



## REANALISE HIDROLOGICA MULTI-DECADAL: EVENTOS EXTREMOS NA BACIA AMAZONICA

*Sly Wongchuig Correa<sup>1\*</sup>; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>1</sup>, Jhan Carlo Espinoza<sup>2</sup>, Walter Collischonn<sup>1</sup>*

### RESUMO

Nos últimos anos metodologias como as reanálises climáticas tem sido desenvolvidas com a finalidade de gerar um registro coerente dos sistemas climáticos. Adotando essa ideia, este trabalho propõe sua analogia chamada Retrospectiva Hidrológica (RH), sendo principalmente a simulação de series extensas de precipitação através de um modelo hidrológico com a finalidade de desenvolver um registro dos campos espaço-temporais hidrológicos em uma determinada região, permitindo analisar eventos como cheias e secas passadas. A presente metodologia foi testada na bacia Amazônica onde recentes estudos tem reportado um incremento na frequência e na intensidade dos eventos extremos nas últimas décadas. Desta maneira foram usados oito bases de dados com mais de 30 anos de series de precipitação como input do modelo hidrológico (MGB-IPH). As saídas do modelo denominadas de RH foram validadas com series de vazão observada através de diferentes métricas estatísticas; também foi avaliada a performance para detectar eventos extremos. Resultados indicam que somente algumas destas bases de dados são capazes de obter uma adequada representação do ciclo hidrológico assim como dos eventos extremos. Adicionalmente foi detectado um incremento na tendência dos eventos extremos como relatado em outros estudos. Considerando isto, seria possível usar esta metodologia em regiões com escassez de dados.

Palavras chave: Retrospectiva Hidrológica, Eventos extremos, Bacia Amazônica

## MULTI-DECADAL HYDROLOGICAL RETROSPECTIVE: EXTREME EVENTS ON THE AMAZON BASIN

### ABSTRACT

Methodologies such as climatic reanalysis are being developed in order to create a coherent record of climate systems. This research proposes a similar methodology called Hydrological Retrospective (HR), which mainly simulates large precipitation datasets into hydrological models to create a record of the hydrology variables, making it possible to analyse past extreme events. We applied this methodology on the Amazon basin, where extreme events were reported in recent decades. We used eight precipitation datasets as input for a large scale hydrological and hydrodynamic model (MGB-IPH). HR were validated against in-situ discharge gauges, focusing on maximum and minimum events. Also a forecast skill to detect floods and droughts was performed. A statistical temporal series trend was performed for intensity of seasonal floods and droughts in the entire Amazon Basin. Results indicate that HR could represent most past extreme events well compared with in-situ observed data, and was consistent with many events reported in literature. A significant upward trend in intensity of floods was seen in western and north-western regions and for droughts in south and central-south regions of the Amazon basin. This methodology can be transferred to other regions for better estimation of future hydrological behaviour and its impact on society.

Keywords: Hydrologic Retrospective, Extreme events, Amazon basin.

[1] {IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, C.P. 15029, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil} \*xinox010@gmail.com

[2] {Instituto Geofísico del Perú, Lima - Perú}

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de consistentes e detalhados registros de eventos extremos passados tais como cheias e secas é importante para uma melhor avaliação do risco hidrológico futuro e para o entendimento dos possíveis efeitos da mudança e variabilidade climática. A bacia Amazônica é a maior do mundo, possui uma área de drenagem aproximada de 6 milhões de km<sup>2</sup> e descarga ~15% da água continental que chega aos oceanos. Adicionalmente, possui também um papel importante na sociedade (e.g. transporte fluvial, agricultura, pesca e produção de energia). Eventos hidrológicos extremos têm sido reportados nos últimos anos na bacia Amazônica mostrando um incremento na frequência de ocorrência desde os anos 1980 (Espinoza e col., 2009; 2011; Gloor e col., 2013; Marengo e col., 2013).

A caracterização dos eventos hidrológicos extremos passados é de alguma maneira difícil considerando que a maioria dos registros de dados observados in-situ estão disponíveis apenas para décadas recentes e tem uma baixa densidade. No entanto, observou-se nas últimas décadas a disponibilidade de inúmeras bases de dados como reanálises climáticas. Por outro lado, modelos hidrológicos de grande escala têm melhorado recentemente. Nesse contexto, em grande parte do Brasil, várias aplicações têm sido propostas utilizando o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH (Collischonn e col. 2007), denominado “Modelo de Grandes Bacias” e desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Modelos como o MGB-IPH são capazes de simular processos hidrológicos continentais, fluxos e armazenamentos de água e energia como infiltração, evapotranspiração, ondas de cheias em rios, etc.

Portanto, a fusão entre modelos hidrológicos como o MGB-IPH, somados a extensas bases de dados como reanálises climáticas podem ser utilizados para o desenvolvimento do que é denominado nesta pesquisa de Retrospectiva Hidrológica (HR), uma metodologia desenvolvida para o melhor entendimento dos processos hidrológicos passados, e dando foco neste trabalho aos eventos extremos. Para isto foram usadas oito bases de dados globais de precipitação diária, e simuladas no modelo hidrológico MGB-IPH, usando diferentes métricas estatísticas para validá-las e analisar a capacidade de representar os eventos extremos passados na bacia Amazônica.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. O modelo hidrológico MGB-IPH

O modelo MGB-IPH é um modelo semi-distribuído do tipo chuva-vazão para simulação contínua de grandes bacias hidrográficas (Collischonn e col., 2007). No modelo, a bacia é dividida em mini bacias, onde processos hidrológicos verticais como interceptação vegetal, evapotranspiração e infiltração são considerados para modelar a geração de escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo. O fluxo então gerado é propagado em reservatórios lineares para a rede de drenagem principal, onde o método de propagação de ondas de cheia Inercial é empregado nas últimas versões (Fan et al., 2014; Pontes et al., 2015). As forçantes do modelo são séries temporais de dados de precipitação e clima (velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura do ar, insolação e pressão atmosférica). A configuração usada neste trabalho é o modelo desenvolvido por Paiva et al. (2013) escolhido por: i) a capacidade de representar adequadamente os processos físicos tais como o balanço hídrico vertical, a hidrodinâmica nos rios e os processos de inundação em grande escala na Amazônia; e ii) o performance demonstrado em validações prévias contra observações in-situ e de sensoriamento remoto atingindo valores de NSE > 0.6 em ~70% das estações fluviométricas.

## 2.2. Bases de dados de precipitação

Oito bases de dados globais livremente disponíveis foram usadas para representar a evolução temporal em grande escala da hidrologia na bacia Amazônica: cinco delas são reanálises climáticas (ERA-Interim, ERA-20CM, CFSR, JAR-55 e NOAAv2c) e três delas são combinações entre reanálises climáticas, e observações de satélites e/ou in-situ (CHIRPS v2.0, ERA-Interim Land e MSWEP), sendo estas últimas bases de dados as que possuem séries mais curtas (~30 anos).

**Tabela 1.** Resumo das bases de dados usados na Retrospectiva Hidrológica

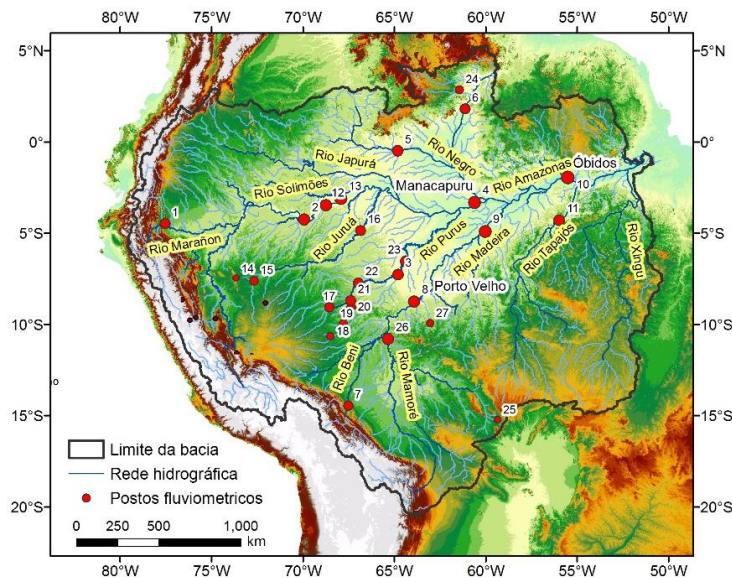
Nome curto	Instituição	Referencia	Tipo de informação	Cobertura temporal	Resolução temporal *	Resolução espacial usada
CFSR	NCEP	Saha et al. (2010)	Reanalise	1979/01 - 2010/12	SD e M	0.5° x 0.5°
CHIRPS v2.0	CHG	Funk et al. (2015)	In.situ, satélite	1981/01 - presente	D e M	0.25° x 0.25°
ERA-Interim	ECMWF	Dee et al. (2011)	Reanalise	1979/01 - presente	SD, D e M	0.75° x 0.75°
ERA-Interim Land	ECMWF	Balsamo et al. (2015)	In situ, satélite, reanalise	1979/01 - 2010/12	SD, D e M	0.75° x 0.75°
ERA 20CM	ECMWF	Hersbach et al. (2013)	Reanalise	1900/01 - 2010/12	D e M	0.125° x 0.125°
JRA-55	JMA	Kobayashi et al. (2015)	Reanalise	1958/01 - presente	SD e M	0.56° x 0.56°
MSWEP	JRC-EC	Beck et al. (2016)	In situ, satélite, reanalise	1979/01 - 2014/12	SD e D	0.25° x 0.25°
NOAA V2c	NOAA-CIRES	Compo et al. (2011)	Reanalise	1851/01 - 2011/12	SD, D e M	2.0° x 2.0°

\* SD (Sub-diário), D (Diário) e M (Mensal)

## 2.3. Validação

### 2.3.1. Informação de postos in-situ

A vazão produto das RH foram validadas com informação in-situ de 27 postos fluviométricos distribuídos no rio principal e nos maiores afluentes na bacia Amazônica (Figura 1). Estes postos foram selecionados devido a que possuem um registro de séries de vazão maior a 30 anos e uma área de drenagem maior a 1.000 km<sup>2</sup>. Adicionalmente foram escolhidas três estações onde usualmente foram reportados eventos extremos pela literatura, com a finalidade de realizar uma análise mais detalhada. A informação de observações in-situ foi disponibilizada pelos sites do das instituições Environmental Research Observatory SO HYBAM ([www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)) e da Agência Nacional de Águas – ANA ([www.hidroweb.ana.gov.br](http://www.hidroweb.ana.gov.br)).



**Figura. 1** - Rio Amazonas com a rede de drenagem, limites internacionais, relevo pelo MDE do SRTM, e os postos in-situ (o tamanho dos círculos vermelhos estão associados à área de contribuição) usados para a validação.

### 2.3.2. Métricas estatísticas

As vazões diárias das Retrospectivas Hidrológicas foram comparadas com as observações in-situ baseado em algumas métricas estatísticas. Foram usadas para isto o índice de Nash Suttcliffe (NSE), o valor absoluto do erro da vazão e o índice modificado de Klinge Gupta (KGE<sup>2</sup>). Adicionalmente foram calculadas os coeficientes de correlação linear de Pearson para os valores de vazão máxima, média e mínima anual.

### 2.3.3. Intensidade da duração da vazão

Para estimar a ocorrência e a intensidade dos eventos de cheias e secas, foi estimado o número de dias em um determinado ano em que um evento superou ou não determinado limiar. Estes limiares foram calculados para cheias e para secas da seguinte maneira: a média dos valores máximos/mínimos anuais foi adicionado/subtraído um valor do desvio padrão respectivamente. Esta metodologia foi sugerida pelo CPRM e avaliada por Marengo e col. (2013) para três grandes rios na bacia Amazônica. No presente trabalho este limiar é avaliado durante o período de 1981 até 2010.

Baseados nesta metodologia foram determinados a quantidade de dias de cheias e secas para cada ano em determinada região. Para determinar a habilidade das RH em capturar eventos detectados pelas observações in-situ, foi usada uma métrica simples de Peirce Skills Score (PSS) baseada em tabelas de contingência. A métrica PSS é obtida mediante a diferença entre o Hit rate (H) e o False alarme (F). Esta métrica foi adotada devido à simplicidade de interpretação. Este índice possui limites entre -1 e 1, sendo que os valores positivos indicam que os H excedem os F e podem se inferir que as simulações são capazes de representar adequadamente os valores observados.

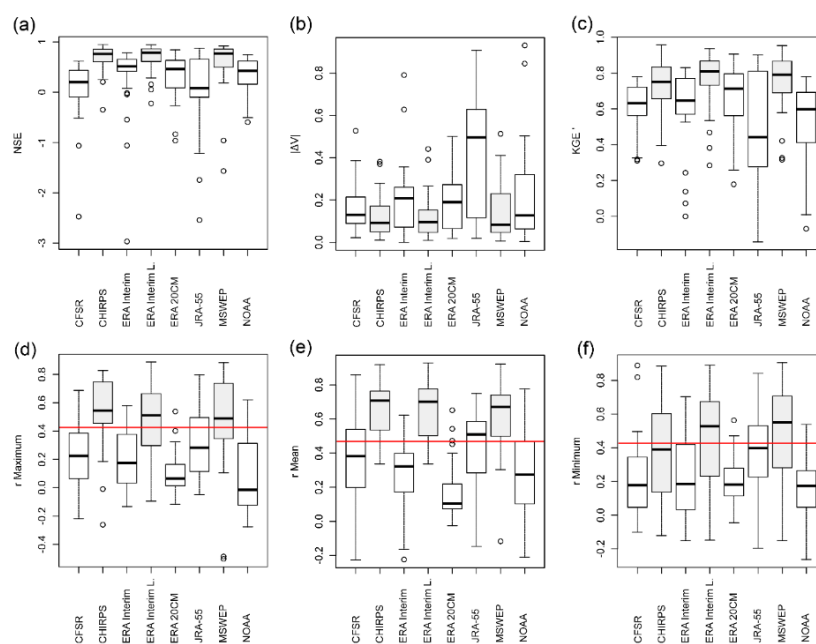
### 2.3.4. Tendência estatística dos eventos extremos

Foi realizada a análise de tendência temporal das vazões anuais máximas, médias e mínimas pelo teste não paramétrico de Mann Kendall, cuja estatística está baseada no "rank" ou ordem das variáveis. A aplicação do teste foi usado amplamente em séries temporais de informação hidrológica

e climática (Birsan e col., 2005; Espinoza e col., 2009), sendo recomendada um nível de confiança igual ou maior a 95% (Marengo, 2007). Embora muitos estudos revelam que a presença de autocorrelação nas series influencia nos resultados do teste (Clarke, 2010), ou seja incrementando (diminuindo) a probabilidade na detecção de tendência enquanto a autocorrelação é positiva (negativa). Desta maneira também são realizadas as análises estatísticas para confirmar a presença de autocorrelação nas series. O teste de tendência estatística foi realizada no período de 1981 até 2010.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

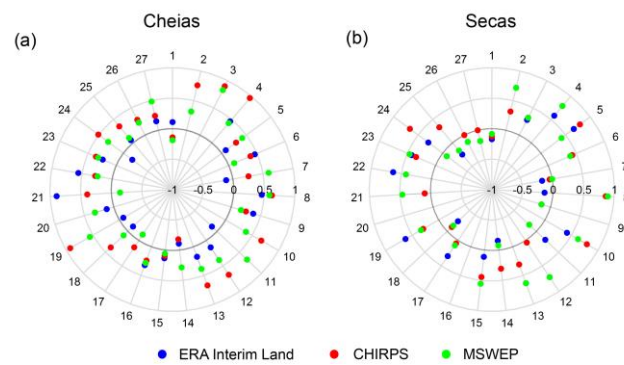
A eficiência das métricas estatísticas para a média das estações é apresentada na Figura 2, considerando um período comum de 1981 até 2010. As RH baseadas nas bases de dados do CFSR, ERA Interim, ERA-20CM, JRA-55 e NOAA mostram baixa performance para os coeficientes de NSE ( $< \sim 0.50$ ) e KGE' ( $< \sim 0.65$ ) o que não indicaria uma adequada representação dos hidrogramas observados. Adicionalmente os coeficientes de correlação para valores máximos, médios e mínimos anuais, não supera 0.4 além que não são significativos ( $p > 0.05$ ) na maioria dos casos, o que indica que não seriam capazes de capturar eventos como secas e cheias. A melhor performance foi mostrada pelas RH baseadas nos produtos ERA Interim Land, MSWEP e CHIRPS v2.0, com valores de NSE e KGE' maiores a 0.75 e erros do volume menores a  $\sim 10\%$ . Enquanto os coeficientes de correlação foram maiores a 0.5 e se mostraram significativos ( $p < 0.01$ ) na maioria dos casos. Estes produtos são principalmente uma combinação de reanálises climáticas e observações de precipitação in-situ e/ou de satélite sendo provavelmente essa uma das principais razões do melhor desempenho.



**Figura. 2** - Boxplot da performance das métricas estatísticas (a) NSE, (b)  $|\Delta V|$ , (c) KGE' e da correlação linear de Pearson para (d) máximos, (e) média e (f) mínimos (linha vermelha significa o r crítico para um nível de significância de 0.01) para cada RH, em cor branca as reanálises climáticas e em cor cinza os RH baseados em bases com a combinação de produtos (reanálises, in-situ e satélites)

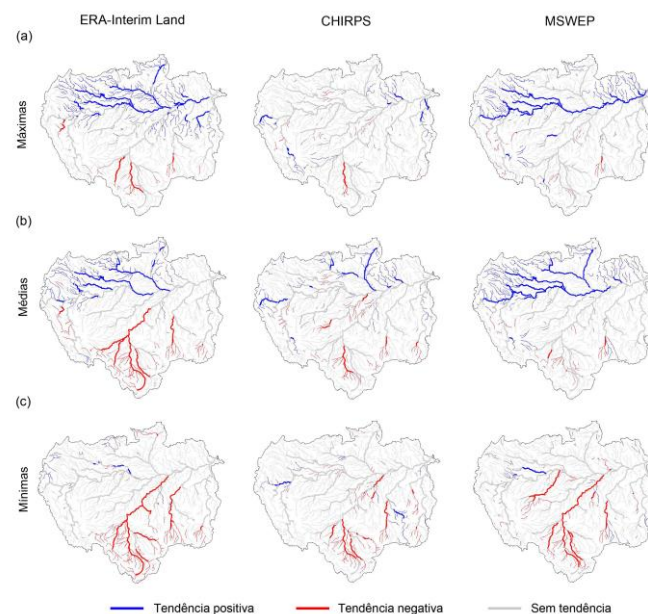
A capacidade dos RH de capturar os eventos de cheias e secas é apresentado na Figura 3, através do índice PSS. No caso das cheias (Fig. 12a), apresentaram valores positivos, sendo o produto do CHIRPS com 25/27 (93%) estações, enquanto MSWEP e ERA Interim land atingiram 24/27 (89%)

e 20/27 (74%) respectivamente. Isto indica que a maioria de estações conseguiu identificar adequadamente as cheias ocorridas durante o período da análise. Para o caso das secas, esta precisão diminuiu mas ainda assim os valores se mostraram adequados, Da mesma forma o produto RH CHIRPS capturou melhor as secas com 18/27 (67%) estações, enquanto ERA Interim land e MSWEP apresentaram valores positivos do PSS para 16/27 (59%) e 15/27 (60%) estações respectivamente.



**Figura. 3** - Peirce skill score (-1 até 1) para as RH ERA Interim Land (azul), CHIRPS (vermelho) e MSWEP (verde), para a capacidade de capturar (a) cheias e (b) secas detectadas pelas observações durante o período de 1981 até 2010.

A análise de tendência estatística no período de 1981 até 2010 para valores de vazões máximas, médias e mínimas anuais é apresentada na Figura 4. Estes resultados mostram uma clara tendência positiva de valores máximos nas regiões norte e noroeste (margem esquerda) assim como no rio principal, isto indica um claro aumento dos eventos de cheias nestas regiões durante o período da análise. Por outra parte a região sul e principalmente a bacia do rio Madeira mostram uma tendência negativa dos valores mínimos, o que indica um aumento na intensidade dos eventos de secas. É interessante indicar que estes resultados se mostram coerente com outros estudos (Callède e col. 2004; Espinoza e col. 2009b; Molina-Carpio e col. 2017), ou estudos de projeções futuras (Sorribas e col. 2016).



**Figura. 4** - Mann-Kendall test de tendência das vazões (a) máximas, (b) médias e (c) mínimas anuais para ERA Interim land, CHIRPS e MSWEP, desde 1981 até 2010. As cores dos trechos indicam uma tendência significativa positiva (azul), negativa (vermelho) e sem tendência (cinza), para um nível de significância de 0.05.

#### 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho propõe o método denominado Retrospectiva Hidrológica baseado no modelamento hidrológico e hidráulico em grande escala forçado por oito bases de dados principalmente baseados em reanálises climáticas. Esta metodologia tem sido usada para validar, capturar e avaliar a tendência dos eventos extremos na bacia Amazônica nas últimas décadas.

Os resultados da validação indicam que bases de dados que são compostas unicamente por modelos de reanálises climáticas não conseguem representar adequadamente os valores de vazão, enquanto aquelas bases que adicionalmente usaram informação de precipitação in-situ e de satélite (ERA-Interim Land, CHIRPS e MSWEP) tiveram melhor desempenho para representar tanto a hidrologia da bacia como os eventos extremos.

De maneira geral, as secas e cheias foram bem representadas pelos melhores produtos de RH, considerando tanto as observações como eventos reportados pela literatura. Isto foi possível observar mediante os altos coeficientes de correlação de Pearson como pela sua significância. Assim, o índice PPS indicou que na maioria de estações fluviométricas as cheias e secas foram adequadamente capturadas.

Assim como outros trabalhos indicaram, uma clara tendência de aumento na intensidade dos eventos extremos em regiões específicas foi identificado durante o período da análise. As RH mostraram um aumento nas cheias nas regiões oeste e noroeste, em quanto a região sul apresentou uma clara tendência de aumento de secas.

Neste trabalho, avaliamos uma aproximação simples denominada Retrospectiva Hidrológica, baseada na simulação de séries extensas de precipitação, Enquanto outras aproximações podem ser implementadas no futuro,

#### REFERÊNCIAS

- BOVOLO, C.I.; PEREIRA, R.; PARKIN, G.; KILSBY, C.; WAGNER, T. (2012). Fine-scale regional climate patterns in the Guianas, tropical South America, based on observations and reanalysis data. *Int. J. Climatol.*, 32, pp. 1665–1689.
- BIRSAN, M.-V.; MOLNAR, P.; BURLANDO, P.; PFAUNDLER, M. (2005). Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314(1–4), pp. 312 – 329.
- CALLÈDE, J.; GUYOT, J.L.; RONCHAIL, J.; L'HÔTE, Y.; NIEL, H.; DE OLIVEIRA, E. (2004). Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999 / evolution of the river amazon's discharge at Óbidos from 1903 to 1999. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), pp. 85–97.
- CLARKE, ROBIN T. (2010). On the (mis)use of statistical methods in hydro-climatological research. *Hydrological Sciences Journal*, 55(2): pp. 139-144.

- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The mgb-iph model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), pp. 878–895.
- ESPINOZA J.C.; GUYOT J.L.; RONCHAIL, J.; COCHENEAU G.; FILIZOLA N.; FRAIZY P.; LABAT D.; DE OLIVEIRA E.; ORDOÑEZ, J.J.; VAUCHEL P. (2009). Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 375, pp. 297–311.
- ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; JUNQUAS, C.; VAUCHEL, P.; LAVADO, W.; DRAPEAU, G.; POMBOSA, R. (2011). Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western amazon basin, Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(13), n/a–n/a. L13406.
- FAN, F.M.; PONTES, P.R.M.; PAIVA, R.C.D. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 19(4), pp. 137–147.
- GLOOR, M.; BRIENEN, R.J.W.; GALBRAITH, D.; FELDPAUSCH, T.R.; SCHÖNGART, J.; GUYOT, J.-L.; ESPINOZA, J.C.; LLOYD, J.; PHILLIPS, O.L. (2013). Intensification of the amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, 40(9), pp. 1729–1733.
- LETTENMAIER, D.P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.; HUFFMAN, G.J.; PAN, M.; WOOD, E.F. (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resources Research*, 51(9), pp. 7309–7342.
- LEE, T.; KWON, H.; MODARRES, R.; KIM, S.; CHEBANA, F. (2016). Hydrological and Meteorological Extreme Events in Asia, Understanding, Modeling, Vulnerability, and Adaptation Measures. *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2016/2325384.
- MOLINA-CARPIO, J.; ESPINOZA, J.C.; VAUCHEL, P.; RONCHAIL, J.; GUTIERREZ, B.; GUYOT, J.L.; NORIEGA, L. (2017). The hydroclimatology of the upper Madeira River basin, spatio-temporal variability and trends (1967–2013). Accepted in *Hydrological Sciences Journal*.
- MARENGO, J.A.; BORMA, L.S.; RODRIGUEZ, D.A.; PINHO, P.; SOARES, W.R.; ALVES, L.M. (2013). Recent extremes of drought and flooding in Amazonia, vulnerabilities and human adaptation. *American Journal of Climate Change*, 2, pp. 87–96.
- MARENGO, J.A. (2007). Boletim do projeto uso de cenários de mudanças climáticas regionais em estudos de vulnerabilidade e adaptação no brasil e na américa do Sul (gof-uk-cptec).
- PAIVA, R.C.D.; BUARQUE, D.C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C.A. (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, 49(3), pp. 1226–1243.
- SORRIBAS, M. V.; PAIVA, R.C.D.; MELACK, J.M.; BRAVO, J.M.; JONES, C.; CARVALHO, L.; BEIGHLEY, E.; FORSBERG, B.; COSTA, M.H. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136, pp. 555–570.