

A cheia de 2009 na Amazônia Brasileira

Roseilson do Vale¹, Naziano Filizola², Rodrigo Souza¹ & Jochen Schongart³

Resumo O ano de 2009 se mostrou atípico do ponto de vista hidrológico em relação ao período e intensidade de cheia climatológica de alguns dos principais rios da Bacia Amazônica. Dentro desse contexto, busca-se, no presente estudo, entender como uma resposta heterogênea dos rios está relacionada com uma anomalia de precipitação de grande escala. Este trabalho apresenta uma análise da cheia de 2009 na Amazônia Brasileira com apoio em dados hidrometeorológicos. Para isso, foram utilizados dados de cota das estações de Tabatinga (Rio Solimões), Fonte Boa (Rio Solimões), Manaus (Rio Negro), Moura (Rio Negro), Borba (Rio Madeira) e Óbidos (Rio Amazonas) e estimativas remotas de radiação de onda longa (ROL) sobre cada um dos sítios citados anteriormente e ainda as estações de Serrinha (Alto Rio Negro) e Porto Velho (Rio Madeira). Os resultados obtidos sugerem que as causas da cheia não ocorreram de forma simultânea na bacia, e sim devido aos efeitos combinados de translação da onda de cheia na bacia, presença de grandes áreas de várzeas e pelas atividades convectivas nos diferentes sítios analisados. Esse efeito combinado produziu uma cheia recorde inicialmente à jusante da bacia amazônica, em Óbidos - PA e, posteriormente, na parte central em Manaus - AM.

Palavras-chave: cheia, cota, ROL.

Abstract *The flood of 2009 in the Brazilian Amazon.* The year of 2009 was atypical concerning hydrology and the period the mean intensity climatic flood of some major rivers of the Amazon Basin. Within this context, we attempt to understand how a heterogeneous response of rivers is related to a large scale precipitation anomaly. This paper presents an analysis of the 2009 flood in Brazilian Amazon. For this, hydrometric data were used to best identify the season at Tabatinga (Rio Solimões), Manaus (Rio Negro), Borba (Rio Madeira) and Óbidos (Amazon) stations and long-wave radiation (LWR) estimated by remote sensing under each analyzed site. The results suggest that the flood causes do not occurred at the same time in the basin, but due to the combined effects of flood-wave translation into the basin and convective activities reaction by rivers in the different analyzed sites. This combined effect produced the highest record flood at the downstream region of the Amazon River as registered in Óbidos, PA (the Óbidos centennial flood).

Keywords: flood, level, OLR.

INTRODUÇÃO O regime anual dos rios da Região Amazônica é bem definido e representam a variabilidade do regime pluviométrico das cabeceiras. Devido sua enorme extensão, a bacia hidrográfica integra fenômenos hidrometeorológicos que se refletem nas variações de níveis d'água (Fisch *et al.* 1998). A variabilidade de descarga dos rios é principalmente explicada pela variabilidade de chuva (Molinier *et al.* 1996). As chuvas que ocorrem na parte montante da bacia são responsáveis pela elevação do nível dos rios locais e, conseqüentemente, pelo deslocamento da onda de cheia na parte central e jusante da bacia (Mertes *et al.* 1995). Tal regime tem uma importância fundamental nos processos ecológicos das áreas alagáveis que acompanham os grandes rios na bacia, conceituado como o pulso de inundação (Junk *et al.* 1989).

O pulso de inundação induz uma distinta sazonalidade no ciclo anual, entre a fase aquática e a terrestre. Assim, o pulso de inundação controla os ciclos

biogeoquímicos, ritmos de crescimentos e ciclos de vida de muitas espécies da biota tais como algas, macrofitas, árvores, peixes e invertebrados nas áreas alagáveis, conhecidos como igapó e várzea (Junk 1997). Porém, durante anos extremos esse regime padrão pode sofrer alterações e causar sérios danos à saúde, transporte de mercadoria e pessoas, abastecimento de energia, fauna e flora da região, a economia e etc.

Eventos extremos ocorrem por todo o globo e cada região apresenta conseqüências peculiares, principalmente relacionadas às condições atmosféricas que mais e mais sofrem alterações pela mudança climática (IPCC 2007). No caso do Brasil, em particular a Bacia Amazônica, eventos extremos estão relacionados principalmente a eventos de El Niño/Lã-Niña, tendo como conseqüências fracas/fortes chuvas, aumento/diminuição nas descargas e níveis dos rios (Richey *et al.* 1989, Marengo, 1992, Marengo & Hasternrath 1993, Marengo *et al.* 1998a, 1998b, 2008, Guyot *et al.* 1997, Uvo &

1 - Núcleo de Meteorologia e Hidrologia, Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas (EST/UEA), Manaus (AM), Brasil. E-mail: roseilsondovale@gmail.com, souzaraf@gmail.com

2 - Laboratório de Potamologia Amazônica, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), Brasil. E-mail: naziano.filizola@gmail.com

3 - Convênio INPA/Max Planck, Instituto Max Planck, Manaus (AM), Brasil. E-mail: j.schoengart@mpic.de

Graham, 1998, Uvo *et al.* 2000, Ronchail *et al.* 2002, 2005, Wang, 2002, Zeng *et al.* 2008). De modo geral, encontra-se na literatura eventos extremos mais relacionados à seca na Região Amazônica. A última seca de grandes proporções que afetou a Amazônia ocorreu em 2005, a qual foi estudada por Marengo *et al.* (2008) e Zeng *et al.* (2008). De acordo com Marengo *et al.* (2008), o evento esteve relacionado com o aquecimento da temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico tropical Norte e não com o evento de El Niño, como ocorre em geral, e que a parte sul e oeste da região Amazônica foi mais afetada pela seca. Zeng *et al.* (2008), afirma que o episódio foi causado pela combinação do El Niño de 2002-2003 e do Oceano Atlântico Norte subtropical. Ocasionalmente, desta maneira, redução de chuvas devida à redução no transporte de umidade do Atlântico para a Amazônia.

De acordo com os boletins climáticos emitidos pelo INPE/CPTEC (2009), as condições atmosféricas desde outubro de 2008 a junho de 2009, favoreceram a produção de chuva intensa sobre grande parte da região Amazônica. Os principais eventos responsáveis pelas chuvas foram a configuração de um evento de La Niña, no final de 2008, no Pacífico Equatorial, e águas anormalmente quentes do oceano Atlântico Sul. O gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM), que se estabeleceu entre o norte e sul do Atlântico Tropical durante (principalmente) os meses de janeiro a maio de 2009, manteve a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) por mais tempo no sul em comparação com sua posição média. Isso causou chuvas acima da normalidade, principalmente nas regiões oeste e leste da bacia, no período de janeiro a abril, e especialmente na porção mais a oeste da bacia nos meses de dezembro a março.

As respostas observadas nos rios, diretamente através dos registros de níveis medidos em algumas estações hidrométricas na região, indicavam inicialmente

tratar-se de uma antecipação do período de cheia em relação ao normalmente esperado. No decorrer do ano, pouco a pouco, o evento mostrou sua magnitude e inúmeras comunidades ribeirinhas e cidades localizadas às margens dos rios amazônicos sofreram com a maior cheia do último século.

São associados a esta análise dados de radiação de onda longa (ROL) estimada a partir de satélite, visando entender a distribuição espacial de chuva na Bacia Amazônica, devido sua boa relação com as chuvas nos trópicos. Devido à grande variabilidade espacial de chuvas na bacia, consequentemente os rios respondem de maneira peculiar a essa variabilidade. A cheia de 2009 apresentou cotas máximas que caracterizaram um evento de forte cheia em boa parte da bacia. De acordo com o balanço feito pelo Governo do Estado do Amazonas, dos 62 municípios, 58 estiveram em estado de emergência devido a forte cheia. Portanto, pretende-se contribuir para responder a pergunta sobre, como se pode analisar uma resposta heterogênea dos rios a um caráter aparentemente homogêneo de uma anomalia de precipitação de grande escala?

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo Para poder gerar uma análise detalhada do impacto do evento climatológico em escala regional seriam necessários dados de muitas estações hidrométricas da Bacia Amazônica. Devido à carência de estações hidrométricas em funcionamento, buscou-se inicialmente um estudo das séries fluviométricas (cotas) em 6 estações distintas (Fig. 1), representativas de regimes hidrológicos com controles distintos (Molinier *et al.* 1993, Filizola *et al.* 2002, Sioli 1975).

A definição dos regimes dos rios amazônicos (Molinier *et al.* 1993) é baseada na descarga, porém devido à boa semelhança entre seus hidrogramas essa

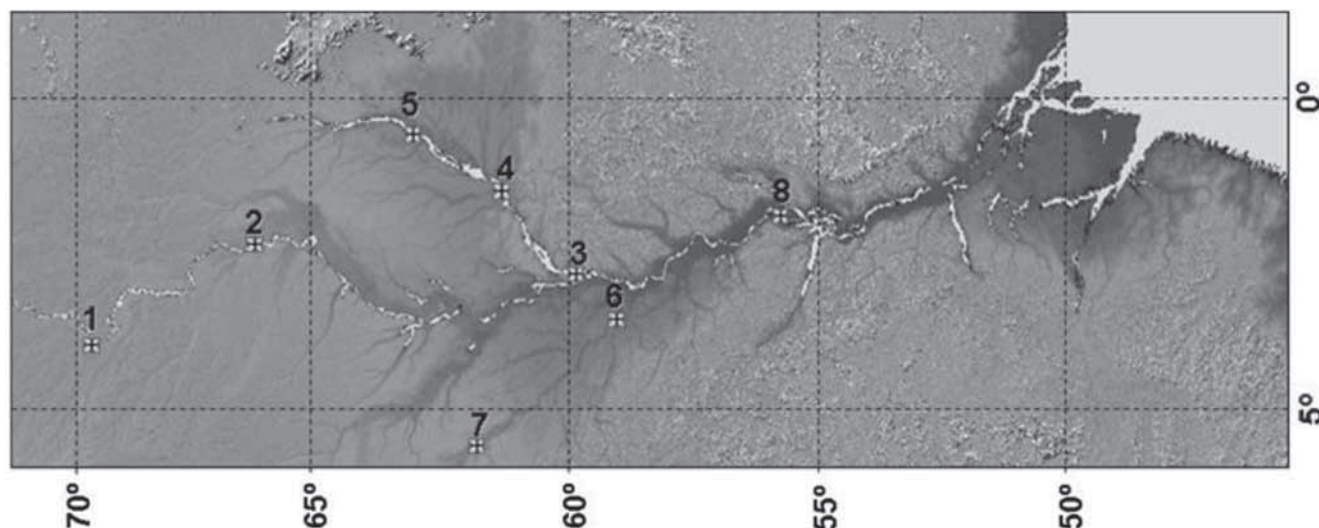


Figura 1 - Posição dos sítios investigados neste estudo, em especial as estações hidrométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) na Bacia Amazônica: Tabatinga (1); Fonte Boa (2); Manaus (3); Moura (4); Serrinha (5); Borba (6); Porto Velho (7) e Óbidos (8).

mesma definição foi aplicada ao regime de cotas. Assim, temos que as estações de Tabatinga e Fonte Boa, localizadas no Rio Solimões, cujo regime é dito como Equatorial com um pico de cheia dominante no primeiro semestre do ano civil (maio e junho, respectivamente). O rio principal neste ponto recebe contribuições basicamente advindas do hemisfério sul, notadamente dos rios Napo (Equador e Peru), Uacayali e Marañon (Peru).

As estações de Manaus e Moura, localizadas no rio Negro, também apresentam um regime dito Equatorial. Manaus apresenta sua cheia no meio do ano civil (junho/julho). Já a estação de Moura, localizada mais a montante de Manaus, apresenta seu pico no início do segundo semestre (julho). As contribuições do Rio Negro estão concentradas em bacias hidrográficas cujas calhas dos rios principais advêm do hemisfério norte.

A estação de Borba no Rio Madeira, por sua vez, está na calha de um rio cujo regime é dito Tropical Austral transicional, por conta da influência do Rio Amazonas, com pico de cheia em meados do primeiro semestre do ano civil (de abril a maio) e recebendo contribuições principalmente do hemisfério sul. Finalmente, no rio Amazonas, a estação de Óbidos, que controla cerca de 80% da água que escoia pela Bacia Amazônica para o Oceano Atlântico, tem regime do tipo Equatorial, porém é dito “alterado” em função das conjunções dos diferentes grandes tributários do curso principal da bacia. Apesar de se encontrar a jusante da foz do Rio Negro, que em Manaus é controlado pelo nível do Rio Solimões (Meade *et al.* 1991), tem o pico de cheia antecipado em relação ao do Rio Solimões naquelas proximidades. Tal fato se verifica pelas fortes contribuições líquidas do Rio Madeira, cujo pico de cheia como acima referido se posiciona em meados do primeiro semestre do ano civil (Molinier *et al.* 1993, Sioli 1975).

Dados Neste estudo utilizaram-se dados de cota fluviométrica média diária obtidos junto à ANA (<http://www.ana.gov.br>), SNPH (<http://www.snph.am.gov.br>) e a Rede ORE/HYBAM (<http://www.ore-hybam.org>), previamente validados pela equipe da Rede Estadual de Meteorologia

e Hidrologia do Amazonas (<http://remethi.org>). Dados semanais de radiação de onda longa foram inferidos pelo sensor AIRS - *Atmospheric Infrared Sounder* do satélite ambiental AQUA (<http://www.jpl.nasa.gov>). Devido à órbita polar do satélite AQUA, os dados de ROL não possuem informações diárias para o mesmo ponto e sim semanal. Assim sendo, os dados correspondem a uma média da ROL de 8 dias. A fonte e o período de dados de cota e ROL se encontram na tabela 1.

Para o período de 6 de dezembro de 2008 a 2 de julho de 2009, a quantidade de radiação (infravermelha) emitida para o espaço pelo sistema terra-atmosfera, também conhecida como radiação de onda longa, está diretamente relacionada com a precipitação, já que para a região tropical as maiores variações de ROL resultam em mudanças na quantidade e na altura das nuvens. Na região tropical a maior parte da precipitação está associada à convecção profunda (Xie & Arkin 1998).

Regiões de intensa e frequente convecção e precipitação, associadas às monções e à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) aparecem como regiões de baixa ROL (Chelliah & Arkin 1992). Para as regiões tropicais, baixos valores de radiação de onda longa (ROL), registrados por satélites ambientais no topo da atmosfera terrestre, são utilizados para caracterizar regiões de convecção profunda, enquanto que em médias latitudes, similares valores de ROL podem representar nuvens do tipo Stratus (Dutton *et al.* 2000). A convecção tropical geralmente corresponde a regiões de ROL abaixo de 240 W/m² (Lau *et al.* 1997).

Processamento dos Dados Os dados obtidos foram processados em planilha eletrônica de cálculo de forma a gerar uma série histórica de cotas médias diárias a partir de 03/10/2008 até o dia 26/07/2009, para cada uma das estações estudadas. Estas séries foram comparadas com as séries estatísticas diárias médias, máximas e mínimas históricas. A partir das séries diárias foram obtidos os gradientes de variação diária da cota. Os valores dos gradientes foram filtrados estatisticamente

Tabela 1 - Estações hidrométricas com suas respectivas informações sobre latitude, longitude, período, cota média (H_{med}), cota máxima (H_{max}), cota mínima (H_{min}) e amplitude máxima.

Estação	Lat.	Long.	Período	H med.	H máx.	H min.	Amplitude
Tabatinga	-04 15 00	-69 56 00	1982-2009	804	1382	14	1368
Fonte Boa	-02 32 00	-66 01 00	1977-2009	1728	2224	890	1334
Serrinha*	00 28 54	-64 49 38	1967-2009	957	1108	804	304
Manaus	-03 08 12	-60 01 37	1902-2009	2335	2969	1364	1605
Moura	-01 27 24	-61 38 05	1979-2009	918	1544	268	1276
Porto Velho*	-08 44 12	-63 55 13	1967-2009	944	1750	163	1587
Borba	-04 23 18	-59 35 50	1967-2009	1615	2222	798	1424
Óbidos	-01 55 09	-55 30 47	1968-2009	472	810	-43	853

As cotas são dadas em cm. * As estações de Serrinha e Porto Velho foram utilizadas apenas para a obtenção de ROL (W/m²).

utilizando-se média móvel de 8 dias e assim foi gerada uma série de gradiente médio da variação de cota a cada 8 dias, aqui denominado $DH/DT_{(8)}$. Este intervalo, de pouco mais de uma semana, foi adotado para que se pudesse retirar o ruído diário, priorizando os sinais mais facilmente correlacionáveis com o tempo de translação da onda de cheia entre as estações, bem como para que se ficasse compatível com os dados semanais disponíveis de ROL, aqui denominada de $ROL_{(8)}$. A análise de Radiação de Onda Longa é referente à anomalia de 2009 em relação à série histórica dos dados gerados pelo Satélite AQUA, em torno de 6 anos. Para a análise de anomalia de $ROL_{(8)}$ foram utilizadas mais duas estações (Serrinha e Porto Velho) localizadas mais a norte e sul da bacia, com a finalidade de se verificar indícios de chuvas na parte montante desses rios (Rio Negro e Madeira), o que influencia no nível e descarga na calha principal. Vale ressaltar que estes dados de radiação de onda longa, oriundas do sensor AIRS, correspondem a observações sobre a região mais próxima de cada um dos sítios analisados, sendo representativo de uma área correspondente a $1^\circ \times 1^\circ$.

Uma vez geradas as séries de dados de $DH/DT_{(8)}$ e de anomalias de $ROL_{(8)}$, para o mesmo período, as mesmas foram analisadas separadamente para cada sítio de estudo. Em seguida os possíveis efeitos entre os dados de $ROL_{(8)}$ e de $DH/DT_{(8)}$ foram avaliados com o intuito de inferir possíveis relações entre convecção profunda associada à precipitação mais intensa e seu reflexo no gradiente da cota. Ademais, entre alguns sítios também se buscou observar sinais de translação da onda de cheia ocasionada por forte anomalia de precipitação sobre a região Amazônica, especialmente no período de janeiro a julho de 2009, quando o evento atingiu seu ápice em Manaus.

RESULTADOS

Os Cotagramas Para o período de tempo analisado, os níveis das estações estudadas variaram como indicado na figura 2. Da análise desta figura, percebe-se uma abrupta ascensão do nível do Rio Solimões em Tabatinga, cobrindo quase toda a variabilidade histórica diária para o período. O nível do rio, que iniciou o ano bem abaixo da média histórica diária, cerca de 30 dias depois estava muito próximo da máxima histórica diária. Neste período, em cerca de 4 semanas o nível do Rio Solimões subiu pouco mais de 4,5 m, quase alcançando a curva de máxima histórica diária. Deste período em diante, os níveis em Tabatinga subiram um pouco mais (cerca de 1 m) e permaneceram sempre altos, porém não ultrapassando os valores máximos históricos diários (aproximadamente 30 cm abaixo), chegando a tangenciar a curva de máxima na primeira semana de abril.

A estação de Fonte Boa, a jusante de Tabatinga, apresentou um comportamento um tanto similar ao de Tabatinga. A cota do rio começou o ano declinando e abaixo da média. A partir de 09/01 começou uma subida rápida e íngreme, depois tendendo à estabilidade. Em 15/02 sua cota alcança praticamente o valor da máxima

histórica do dia, tangenciando a curva máxima por 29 dias. A partir do dia 08/03 a cota atingida supera a máxima histórica, permanecendo por quase 3 meses. A estação de Fonte Boa atingiu sua cota máxima de 2.197 cm em 10/06 com uma antecedência de aproximadamente 10 dias, não superando a cota máxima histórica.

No mesmo período, em Manaus, os níveis do Rio Negro iniciaram o ano com 70% da margem de variabilidade entre a média e máxima histórica diária registrada para o período, o que corresponde a uma anomalia positiva de aproximadamente 10% em relação à média histórica diária para o período. Os valores chegaram a corresponder ao máximo histórico diário a partir do dia 30/01, tendo ultrapassado esta curva em 02/02. Neste período, do primeiro mês do ano, o nível do Rio Negro variou pouco mais de 2 m. No dia 11/05 o nível atingido foi o mesmo para a máxima histórica e, a partir desse dia, a curva declina apresentando uma diferença máxima de -49 cm em 04/06. A partir do dia 20/06 a cota de 2009 passa novamente a máxima histórica, atingindo um valor de 2.977 cm em 01/07, superando a maior cheia até então registrada de 1953 (2.969 cm).

A estação de Moura iniciou o ano de 2009 com valores acima da máxima histórica em 53 cm. A cota em 2009 permaneceu cerca de 52 dias acima da máxima histórica, declinando em seguida por 19 dias e voltando a superar por mais dois meses. A partir de então permaneceu abaixo da máxima histórica. Até a última data deste estudo sua cota estava aumentando com gradiente de 1 a 2 cm por dia. Em geral, sua cota máxima ocorre na primeira semana de julho. Embora não tenha superada a marca histórica, a cheia em Moura apresentou valores de até 130 cm acima do máximo histórico para o início do ano.

Na região de Borba no Rio Madeira, os níveis iniciaram o ano ligeiramente abaixo da normal para o período, ultrapassando a máxima histórica no dia 06/05 em 3 cm. As cotas oscilaram novamente para menos do que a histórica em 16/05 (4 cm) e retornando, a partir do dia 21/05, com valores acima até a data final do estudo. A cota máxima atingida na estação de Borba foi de 2.214 cm em 10/05, com 6 cm acima da máxima observada para esta data. A cota máxima histórica registrada em Borba é de 2.222 cm em 23/04. A partir do final de abril, percebe-se que a curva de 2009 é praticamente sobreposta a de máximo histórico, apresentando variações de 21 cm abaixo e 19 cm acima. Embora tenha atingido valores de cota muito altos, a estação de Borba não superou sua marca histórica e apresentou seu valor máximo de cota, para 2009, atrasado em, aproximadamente, 14 dias em relação à média histórica observada.

Finalmente, na estação de Óbidos, as cotas do Rio Amazonas iniciaram o ano com valores entre a máxima e média histórica. A partir do dia 16/02 as cotas de 2009 superaram os valores máximos observados, permanecendo assim até o final do evento. A cota máxima atingida em Óbidos foi de 860 cm em 31/05, superando em aproximadamente 50 cm as duas maiores registradas em 1953 e 2006. No entanto, a maior amplitude ocorreu no dia 01/05, com 75 cm acima do valor

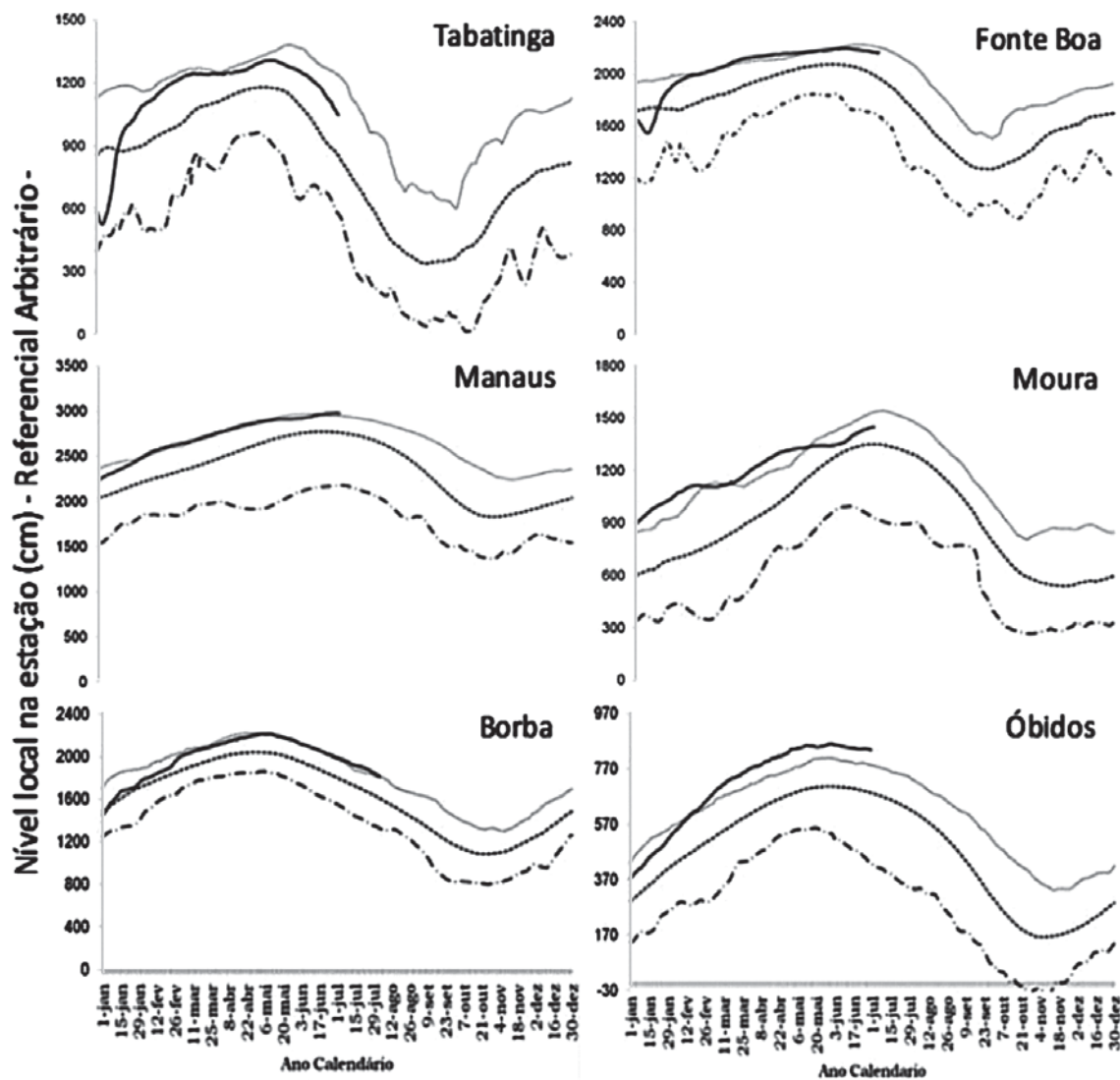


Figura 2 - Cotograma das estações hidrométricas da ANA para o ano de 2009 (linha contínua preta) em relação aos valores médios (linha pontilhada), máximos (linha contínua cinza) e mínimos (linha traço-ponto-traço) históricos diários.

máximo observado. Embora alguns rios a montante de Óbidos tenham sofrido alterações de antecipar ou retardar sua cheia, em Óbidos a cheia aconteceu dentro do período previsto.

As Anomalias de $DH/DT_{(8)}$ A análise das cotas diretas só permite o estudo de cada estação individualmente, pelo fato de o referencial de nível ser arbitrário e independente para cada estação. Ou seja, os referenciais de níveis (RRNN) de cada posto estão localizados na margem do respectivo curso d'água. No entanto, não estão relacionados ao nível do mar um referencial absoluto. Assim, para uma análise comparativa entre os níveis das diferentes estações hidrométricas, se pode fazer uso do gradiente de variabilidade das cotas (Fig. 3). O procedimento adotado aqui leva em consideração a variabilidade média histórica para 8 dias, tida como normal para cada período, à qual são comparados os dados de 2009.

Em Tabatinga, é possível se observar um comportamento no mês de dezembro de 2008 abaixo da normal, assim permanecendo até a primeira quinzena de 2009. Neste período $DH/DT_{(8)}$ variou desde +3 cm até -12 cm, enquanto o esperado para o período seria uma variação de +1 cm até +5 cm. Ou seja, observou-se uma inversão praticamente total em relação ao padrão esperado. Já a partir da primeira quinzena de janeiro o sinal $DH/DT_{(8)}$ elevou-se de -6 cm para +34 cm, quando o esperado para o período seria uma variação de +5 cm para -1 cm. Na sequência, depois do máximo $DH/DT_{(8)}$ alcançado de +34 cm, observou-se uma redução gradual até a primeira semana de abril, depois com um leve aumento de +1 a +3 cm da segunda semana para a terceira e permanecendo em +3 cm até a última semana de abril. A partir da última semana de abril o $DH/DT_{(8)}$ declinou, atingindo seu mínimo de -9 cm na última semana de junho. O gráfico de Tabatinga mostra uma forte variabilidade de janeiro ao final

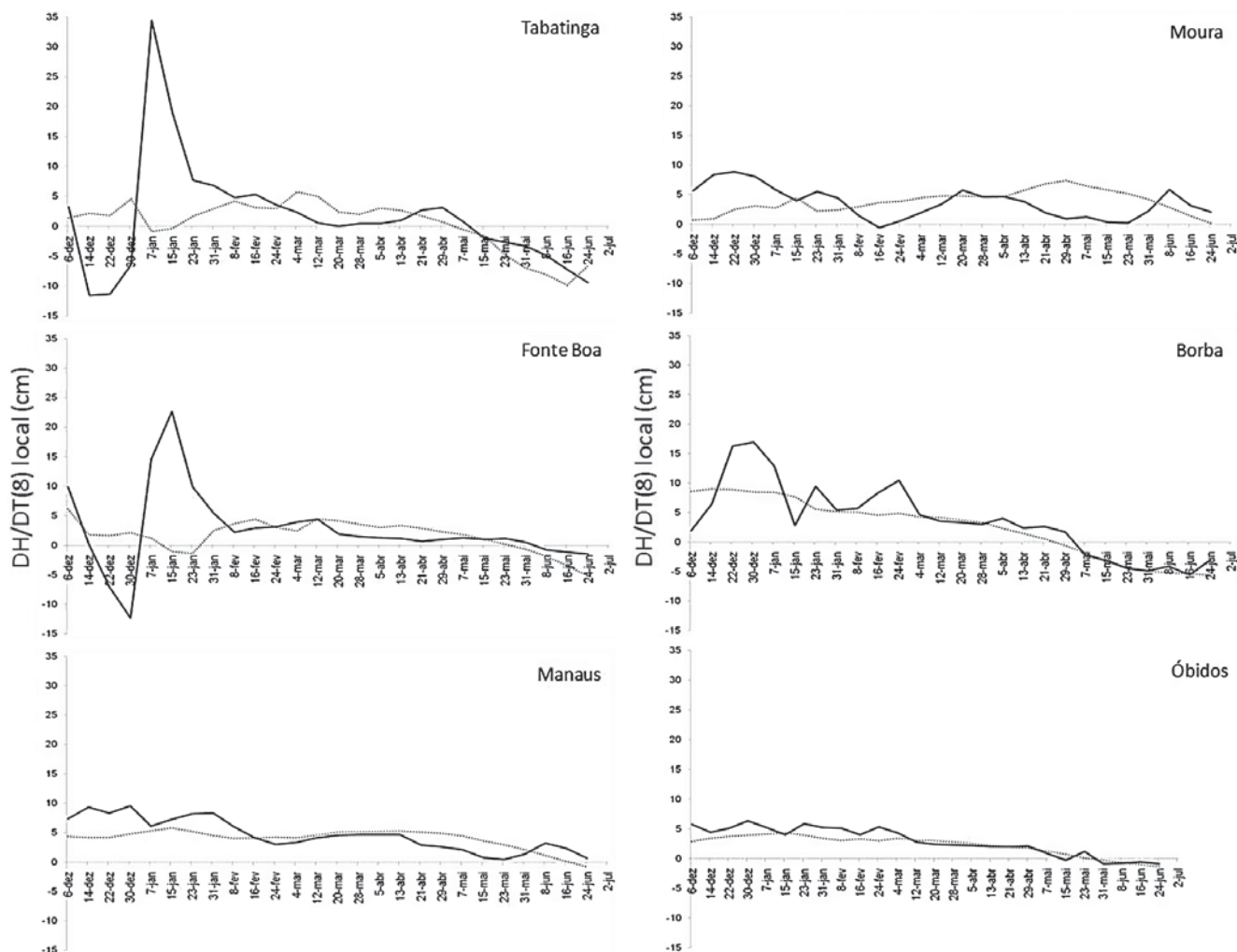


Figura 3 - Dados de cota médios para 8 dias observados em 2009 (linha contínua) e dados de cota médios para 8 dias obtidos a partir das médias históricas diárias (linha pontilhada) geradas a partir das séries históricas da ANA e SNPH.

de fevereiro, permanecendo acima dos valores médios históricos observados.

A estação de Fonte Boa apresentou, no final de 2008, valores negativos de $DH/DT_{(8)}$, variando de +10 cm a -12 cm até a última semana de dezembro de 2008, quando o esperado para o mesmo período seria de +6 cm a +2 cm. A partir de então, o $DH/DT_{(8)}$ sofreu forte variação atingindo seu máximo de +23 cm na primeira semana de janeiro, enquanto o valor médio observado para essa semana seria de -1 cm. Depois desta semana a variabilidade passou a declinar até a primeira semana de fevereiro (+2 cm), sofrendo um leve aumento no $DH/DT_{(8)}$ de +2 cm a +4 cm até a segunda semana de março. E a partir de então, declinando até o final de junho, atingindo um mínimo de -2 cm, enquanto esperado seria de -5 cm. O $DH/DT_{(8)}$ em Fonte Boa apresenta uma forte variabilidade no mês de janeiro, porém mais tênue e de menor duração do que em Tabatinga.

Na estação de Manaus, no período de dezembro de 2008, houve pouca variação (+7 cm a +10 cm) em relação ao gradiente normal para o período (+4cm a +5cm). Para o mês de janeiro o $DH/DT_{(8)}$ oscilou de +6

cm a +8 cm, com pouca variação em relação à média histórica observada (+5 cm a +6 cm). Esse sinal de oscilação, com pequenas variações em relação ao observado, se estendeu até o final de junho. Até por volta da segunda semana de fevereiro, o $DH/DT_{(8)}$ se manteve acima da média observada e, a partir de então, abaixo e voltando a se manter acima no final de junho, com variações de no máximo ± 3 cm em relação à média observada.

Em Moura, o mês de dezembro de 2008 também foi de $DH/DT_{(8)}$ positivos, apresentando valor máximo de +9 cm na terceira semana contra +2 cm do esperado. O mês de janeiro continuou a apresentar valores positivos de $DH/DT_{(8)}$ (+6 cm a +4 cm) e passando a valores negativos em fevereiro de -1 cm a +1 cm, quando o esperado era de +3 cm a +4 cm. A partir da segunda semana de fevereiro o $DH/DT_{(8)}$ oscilou, atingindo um máximo de +6 cm em meados de março e declinando a um mínimo de 0 cm na terceira semana de maio e retornando a +6 cm na primeira semana de julho. Desde o final do mês de janeiro o $DH/DT_{(8)}$ esteve abaixo da média observada, passando a superá-la na primeira semana de junho.

O caso de Borba, o Rio Madeira mostrou comportamento bem diferenciado em relação a Manaus. O valor de $DH/DT_{(8)}$, em meados de dezembro de 2008, encontrava-se abaixo (+7 cm) da normal para o período (+9 cm). No entanto, no período entre o final de 2008 houve uma ascensão no sinal do gradiente, elevando de uma variação média semanal de +7 cm para +17 cm, quando o esperado seria de +9 cm a +8 cm. O mês de janeiro apresentou máximos (+13 cm; +9 cm) e mínimos (+3 cm; +5 cm) oscilando em torno da média histórica observada. O mês de fevereiro apresentou $DH/DT_{(8)}$ acima da média observada, atingindo seu máximo de +10 cm na terceira semana. Para o mês de março, o comportamento foi muito similar à média observada, apresentando diferenças de apenas 1 cm entre o $DH/DT_{(8)}$ de 2009 e a média observada. Este mesmo comportamento se repetiu no mês de maio. De modo geral, o $DH/DT_{(8)}$ da estação de Borba esteve acima da média observada durante o período de estudo.

Finalmente, na estação de Óbidos, o sinal de $DH/DT_{(8)}$ desde o final de 2008 até final de junho apresentou valores em torno da média histórica observada, apresentando também, diferenças entre os dois gradientes de +3 cm a -1 cm. No entanto, os valores de maior $DH/DT_{(8)}$ ocorreram para o período de dezembro de 2008 até a segunda semana de março. O mês de abril apresentou, praticamente, os mesmos valores de $DH/DT_{(8)}$ médio histórico observado e de 2009, com apenas uma diferença de 1 cm na primeira semana de abril.

Radiação de Onda Longa (ROL) A figura 4 apresenta os valores de anomalia de ROL médios de 8 dias inferidas pelo satélite ambiental AQUA para Tabatinga-Fonte Boa, Serrinha-Moura, Manaus-Óbidos e Porto Velho-Borba. De modo geral, observou-se que as estações apresentaram valores de ROL abaixo de 240 W/m^2 , o que é forte indicador de nuvens convectivas e apresenta uma boa relação com chuvas nos trópicos (Lau *et al.* 1997). No entanto, a região amazônica apresenta boa parte de suas chuvas de origem de nuvens convectivas, o que, para o período estudado, é ainda mais comum. Por isso, análise de anomalia de ROL para os sítios estudados revela o quanto esteve abaixo da média esses valores. A figura 4 revela que a estação de Fonte Boa, localizada na parte montante da bacia, apresentou três picos de mínimos, anomalias que variaram por volta de -50 W/m^2 a -60 W/m^2 para o período do final de 2008, meados de janeiro e final de junho e início de julho de 2009. A estação de Tabatinga, localizada na fronteira entre Brasil e Colômbia, apresentou anomalias em torno de -15 W/m^2 .

As estações mais a norte da bacia amazônica, Serrinha e Moura, apresentaram um comportamento muito similar para o período estudado. A figura 4 revela que estas estações apresentaram valores significativos de anomalias de ROL desde o novembro de 2008 a março de 2009, com um pico significativo entre o fim de junho até a segunda semana de julho de 2009.

Na parte centro-leste da bacia amazônica, as estações de Manaus e Óbidos, apresentaram um padrão

semelhante de nebulosidade com valores mínimos oscilando entre -20 e -40 W/m^2 , destacando uma anomalia mínima de -70 W/m^2 para Manaus no final de junho de 2009. Por fim, na parte sul, as estações de Borba e Porto Velho, apresentaram uma distribuição negativa de anomalia em boa parte do período estudado, com mínimos de -70 W/m^2 no final de 2008 e de -90 W/m^2 entre final de maio e início de junho de 2009, para Porto Velho e Borba, respectivamente.

DISCUSSÃO Tomando-se os resultados obtidos e levando-se em consideração os baixos valores de anomalias de ROL, é possível verificar a ocorrência de convecção em quase todo o período estudado. No entanto, tomando-se os valores mínimos de anomalias de ROL como indícios mais fortes de convecção profunda, e associando-os à precipitação intensa, é possível considerar que os picos de cota em alguns momentos do período estudado exibem forte relação com os valores mais baixos de ROL defasados no tempo. Além disso, é possível considerar a defasagem entre o início do período de decaimento dos valores de anomalias de ROL com a intensificação dos valores de $DH/DT_{(8)}$.

De acordo com as análises pode-se perceber que em Fonte Boa o grande pulso no cotograma ocorrido durante o mês de janeiro, pode ser associado tanto com valores baixos de anomalias de ROL, em Fonte Boa, no final de 2008, como no final de dezembro de 2008, em Tabatinga. O mapa de precipitação acumulada também corrobora com anomalias positivas de precipitação, principalmente, no mês de janeiro na parte oeste da bacia amazônica. Um comportamento parecido do $DH/DT_{(8)}$ de Tabatinga surge em Fonte Boa, com um máximo, no final de janeiro, relacionado com anomalias mais baixas de ROL, no final de dezembro de 2008, na mesma estação.

Na parte mais central da bacia, em Manaus, o $DH/DT_{(8)}$ sofreu dois máximos em dezembro e um em janeiro. Analisando o $DH/DT_{(8)}$ em relação à anomalia de ROL, podemos perceber que Manaus apresenta um decaimento desde outubro de 2008 atingindo seu mínimo no final de junho de 2009. De modo geral, os gráficos de precipitação acumulada e ROL indicam chuva à montante de Manaus, oeste e norte, em boa parte do fim de 2008 e início de 2009.

Em Moura, a distribuição de anomalia de ROL acompanha praticamente o mesmo padrão de Serrinha. Embora o seu nível máximo de cota ocorra por volta da primeira semana de julho, seus valores mínimos de ROL surgem desde o fim de 2008 e atingem seu mínimo no final de junho e início de julho de 2009. A abrupta subida dos níveis em Tabatinga e Fonte Boa deve estar, possivelmente, relacionada a fortes chuvas na parte peruana e colombiana da bacia.

A distribuição anômala das chuvas à montante da bacia foi responsável pela cheia antecipada nessa parte da bacia. Embora a cheia sendo antecipada à montante, em Manaus o pico máximo de cheia foi atrasado em 2 semanas, aproximadamente. Esse fato ocorreu devido

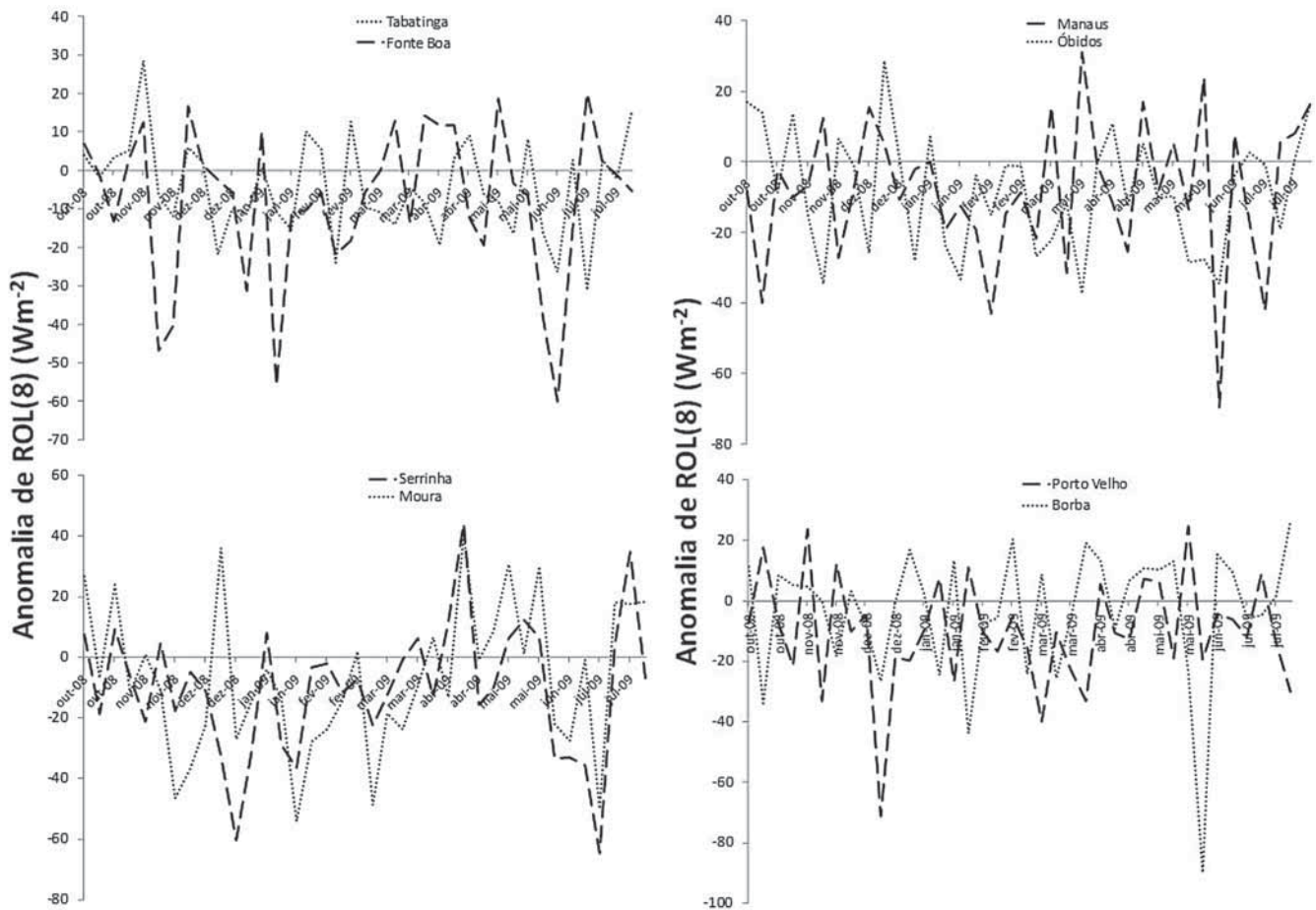


Figura 4 - Dados de Anomalias de ROL médios dados a cada 8 dias estimados para uma região de $1^\circ \times 1^\circ$ sobre as localidades estudadas, para o período de 03/10/2008 a 26/07/2009.

às fortes cheias de outros tributários (não apresentados), localizados principalmente à margem direita da calha principal (Juruá, Javari e Jutai), e às águas no segundo semestre vindas da parte norte da bacia.

O Rio Madeira, apresentou em 2009 um comportamento dentro do padrão em Porto Velho e uma forte cheia em Borba, porém não superando as marcas históricas. Em Borba, a cheia atingiu seu máximo no mês de maio, apresentando seus valores mínimos de anomalias de ROL entre maio e junho de 2009, indicando forte atividade convectiva e possivelmente relacionada com chuvas intensas sobre a região. A ocorrência destes picos deve estar relacionada com chuvas, o que contribuiu para manter os níveis acima da média desde o início do ano. A precipitação acumulada para o mês de junho corrobora com os dados de ROL para o mesmo mês, contribuindo para que o nível nesses meses se igualasse aos máximos observados, chegando até mesmo a superá-los no mês de julho.

Finalmente em Óbidos, os baixos valores de anomalias de ROL, praticamente, ao longo de todo o período estudado, contribuíram para o crescimento contínuo dos níveis nesta estação. O pulso no gradiente, na terceira semana de maio, em Óbidos, pode ser associado ao pulso no gradiente de Borba, ocorrido na última semana de abril. Aliás, os pulsos de $DH/DT_{(8)}$ em Borba

podem ser reconhecidos em Óbidos, indicando que a cota neste período do ano na região sofre influência significativa dos níveis atingidos pelo Rio Madeira.

Assim, tudo indica que a grande quantidade de água, vinda da calha principal, junto com os altos níveis atingidos em Borba foram responsáveis pela cheia recorde em Óbidos. Em Manaus, por sua vez, fortes anomalias no $DH/DT_{(8)}$ em Tabatinga, e possíveis chuvas na parte peruana e colombiana da bacia junto com os altos níveis nos tributários da margem direita da calha principal, contribuíram para elevar os níveis. No entanto, em função do efeito de amortecimento dado pela translação da onda, numa distância longitudinal quase duas vezes maior devido à presença de imensas áreas de várzeas e à baixa declividade da bacia (Mertes *et al.* 1995), fez com que do $DH/DT_{(8)}$ não seja claro ao longo da calha Solimões-Amazonas (Tabatinga-Óbidos).

CONCLUSÕES Através da análise dos dados de cota e anomalias de ROL das estações, o que se pode dizer a respeito do evento atípico de cheia que incidiu sobre a Região Amazônica Brasileira no ano de 2009 é que:

- de modo geral, se tratou de uma cheia entre a média e a máxima histórica em boa parte da Bacia Amazônica;

- a subida rápida das águas em Tabatinga aparenta forte relação com fortes chuvas na parte peruana e colombiana da bacia;

- as grandes áreas de várzeas ao longo da calha do Rio Solimões e a baixa declividade à jusante da bacia são responsáveis pela atenuação da onda de cheia. Apesar de se ter registrado um evento recorde em Manaus, o nível máximo ficou apenas alguns centímetros acima do valor recorde anterior;

- a distribuição espacial do evento pode ser

considerada heterogênea, bem como os seus efeitos nos rios, mas apresentam relações entre si com algum tempo de defasagem;

- o evento forte e atrasado de cheia em Borba, coincidindo com a onda de cheia do rio principal, parece ter sido o principal responsável por uma cheia recorde em Óbidos no Rio Amazonas, com algumas dezenas de centímetros acima do recorde anterior. Nesta localidade, relativamente, o evento foi bem mais forte do que o registrado em Manaus.

Referências

- Chelliah M. & Arkin P. 1992. Large-scale Interannual Variability of Monthly Outgoing Longwave Radiation Anomalies Over the Global Tropics. *Journal of Climate*, **5**:371-389.
- Dutton J.F., Cris J.P. & Jenni L.E. 2000. The Effect of Global Climate Change on the Regions of Tropical Convection in CSM1. *Geophys. Res. Lett.*, **27**(19):3049-3052.
- Filizola N.P., Guyot J.L., Guimarães V.S., Molinier M., Oliveira E. de, Freitas M.A.V. 2002. Caracterização Hidrológica da Bacia Amazônica. In: Rivas A. & Freitas C.E.C. (orgs.) *Amazônia - uma perspectiva interdisciplinar*. Manaus, Ed. EDUA, p. 33-54.
- Fisch G., Marengo J.A., Nobre C.A. 1998. Uma Revisão Geral Sobre o Clima da Amazônia. *Acta Amazônica*, **28**(2):101-126.
- Guyot J.L., Calde J., Molinier M., Guimarães W., de Oliveira E. 1997. La Variabilité Hydrologique Actuelle dans Le Bassin de L'Amazonie. In: Seminário Internacional Conseqüências Climáticas e Hidrológicas Del Evento El Niño a Escala Regional y Local, *Memórias Técnicas*, p. 285-293.
- IPCC. 2007. Core Writing Team, Pachauri R.K., Reisinger A. (eds.) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva, IPCC, 104 p.
- INPE/CPTEC. 2009. *Boletins climáticos*. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acessado em: 01/07/2009.
- Junk W.J. 1997. The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System. Berlin, Springer, 548 p.
- Junk W.J., Bayley P.B., Sparks R.E. 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. *Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences*, **106**:110-127.
- Lau K.M., Wu H.T., Bony S. 1997. The Role of Large-Scale Atmospheric Circulation in the Relationship Between Tropical Convection and Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, **10**:318-392.
- Marengo J. 1992. Interannual Variability of Surface Climate in the Amazon Basin, *Int. J. Climatol.*, **12**:853-863.
- Marengo J.A. & Hastenrath S. 1993. Case Studies of Extreme Climatic Events in the Amazon Basin. *Journal of Climate*, **6**(4):617-627.
- Marengo J.A., Nobre C.A., Sampaio G. 1998a. On the Associations Between Hydrometeorological Conditions in Amazônia and the Extremes of the Southern Oscillation. *Bull. Inst. fr. études andines*, **27**(13)789-802.
- Marengo J.A., Nobre C.A., Tomasella J., Cardoso M.F., Oyama M.D. 2008. Hydro-Climatic and Ecological Behaviour of the Drought of Amazonia in 2005. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, **363**:1773-1778.
- Marengo J.J., Tomasella J., Uvo C. 1998b. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru, *J. Geophys. Res.*, **103**(D2):1775-1783.
- Meade R.H., Rayol J.M., Conceição S.C., Natividade J.R.G. 1991. Backwater Effects in the Amazon River Basin of Brazil. *Environ. Geol. Water Sci.*, **18**(2):105-114.
- Mertes L.A.K., Daniel D.L., Melack J.M., Nelson B., Martinelli L.A., Forsberg B.R. 1995. Spatial Patterns Hydrology, Geomorphology, and Vegetation on the Floodplain of the Amazon River in Brazil from a Remote Sensing Perspective. *Geomorphology*, **13**:215-232.
- Molinier M., Guyot J.L., de Oliveira E., Guimarães W. 1996. Les Régimes Hydrologiques de L'Amazonie et de ses Affluents. In: Chevalier P. & Pouyaud B. (eds.) *Hydrologie Tropicale: Géoscience et Outil Pour Le Développement (Tropical Hydrology: a Geoscience and a Tool for Sustainability)*. Wallingford, IAHS, p. 209-222.
- Molinier M., Guyot J.L., de Oliveira E., Guimarães V., Chaves A. 1993. Hydrologie Du Bassin de L'Amazonie. In: Olivry J.C. & Boulègue J. (eds.) *Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques: Congo, Niger, Amazonie*. Paris, ORSTOM, p. 335-344.
- Richey J., Nobre C., Deser C. 1989. Amazon River Discharge and Climate Variability: 1903 to 1985. *Science*, **246**:101-103.
- Ronchail J., Cochonneau G., Molinier M., Guyot J.L., Chaves A.G.M., Guimarães V.O.E. 2002. Interannual Rainfall Variability in the Amazon Basin and Sea-Surface Temperatures in the Equatorial Pacific and the Tropical Atlantic Oceans. *International Journal of Climatology*, **22**:1663-1686.
- Ronchail J., Labat D., Calde J., Cochonneau G., Guyot J.L., Filizola N., de Oliveira E. 2005. Discharge Variability with in the Amazon Basin. In: Franks S., Wagener T., Bogh E., Gupta H.V., Bastidas L., Nobre C., Galvão C.O. (eds.) *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change: Hydroclimatic variability*. Wallingford, IAHS, p. 21-29.
- Sioli H. 1975. Amazon Tributaries and Drainage Basins. In: Hasler A.D. (ed.) *Conpling of Land and Water System*. Berlin, Springer-Verlag, p. 199-213.

- Uvo C.B., Töle U., Berndtsson R. 2000. Forecasting Discharge in Amazon Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Climatology*, **20**:1495-1507.
- Uvo C.B. & Graham N. 1998. Seasonal Runoff Forecast for Northern South America: A Statistical Model. *Water Resource Research*, **34**:3515-3524.
- Wang C. 2002. Atlantic Climate Variability and Its Associated Atmospheric Circulations Cells. *Journal of Climate*, **15**:399-419.
- Xie P. & Arkin A. 1998. Global Monthly Precipitation Estimates from Satellite-Observed Outgoing Longwave Radiation. *J. Climate*, **11**:137-164.
- Zeng N., Yoon J.H., Marengo J.A., Subramaniam A., Nobre C.A., Mariotti A., Neelin J.D. 2008. Causes and Impacts of the 2005 Amazon Drought. *Environmental Research Letters*, **3**(014002):1-10 [doi:10.1088/1748-9326/3/1/014002].

Manuscrito ID 17884

Submetido em 30 de junho de 2010

Aceito em 21 de dezembro de 2011