

SAMEWATER: Uma agenda de pesquisa integrada da hidrologia da América do Sul

Rodrigo C.D. Paiva & Walter Collischonn & Fernando Fan & Vinicius Siqueira & Ayan Fleischmann & Anderson Ruhoff & Sly Correa & Mino Sorribas & Germano Gondim & João Paulo Fialho Brêda & Juan Martin Bravo & Pedro Jardim

Resumo – A América do Sul é responsável por 30% da vazão afluente aos oceanos, apresenta ampla diversidade hidrológica, importantes ecossistemas e seus recursos hídricos são compartilhados por diversos países, e diferentes setores econômicos, mas que também sofrem com impactos de cheias e secas. Avanços em modelos de simulação e sensoriamento remoto permitem estudos integrados na escala da América do Sul. Este trabalho propõem uma agenda de pesquisa acerca dos recursos hídricos da AS, para abordar os desafios atuais e futuros da gestão integrada de recursos hídricos. São apresentadas as bases técnicas de simulação hidrológica regional e sensoriamento remoto. Além disso, apresentam-se exemplos e discussões sobre eixos de pesquisa como estudo de processos hidrológicos, desenvolvimento de reanálise hidrológica, sistemas de previsão de cheias e secas, estudos relativos a interação entre água, homem, clima e meio ambiente, visando olhar para o passado, presente (condições atuais e comportamentos típicos), e futuro. Os produtos esperados são novos conhecimentos científicos sobre os sistemas hidrológicos da América do Sul, bases de dados, métodos hidrológicos e sistemas de informação de recursos hídricos. Os autores convidam a comunidade técnico científica a colaborar nesta agenda de pesquisa na escala da América do Sul.

Palavras-Chave – SAMEWATER, América do Sul, Hidrologia, Modelagem Hidrológica, Hidrologia de Grande Escala, Sensoriamento Remoto,

SAMEWATER: an agenda for integrated research of South American hydrology

Abstract – South America discharges 30% of global fresh water to oceans, it presents large hydrologic diversity, important ecosystems and its water resources are shared between different countries and economic sectors, that suffer impacts of floods and droughts. Advances of simulation models and remote sensing allow new studies at the South America continental scale. This paper proposes a research agenda on the South America water resources. It presents examples and discussions on research themes as hydrological processes, developments of hydrological reanalyses, forecast systems, studies on the climate, environment, society and water interactions, focusing on the past, present and future. Products to be developed are new scientific knowledge on the hydrology of south America, datasets, methods and information systems. The authors invite the scientific community to join and collaborate on this research agenda on the scale of South America.

Keywords – SAMEWATER, South America, Hydrology, Hydrologic Modelling, Large Scale Hydrology, Remote Sensing.

¹ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

* Autor Correspondente: rodrigo.paiva@ufgs.br

INTRODUÇÃO

Águas continentais têm importante papel no sistema terrestre, regulam trocas de água e energia entre a superfície, atmosfera e oceanos e importantes ciclos biogeoquímicos. Afetam diretamente a sociedade que usa este recurso para abastecimento humano, transporte, agricultura e

energia. A hidrologia da América do Sul tem importante papel neste contexto, já que abriga alguns das maiores bacias hidrográficas do mundo, e.g. Amazonas, Prata e Orinoco, possui rica diversidade climática e hidrológica, sendo responsável por ~30% da água doce afluente aos oceanos. O desenvolvimento econômico e demográfico são diversos na América do Sul, e a região apresenta uma ampla gama de problemas relacionados a recursos hídricos. Por exemplo, a bacia do Prata é responsável por grande parte da atividade econômica do continente, onde os recursos hídricos tem um importante papel [Tucci e Clarke, 1998]. Seus rios são regulados por múltiplos e grandes reservatórios de geração hidroeétrica e a água é usada para importantes atividades agrícolas e industriais. E justamente nesta bacia onde a região sudeste do Brasil enfrentou recentemente uma importante seca que está impactando estas atividades além do abastecimento doméstico. Outras regiões ainda estão em desenvolvimento e grandes alterações hidrológicas ainda podem ocorrer, como é o caso da bacia Amazônica pela pressão do desmatamento e construção de novas barragens hidroeétricas no Brasil e países andinos. A natureza transfronteiriça dos rios sul-americanos complica o seu gerenciamento racional (presente e futuro), considerando que os recursos hídricos das grandes bacias hidrográficas são compartilhados entre as nações vizinhas, além de inúmeros setores econômicos. Além disso, impactos econômicos e sociais de desastres naturais de ordem hídrica também são frequentes, ocorrendo em diferentes escalas espaciais e temporais - alguns relacionados com a cheia de grandes rios e muitos outros em pequenos rios. A partir dos anos 1970, mais de 19 milhões de brasileiros foram afetados por inundações, conforme Guha-Sapir et al. [2015]. Mesmo assim, sistemas de previsão hidrológica têm sido desenvolvidos somente para rios particulares e sistemas integrados ainda são inexistentes [Fan et al, 2016].

Uma das principais bases técnicas disponíveis para a predição hidrológica é a modelagem hidrológica. Na última década, várias aplicações tem sido propostas em grande parte da América do Sul utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH [Collischonn et al. 2007], denominado “Modelo de Grandes Bacias”. As aplicações variam de estudos acerca de processos hidrológicos [e.g. Paiva et al. 2013], predição de vazões para sistemas de suporte a decisão e planejamento de recursos hídricos [Fan et al., 2016], avaliação de impactos devido a mudanças no uso do solo e mudanças climáticas [e.g. Sorribas et al., 2016] e estudos de previsão de vazões no curto e médio prazo para mitigação de cheias e operação de reservatórios [Fan et al., 2016]. Entretanto, aplicações deste tipo têm sido isoladas e focadas em bacias hidrográficas particulares e desenvolvimentos sistemáticos na escala da América do Sul ainda são inexistentes [Fan, 2015]. Por outro lado, existem iniciativas de desenvolvimento de modelos hidrológicos globais [Bierkens 2015], principalmente por pesquisadores localizados em países desenvolvidos, mas que ainda carecem do conhecimento e olhar local na escala da América do Sul. Desenvolvimentos de modelos, pesquisas e sistemas na escala da América do Sul podem ainda se beneficiar de novas observações de sensoriamento para hidrologia, como de altimetria em rios, precipitação, evapotranspiração, etc.

Essas novas fontes de informação hidrológica, somadas à crescente capacidade de processamento e armazenamento de informação, oferecem oportunidades para o desenvolvimento de agendas de pesquisa em hidrologia e recursos hídricos na escala da América do Sul. Perguntas como estas podem ser respondidas através do desenvolvimento de bases técnicas e agendas de pesquisa para o estudo integrado dos recursos hídricos da América do Sul. Qual é o comportamento típico de processos hidrológicos nas diferentes regiões da América do Sul? O que governa a ocorrência e previsibilidade de cheias e secas nos rios da América do Sul em diferentes escalas? Qual será a situação hidrológica em uma região qualquer hoje, amanhã, na próxima semana, mês ou estação? Como ações antrópicas (irrigação, reservatórios, uso do solo, etc.) alteraram e podem alterar a hidrologia na América do Sul? Quais são as melhores técnicas de simulação e observação

para responder a estas questões? Neste contexto, este artigo propõe uma agenda de pesquisa dos recursos hídricos da América do Sul, que responda a questões desta natureza, aproveitando as oportunidades técnico científicas disponíveis para abordar os desafios atuais e futuros da gestão integrada de recursos hídricos.

SAMEWATER

Esta agenda de pesquisa é focada na hidrologia da América do Sul (Figura 1). As bases técnicas a serem desenvolvidas e utilizadas são a modelagem hidrológica regional, observações in situ e de sensoriamento remoto. Os eixos de aplicações incluem o estudo de processos hidrológicos, desenvolvimento de reanálise hidrológica, sistemas de previsão de cheias e secas, estudos relativos a interação entre água, homem, clima e meio ambiente. Estes estudos abordam a hidrologia da América do Sul com um olhar para o passado, presente (visando às condições atuais e comportamentos típicos), e futuro visando ao manejo de questões hídricas no curto e médio prazo e ações de planejamento no longo prazo. Os produtos esperados são novos conhecimentos científicos sobre os sistemas hidrológicos da América do Sul, novas bases de dados, novos métodos hidrológicos e sistemas de informação de recursos hídricos.

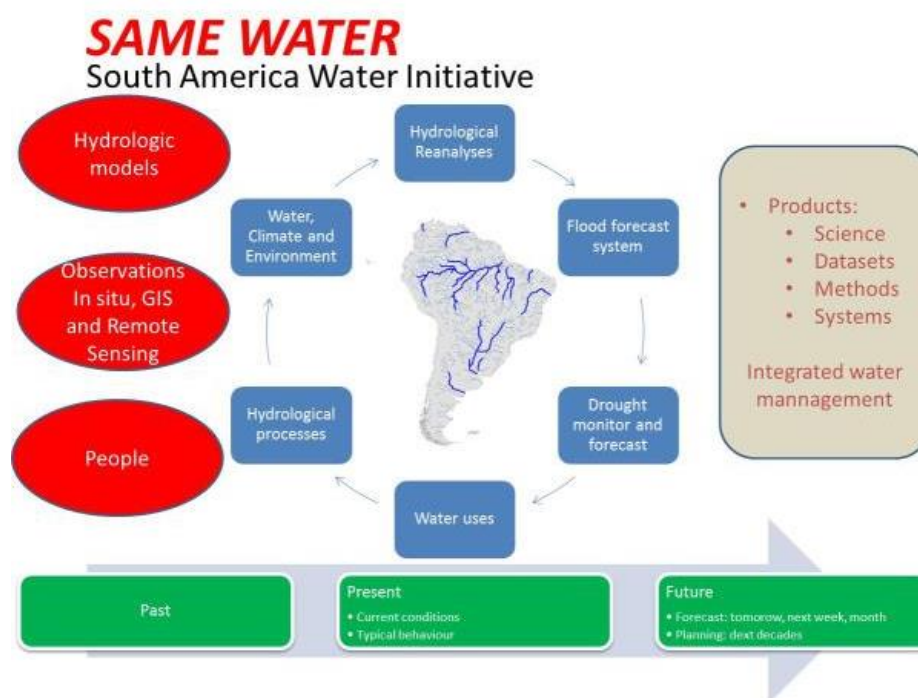


Figura 1 – Visão conceitual de estudos hidrológicos, produtos e bases técnicas para uma agenda de pesquisas hidrológicas para a América do Sul.

BASES TÉCNICAS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS DE GRANDE ESCALA

Modelos de Simulação Hidrológica

Modelos de simulação hidrológica se destacam como uma das principais ferramentas utilizadas em hidrologia, sendo usados (i) como base de sistemas de recursos hídricos visando a previsão e predição hidrológica e em (ii) estudos para a melhor compreensão dos processos hidrológicos e sua relação com outros processos ambientais e sociedade. Tais modelos representam processos variáveis no tempo e espaço como infiltração e movimento de água no solo, balanço de energia e

evapotranspiração e propagação de ondas de cheia em rios e planícies de inundação, reservatórios, usos d'água, etc.

Com o avanço da capacidade de processamento, têm-se desenvolvido modelos de simulação hidrológica regional e global [Bierkens 2015]. Para tanto, existe uma grande diversidade de modelos, alguns focados em processos de interface atmosfera-solo-planta, e outros em vazões em rios, propagação de ondas de cheia e estiagens [e.g. Collischonn, 2007; Paiva, 2013]. Na última década, várias aplicações tem sido propostas em grande parte da América do Sul utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH [Collischonn et al. 2007; Paiva et al., 2013; Pontes et al., 2017]. A bacia é dividida em minibacias e trechos de rio, e equações de base física são utilizadas para simular de forma detalhada fluxos e armazenamentos hidrológicos (ver Figura 2). O modelo é tipicamente forçado, calibrado e validado utilizando-se observações hidrológicas in situ e dados de sensoriamento remoto. Recentemente uma aplicação continental do modelo tem sido desenvolvida e calibrada para todos os rios da América do Sul, conforme ilustrado na Figura 2, demonstrando excelente performance na representação de vazões e outras variáveis como níveis d'água e extensão de áreas inundadas e evapotranspiração.

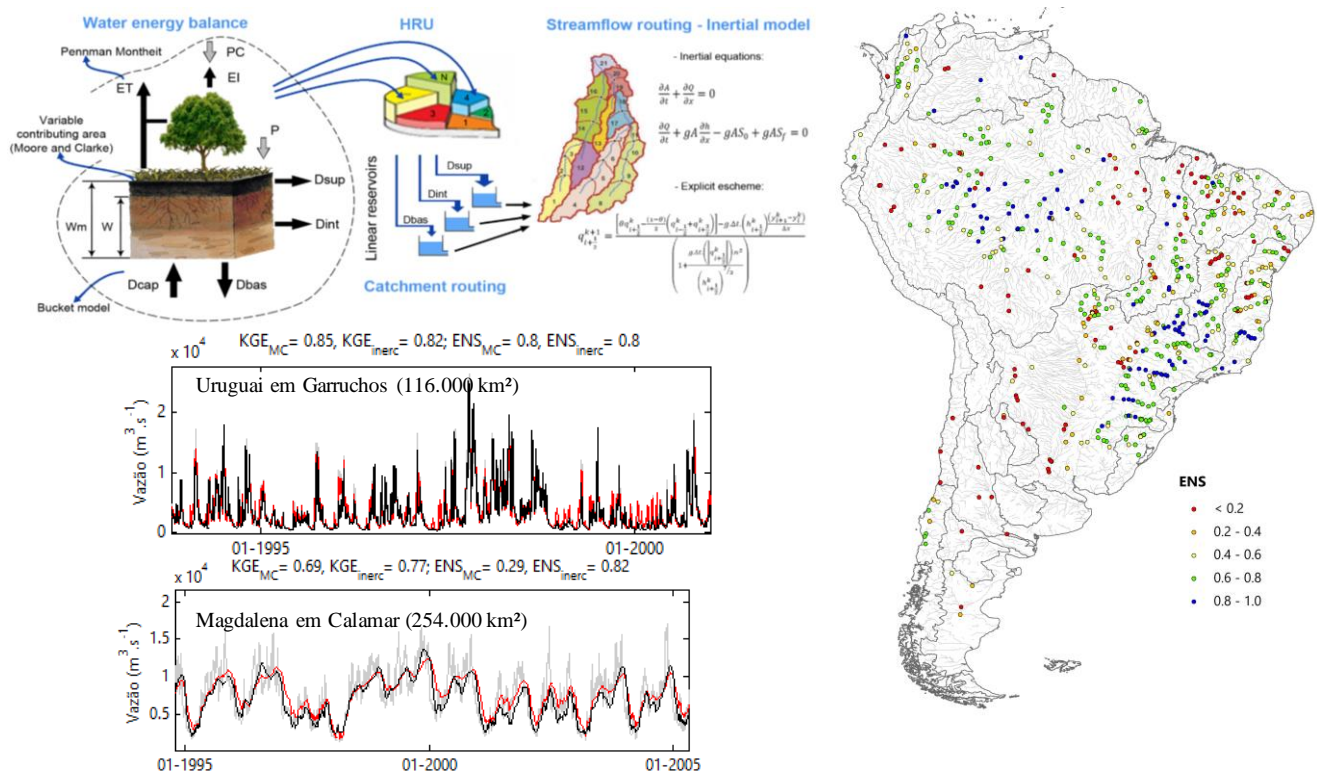


Figura 2 – Esquema conceitual do modelo hidrológico MGB-IPH e sua aplicação recente na escala continental da América do Sul, com rede de drenagens simulada, índice de desempenho de Nash e Sutcliffe em postos fluviométricos e hidrogramas simulados (vermelho) e observados (preto)

Observações e Sensoriamento Remoto

Paralelamente às ferramentas de modelagem hidrológica, têm-se desenvolvido nos últimos anos um grande número de técnicas de sensoriamento remoto (Lettenmaier et al., 2015) para observação de variáveis hidrológicas, que permitem o monitoramento de grandes áreas, com uma cobertura espaço-temporal muito superior a de observações in situ. Os produtos de sensoriamento remoto voltados para hidrologia desenvolvidos recentemente incluem métodos de estimativa dos

níveis d'água através de altimetria espacial por radar com satélites (e.g., TOPEX, Jason-2, ERS-2, ENVISAT, ICESAT, entre outros), variação no armazenamento de água terrestre relativo a volumes estocados em águas subterrâneas, solo e planícies de inundação (GRACE), umidade do solo (e.g., SMOS e SMAP), mapeamento de extensão de áreas alagadas com imagens do visível e radar, estimativas da precipitação com sensores de infravermelho e micro-ondas (e.g., missão TRMM “Tropical Rainfall Measurement Mission”), estimativas de evapotranspiração (e.g., SEBAL, METRIC e ALEXI), dados topográficos de modelos digitais de elevação (e.g., SRTM), concentração e fluxos de sedimentos e indicadores de qualidade de água com imagens do visível e infravermelho, e áreas alagadas e níveis d'água e vazões da futura missão SWOT “Surface Waters and Ocean Topography”. Estas novas informações oriundas de sensoriamento remoto oferecem uma grande oportunidade aos estudos visando à compreensão de processos hídricos no meio ambiente. Estas podem ser utilizadas para (i) a caracterização de hidrossistemas, (ii) desenvolvimento de novas bases teóricas baseadas em observações, (iii) validação de modelos de simulação ou (iv) serem utilizadas integradas a modelos de simulação buscando a melhor representação dos processos físicos.

SISTEMAS E ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Processos Hidrológicos

Este eixo de pesquisa visa à caracterização de processos hidrológicos na América do Sul: hidrologia vertical (infiltração, evapotranspiração, geração de escoamento) e hidrodinâmica (propagação de cheias em rios, dinâmica de inundação em grandes planícies). Podem ser trabalhadas duas linhas de ação: (i) caracterização de processos hidrológicos na macro-escala de toda a América do Sul, e (ii) caracterização do funcionamento hidrológico/hidrodinâmico de hidrossistemas particulares, como bacias hidrográficas importantes (e.g. bacia Amazônica, bacia do Prata), grandes áreas úmidas (e.g. Amazônia, Pantanal), rios (e.g. Amazonas, São Francisco), e diferentes biomas (e.g. cerrado, Amazônia, pampa, mata atlântica). Mais ainda, como o funcionamento destes sistemas se relaciona com outros processos, como o clima, ciclo de carbono, ciclo de sedimentos, fatores antrópicos, entre outros. O estudo destes sistemas é baseado em modelos de simulação e observações. Por outro lado, os resultados destes estudos de processos físicos em sistemas naturais fornecem as bases teóricas para o aperfeiçoamento dos modelos de simulação. Por exemplo, a Figura 3 apresenta simulação hidrodinâmica das várzeas do Rio Negro (Amazônia) com uma versão bidimensional do modelo MGB-IPH, investigando processos hidrológicos e questões relevantes em várzeas fluviais e interfluviais.

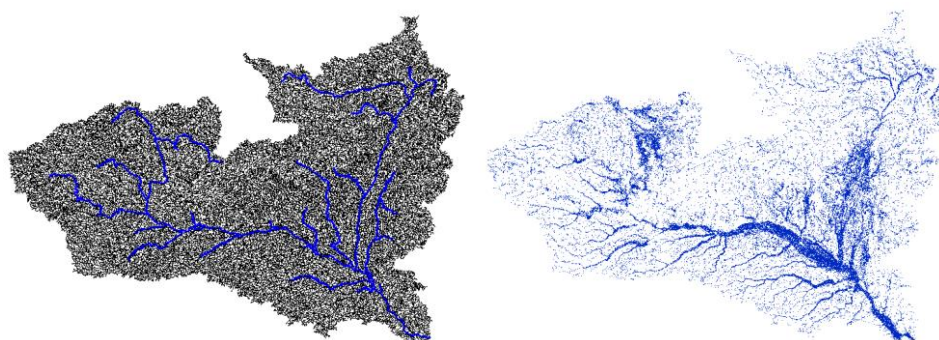


Figura 3 – Exemplo de uso do modelo MGB-IPH 2D na bacia do Rio Negro (Amazônia), com (a) rede de drenagem simulada e (b) estimativa de áreas inundáveis neste complexo sistema rio-planície.

Reanálises hidrológicas

Reanálises são métodos científicos voltados para o desenvolvimento de um registro retrospectivo da evolução de um determinado sistema (e.g., 1900 até 2015). Estes métodos foram inicialmente desenvolvidos na área de meteorologia para o estudo do clima e diversas reanálises meteorológicas estão disponíveis. Reanálises hidrológicas podem ser definidas da mesma forma – estudo retrospectivo (e.g. 1900 até 2015 ou 1998 até 2015) da evolução da hidrologia de uma determinada região (e.g. América do Sul), através da combinação ótima de modelos de simulação (e.g. MGB-IPH) e observações (in situ ou de sensoriamento remoto) para estimar da melhor forma possível campos espaço-temporais de estados e armazenamentos hidrológicos como vazões, níveis d'água, umidade do solo, evapotranspiração, etc. O estudo do passado através deste tipo de registro permite compreender o comportamento hidrológico típico de determinada região, estudar eventos extremos do passado, quantificar/determinar valores de variáveis hidrológicas para serem utilizadas em outros estudos (ciência ou engenharia), determinação de vazões de referencia para processos de outorga e gestão de recursos hídricos, riscos de secas e cheias, etc.

A Figura 4 apresenta um desenvolvimento recente de Correa et al., (2017) para o estudo de eventos extremos passados na bacia Amazônica, através da fusão do modelo MGB-IPH com reanálises climáticas, onde foi possível identificar e estudar as secas e cheias mais extremas do passado e avaliar a sua evolução temporal. Este tipo de técnica ainda é incomum em hidrologia, existindo alguns exemplos de desenvolvimentos na escala global, mas que ainda carecem do conhecimento e olhar local na escala da América do Sul e foco em problemas de específicos recursos hídricos. Neste sentido, ainda existem muitas oportunidades e desafios para o desenvolvimento de reanálises hidrológicas para os rios da América do Sul.

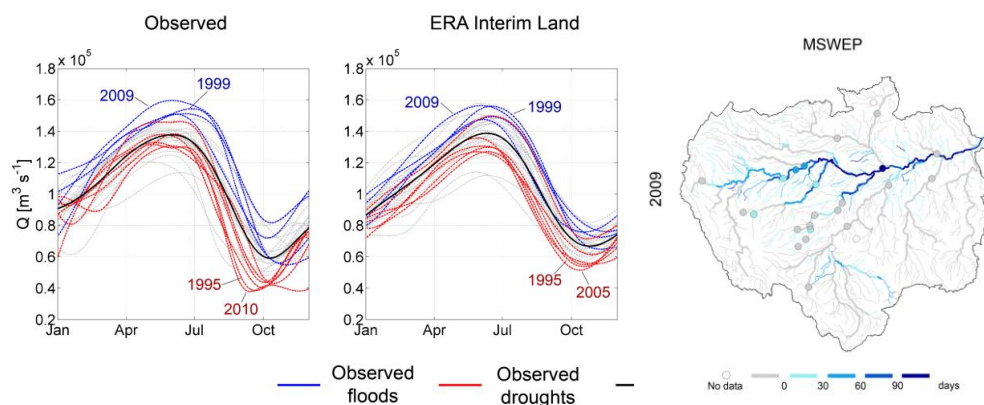


Figura 4 – Hidrogramas de secas (vermelho) e cheias (azul) históricas observadas e simuladas no rio Amazonas e mapa de duração da cheia de 2009 na Bacia Amazônica simulada pela reanálise hidrológica. (Modificado de Correa et al., 2017).

Monitoramento e Previsão de cheias e secas

Sistemas de previsão hidrológica visam a previsão de curto (alguns dias), médio prazo (semanas) ou sazonal (meses) de variáveis como vazões, níveis, volumes d'água ou umidade do solo, objetivando a antecipação de eventos extremos como cheias e secas ou a otimização de decisões sobre o uso dos recursos hídricos, como no caso da operação de reservatórios hidroelétricos. Historicamente, sistemas de previsão hidrológica têm sido desenvolvidos de forma descentralizada e focando em aplicações específicas, conforme relatado por Fan et al. [2016] para o caso do Brasil. As técnicas empregadas variam desde métodos estatísticos até uso de modelos distribuídos baseados em processos acoplados a previsões meteorológicas. Alguns exemplos de

estudos de previsão de vazões em grandes bacias utilizando o modelo MGB-IPH incluem sistema de previsão para o alto São Francisco [Fan et al. 2016, Figura 5b].

Os modelos hidrológicos baseados em processos recentemente passaram a ser utilizados em sistemas regionais e mesmo globais de monitoramento e previsão hidrológica em tempo real. Por exemplo, Thielen et al. [2009] apresentam a concepção do “European Flood Awareness System - EFAS”, que se trata de um sistema alerta contra cheias para a Europa baseado em um modelo hidrológico distribuído forçado com previsões meteorológicas e utilizando a técnica de previsão probabilística.. Alfieri et al. [2012] apresentam a concepção e validações preliminares do “Global Flood Awareness System - GloFAS”, que é uma extensão do sistema EFAS para a escala global. Existem também sistemas baseados em modelos hidrológicos para o monitoramento de secas como o U.S. Drouth Monitor dos Estados Unidos (<http://droughtmonitor.unl.edu/>). Um exemplo de avaliação de índices baseados em dados de sensoriamento remoto para o monitoramento de secas na América do Sul foi apresentado por Gondin (2017), conforme Figura 5a. Entretanto, sistemas de previsão hidrológica (cheias ou secas) regionais para a escala da América do Sul ainda não foram desenvolvidos, apesar do seu grande potencial para complementar os sistemas de previsão locais já existentes de empreendimentos específicos, defesa civil e instituições como ANA, CEMADEN, CPRM, entre outras.

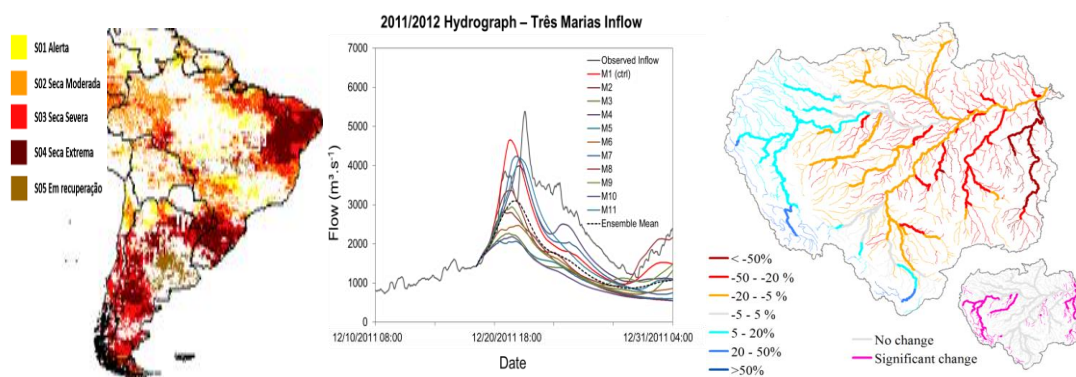


Figura 5 – (a) Monitoramento de seca na América do Sul utilizando combinação de dados de sensoriamento remoto de precipitação, umidade do solo, índice de vegetação e armazenamento d’água (Gondin 2017). (b) Previsão de curto-médio prazo de vazão afluente ao reservatório de Três Marias utilizando o modelo MGB-IPH acoplado a previsão numérica do tempo (Fan et al., 2016). (c) Projeções de futuros impactos de mudanças climáticas (2070 a 2100) nas vazões médias na bacia Amazônica simuladas com o modelo MGB-IPH e cenários do IPCC AR5. Modificado de Sorribas et al. 2016.

Clima e meio ambiente

Este item visa estudos de interação da água com clima e o meio ambiente. Neste item abordam-se questões relacionadas à como a hidrologia da América do Sul pode ser afetada por variabilidade e mudanças climáticas. Por exemplo, a Figura 5 apresenta projeções de futuros impactos de mudanças climáticas (2070 a 2100) nas vazões médias na bacia Amazônica simuladas com o modelo MGB-IPH e cenários do IPCC AR5 desenvolvidas por Sorribas et al. (2016). Por outro lado, este item visa estudos acerca de como a hidrologia da América do Sul afeta processos ambientais como emissões de carbono, processos ecológicos, produção de sedimentos, etc.

Usos d’água

Este eixo de pesquisa visa a avaliação de impactos de usos da água na hidrologia da América do Sul. Como grandes reservatórios hidroelétricos ou a irrigação intensiva alteram o regime de vazões nas grandes bacias da América do Sul? Como esses usos d’água alteraram o regime hidrológico das grandes bacias no passado recente e quais são as perspectivas para o futuro? Quais

são as alternativas para o adequado manejo integrado dos recursos hídricos nas grandes bacias da América do Sul? Perguntas como estas podem ser respondidas através das bases técnicas de modelagem hidrológica regional da América da Sul. Para tanto, devem ser desenvolvidos módulos específicos para a simulação de usos d água no modelo MGB-IPH para a análise do passado recente e a simulação de cenários futuros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESAFIOS FUTUROS

Atraves das informações e análises apresentadas neste artigo, os autores convidam a comunidade técnico científica a colaborar nesta agenda de pesquisa focada ao estudo dos recursos hídricos na escala da América do Sul. Tais resultados têm o potencial de auxiliar na gestão de recursos hídricos nesta escala e vêm a unir esforços de diversos pesquisadores e instituições.

REFERÊNCIAS

- ALFIERI, L.; BUREK, P.; DUTRA, E.; KRZEMINSKI, B.; MURARO, D.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. (2013). GloFAS e global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, pp. 1161-1175.
- Bierkens, M. F. P. (2015), Global hydrology 2015: State, trends, and directions, *Water Resour. Res.*, 51, 4923–4947, *doi*:10.1002/2015WR017173.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences* 52(5), pp. 878-895.
- CORREA, SLY ; PAIVA, R.C.D.; ESPINOZA, J.C.; Collischonn, W. (2017) . Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, v. 549, p. 667-684, 2017.
- FAN, F.M. ; PAIVA, R.C.D. ; COLLISCHONN, W. . Hydrological Forecasting Practices in Brazil. In: THOMAS E. ADAMS; THOMAS C. PAGANO. (Org.). *Flood Forecasting*. 1ed.: Elsevier, 2016, v. , p. 41-66.
- Guha-Sapir, D., Below, R., Hoyois, Ph., 2015.EM-DAT: International Disaster Database – www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium. 2015
- Lettenmaier, D. P., D. Alsdorf, J. Dozier, G. J. Huffman, M. Pan, and E. F. Wood (2015), Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era, *Water Resour. Res.*, 51, 7309–7342, *doi*:10.1002/2015WR017616.
- Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., Buarque, D.C., Frappart, F., Calmant, S., Mendes, C.B. 2013a. Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.*, *doi*: 10.1002/wrcr.20067
- PONTES, P.; FAN, F.; FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; BUARQUE, D.; SIQUEIRA, V.; JARDIM, P.; SORRIBAS, M.; COLLISCHONN, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software* 94, pp. 1-20.
- Sorribas, M.VV.; R.C.D. Paiva, J.M. Melack, J.M. Bravo, C. Jones, L. Carvalho, E. Beighley, B. Forsberg, M.H. Costa (2016) Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Clim. Change*, 136 (2016), pp. 555–570
- Tucci, C.E.M.; Clarke, R.T., 1998. Environmental Issues of La Plata Basin. . *Water Resources Development*. v.14, n.2, p.157-173.