

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL**

**Otávio Augusto Passaia**

**SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS BRASILEIROS EM  
MODELO HIDROLÓGICO CONTINENTAL**

**PORTO ALEGRE**

**2019**

OTÁVIO AUGUSTO PASSAIA

SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS BRASILEIROS EM MODELO HIDROLÓGICO  
CONTINENTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Rodrigo C. D. Paiva

PORTO ALEGRE

2019

Passaia, Otávio Augusto  
Simulação de Reservatórios Brasileiros em Modelo  
Hidrológico Continental / Otávio Augusto Passaia. --  
2019.  
100 f.  
Orientador: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. hidrologia. 2. modelagem hidrológica. 3.  
reservatórios. 4. hidrologia de grande escala. 5.  
Modelo de Grandes Bacias (MGB). I. Cauduro Dias de  
Paiva, Rodrigo, orient. II. Título.

OTÁVIO AUGUSTO PASSAIA

SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS BRASILEIROS EM MODELO HIDROLÓGICO  
CONTINENTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 24 de Abril de 2019.

---

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – IPH/UFRGS  
Orientador

---

Dr. Adalberto Meller – ANA  
Examinador

---

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – IPH/UFRGS  
Examinador

Dedico este trabalho a meus pais, Adair e Roseli, e a minha irmã, Carol, que sempre acreditaram em mim e foram meu grande apoio ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Para concluir a dissertação e realizar este trabalho, o auxílio e motivação de diversas pessoas foi imprescindível. Transmito aqui meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Rodrigo C. D. Paiva, orientador deste trabalho, e também da minha bolsa de iniciação científica, estágio obrigatório e TCC, pela amizade, compreensão, incentivo, paciência e pela disponibilidade em transmitir seu conhecimento.

Aos meus queridos colegas do grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala, pela convivência, amizade e pelas brincadeiras sadias que tornam essa jornada mais leve. Eles sempre estão dispostos a ajudar e sanar dúvidas. Agradeço especialmente ao Ayan, pelo desenvolvimento do módulo de reservatórios, e ao Vinícius Siqueira pelo incrível Modelo Hidrológico da América do Sul.

A todos meus colegas de mestrado, em especial aqueles com os quais compartilhei muitos intervalos, caronas, idas ao RU e risadas, que ajudaram a suportar a grande exigência do nosso curso. Aos meus diversos amigos pelas inúmeras viagens, festas, reuniões e jogos.

A todos os excelentes professores que contribuíram para minha formação pessoal e profissional, sejam eles das escolas que estudei, da Universidade, do cursinho, do SENAI ou do Teatro, seus ensinamentos fazem parte do que sou hoje.

A toda minha grande família, primos, tios, avós, e especialmente aos meus pais, Adair e Roseli, pela excelente educação, compreensão e confiança que ajudaram a moldar minha personalidade; e à minha irmã, Carolina, pelas conversas, conselhos, amizade. Juntos nós quatro formamos esta família tão unida e divertida, sem eles não seria o que sou hoje.

Às minhas amigas que em determinado momento foram minhas companheiras; aos instrutores e instrutoras de Yôga da Casa Rio Branco, pela transmissão dessa filosofia milenar que muito contribui para meu bem-estar físico, mental e emocional; à benzedeira Dilma Baldessarelli, pelo auxílio espiritual; ao meu terapeuta, pelo auxílio psicológico; e, finalmente, aos colegas, professores e regentes dos corais que participei, pelos ensinamentos e ajuda no aprendizado da música.

Às instituições: IPH, UFRGS, CNPq e CAPES, pelos auxílios em dinheiro, estrutura física, equipamentos, passagens e diárias. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

Apenas quando o homem matar o último peixe, poluir o  
último rio e derrubar a última árvore, irá compreender que  
não poderá comer o dinheiro que ganhou  
*Provérbio Indígena*

## RESUMO

Dezenas de milhares de barragens foram construídas no mundo para diminuir os riscos de inundação e maximizar os benefícios dos recursos limitados de água doce. No Brasil, os principais e maiores reservatórios são do setor hidrelétrico. Todavia, eles podem gerar significativas alterações no regime hidrológico, como atenuação e atraso no hidrograma; e impactos na biota e sedimentação. Logo, é de suma importância estudar e avaliar o impacto e dinâmica dos reservatórios no regime de vazões. Isto pode ser feito por meio de um modelo hidrológico, que representa os processos de geração do escoamento e propagação da água em rios. Um exemplo é o Modelo de Grandes Bacias (MGB), um modelo hidrológico conceitual e semi-distribuído, já aplicado para toda a América do Sul. Neste modelo, acrescentaram-se 109 reservatórios de usinas de geração de energia hidrelétrica que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) - controlados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) – representados no modelo através de substituição das vazões calculadas pelas observadas nos pontos onde existem os reservatórios na rede de drenagem, e 34 deles foram simulados com uma regra de operação simples. Uma análise exploratória dos dados de reservatórios do ONS e do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), da Agência Nacional de Águas (ANA) mostrou que as vazões afluente e defluente são altamente correlacionadas, apresentando correlação média de 0.79; vazão defluente e volume, vazão defluente e cota, e vazão defluente e época do ano possuem correlações médias menores (0.31, 0.22 e 0.19 respectivamente). O resultado da aplicação do método em relação a simulação sem a inserção dos reservatórios melhorou na maioria das regiões, todavia houve uma diminuição no desempenho em outras. A simulação com vazões substituídas apresentou um Índice de Melhoria no Desempenho médio (IMD) para a Eficiência de Kling-Gupta (KGE) de 21%, em relação ao modelo com vazões naturalizadas. A simulação com regra simples teve um IMD de 2% para o KGE. Ambas possuem capacidade para representar vazões de maneira satisfatória (Mediana do KGE = 0.68). Quanto ao impacto dos reservatórios no regime de vazões, a diferença média percentual em termos absolutos entre as vazões anuais naturais e substituídas, para toda a América do Sul, é de 1,8%. Para as quatro principais bacias sul-americanas (Amazônica, Tocantins, São Francisco e Bacia do Prata) a diferença é de 0,1%, 16,3%, 18,0% e 6,0 %, respectivamente.

**Palavras-chave:** hidrologia, modelo hidrológico, reservatório.



## ABSTRACT

Tens of thousands of dams were built around the world to reduce flood risks and maximize the benefits of limited freshwater resources. In Brazil, the main and largest reservoirs are for hydropower production. However, they can generate significant changes in the hydrological regime, such as mitigation and hydrograph delay; and impacts on biota and sedimentation. Therefore, it is extremely important to study and evaluate the impact and dynamics of reservoirs in the flow regime. This can be done through a hydrological model, which represents the processes of water generation and water flow in rivers. One example is the Large Scale Hydrological Model (MGB, in the Portuguese acronym), a conceptual and semi-distributed hydrological model already applied to all of South America. In this model, we added the simulation of 109 reservoirs of hydroelectric power generation plants that are part of the National Interconnected System (SIN) - controlled by the National System Operator (ONS) - represented in the model by replacing the discharge calculated by the discharge observed at the points where a reservoirs in the drainage network exist, and 34 of them were simulated with a simple operating rule. The exploratory analysis of the ONS reservoir data and the Reservoir Monitoring System (SAR) of the National Water Agency (ANA) data showed that the reservoir's inflow and outflow are highly correlated, presenting an average correlation of 0.79; outflow and volume, outflow and elevation, and discharge and time of year have lower average correlations (0.31, 0.22 and 0.19 respectively). The result of the application of the method in relation to the simulation without the insertion of the reservoirs has improved in most regions, however there was a performance decrease in other regions. The substituted flow simulation presented a mean improvement for Kling-Gupta Efficiency (KGE) of 21%, when compared to the naturalized flow model. The simulation with simple rule had 20% improvement for the KGE. Both simulations have the capacity to represent flows satisfactorily (KGE Median = 0.68). Regarding the impact of the reservoirs on the hydrological regime, the average absolute percentage difference between the natural and substituted annual flows for all of South America is 1.8%. For the four main South American basins (Amazon, Tocantins, São Francisco and Prata) the difference is 0.1, 16.3, 18.0 and 6.0%, respectively.

**Keywords:** hydrology, hydrologic modeling, reservoirs

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Barragens hidrelétricas existentes (LEHNER <i>et al.</i> , 2011) e as em construção ou planejadas .....	18
Figura 2 - Curvas de permanência hipotética de vazão afluente e defluente de um reservatório .....	19
Figura 3 - Variação de armazenamento sazonal nos reservatórios para 32 bacias globais .....	20
Figura 4 - Representação do módulo de reservatórios proposto por Zhao et al. ....	23
Figura 5 - Exemplo de curva-guia para controle de cheias com volume de espera variável durante o ano .....	25
Figura 6 - Geração de energia no SIN de janeiro de 2000 a março de 2015 .....	26
Figura 7 - O erro médio absoluto como porcentagem da capacidade do reservatório .....	29
Figura 8 – Distribuição global dos lagos e reservatórios da base de dados HydroLAKES .....	30
Figura 9 - Distribuição geográfica dos lagos e reservatórios analisados por Busker <i>et al.</i> (2018) .....	31
Figura 10 - Processos envolvidos em um modelo hidrológico.....	33
Figura 11 – Fluxograma de funcionamento do WaterGAP .....	40
Figura 12 – Localização e extensão dos reservatórios no modelo LEAF-Hydro-Flood-Dam ..	43
Figura 13 - Representação esquemática do modelo hidrológico MGB.....	45
Figura 14 - <i>Boxplots</i> dos desempenhos dos modelos globais e continental .....	46
Figura 15 - Localização dos lagos e reservatórios dentro do modelo global LISFLOOD .....	49
Figura 16 - Desempenho de modelos hidrológicos de acordo com seu esquema de saída de água.....	52
Figura 17 - Fluxograma resumo da metodologia.....	53

Figura 18 - Localização dos 109 reservatórios simulados.....	54
Figura 19 - Perfil longitudinal do Rio White baseado no MDE da SRTM .....	56
Figura 20 - Minibacias do reservatório de Irapé.....	58
Figura 21 - Projeto SAME Water .....	59
Figura 22 - Localização dos seis reservatórios da análise exploratória.....	62
Figura 23 – Vazões afluentes e defluentes de seis reservatórios hidrelétricos brasileiros .....	62
Figura 24 –Porcentagem do volume útil pela cota, para quatro reservatórios hidrelétricos brasileiros .....	63
Figura 25 - Cota de seis reservatórios hidrelétricos brasileiros ao longo do tempo.....	63
Figura 26 - Vazão defluente de seis reservatórios hidroelétricos brasileiros em função do armazenamento (cota d'água) e estação do ano .....	64
Figura 27 - Vazão defluente média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros .....	65
Figura 28 - Vazão afluente média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros .....	65
Figura 29 - Cota média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros .....	66
Figura 30 - Porcentagem do volume útil média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros.....	66
Figura 31 - Histogramas de correlações .....	67
Figura 32 - Correlação pela capacidade de armazenamento do reservatório .....	68
Figura 33 - Correlação pelo tempo de residência .....	68
Figura 34 - Índice de melhoria de desempenho na simulação S .....	70
Figura 35 - Localização dos seis reservatórios para os quais apresentaram-se resultados de vazões substituídas .....	71

Figura 36 - Hidrogramas das simulações N e S .....	71
Figura 37 - Índice de melhoria de desempenho para a simulação D.....	72
Figura 38 - Hidrogramas das simulações D e N.....	73
Figura 39 - Hidrograma a jusante do reservatório de Irapé.....	73
Figura 40 - IMD x Volume do reservatório.....	74
Figura 41 - Mapas mostrando a alteração no regime de vazões nos trechos de rios devido à presença de reservatórios.....	76
Figura 42 – <b>RMSE</b> e <b>r</b> (correlação) entre as vazões naturalizadas e substituídas pelo logaritmo da área da bacia.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bases de dados de reservatórios. ....	28
Tabela 2 - Características de reservatórios da América do Sul .....	29
Tabela 3 - Distribuição e características morfológicas de lagos ao redor do mundo .....	31
Tabela 4 - Bases de dados utilizadas no modelo MGB para a América do Sul .....	59
Tabela 5 – Acima, percentil 10 (P10), percentil 90 (P90) e mediana (Ma) dos índices de desempenho para as 3 simulações; abaixo, o índice de melhoria de desempenho .....	75
Tabela 6 - Média da diferença na vazão anual no exutório das principais bacias brasileiras ..	76

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL .....	16
2.2	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1	O IMPACTO DOS RESERVATÓRIOS .....	17
<b>3.1.1</b>	<b>Impactos no ciclo hidrológico</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Impactos na Biota</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Impacto nos sedimentos</b> .....	<b>21</b>
3.2	MODELAGEM DE RESERVATÓRIOS .....	22
<b>3.2.1</b>	<b>Curvas-guia</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.2</b>	<b>O Operador Nacional do Sistema (ONS) e o SIN</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Bases e obtenção de dados</b> .....	<b>26</b>
3.2.3.1	O Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), da ANA .....	32
3.2.3.2	Dados do Operador Nacional do Sistema (ONS) .....	32
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA .....	32
3.3.1.1	Modelagem hidrológica .....	33
3.3.1.2	Modelagem Hidrodinâmica .....	36
<b>3.3.2</b>	<b>Modelos Hidrológicos Regionais</b> .....	<b>38</b>
3.3.2.1	WaterGAP .....	39
3.3.2.2	LISFLOOD .....	40
3.3.2.3	LEAF-Hydro-Flood-Dam .....	42
3.3.2.4	O Modelo de Grandes Bacias (MGB) .....	44
3.4	HISTÓRICO DA MODELAGEM GLOBAL DE RESERVATÓRIOS .....	47
3.5	MODELOS COM VAZÕES SUBSTITUÍDAS .....	51
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
4.1	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS .....	54
4.2	O MÓDULO DE RESERVATÓRIOS NO MGB .....	55
<b>4.2.1</b>	<b>Modelo com vazões substituídas</b> .....	<b>55</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Informação topo-batimétrica e demais características</b> .....	<b>55</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Cálculo do balanço de massa no reservatório</b> .....	<b>56</b>

<b>4.2.4</b>	<b>Estimativa da vazão defluente.....</b>	<b>57</b>
4.3	O MODELO HIDROLÓGICO DA AMÉRICA DO SUL .....	58
4.4	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	60
4.5	ANÁLISE DO IMPACTO DOS RESERVATÓRIOS NO REGIME DE VAZÕES .....	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
5.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO COMPORTAMENTO DE RESERVATÓRIOS .....	61
5.2	MODELO COM VAZÕES SUBSTITUÍDAS .....	69
5.3	MODELO COM REGRA DE OPERAÇÃO SIMPLES .....	72
5.4	ANÁLISE DO IMPACTO DOS RESERVATÓRIOS NO REGIME DE VAZÕES .....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO A – AS USINAS HIDRELÉTRICAS DO SIN.....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS SIMULADOS .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Terra está mudando devido a alterações antrópicas nos usos do solo, padrões de vegetação e ao manejo dos recursos hídricos. Em cem anos a população quadruplicou, atualmente somos 7 bilhões, metade vive em áreas urbanas, e uma rápida urbanização está ocorrendo em muitas regiões desenvolvidas e em desenvolvimento do mundo (KLEIN GOLDEWIJK *et al.*, 2011). Para alimentação, a área irrigada para agricultura aumentou seis vezes no último século (SIEBERT *et al.*, 2015) e a necessidade de água continua aumentando, dominada pela agricultura (>70%). No Brasil, a irrigação representa cerca de 50% da retirada total estimada e 70% do consumo total estimado de água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018).

A urbanização rápida e o desenvolvimento econômico são forçantes para aumentar a demanda de água (WADA *et al.*, 2016). Além disso, mudanças climáticas podem piorar a situação, pois, devido ao possível aumento de temperatura em terras agrícolas, a demanda tenderá a crescer ainda mais (DIRMEYER *et al.*, 2014; WADA *et al.*, 2013a, b; HADDELAND *et al.*, 2014; SCHEWE *et al.*, 2014).

A água dos corpos hídricos é utilizada para diversos fins, como abastecimento humano, geração de energia, pecuária, irrigação, navegação, indústria, resfriamento de termelétricas, entre outros. Ou seja, a humanidade depende da água, e sofre com a variação natural do regime hidrológico (como secas e cheias) e também afeta diretamente o balanço natural da hidrologia. Alguns exemplos de alterações antrópicas são a mudança na qualidade da água e a construção de reservatórios.

Com o objetivo de maximizar os benefícios de recursos limitados de água doce e mitigar os riscos de inundação, foram construídas dezenas de milhares de barragens artificiais nos principais sistemas fluviais do mundo, com capacidade de armazenamento total superior a 8000 km<sup>3</sup> (NILSSON *et al.*, 2005; LEHNER *et al.*, 2011).

A geração de energia elétrica é o principal motivo para a implementação de reservatórios de grande porte no Brasil (BRAVO *et al.*, 2009), correspondendo a 65,2% da energia elétrica consumida no Brasil (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). Com a seca severa que atingiu as principais bacias no final de 2012, daquele período até 2015 a participação das



hidrelétricas na geração de energia foi de, em média, 76%, com muita utilização das usinas térmicas e grande deplecionamento dos reservatórios, enquanto entre 2000 e 2012, em média 91% da geração era hidrelétrica (ZAMBON, 2015).

Entretanto, questiona-se o quanto essas grandes intervenções estruturais causam alterações nos regimes hidrológicos naturais. Reservatórios armazenam a água e a liberam conforme o padrão temporal exigido pela demanda, suavizando o hidrograma; causam um aumento na evaporação, logo, diminuem a vazão total; afetam a sazonalidade do hidrograma; limitam o transporte de sedimentos e nutrientes; a fragmentação do rio diminui a conectividade natural dentro e entre os sistemas fluviais; entre outros impactos. Normalmente são realizados estudos em pequenas regiões ou cascatas de reservatórios, entretanto não se conhece o impacto desses reservatórios no regime de vazões em escala nacional.

Estudos recentes mostraram o papel das intervenções humanas (usos d'água e regulação por reservatórios) em eventos de secas, cheias e escassez de água (DI BALDASSARRE *et al.*, 2017; HADDELAND *et al.*, 2014; HE *et al.*, 2017). O stress da água no solo é raramente avaliado no contexto das necessidades antrópicas (SCHYNS *et al.*, 2015), mesmo que a água já presente no solo (a parcela não-irrigada) seja a principal fonte de água para produção de alimentos (aproximadamente ~80%, KUMMU *et al.*, 2014). Os estudos globais e regionais mais recentes mostram que as atividades humanas não podem mais ser desprezadas em modelos hidrológicos, a hidrologia deve ser tratada como um sistema interligado entre homem e natureza (WADA *et al.*, 2017).

Em termos globais, o conhecimento da dinâmica espaço-temporal do armazenamento em lagos e reservatórios é baixo (BUSKER *et al.*, 2018). Apesar de sua importância para as reservas de água doce, o monitoramento sistemático desses mananciais é muito limitado (GAO, 2015). As redes de medição que registram o armazenamento dos reservatórios são menos unificadas que as redes de monitoramento para medição de vazões naturais e seus registros nem sempre são compartilhados. O sensoriamento remoto é uma alternativa para se criar bases de dados globais com informações das características de lagos e reservatórios (GAO *et al.*, 2012). As simulações podem ser comparadas com essas estimativas, bem como com os dados medidos *in situ*.

Compreender e representar da melhor maneira possível os processos de geração e escoamento de água em rios tem sido continuamente objeto de estudo em áreas como a hidráulica e a hidrologia. Nos anos 90, surgiu a primeira geração de modelos hidrológicos em grande escala

(LHMs, na sigla em inglês), os quais resolvem o balanço hídrico local de forma consistente em grandes escalas e calculam a descarga do rio propagando o escoamento sobre uma rede fluvial construída a partir de informações topográficas (BIERKENS, 2015). Recentemente os LHMs incorporaram melhor os processos hidrológicos, com melhor base física e melhor representação dos processos. Por exemplo, já se calcula vazão de água e armazenamento para cada componente hidrológico individual, como rios, lagos, reservatórios, água subterrânea, entre outros (por exemplo, DÖLL *et al.*, 2003; HANASAKI *et al.*, 2008a, b; ROST *et al.*, 2008; WADA *et al.*, 2011; POKHREL *et al.*, 2012).

Naquela fase inicial (anos 90), poucos modelos consideraram a interação entre os fluxos de água terrestres e as atividades humanas, incluindo a regulação dos reservatórios (NAZEMI e WHEATER, 2015a, b). Apesar de muitos LHMs terem incorporado os impactos humanos no ciclo hidrológico, muitas incertezas ainda persistem nas simulações (DÖLL *et al.*, 2016). Além disso, os modelos de grande escala atuais não levam em conta, apesar de serem relevantes, os conflitos de usos d'água como abastecimento, irrigação, controle de cheias e geração de energia hidrelétrica, e entre usuários a montante e jusante. Esses conflitos têm origem sociais, culturais e econômicas. As decisões que levam a eles são quanto à localização, expansão da capacidade, cultura à plantar, onde e quando etc. E essas decisões estão fora do alcance da modelagem hidrológica.

O Modelo de Grandes Bacias (MGB, COLLISCHONN e TUCCI, 2001; COLLISCHONN *et al.*, 2007a; PAIVA *et al.*, 2013a; PONTES *et al.*, 2017) é um modelo hidrológico conceitual e semi-distribuído, desenvolvido para grandes bacias tropicais, já aplicado para todas as bacias da América do Sul, e com bons resultados na maior parte delas. Alguns trabalhos exploraram a simulação direta de reservatórios no MGB (COLLISCHONN *et al.*, 2011; FLEISCHMANN *et al.*, 2015), entretanto, sendo estudos pontuais, a modelagem de reservatórios no MGB ainda não está consolidada. O objetivo deste trabalho é avaliar métodos e melhorar uma rotina para a simulação de reservatórios neste modelo, com passo de tempo diário, visando permitir uma fácil consideração de barragens nas simulações hidrológicas de grandes bacias, com enfoque em escala regional e continental. Será mostrado um estudo de caso para os reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN), do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Além disso, não foi encontrado registro na bibliografia de um estudo nacional avaliando o que governa a dinâmica dos grandes reservatórios brasileiros, e nem analisando seu impacto no regime de vazões. Esses também são objetivos do presente trabalho.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar metodologias para a simulação de reservatórios em um modelo hidrológico de escala continental, com passo de tempo diário, e verificar seus impactos no regime de vazões em escala nacional.

### 2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) avaliar a existência de correlação entre variáveis operativas dos reservatórios;
- b) avaliar métodos de simulação disponíveis de reservatório em escala continental;
- c) avaliar a capacidade do modelo de representar vazões nos rios com a consideração dos reservatórios;
- d) verificar o impacto de grandes reservatórios no regime de vazões em escala nacional;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentado o estado da arte dos trabalhos que mostram conceitos e resultados úteis para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como os avanços da ciência na área de modelagem de lagos e reservatórios em escala continental. Ao longo do texto é feito o máximo esforço para distinguir os lagos “naturais” dos “reservatórios produzidos pelo homem”. Entretanto, o termo geral “reservatório” é usado nos casos em que a distinção é considerada desnecessária.

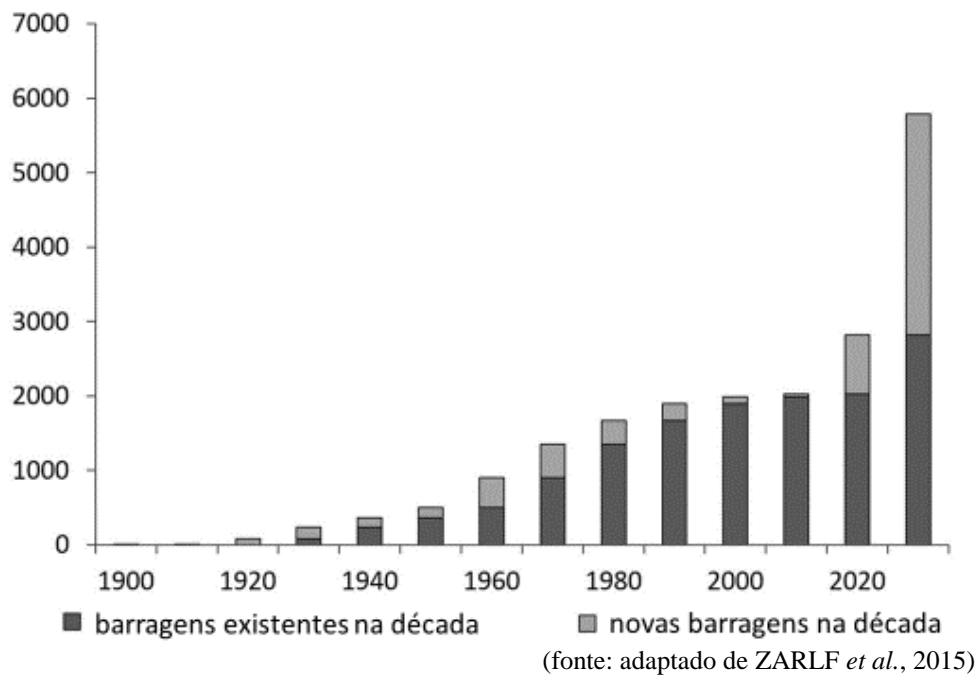
#### 3.1 O IMPACTO DOS RESERVATÓRIOS

Em diversas regiões, uma condição necessária para a boa prática no gerenciamento dos recursos hídricos é a construção de barramentos. O Registro Mundial de Barragens (WRD, na sigla em inglês), elaborado pela Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2017) classifica o propósito do reservatório em oito classes: energia hidrelétrica, abastecimento (seja ele agrícola, municipal ou industrial), controle de inundações, irrigação, navegação, recreação, piscicultura e outros. Todavia, essas intervenções estruturais geram significativas alterações na biota e nos regimes hidrológicos.

Os lagos (naturais e artificiais) cobrem apenas uma pequena parte da superfície terrestre, aproximadamente 3,7% (VERPOORTER *et al.*, 2014). Entretanto, estes expandem a superfície de água continental em cerca de 305 000 km<sup>2</sup> globalmente (LEHNER *et al.*, 2011). Segundo Nilsson *et al.* (2005), mais de metade dos grandes sistemas fluviais do mundo são atualmente impactados por barragens.

A demanda de água e energia hidrelétrica é cada vez mais impulsionada por i) uma população em rápido crescimento; ii) aumento da atividade econômica e; iii) mudanças climáticas (OKI e KANAE, 2006). O número de construções de barragens aumentou ao longo das últimas seis décadas, e prevê-se que continue aumentando, particularmente em regiões menos industrializadas (CHAO *et al.*, 2008; DUAN e BASTIAANSEN, 2013). No futuro, a construção de barragens deverá continuar, com mais de 3700 grandes represas atualmente planejadas ou em construção (ZARFL *et al.*, 2015, Figura 1).

Figura 1 –Barragens hidrelétricas existentes (LEHNER *et al.*, 2011) e as em construção ou planejadas



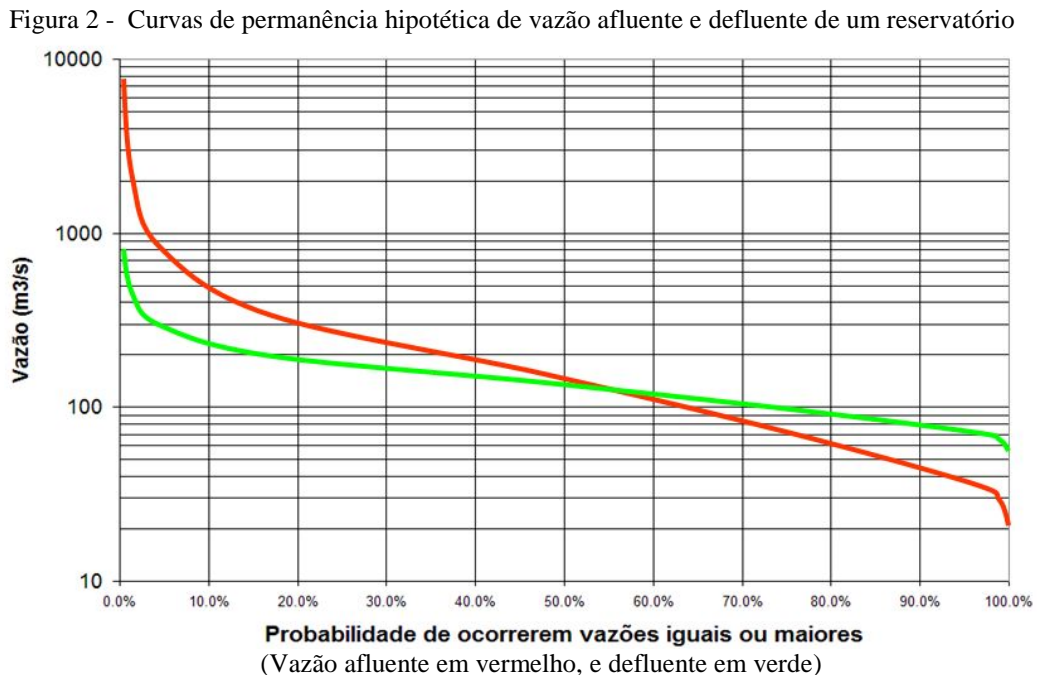
Um total de mais de 58.000 grandes barragens estão incluídas no WRD, com uma capacidade de armazenamento total de cerca de 8300 km<sup>3</sup> em 2000 (CHAO *et al.*, 2008; ICOLD, 2018). Entretanto, parte dessas são a fio d'água, sem um armazenamento significativo, e então com pouco efeito no regime hidrológico, embora com impactos em outros aspectos ambientais, como o fluxo migratório de espécies e demais efeitos explicados na seção 3.1.2.

### 3.1.1 Impactos no ciclo hidrológico

Segundo Zajac *et al.* (2017), o efeito geral dos lagos naturais é atenuar os picos dos hidrogramas e atrasá-los, devido à evaporação e ao aumento do tempo de detenção. A vazão de saída dos lagos é condicionada pela sua área superficial, clima, magnitude da vazão de entrada a montante, bem como das características do seu exutório.

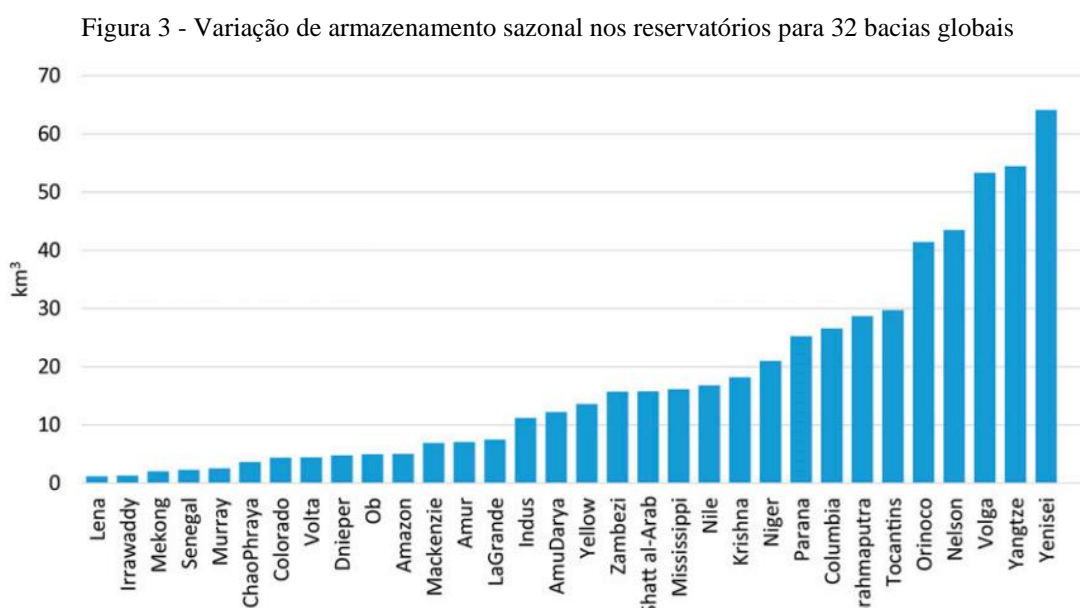
Barragens são de suma importância, pois reduzem a distribuição temporal desigual das chuvas e conseqüentemente da vazão (SHIKLOMANOV, 2000). Comparado com a extração de água diretamente de córregos, um sistema de abastecimento de água baseado em reservatórios aumenta a confiabilidade da oferta na maioria das regiões (MOY *et al.*, 1986). Eles são o principal recurso hídrico para quase metade da agricultura irrigada mundial, fornecendo aproximadamente 460 km<sup>3</sup> de água por ano (BIEMANS *et al.*, 2011; HANASAKI *et al.*, 2006).

Os lagos artificiais causam um aumento da evaporação. Logo, diminuem a vazão e afetam a sazonalidade do hidrograma. Eles levam a uma diminuição da amplitude sazonal da vazão (DÖLL *et al.*, 2009; GALLEGO-ELVIRA *et al.*, 2010; GÖKBULAK e ÖZHAN, 2006). Collischonn *et al.* (2011) corroboram a afirmação anterior. Em seu trabalho, concluíram que a simples presença dos reservatórios de irrigação para lavouras de arroz localizados nas cabeceiras dos afluentes implica numa redução da vazão do rio, pois parte da água é consumida pela evaporação. A retirada de água para irrigação a partir dos açudes não afeta muito mais as vazões do rio do que a presença dos reservatórios em si. A Figura 2 apresenta as curvas de permanência de vazão afluente (entrada) e defluente (saída) de um reservatório genérico com grande volume e capacidade de regularização. O efeito dela sobre a curva de permanência é torná-la mais horizontal, com valores próximos da mediana durante a maior parte do tempo.



Os reservatórios criaram um “atraso” no aumento global do nível do mar, pois a água fica retida no continente. Lettenmaier e Milly (2009) estimaram que os reservatórios causaram uma queda equivalente do nível do mar de cerca de 20,5 mm/ano (usando uma escala de tempo decenal) e sugeriram que a taxa diminuiu nos últimos anos por causa de uma desaceleração na construção de barragens novas. Chao *et al.* (2008) deram uma estimativa diferente, uma queda de 0,55mm/ano (totalizando 30 mm nos últimos 50 anos). Vörösmarty *et al.* (1997) estimaram que 20% do escoamento anual médio global pode estar mantido em reservatórios e que o tempo de residência do escoamento terrestre global provavelmente triplicou devido ao armazenamento.

Além de todos os impactos já citados, Zajac *et al.* (2017) concordam que os lagos e especialmente os reservatórios exercem uma influência importante nas vazões em muitas bacias hidrográficas, muitas vezes representando uma grande variação no armazenamento (Figura 3). E isso está de acordo com vários estudos anteriores (BIEMANS *et al.*, 2011; COE, 2000; DÖLL *et al.*, 2009; HADDELAND *et al.*, 2006; HANASAKI *et al.*, 2006; MEIGH *et al.*, 1999; VÖRÖSMARTY *et al.*, 1997; ZHOU *et al.*, 2016).



(fonte: ZHOU *et al.*, 2016)

### 3.1.2 Impactos na Biota

A operação da barragem, em particular o armazenamento de água, é o principal contribuinte da regulação das vazões, muitas vezes com o objetivo de eliminar vazões máximas, estabilizar as vazões baixas ou adulterar ou desviar vazões dos rios. Essas alterações podem prejudicar o funcionamento ecológico (WARD e STANFORD, 1995; PRINGLE *et al.*, 2000; CARLISLE *et al.*, 2011), por exemplo, alterando os regimes térmicos (POOLE e BERMAN, 2001) ou interrompendo ciclos de vida de espécies de água doce. Por sua vez, isso pode causar a perda de espécies endêmicas ou a invasão de exóticos (AGOSTINHO *et al.*, 1992; BUNN e ARTHINGTON, 2002), reduzindo, assim, a biodiversidade geral (POFF *et al.*, 2007; LIERMANN *et al.*, 2012). Embora a mobilidade dos peixes também dependa dos elementos do projeto do reservatório, como o desvio utilizado - escada para peixes -, a alteração na vazão mostrou impactos consistentemente negativos sobre a saúde dos peixes (MOSTAFAVI *et al.*, 2015; POFF e ZIMMERMAN, 2010).

As barragens têm impactos substanciais na integridade ecológica dos sistemas aquáticos e na diversidade dos sistemas fluviais, sistemas esses que fornecem recursos importantes para comunidades rurais e economias regionais (ARTHINGTON *et al.*, 2010; RICHTER *et al.*, 2010; TOCKNER e STANFORD, 2002). Elas alteram as vazões dos rios e limitam o transporte de sedimentos, nutrientes e biota, causando impactos ecologicamente prejudiciais ao sistema do rio natural (LIGON *et al.*, 1995). Além disso, a variação no armazenamento dos reservatórios tem importante implicação no ciclo do carbono. Por exemplo, Tranvik *et al.* (2009) estimaram que as emissões para a atmosfera de CO<sub>2</sub> das águas continentais (incluindo lagos, reservatórios, planícies inundadas e rios) são semelhantes em magnitude à absorção de CO<sub>2</sub> pelos oceanos. Esse é um papel crucial na atividade biogeoquímica de lagos e zonas úmidas (BALMER e DOWNING, 2011; COLE *et al.*, 2007; RICHEY *et al.*, 2002).

A fragmentação do rio diminui a conectividade natural dentro e entre os sistemas fluviais (TISCHENDORF e FAHRIG, 2000; MOILANEN e HANSKI, 2001). Define-se a conectividade de um ponto de vista ecológico com foco na hidrologia como "transferência de matéria, energia ou organismos mediada pela água dentro ou entre elementos do ciclo hidrológico" (PRINGLE, 2003). A conectividade longitudinal é importante para a ecologia devido à sua relação com a migração e dispersão das espécies (FUKUSHIMA *et al.*, 2007; COTE *et al.*, 2009; ZIV *et al.*, 2012), bem como seu papel na estrutura da comunidade e nos padrões de biodiversidade nos canais (ALTERMATT, 2013). A conectividade longitudinal e lateral também funciona como via de transporte de matéria orgânica e inorgânica a jusante, em zonas ripárias e planícies de inundação (SYVITSKI *et al.*, 2009; NILSSON *et al.*, 2010). Grill *et al.* (2015) mostraram que, globalmente, 48% do volume dos rios é impactado de forma moderada a grave por regulação de vazões, fragmentação ou ambos.

### **3.1.3 Impacto nos sedimentos**

Com relação à sedimentação, a pesquisa realizada pelo Conselho de Desenvolvimento de Água do Texas (TWDB, na sigla em inglês) em junho de 2005 sugere que o volume de conservação de Lake Whitney diminuiu 11,6% nos últimos 50 anos (com taxa de sedimentação de cerca de  $1,91 \times 10^6$  m<sup>3</sup> / ano) (TWDB, 2006). Se os reservatórios retêm os sedimentos, obviamente a sua concentração a jusante da barragem é menor. Kummu *et al.* (2006) mostraram que os sólidos suspensos totais (SST) diminuíram pela metade numa estação de medição localizada 660 km a jusante da barragem de Manwan, a primeira da cascata localizada no rio Mekong, na China. É



sabido que os reservatórios reduzem a distribuição de sedimentos para planícies de inundação e deltas (SYVITSKI *et al.*, 2009), causando impactos negativos na biota.

Lopes *et al.* (2015) estudaram a sedimentação ocorrida de 1978 até 2009 no reservatório de Sobradinho. A taxa de sedimentação foi de 8,25%, com um volume acumulado de 3,33 km<sup>3</sup>. Lima *et al.* (2001) avaliaram o comportamento hidrossedimentológico da bacia do rio São Francisco por meio da análise do fluxo de sedimentos em suspensão nas estações fluviométricas. Com base nos resultados, os autores estimaram um tempo de vida útil do reservatório de Sobradinho de 545 anos. A estimativa de vida útil do trabalho de Lopes *et al.* (2015) reduziria à metade do tempo estimado por Lima *et al.* (2001). A retenção de sedimentos nos reservatórios foi responsável por mudanças morfológicas na foz do Rio São Francisco (BANDEIRA *et al.*, 2013).

### 3.2 MODELAGEM DE RESERVATÓRIOS

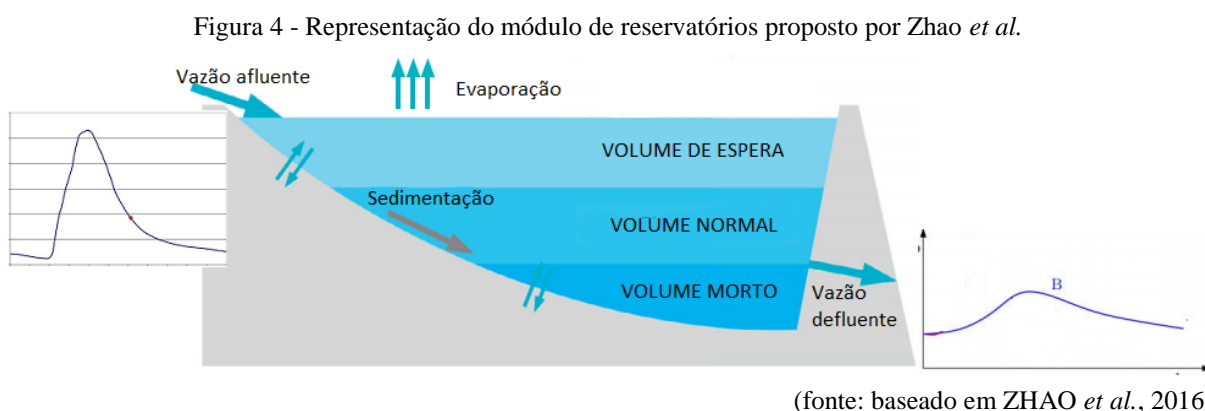
Os primeiros modelos hidrológicos eram mais simples, e consideravam regime permanente e mistura vertical completa. Após, os modelos ecológicos incorporaram processos hidrodinâmicos uni e bidimensionais, tais como advecção e difusão, e hoje em dia os processos são representados até em 3 dimensões.

Em reservatórios relativamente curtos, a linha d'água é aproximadamente horizontal e o escoamento é caracterizado por uma baixa velocidade e grande profundidade. Para estes casos, são utilizados modelos do tipo Armazenamento para descrever o comportamento do escoamento, pois os efeitos dinâmicos são desprezíveis perto da variação do armazenamento. Em reservatórios longos e rasos, as hipóteses descritas não são válidas. Neste caso, o reservatório deve ser considerado como um rio, e as equações de propagação de escoamento em canais devem ser utilizadas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

A regularização causada pelos reservatórios difere consideravelmente entre os modelos hidrológicos (MASAKI *et al.*, 2017). Esses autores foram os primeiros a comparar os resultados da simulação das operações de reservatório entre cinco modelos hidrológicos de grande escala. Eles usaram o conjunto retrospectivo de dados de simulação multi-modelo do projeto ISIMIP 2a (<https://www.isimip.org/>) e focaram nos reservatórios dos rios Missouri e Colorado nos EUA. Embora todos os modelos adotassem algoritmos similares de operação do reservatório e usassem dados meteorológicos e geográficos harmonizados, houve diferenças consideráveis

entre eles. Essas diferenças são atribuídas não apenas aos esquemas de operação, mas também à magnitude da vazão simulada afluyente. Os resultados foram analisados para apenas dois rios nos EUA; seria necessária uma comparação sistemática que abranja outras regiões do mundo.

Normalmente, os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão desconsideram os usos d'água para fazer a calibração, ou então tentam evitar a influência dos reservatórios e retiradas de água. Entretanto, quando esses processos são importantes e não podem ser desprezados, são feitas correções nos dados, através de séries naturalizadas (HADDELAND *et al.*, 2006; COLLISCHONN *et al.*, 2007b). Uma outra opção é utilizar séries de vazões substituídas, ou seja, colocar a vazão de saída do reservatório medida *in situ* diretamente no modelo, como um dado de entrada.



Os reservatórios podem ser divididos em volume inativo (ou “morto”), volume normal (ou de “conservação”), e volume de espera (controle de cheias) (Figura 4). A soma do volume normal e de controle de cheias forma o volume útil do reservatório. Num reservatório de hidrelétrica, o volume normal também será responsável por fornecer água para as turbinas. Como a vazão de entrada varia de acordo com a estação, é uma prática comum que o topo do volume normal seja ajustado pelos operadores do reservatório. O volume inativo (ou seja, "volume morto") é a parte inferior de um reservatório que serve para contenção de sedimentos e a proteção do ecossistema. O nível ideal de um reservatório é aquele definido conforme os objetivos aos quais ele se propõe. Isso pode variar conforme a época do ano, previsões meteorológicas e outros aspectos. Por exemplo, pode-se operar o reservatório para que ele fique com seu nível d'água no topo do volume normal. Se o armazenamento atual for mantido a este nível, o reservatório terá espaço suficiente para armazenar possíveis inundações recebidas de montante - e também poderá liberar bastante água (do volume útil) para vários usos da água (ZHAO *et al.*, 2016).

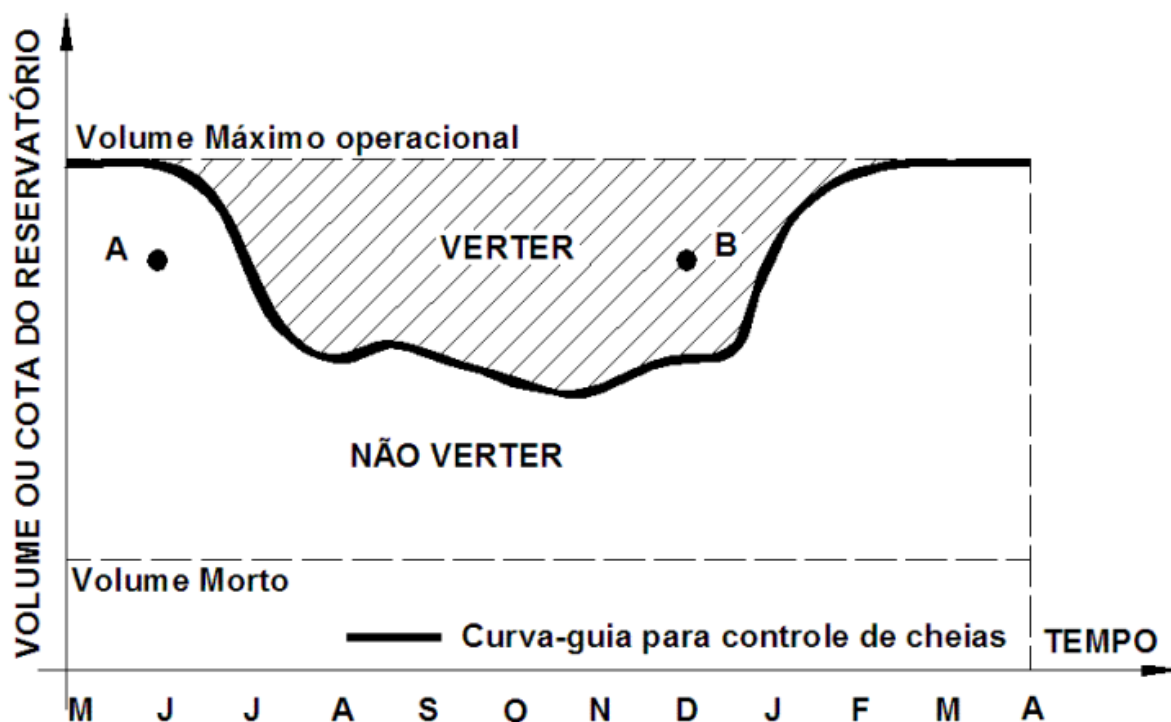
Mamede *et. al* (2018) foram uns dos poucos a avaliar o impacto causado por múltiplos reservatórios na dinâmica de sedimentos, em uma bacia semiárida brasileira (Benguê). Os reservatórios são capazes de reter aproximadamente 21% do escoamento gerado e quase 42% dos sedimentos da bacia no período de simulação, de 2000 a 2012.

Quanto a inclusão de reservatórios em modelos hidrológicos, um breve histórico será mostrado na seção 3.4, com foco em modelagem regional e global. Ao incluí-los nestes modelos, uma das dificuldades é encontrar informações detalhadas sobre as curvas cota-área-volume (hipsometria), sobre suas estruturas de saída, ou sobre as regras operativas (COLISCHONN *et al.*, 2011; ZAJAC *et al.*, 2017). Algumas alternativas para estimar a hipsometria serão mostradas na seção 3.2.3 - Bases e obtenção de dados. O ideal é obter a curva diretamente com o operador do reservatório. Quanto à vazão defluente, os reservatórios são operados de diversas formas. São utilizadas curvas-guias, descritas na seção 3.2.1. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é operado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) com o objetivo principal de minimizar o risco de déficits na geração de energia e o risco da geração térmica pela manutenção de volumes de espera nos reservatórios (seção 3.2.2). É possível, ainda, utilizar uma regra simples aplicável a todos os reservatórios, como alguns autores vem desenvolvendo. Essa será a abordagem aqui utilizada, mostrada adiante no trabalho.

### 3.2.1 Curvas-guia

As curvas-guia definem as vazões defluentes em função do volume (ou nível d'água) do reservatório, para cada época do ano. Elas são usadas para indicar volumes (ou níveis d'água) alvos ou ideais do reservatório visando determinados objetivos (maximizar benefícios da geração de energia, minimizar danos por uma cheia, maximizar vazões defluentes mínimas) (WURBS, 1996). Esta curva representa uma regra de operação simples para controle de cheias que pode ser expressa como segue: se o nível d'água no reservatório estiver acima da curva-guia, é necessário defluir; se estiver abaixo, não. Um exemplo simples de curva-guia é apresentado na Figura 5. A sua grande vantagem é a simplicidade de utilização para o operador da barragem. Entretanto, elas desconsideram as circunstâncias atuais das condições meteorológicas e das bacias hidrográficas (HOWARD, 1999). Uma alternativa seria utilizar dados observados em tempo real e modelos hidrológicos que satisfaçam as restrições e maximizem uma função objetivo.

Figura 5 - Exemplo de curva-guia para controle de cheias com volume de espera variável durante o ano



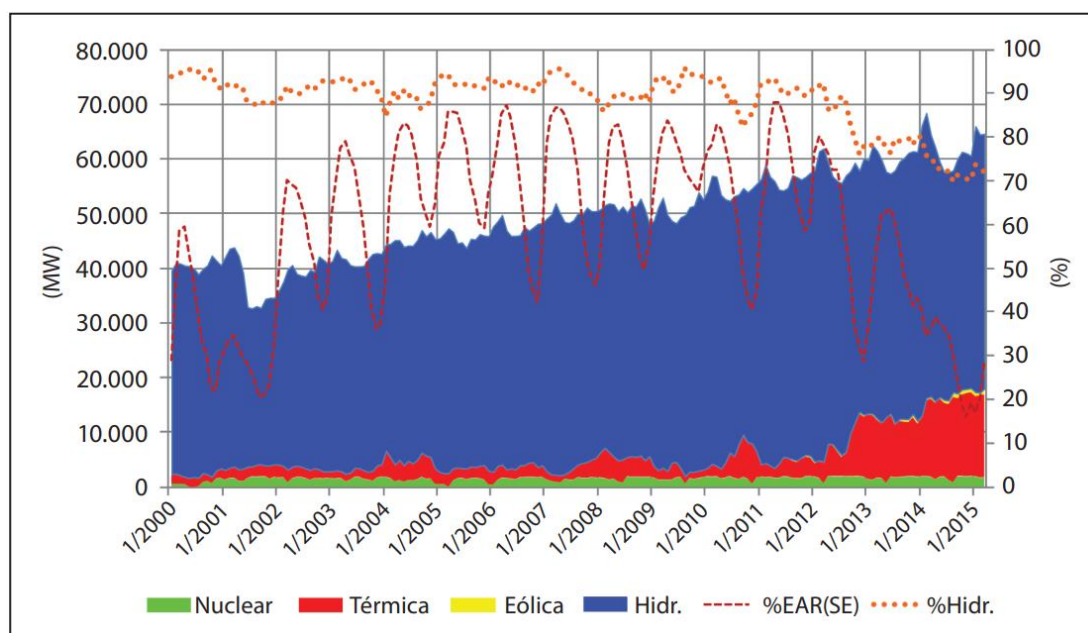
Na situação dada pelo ponto A, não é necessário verter. Enquanto em B verte-se até alcançar novamente a curva guia. A operação é diferente apesar do nível do reservatório ser mesmo. (Fonte: BRAVO et al., 2008)

Os reservatórios operados com o objetivo de reduzir inundações a jusante da barragem são mantidos em níveis mínimos para que as vazões máximas sejam reduzidas e as cheias possam ser absorvidas. Todavia, se a meta é atender demandas de água para irrigação, geração de energia e abastecimento, normalmente mantém-se o nível mais alto possível para garantir uma reserva de água que será utilizada durante os períodos de estiagem. Quando um mesmo reservatório é operado para atender os dois tipos de objetivos, surgem conflitos.

### 3.2.2 O Operador Nacional do Sistema (ONS) e o SIN

O ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de transmissão e geração de energia elétrica nos sistemas interligados brasileiros. É uma entidade privada, criada em 1998 (ONS, 2014). O Sistema Interligado Nacional (SIN) concentra 98,3% da capacidade de produção de eletricidade do país. O restante está em pequenos sistemas isolados, principalmente na região amazônica. A Figura 6 resume a geração média mensal do SIN, elaborada a partir de dados do histórico da operação (ONS, 2014). Por 13 anos (2000 a 2012), em média 91% da geração foi de origem hidrelétrica. O racionamento de 2001 é perceptível.

Figura 6 - Geração de energia no SIN de janeiro de 2000 a março de 2015



EAR - Energia Armazenada no Sistema, Hidr - produção hidrelétrica. (fonte: adaptado de ZAMBON, 2015)

Devido aos altos custos com a complementação através da energia térmica, aumentando a emissão de poluentes através da queima de combustíveis fósseis, procura-se maximizar a geração hidrelétrica durante o planejamento da operação do SIN. É um trabalho árduo, pois leva em conta a aleatoriedade das vazões afluentes, a expansão do sistema, vazões a jusante, demandas futuras etc. (ZAMBON, 2015). Atualmente, o ONS representa o SIN como quatro subsistemas interligados, onde todos os reservatórios dentro de cada um deles são tratados em um único reservatório equivalente. Isso é feito através de modelos desenvolvidos com a técnica da programação dinâmica dual estocástica (PDDE) (CEPEL, 2013). O Anexo A mostra um Diagrama Esquemático das Usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN).

### 3.2.3 Bases e obtenção de dados

As bases de dados publicamente disponíveis de níveis e volumes de reservatórios são escassas (BUSKER *et al.*, 2018). Além disso, grandes áreas do globo ainda sofrem de informações de vazão muito limitadas (por exemplo, partes da África, Ásia e América do Sul) (HUNGER e DOLL, 2007). Alguns dos conjuntos de dados globais disponíveis incluem a FAO AQUASTAT para bancos de dados de uso da água, dados de águas subterrâneas do IGRAC, o Centro de Dados de escoamento global (GRDC) para vazão no rio e, como já mencionado neste trabalho, o Registro Mundial de Barragens (WRD, na sigla em inglês), elaborado pela Comissão

Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, na sigla em inglês, 2017). Entretanto, o WRD é inadequado para a modelagem, pois não inclui informações geográficas (ou seja, latitude e longitude) para os reservatórios, e geralmente não possui informações sobre regras operacionais (LEHNER *et al.*, 2011), além de ser necessário pagar por este registro.

Existem apenas alguns conjuntos globais de dados de reservatórios (por exemplo, DOWNING *et al.*, 2006; LEHNER E DÖLL, 2004; MEYBECK, 1995; VERPOORTER *et al.*, 2014; MESSENGER *et al.*, 2016) e, quando fornecem uma estimativa de armazenamento de água, essas estimativas ou não são dinâmicas, ou não fornecem dados em uma série de tempo mais longa. Portanto, os dados de sensoriamento remoto podem ser uma alternativa valiosa para monitorar os volumes de água em reservatórios nas últimas décadas, como feito em trabalhos recentes (por exemplo, AVISSE *et al.*, 2017; CRÉTAUX *et al.*, 2016; DUAN e BASTIAANSEN, 2013; GAO *et al.*, 2012; SMITH e PAVELSKY, 2009; MCGUIRE *et al.*, 2006; CRÉTAUX e BIRKETT, 2006). A Tabela 1 mostra bases de dados globais de lagos e reservatórios, bem como parte das informações que elas trazem. A maioria foi obtida através de um sensor que mede a altimetria (como Jason, Topex/Poseidon, Cryosat), e/ou um sensor de imageamento (e.g. Modis, Landsat, Sentinel), e podem ainda incluir outras bases de dados existentes, como medições realizadas *in situ* e informações de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

A Resolução Conjunta da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL) 003-2010 diz que as usinas pertencentes ao SIN devem atualizar suas curvas cota-área-volume (batimetria) a cada 10 anos (ANA e ANEEL, 2010). Entretanto, batimetrias recentes em reservatórios da região semiárida, contratadas pela ANA, tiveram custo entre R\$ 1.200 e R\$ 4.400 por hectômetro cúbico (hm<sup>3</sup>) (COLLISCHONN e CLARKE, 2016). Isso reafirma a importância da utilização de bases de dados globais e gratuitas, e também do sensoriamento remoto. Ainda assim, é importante manter redes de observação *in situ* em paralelo com os avanços na tecnologia de sensoriamento remoto, pois os produtos derivados do satélite precisam ser verificados com observações independentes (FAMIGLIETTI *et al.*, 2015). Em última análise, um banco de dados de acesso aberto global de registros diários de reservatórios seria útil para melhorar ainda mais a simulação de qualquer modelo hidrológico ao incluir a dinâmica do reservatório (ZAJAC *et al.*, 2017). A seguir são apresentados alguns estudos globais de reservatórios, com resultados úteis para se comparar com os resultados dessa dissertação ou pesquisa.

Tabela 1 - Bases de dados de reservatórios.

Base de Dados	Autores	Informações	Global
-	Busker <i>et al.</i> , 2018	Curva cota-área	X
WRD	ICOLD, 2017	Capacidade, área e comprimento do reservatório, tipo, altura e nome da barragem, capacidade do vertedouro etc.	X
-	Avisse <i>et al.</i> , 2017	Elevação, área, variação do volume	
Hydroweb-LEGOS	Crétau <i>et al.</i> , 2016	Variação do nível (altimetria) e, para alguns, do volume	X
HidroLAKES	Messenger <i>et al.</i> , 2016	Área, volume, profundidade média, tempo de residência. 1.4 milhão de lagos >0.1 km <sup>2</sup> ,	X
GLOWABO	Verpoorter <i>et al.</i> , 2014	Tamanho (área e perímetro), distribuição geográfica, elevação, características morfométricas. 117 milhões de lagos > 0.002 km <sup>2</sup>	X
-	Duan e Bastiaanssen, 2013;	Variação no volume, área e níveis	
-	Gao <i>et al.</i> , 2012	Curva cota-área, capacidade	X
-	Smith e Pavelsky, 2009	Variação no volume, área e níveis	
-	Crétau e Birkett, 2006	Variação do nível (altimetria) e, para alguns, do volume	X
-	MCGUIRE <i>et al.</i> , 2006	Previsão no armazenamento de reservatórios	
-	Downing <i>et al.</i> , 2006	Área e sua relação com o número de lagos da região	X
GLWD	Lehner e Döll, 2004	Tamanho (área e perímetro), distribuição geográfica. Lagos > 50 km <sup>2</sup> e reservatórios > 0.5 km <sup>3</sup>	X
-	Meybeck, 1995	Localização, nome, área	X
-	ONS e ANA	Curvas cota-volume, vazão afluente, defluente, cota e volumes no tempo, tempo de residência (base não sistematizada)	

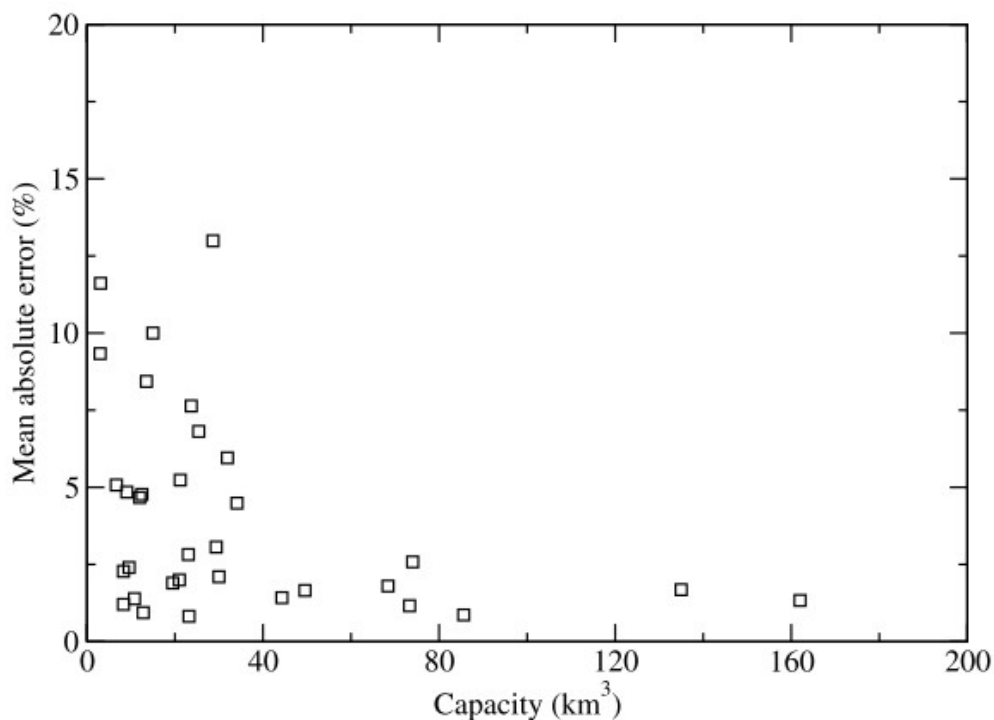
GAO *et al.* (2012) estudaram 34 reservatórios, usando 5 altímetros de 1992 até 2010 e o produto de vegetação do MODIS 16 dias e 250 m de resolução (2000 a 2010). Fizeram séries históricas de 1992 até 2010. Os reservatórios estudados da América do Sul foram Guri, Sobradinho, Itaparica, Três Marias, Tucuruí, Nova Ponte e Ilha Solteira. A Tabela 2 mostra a incerteza e relações cota área para eles.

Tabela 2 - Características de reservatórios da América do Sul

Reservatório	Capacidade (km <sup>3</sup> )	Período	Cota-área	Corr.	RMSE (%)
Guri	135	1992-2010	$y = -354.07 + 16.948x$	0.4	2
Sobradinho	34.1	2000-2010	$y = -48382 + 131.55x$	0.81	4
Itaparica	10.8	2000-2010	$y = -11074 + 39.052x$	0.8	1
Três Marias	21	2002-2010	$y = 357.44 + 0.7708x$	0.19	2
Tucuruí	49.54	2002-2010	$y = 1645.7 + 7.299x$	0.25	2
Nova Ponte	12.8	1995-2005	$y = 73.749 + 0.19923x$	0.08	1
Ilha Solteira	21.2	2000-2010	$y = -18518 + 59.925x$	0.59	5

(fonte: adaptado de GAO *et al.*, 2012)

Figura 7 - O erro médio absoluto como porcentagem da capacidade do reservatório

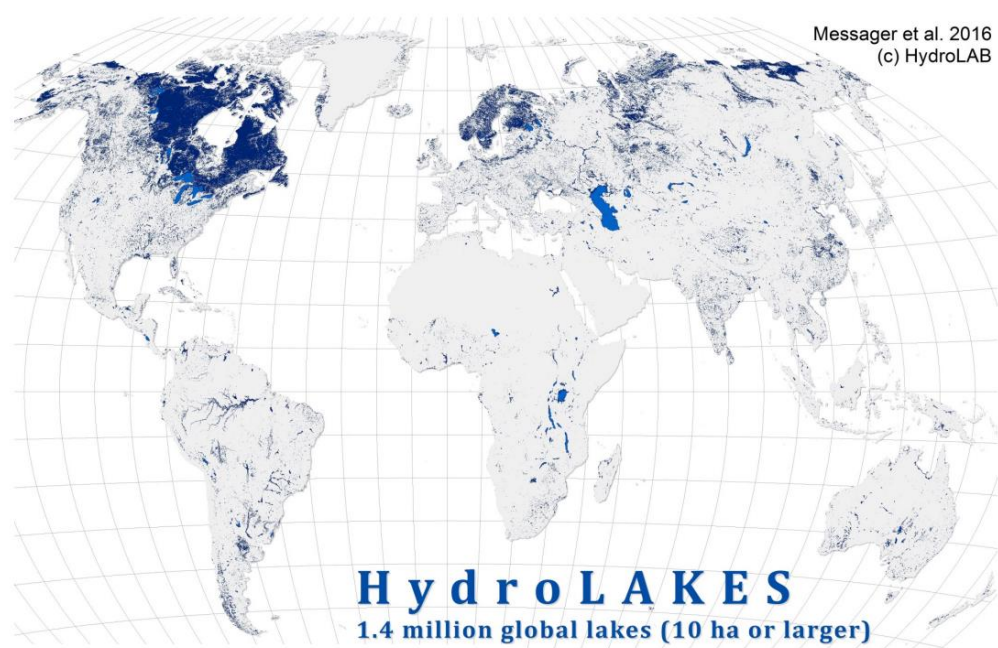
(fonte: adaptado de GAO *et al.*, 2012)

Os erros absolutos médios de armazenamento como porcentagem da capacidade do reservatório foram plotados em relação à capacidade. A Figura 7 sugere que à medida que a capacidade aumenta, a incerteza da estimativa diminui. Para todos os reservatórios maiores que 40 km<sup>3</sup>, os erros absolutos médios são inferiores a 3%.



O banco de dados **HydroLAKES** foi projetado como um repositório de mapas digitais para incluir todos os lagos e reservatórios com uma área superficial de pelo menos 10 ha (Figura 8). A escala resultante é estimada entre 1: 100,000 e 1: 250,000 para a maioria dos lagos a nível mundial, com alguns mais grosseiros em 1: 1 milhão. Entre as bases de dados utilizadas para compor a base, estão: o SRTM *Water Body* (SWBD, 2005), GRanD (LEHNER *et al.*, 2011), GLWD (LEHNER e DÖLL, 2004) e MODIS *Water mask*.

Figura 8 – Distribuição global dos lagos e reservatórios da base de dados HydroLAKES



(fonte: adaptado de MESSAGER *et al.*, 2016)

Para criar o banco de dados HydroLAKES, os polígonos dos lagos foram compilados a partir de inúmeras fontes. Se os dados originais fossem fornecidos em formato *raster*, eles eram primeiramente vetorizados usando procedimentos de suavização de limites. As principais etapas de processamento na criação do HydroLAKES incluíram identificação manual e remoção de polígonos de rios e planícies de inundação; remoção de duplicatas e polígonos sobrepostos; dissolução de polígonos segmentados em entidades individuais do lago; correção de geometria de polígono corrupta ou incorreta; remoção de pequenas ilhas (menos de 3 ha) nos lagos; alisamento de costas do corpo de água para reduzir inconsistências entre conjuntos de dados de resolução inicial diferente; e estabelecendo um corte de 10 ha (0,10 km<sup>2</sup>) com base na área da superfície do lago. Em geral, são esperadas altas incertezas em qualquer conjunto de dados para as zonas de transição entre lagos, rios e planícies inundadas, ou onde mudanças periódicas nos processos hidrológicos levam a alterações temporais nessas características,

como meandros isolados que se transformam em rios ativos durante os ciclos de inundação ou lagos que se convertem em zonas úmidas durante períodos mais secos. A Tabela 3 é um resumo das características morfológicas dos lagos, também compiladas no HydroLAKES.

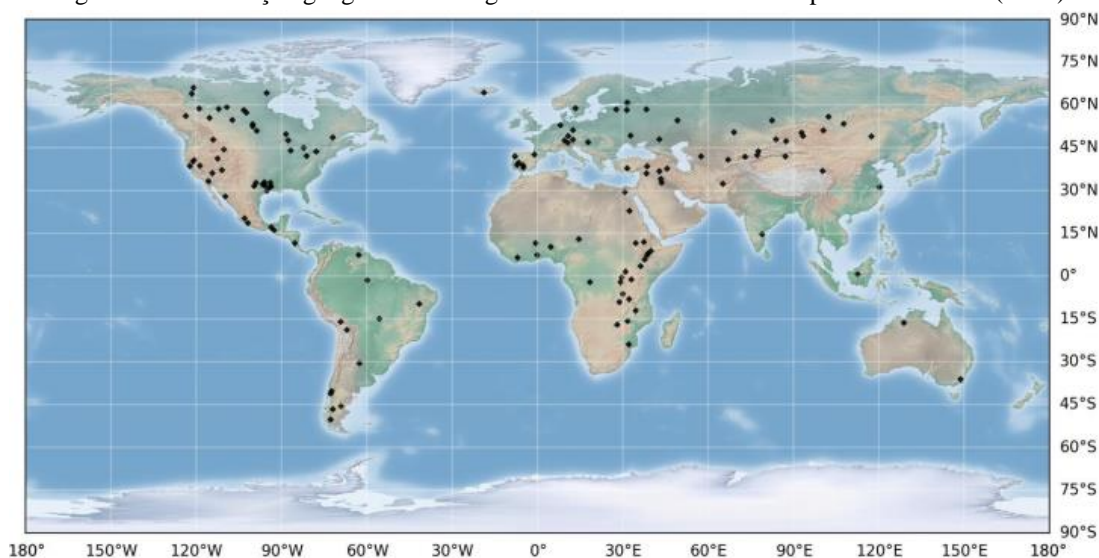
Tabela 3 - Distribuição e características morfológicas de lagos ao redor do mundo

Continentes	Nº de Lagos (10 <sup>3</sup> )	Área (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Comprimento da borda (10 <sup>3</sup> km)	Volume (10 <sup>3</sup> km <sup>3</sup> )	Profundidade média (m)	Tempo de residência (anos)
América do Norte	991.9	1 229.5	4 990.9	36.6	3.7	1.4
Europa	280.7	781.2	1 264.5	103.8	4.6	1.6
Ásia	66.2	274.8	391.7	7.3	2.9	0.3
América do Sul	53.8	103.7	296.7	3.1	3.3	0.2
África	15.2	232.0	120.1	30.6	2.5	0.3
Oceania	13.2	55.7	108.3	0.4	2.8	0.8

(fonte: adaptado de MESSAGER *et al.*, 2016)

Busker *et al.* (2018) determinaram séries temporais mensais e a hipsometria de 135 lagos e reservatórios em todos os continentes (Figura 9), com um conjunto de dados de área superficial de água e altimetria. Quase todos apresentaram uma regressão linear. 57 desses apresentaram uma regressão altamente precisa, com  $R^2 > 0,8$ , e média de 0,91. Infelizmente, os dados da pesquisa não são acessíveis ao público.

Figura 9 - Distribuição geográfica dos lagos e reservatórios analisados por Busker *et al.* (2018)



(fonte: BUSKER *et al.*, 2018)

Park *et al.* (2019) apresentaram um novo método para estimar o nível d'água em grandes lagos, usando dados de sensoriamento remoto passivo e ótico, combinados com qualquer MDE. O método obtém estimativas do nível de água a uma resolução de 30 m<sup>2</sup> usando Landsat. Já Yigzaw *et al.* (2018) derivaram curvas cota-área-volume através do estabelecimento de uma geometria ótima para a curva, através de 5 geometrias regulares definidas, escolhendo a que minimiza os erros das estimativas no armazenamento e área superficial. Isso foi feito para 6800 reservatórios da base GRanD, e a estimativa comparada com estudos anteriores (para 40 reservatórios) e com medições *in situ* (34 reservatórios dos EUA e China).

#### 3.2.3.1 O Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), da ANA

O SAR possibilita acompanhar como é feita a operação de alguns dos principais reservatórios do Brasil, como os do SIN, Nordeste e Sistema Cantareira. O sistema possui um mapa de localização das barragens. A sessão de “Dados Históricos” permite visualizar online e exportar em uma planilha eletrônica as informações diárias de cota, porcentagem de volume útil, vazões afluentes, defluentes, entre outras. É disponibilizada no site [sar.ana.gov.br](http://sar.ana.gov.br), atualizado diariamente.

#### 3.2.3.2 Dados do Operador Nacional do Sistema (ONS)

O ONS mantém dados dos diversos reservatórios que opera, bem como diversos postos fluviométricos. Destaca-se as informações de cota máxima e mínima, volume máximo e mínimo, e algumas Curvas Cota-Volume. O acesso a esses dados é feito na área restrita do site [ons.org.br/](http://ons.org.br/).

### 3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

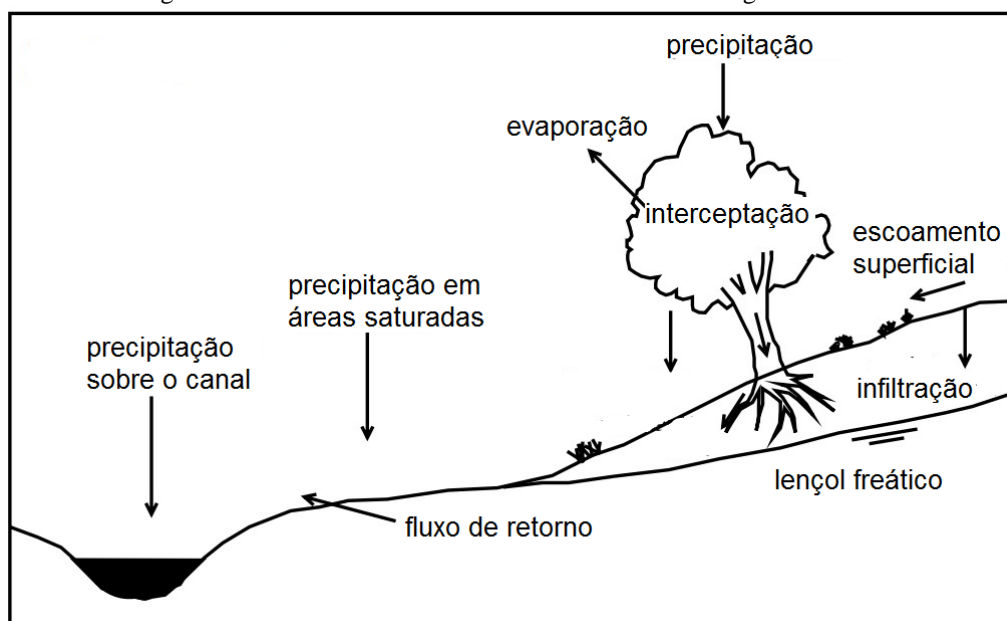
Os modelos hidrológicos representam, além do escoamento nos rios, os demais processos do ciclo hidrológico, como a geração de escoamento superficial, a evapotranspiração e o balanço de água no solo. Os cálculos de propagação de ondas de cheias em rios são geralmente realizados utilizando soluções numéricas das equações de Saint-Venant. No entanto, em modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão, é comum a utilização de métodos simplificados para representar a propagação de cheias em rios. A seguir, são apresentados os conceitos básicos em modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica.

### 3.3.1.1 Modelagem hidrológica

Os modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão. Por meio da aplicação de princípios de uma ou mais teorias e conceitos, os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes hidrológicos, anteriormente desconhecidos ou não quantificados (BEVEN, 2012). A Figura 10 mostra os principais processos simulados em um modelo hidrológico. No que diz respeito à discretização espacial, as arquiteturas variam de agregadas a distribuídas. O tempo é também uma dimensão relevante a ser levada em conta, havendo modelos desenvolvidos para simular eventos isolados e outros para a simulação contínua.

Dois grandes grupos de modelos hidrológicos surgiram, como os **modelos estocásticos**, que fazem uso das séries observadas de vazões em determinados pontos e, a partir de certas hipóteses sobre seu comportamento, permitem que estas sejam representadas por um dos diversos tipos de modelos de séries temporais normalmente utilizados; e os **modelos determinísticos** ou **conceituais**, cujo objetivo reside em representar o sistema físico natural (isto é, os processos do ciclo hidrológico), de modo que, a partir de dados de entrada, tais como os volumes precipitado e evaporado, condições iniciais de umidade do solo, cobertura vegetal, entre outros, possam ser fornecidas as séries de vazões. Tais modelos são usualmente denominados como modelos chuva-vazão (TUCCI, 2005).

Figura 10 - Processos envolvidos em um modelo hidrológico



(fonte: baseado em BEVEN, 1991)

Ainda é possível classificar os modelos de acordo com a escala: escala de experimentos em pequenas áreas, ou escala **local** ( $10^2$  m<sup>2</sup>); escala de micro-bacias ( $10^3$  m<sup>2</sup>); escala de sub-bacias ( $10^4$  m<sup>2</sup>) e escala de bacia ( $10^6$  m<sup>2</sup>) (DOOGE, 1973). Ainda existem os modelos continentais e globais. Segundo Arnold *et al.* (1998), os impactos de escala estão diretamente relacionados com as diferenças no clima, topografia, solo e geologia, as descontinuidades separando os tipos de solo, formações geológicas e cobertura do solo, ou seja, a heterogeneidade da bacia.

Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Por exemplo, o nível futuro de um reservatório depende da vazão afluente futura, que é uma variável aleatória com uma dada distribuição de probabilidade. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante a elaboração de um modelo, este será denominado determinístico (TUCCI, 2005).

Os primeiros modelos hidrológicos foram desenvolvidos na década de 30 e buscavam descrever individualmente os componentes dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Alguns exemplos são a equação de Horton para o cálculo da infiltração pontual, o modelo Muskingum para o escoamento em rios e o modelo de Puls para o escoamento em reservatórios (HORTON, 1939; MCCARTHY, 1938; PULS, 1928).

Com a disseminação do uso de computadores nas décadas de 1960 e 1970 e a maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos, a abordagem espacial distribuída começou a ser aplicada na modelagem hidrológica (FREEZEE, 1969; BEVEN e KIRKBY, 1979). Desde então, surgiram uma série de novos modelos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas.

Entre os estudos em que são aplicados estes modelos estão: análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão; efeitos de mudanças no uso do solo e/ou mudanças climáticas; compreender melhor os processos hidrológicos e a dinâmica de determinado local. Exemplos de modelos hidrológicos de escala local, que podem simular também reservatórios:

- O TopModel foi proposto como um modelo simplificado, baseado em parâmetros físicos que podem ser medidos diretamente em uma bacia, visando englobar os efeitos distribuídos de áreas de contribuição variáveis e da vazão sobre a rede de drenagem (BEVEN e KIRKBY, 1979). Também poderia ser aplicado em escalas maiores;

- SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), desenvolvido por Arnold *et al.* (1998), é um modelo conceitual, contínuo, com passo de tempo diário, semi-distribuído e com foco em bacias de grande escala. O modelo tem por objetivo prever os impactos ao longo do tempo das práticas de manejo de uso do solo sobre o aporte de água, agroquímicos e sedimentos em bacias de grande escala sem dados;
- Mike-11 (DHI, 2017) é um modelo hidrodinâmico unidimensional constituído de vários módulos, sendo os módulos básico o de chuva-vazão, o hidrodinâmico, o de transporte de sedimentos e o de qualidade de água. Os módulos podem envolver tanto abordagem conceitual como de base física e temporalmente pode trabalhar tanto com eventos simples de chuva como com balanço hídrico mensal (MERRIT *et al.*, 2003).

Quanto aos modelos de escala regional, podem-se citar três modelos, todos sem uma modelagem de reservatórios consolidada:

- LASCAM (*Large Scale Catchement Model*), um modelo contínuo, com passo de tempo diário, conceitual e distribuído. Ele utiliza três reservatórios de armazenamento de água no solo (aquífero próximo ao rio, aquífero profundo e zona não saturada do solo), interconectados, com saídas propagadas pela rede de drenagem até o exutório da bacia. Dentre as saídas do modelo hidrológico estão os escoamentos superficiais e sub-superficiais, evaporação, recarga, escoamento de base e medidas de umidade do solo (VINEY e SIVAPLAN, 1999);
- LARSIM (*Large Area Runoff Simulation Model*), desenvolvido para ser usado como um componente hidrológico geral em modelos acoplados do tipo hidrológico-atmosférico (LUDWIG E BREMICKER, 2006);
- O MGB (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo hidrológico distribuído, concebido principalmente para aplicações em grandes bacias tropicais. É o modelo utilizado neste trabalho, mostrado em detalhe na seção 3.2.3.3.

Existem, ainda, modelos hidrológicos globais que simulam a hidrologia de toda a superfície terrestre (com exceção da Antártida), com simulação explícita de reservatórios. Alguns exemplos são:

- O LPJmL foi projetado para simular os balanços globais de água e carbono em conjunto com a dinâmica da vegetação natural e agrícola. Atualmente, simula a propagação de escoamento e irrigação em escala global (ROST *et al.*, 2008; BIEMANS *et al.*, 2011);

- Wada *et al.* (2014) desenvolveram o PCR-GLOBWB, cuja versão atual (2.0) calcula a disponibilidade de água e sua demanda de maneira integrada para simular dinamicamente o uso de água em passo de tempo diário e para explicar as interações entre o uso antrópico de água e os fluxos de água terrestres;
- O LISFLOOD (Modelo distribuído de balanço hídrico e simulação de inundações) foi desenvolvido para ser aplicado em uma ampla gama de escalas espaciais e temporais, portanto se encaixa em todas as classificações acima. Será melhor descrito na seção 3.2.3.2;
- O WaterGAP, primeiro modelo global de simulação hidrológica e de usos d'água, também será explicado adiante (seção 3.2.3.1);
- O H08 é um modelo global integrado que simula ambos os fluxos d'água: o natural e o antrópico. É composto por seis módulos: hidrologia de superfície terrestre, propagação nos rios, crescimento de culturas, operação de reservatórios, demanda de água do meio ambiente e retirada de água pelos seres humanos (HANASAKI *et al.*, 2008a e 2008b).

Em bacias com uso intenso da água, que apresentam retiradas significativas de vazão dos rios ou grandes alterações do regime hidrológico devidas à presença de reservatórios, as séries de dados de vazão utilizadas na calibração dos modelos hidrológicos e na avaliação da disponibilidade hídrica podem estar influenciadas pelas atividades humanas (SILANS *et al.*, 2000; CRUZ e SILVEIRA, 2007).

A estrutura dos modelos hidrológicos distribuídos inclui pelo menos dois módulos: um módulo de balanço hídrico no solo e geração de escoamento a partir da chuva; e um módulo de propagação de vazões ao longo da rede de drenagem (por exemplo, módulo hidrodinâmico).

### 3.3.1.2 Modelagem Hidrodinâmica

Normalmente, o escoamento em rios possui como dimensão predominante a longitudinal, logo um conjunto de equações unidimensionais permite descrever a maior parte dos sistemas e fenômenos. Duas ou três dimensões espaciais podem ser consideradas. Além do escoamento ser tratado como unidimensional, nas equações de Saint-Venant são feitas as seguintes hipóteses (SAINT-VENANT, 1871):

- velocidade da água em uma seção transversal é constante e igual à velocidade média;
- distribuição hidrostática de pressões (depende apenas da profundidade);



- massa específica da água constante;
- a declividade do fundo do canal é pequena.

Com base nessas hipóteses, é possível obter duas equações diferenciais que representam, de forma aproximada, o escoamento não permanente em canais: a equação da continuidade e a equação de conservação de quantidade de movimento.

Esse conjunto de equações completas pode ser simplificado, dando origem a modelos como o de onda cinemática, frequentemente utilizado em modelos hidrológicos chuva-vazão (TUCCI, 2005; DE ROO *et al.*, 2000; BEVEN, 2012). O método Muskingum-Cunge também é bastante utilizado nesses modelos. Se adicionarmos o termo de força de pressão ao modelo de onda cinemática, temos o modelo não-inercial (YEN e TSAI, 2001). A vantagem deste modelo é que são levados em conta os efeitos de jusante sobre o escoamento.

O modelo de propagação de cheias obtido a partir das equações da continuidade e da quantidade de movimento, negligenciando apenas o termo de advecção, tem sido chamado de "modelo inercial simplificado", ou "modelo de inércia local", ou, simplesmente, "modelo inercial" (BATES *et al.*, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2012; ALMEIDA e BATES, 2013; FAN *et al.*, 2014a). O modelo inercial pode ser aplicado em rios de baixa declividade, em rios com trechos de reservatórios, e em rios sujeitos a efeitos de marés, apresentando resultados semelhantes aos modelos baseados nas equações completas de Saint-Venant, porém com um algoritmo e código computacional muito mais simples (FAN *et al.*, 2014a).

Atualmente, existem diversos programas computacionais que resolvem as equações de Saint-Venant numericamente para solucionar problemas de propagação de vazão em rios e canais, como o modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), por exemplo. É um software livre que permite fazer simulações em 1D e 2D, em regime permanente ou não, e também simula transporte de sedimentos e qualidade d'água (HEC/USACE, 2016). É bem conhecido e utilizado no mundo todo para realizar simulações hidrodinâmicas.

O modelo Mike-11 (DHI, 2017), já mencionado anteriormente na seção sobre modelagem hidrológica, além dos módulos de chuva-vazão e transporte de sedimentos, também é um modelo dinâmico unidimensional, capaz de resolver as equações de Saint-Venant de maneira completa, em regime não permanente e quase-permanente.

O LISFLOOD-FP é um modelo hidrodinâmico bidimensional projetado especificamente para simular inundações de maneira computacionalmente eficiente, mesmo sobre uma topografia



complexa. Com ele é possível utilizar novos Modelos Digitais de Elevação de alta resolução, como os realizados por altimetria a laser aérea (LIDAR) ou por interferometria.

O último modelo hidrodinâmico aqui discutido é o DELFT3D (DELTARES, 2014). Realiza simulações de escoamentos, transporte de sedimentos, ondas, qualidade d'água, ecologia, em 2D ou 3D e regime não-permanente. Seus diversos módulos são capazes de interagir entre si, resultando numa simulação complexa e completa.

### 3.3.2 Modelos Hidrológicos Regionais

A urgência em simular o ciclo hidrológico em escala global foi pela primeira vez discutida por Eagleson (1986). Ele lembrou aos hidrólogos que o ciclo hidrológico é um fenômeno global e que os impactos humanos na hidrologia superam a escala de bacia. Assim, a compreensão da variabilidade climática, bem como do impacto humano sobre o clima e o ciclo hidrológico requer o desenvolvimento de modelos globais e, mais importante, o envolvimento da comunidade hidrológica no desenvolvimento desses modelos (BIERKENS, 2015).

Existe, agora, um nível de maturidade entre as comunidades de bacias e de modelagem, de modo que essas comunidades estão convergindo para modelos hidrológicos de domínio continental e global (ARCHFIELD *et al.*, 2015). Eles servem para informar a distribuição da água nas grandes bacias hidrográficas, internacionais e nacionais (por exemplo, UNECE, 2014), para fornecer uma base para a política internacional de inundações (UNIÃO EUROPEIA, 2007) e planejar os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos (COLLINS *et al.*, 2009).

Uma das dificuldades encontradas na simulação com um modelo global é a aplicação dos resultados para regiões específicas. Por terem sido concebidos para simulação de fenômenos em escala global, esses modelos podem apresentar resultados inadequados em pequena escala. Para resolver essas dificuldades, a abordagem mais avançada é aumentar a resolução espacial dos modelos globais para representar melhor os detalhes regionais. Aumentar a resolução espacial de modelos globais ou aplicar modelos globais para uma região específica potencialmente elimina as barreiras entre modelos regionais e globais (HATTERMANN *et al.*, 2017). Fleischmann *et al.* (2019) reforçam essa afirmação mostrando que se pode melhorar a simulação de níveis d'água e vazão em escala local. Para tal, é indicado (i) investir em melhores estimativas de seções transversais de rios em modelos globais e (ii) refinar os comprimentos de

trecho de rio e a resolução do MDE, apesar desta última não ser tão importante em modelos hidrodinâmicos 1D (com apenas uma dimensão).

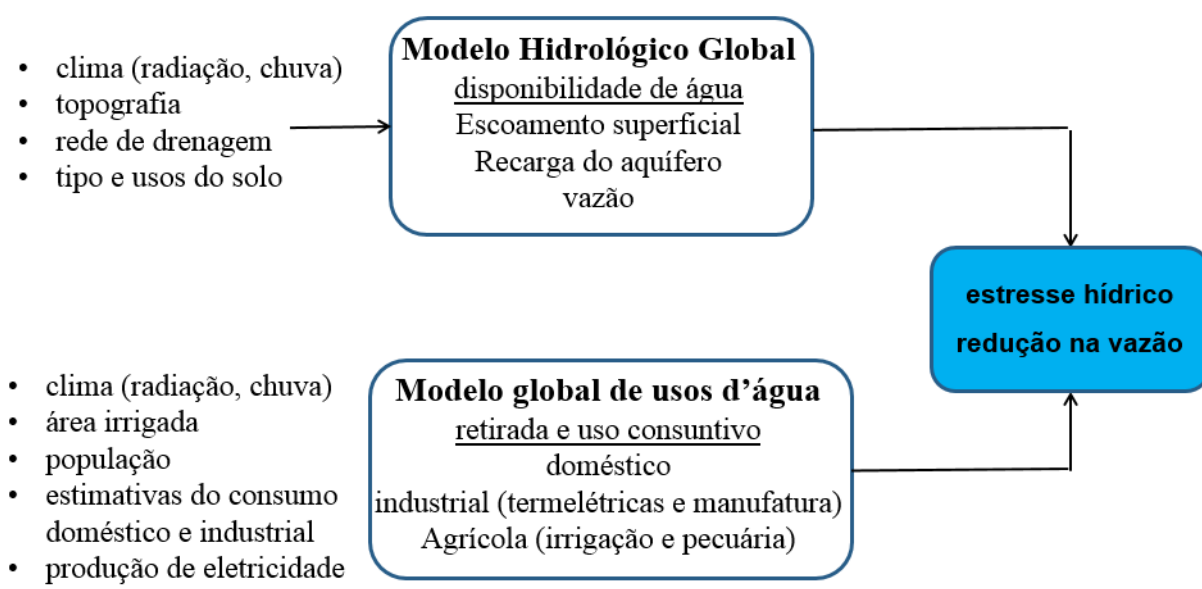
A seguir, são apresentados brevemente três modelos hidrológicos continentais: WaterGAP, LISFLOOD e o MGB. Os dois primeiros modelos já foram utilizados para simular reservatórios em escala global. Nessa pesquisa o modelo MGB será utilizado para realizar uma simulação com reservatórios brasileiros, em escala continental.

### 3.3.2.1 WaterGAP

O Modelo hidrológico global e de usos d'água WaterGAP (na sigla em inglês) consiste em duas partes principais: os módulos de usos d'água para cinco setores diferentes e o Módulo Hidrológico Global (WGHM, na sigla em inglês; Figura 11). Um submodelo é usado para distinguir o uso de águas subterrâneas das águas superficiais e calcula retiradas líquidas de ambas as fontes, que são a entrada para o WGHM. Usando uma série de equações de armazenamento de água, o WGHM calcula diariamente as vazões de água e os armazenamentos a uma resolução espacial de 0,5 por 0,5° (55 km por 55 km no Equador) para toda a área terrestre, exceto a Antártida (66 896 células) (DÖLL *et al.*, 2003). O WaterGAP é calibrado contra a descarga anual média do rio em 1319 estações e o fator de calibração ajustado é regionalizado para células quadradas fora das bacias de calibração.

Desde a publicação inicial do WaterGAP 2.1d, foram feitas grandes mudanças para manter o modelo atualizado. Por exemplo, foram incluídos algoritmos de operação do reservatório, a recarga de água subterrânea foi otimizada ao distinguir regiões semiáridas/áridas de regiões úmidas, um algoritmo de velocidade de fluxo variável foi incluído e a fonte da água extraída foi considerada (MÜLLER SCHMIED *et al.*, 2016). A operação de reservatórios era feita de maneira simplificada, conforme mostrado na seção 3.2.4. Essa seção descreve também a regra desenvolvida por Hanasaki *et al.* (2006), incorporada posteriormente ao WaterGAP, por ser mais completa e descrever melhor o comportamento dos reservatórios.

Figura 11 – Fluxograma de funcionamento do WaterGAP



(fonte: adaptado de ALCAMO *et al.*, 2003)

### 3.3.2.2 LISFLOOD

O Modelo Distribuído de Balanço Hídrico e Simulação de Inundações (LISFLOOD) foi desenvolvido no âmbito do Projeto de Desastres Naturais do Centro de Pesquisa Conjunta (JRC, na sigla em Inglês) do Instituto Pelo Meio-ambiente e Sustentabilidade, da Comissão Europeia. É um modelo distribuído, parcialmente conceitual e parcialmente de base física, desenvolvido principalmente para simular os principais processos hidrológicos em grandes bacias (DE ROO *et al.*, 2000; VAN DER KNIJFF *et al.*, 2010). Foi feito para ser aplicado em uma ampla gama de escalas espaciais e temporais. As aplicações até agora empregaram células quadradas de 100 metros para bacias de tamanho médio, 5000 metros para modelagem de toda a Europa e até 0,1° (em torno de 10 km) para modelagem global. O balanço hídrico a longo prazo pode ser simulado (usando um passo de tempo diário), bem como eventos de inundações (usando intervalos horários ou mesmo menores) (BUREK *et al.*, 2013).

Falamos aqui da aplicação do LISFLOOD para uma simulação global, com resolução de 0,1° e propagação usando onda cinemática, com um sub-passo de tempo de 4h (ZAJAC *et al.*, 2017). Utilizaram a base de dados global de rios de Wu *et al.* (2012) para determinar, por exemplo, a direção do fluxo, área a montante e comprimento dos trechos de rios; o mapa de largura dos rios foi retirado do Banco de Dados de Largura Global para Grandes Rios (GWDLR, na sigla em inglês; YAMAZAKI *et al.*, 2014), enquanto o coeficiente de rugosidade de Manning foi calculado a partir da elevação e da área a montante. As rotinas utilizadas para o cálculo da vazão

defluente e da variação de volume dos lagos e reservatórios serão mostradas na seção 3.2.4. A seguir, são mostrados alguns dos resultados encontrados pelos autores do trabalho.

Segundo Zajac *et al.* (2017), onde a hidrologia é fortemente afetada pela evaporação de água superficial, a amplitude e magnitude dos picos de vazão é melhor simulada a jusante, quando lagos e reservatórios são considerados. Isso ocorre com mais frequência em bacias com lagos de grande superfície, especialmente locais propensos a uma grande evaporação potencial. Por outro lado, lagos com pouca área superficial podem afetar a vazão principalmente através da retenção. Como observado na Rússia, lagos de montante melhoraram o desempenho e amplitude dos picos do hidrograma. A inclusão de lagos geralmente melhorou a habilidade de simulação de vazões. No entanto, para a maioria das bacias hidrográficas, a melhoria no Coeficiente de Nash (NSE) pelo efeito dos lagos foi bastante pequena, com poucas exceções notáveis (ZAJAC *et al.*, 2017).

Para a estação do Peixe, em Tocantins-Brasil (Lat.  $-12^{\circ}13'41''$ ; Lon.  $-48^{\circ}24'14''$ ), a operação do reservatório afeta bastante a distribuição natural de vazões. A incorporação do reservatório de Serra da Mesa, principalmente usado para geração de energia, afetou a distribuição sazonal do período do verão úmido para o inverno seco, e melhorou os hidrogramas simulados nas estações a jusante (ZAJAC *et al.*, 2017).

Foram encontradas melhorias substanciais com a introdução de reservatórios para muitas bacias hidrográficas, incluindo, por exemplo, Tocantins e Magdalena (América do Sul). No entanto, o efeito da sua inclusão nem sempre foi benéfico à medida que os coeficientes pioraram em algumas estações, muitas delas localizadas na América do Norte, mas também para outras bacias, como, por exemplo, no Rio Iguaçu. Uma possível razão é que a rotina de vazão defluente é feita somente para controle de cheias, entretanto os reservatórios frequentemente possuem múltiplos usos, principalmente geração hidrelétrica, nesse caso (ZAJAC *et al.*, 2017).

O cenário com lagos e reservatórios resultou em melhoria do ENS para um grande número de bacias hidrográficas, indicando que o desempenho do modelo é mais fortemente afetado pelos reservatórios do que pelos lagos. Para a maioria das bacias de teste, o efeito dos parâmetros do reservatório é mais forte para as seções do rio a jusante dos reservatórios. Este efeito é reduzido com o aumento da distância a jusante, em favor de outros parâmetros (ZAJAC *et al.*, 2017).

### 3.3.2.3 LEAF-Hydro-Flood-Dam

O modelo *Land Ecosystem-Atmosphere Feedback* (LEAF, MIGUEZ-MACHO & FAN, 2012) foi posteriormente melhorado, dando origem a diversas versões, a última sendo o LEAF-Hydro-Flood. Shin *et. al* (2018) acoplaram um esquema de saída e armazenamento de reservatórios a ele, originando o LEAF-Hydro-Flood-Dam. Esse modelo também utiliza a propagação hidrodinâmica inercial (de maneira semelhante ao MGB).

Shin *et. al* (2018), neste mesmo modelo, identificaram 4 pontos importantes relacionados à simulação de reservatórios em modelos hidrológicos de alta resolução (não são todos os aspectos considerados): **1º)** A maioria das regras de operação foram desenvolvidas pra modelos hidrológicos de grande-escala, com tamanho de célula de 50 a 100 km, onde as capacidades dos reservatórios na mesma célula eram agrupadas num único reservatório. **2º)** Os esquemas atuais não representam explicitamente a dinâmica da superfície d'água, que é muito importante para simular a evaporação sob mudanças climáticas. **3º)** Os esquemas existentes não são projetados para uma simulação integrada de rios, reservatórios e planícies, o que é essencial quando aplicamos o modelo em regiões como a Amazônia, onde a dinâmica planície-rio-reservatório precisa ser simulada como um processo acoplado. **4º)** É essencial melhorar a representação da batimetria dos reservatórios. Usar diretamente MDEs é razoável apenas quando o reservatório foi construído após a produção do MDE. Para reservatórios já existentes, ele representará a lâmina d'água, o que pode ser dezenas de metros acima da cota de fundo correta.

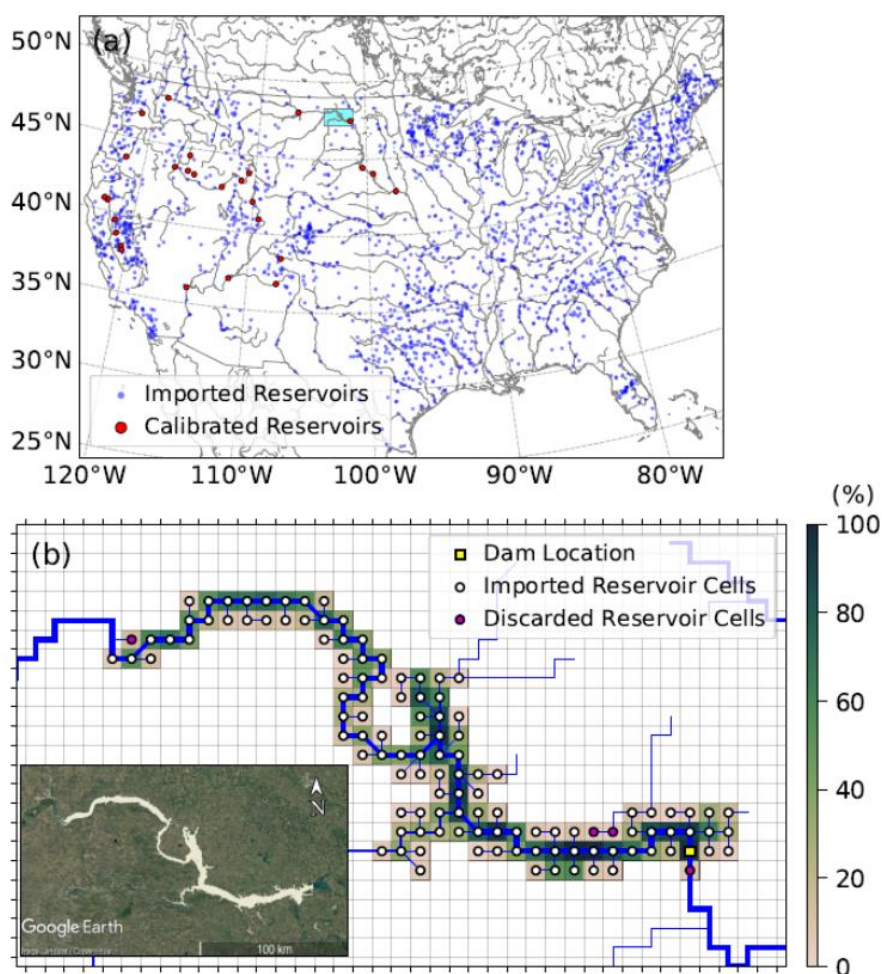
Voltando ao seu modelo, eles simularam aproximadamente 1900 reservatórios nos EUA continentais. As células quadradas possuem 5 km de lado, e seu esquema considera a variação temporal e espacial nas vazões defluentes. Pela primeira vez em um modelo continental, o armazenamento de um reservatório não fica agregado à localização da barragem, e sim é distribuído sobre múltiplas células a montante da barragem. Para tal, encontraram a extensão máxima do reservatório através dos polígonos do GRanD.

Toda célula tem seção quadrada. A água de inundação que ultrapassa a margem é simulada para se distribuir uniformemente na planície de maneira horizontal. Cada célula tem um perfil de rio e uma elevação de planície, independentemente de ter reservatório ou não. Assume-se que as elevações do leito e da planície de inundação sejam planas dentro de uma célula da grade. As células reservatório e não-reservatório são modeladas de forma idêntica e a informação sobre se uma célula é uma célula reservatório é usada apenas para diagnosticar o armazenamento do

reservatório, que é a soma da água superficial armazenada em todas as células dentro do reservatório (SHIN *et. al*, 2018).

Seu esquema de saída é um melhoramento dos esquemas de Hanasaki *et. al* (2006) e Biemans *et al.* (2011). Considerando a disponibilidade dos dados de uso de água do USGS, são realizadas simulações para o período de 1983-2010. Uma simulação de aquecimento de 20 anos é realizada sem considerar reservatórios. Além disso, os primeiros dois anos de simulação com reservatórios são descartados, portanto, 26 anos de resultados (1985-2010) são analisados. Dos 1.889 reservatórios importados do banco de dados GRanD, 27 são selecionados para calibração (Figura 12), para os quais os dados de armazenamento e vazão defluente de longo prazo estão disponíveis. Eles concluem que seu modelo apresentou melhorias em relação aos existentes.

Figura 12 – Localização e extensão dos reservatórios no modelo LEAF-Hydro-Flood-Dam



(a) os 1.889 reservatórios simulados no modelo (círculos azuis) e 27 reservatórios calibrados (círculos vermelhos), e (b) a extensão máxima rasterizada do reservatório do Lago Sakakawea no rio Missouri, mostrado por uma caixa azul clara em (a). Fonte: SHIN *et. al*, 2018

### 3.3.2.4 O Modelo de Grandes Bacias (MGB)

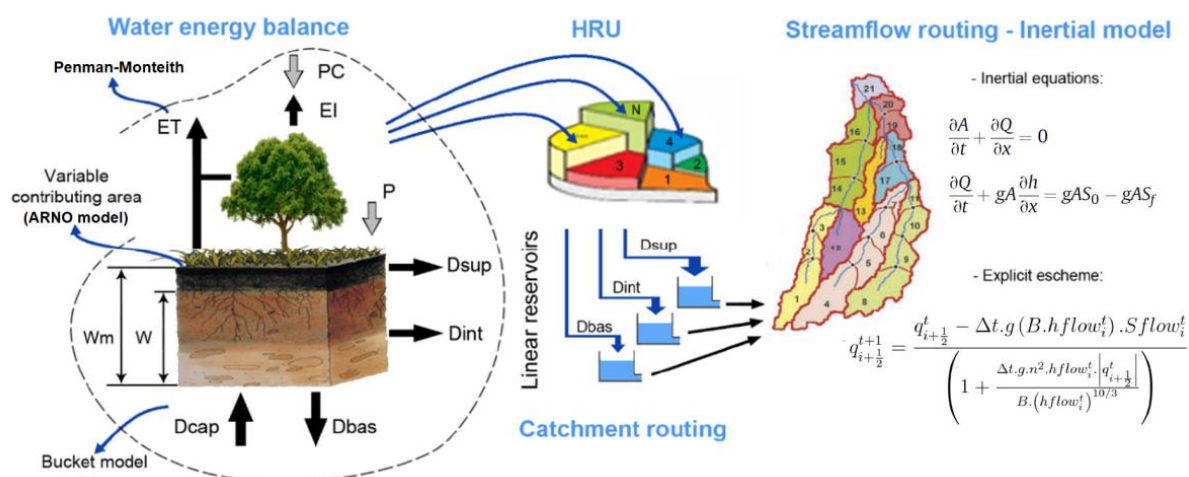
O MGB (COLLISCHONN e TUCCI, 2001) é um modelo hidrológico de simulação contínua, baseado em processos, ou seja, são utilizadas equações físicas e conceituais para simular o comportamento da bacia. É um modelo distribuído (ou semi-distribuído) desenvolvido especialmente para grandes bacias tropicais e voltado para a típica condição de disponibilidade de dados encontrada no Brasil (COLLISCHONN *et al.*, 2007a), utilizado com sucesso em um grande número de aplicações na América do Sul (por exemplo, COLLISCHONN *et al.*, 2007a; PAIVA *et al.*, 2013; PONTES *et al.*, 2017). Possui módulos específicos para o cálculo do balanço hídrico no solo, evapotranspiração (calculada por Penman-Monteith), propagação do escoamento na célula (realizada de forma simplificada utilizando reservatórios lineares simples) e propagação do escoamento na rede de drenagem (através do método Inercial). O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. Estes processos de cálculo estão descritos detalhadamente em Collischonn *et al.* (2007a).

Na versão atual, a bacia é discretizada em minibacias (células), pequenas subdivisões definidas nos pontos de confluência entre dois trechos de rios ou em outros pontos de interesse (FAN e COLLISCHONN, 2014). Além disso, é adotada uma divisão da bacia em um conjunto de Classes de Resposta Hidrológica (CRH), definidas, tipicamente, a partir da combinação de mapas de tipos de solos e de tipos de vegetação, ou de classes de uso da terra. As CRH possuem comportamento hidrológico similar, explicado por características físicas relacionadas aos solos, como capacidade de armazenamento d'água e condutividade hidráulica, e à cobertura vegetal, como índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes e albedo.

Normalmente para aplicar o modelo realizam-se as etapas de pré-processamento dos dados de solo, vegetação, chuva, clima, e então definem-se os parâmetros para realizar a simulação (FAN e COLLISCHONN, 2014). A combinação das minibacias com as classes de resposta hidrológica (CRH) origina as Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são as regiões em que determinada CRH existe no interior de uma minibacia, isso sem considerar a localização dentro do elemento (COLLISCHONN e TUCCI, 2001). A calibração do modelo hidrológico pode ser feita utilizando diferentes métodos de propagação de vazão nos rios, pois os parâmetros calibráveis do modelo são predominantemente dos processos de transformação chuva-vazão.

Na maior parte dos estudos utilizando MGB, os reservatórios não são modelados, são utilizadas séries de vazões naturalizadas. Os usos d'água não são considerados. Entretanto, já foram feitos trabalhos de avaliação de disponibilidade hídrica (COLLISCHONN *et al.*, 2011) e qualidade de água (LARENTIS, 2008), todavia nestas ocasiões não foi desenvolvida uma interface e ferramentas que permitam aos usuários em geral realizarem tais simulações. Tal feito foi realizado por Fleischmann *et al.* (2015), quando o método de propagação utilizado era o de Muskingum-Cunge. A Figura 13 mostra um esquema do funcionamento do MGB, com os balanços de água e energia, reservatórios e propagação.

Figura 13 - Representação esquemática do modelo hidrológico MGB.



(fonte: SIQUEIRA *et al.*, 2018)

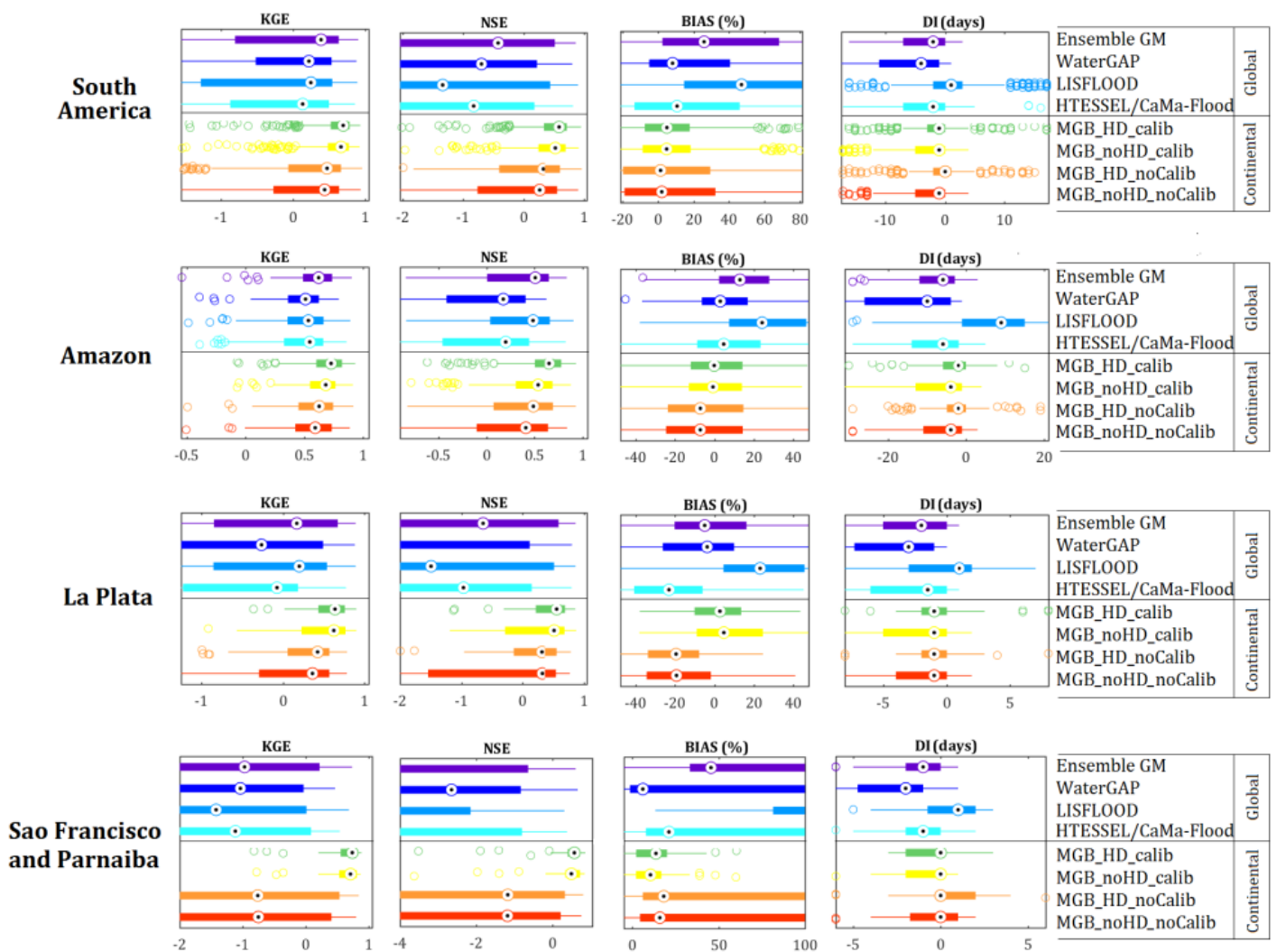
O MGB tem sido utilizado em inúmeros estudos de modelagem hidrológica. Foi aplicado em diversas bacias, como a Amazônica (RIBEIRO *et al.*, 2006), a do Rio Grande (NOBREGA *et al.*, 2011), do rio São Francisco (DA SILVA *et al.*, 2004). Com ele, foi realizada a modelagem hidrológica e hidrodinâmica na Amazônia (PAIVA *et al.*, 2013a e 2013b) e na bacia do Alto Paraguai (BRAVO *et al.*, 2011). Usado também em modelos de previsão de cheias no rio Uruguai (FAN *et al.*, 2014b), rio Tocantins (FAN *et al.*, 2014c; FAN *et al.*, 2016), previsão de vazões no Rio Grande (TUCCI *et al.*, 2008), Rio São Francisco (FAN *et al.*, 2014d), e em estudos de modelagem hidrossedimentológica (BUARQUE, 2015; FAGUNDES *et al.*, 2017). Lopes *et al.* (2018) pela primeira vez modelaram de maneira integrada um sistema rio-lagunar de grande escala, para a bacia da Lagoa dos Patos, no Brasil e Uruguai, utilizando o MGB.

O trabalho de Siqueira *et al.* (2018) mostrou que modelos globais têm limitações importantes na representação de vazões diárias na América do Sul (Figura 14). Mais de 40% das estações



fluviométricas apresentam valores negativos ou próximos de zero para a eficiência de Kling-Gupta (KGE), e 60% para a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Esses modelos tendem a superestimar as vazões no continente, com viés mediano variando entre +10% e +50%. Em geral, o desempenho dos modelos globais é variável de acordo com a região e a métrica analisadas, o que é confirmado pelos grandes intervalos no *boxplot*. Nenhum dos modelos tem uma clara vantagem em relação a todas as estatísticas, e isso é especialmente válido para o NSE e KGE.

Figura 14 - *Boxplots* dos desempenhos dos modelos globais e continental



(fonte: SIQUEIRA *et al.*, 2018)

Aparentemente, a versão não calibrada do MGB também supera os modelos globais na América do Sul, exceto as bacias com regiões semiáridas (por exemplo, São Francisco e Parnaíba), onde os desempenhos parecem ser muito dependentes do ajuste de parâmetros. Logo, um modelo

melhor calibrado com simulação de reservatórios melhoraria significativamente o conhecimento das vazões regularizadas no nosso continente.

### 3.4 HISTÓRICO DA MODELAGEM GLOBAL DE RESERVATÓRIOS

Somente no final dos anos 90 começou-se a incluir lagos e reservatórios em modelos hidrológicos regionais e globais. MEIGH *et al.* (1999) usaram como regra que a vazão de saída seria o armazenamento elevado a potência 1,5. Qualquer água liberada era usada para suprir as demandas e, uma vez preenchido completamente o reservatório, a vazão de saída iguala a parte liberada. No ano seguinte, COE (2000) desenvolveu um algoritmo hidrológico global de escoamento (HYDRA) para operação de reservatórios no rio Paraná. Era somada a capacidade máxima de armazenamento e área superficial dos reservatórios a montante de Guaíra e tratados como um único. A capacidade era máxima nas cheias e em 10% do máximo na época de seca. Ao desenvolver o WaterGAP, Döll *et al.* (2003) apenas modificaram ligeiramente a abordagem de Meigh *et al.* (1999, equação 1):

$$Q_{out} = k_r \times S_r \left( \frac{S_r}{S_{r\ max}} \right)^{1,5} \quad (1)$$

Onde:

$S_r$  = armazenamento atual;

$S_{r\ max}$  = armazenamento máximo;

$k_r$  = 0.01/dia.

Assumiu-se  $S_{r\ max}$  sendo a área do lago ( $A_{lake}$ ) multiplicada pela profundidade máxima ativa ( $H$ , fixa em 5m, globalmente). Essa parametrização foi desenvolvida para lagos globais, mas também usada para reservatórios devido à falta de informação na sua gestão.

Posteriormente, foram desenvolvidos algoritmos mais complexos, como o de Haddeland *et al.* (2006). Os autores estudaram o impacto dos reservatórios e das retiradas de água para irrigação nas vazões continentais de água superficial com o modelo de Capacidade de Infiltração Variável (VIC, na sigla em inglês) para uma parte da América do Norte e para a Ásia. Um módulo de reservatório, projetado para simulações em escala continental, foi desenvolvido e implementado no VIC. Com base na vazão de entrada no reservatório, sua capacidade de armazenamento e as demandas de energia e/ou de água a jusante, calcularam a vazão de saída ótima de cada reservatório utilizando o algoritmo SCEM-UA (VRUGT *et al.*, 2003). O critério

de desempenho utilizado foi a menor diferença entre a vazão de saída e as demandas de água (irrigação, controle de cheias, produção hidroelétrica, abastecimento de água e navegação).

É importante que a regra seja aplicável globalmente. Meigh *et al.* (1999), Coe (2000) e Haddeland *et al.* (2006) fizeram individualmente para cada reservatório. Entretanto, isso seria impossível para todas as barragens da América do Sul e, além disso, nem todas possuem os dados necessários. Em contraste, Nilsson *et al.* (2005) e Vörösmarty *et al.* (1997) fizeram boas análises globais de reservatórios, apesar de não desenvolver ou usar modelos globais que incluem operação individual. A parametrização de Döll *et al.* (2003) é globalmente aplicável pois somente a informação do armazenamento é necessária, já existente para todo o globo.

Para suprir a necessidade de uma regra um pouco mais complexa, porém sem a necessidade de calibração manual individual, Hanasaki *et al.* (2006) desenvolveram um algoritmo para regra de operação para cada reservatório que utilizava os dados globais disponíveis à época, como capacidade do reservatório, o seu propósito, vazão afluente simulada, e demanda de água a jusante. Foram os primeiros autores a realizar tal feito, o que diminuiu a raiz do erro médio quadrático da vazão simulada dos reservatórios e do rio, comparada àquelas realizadas ignorando a operação do reservatório ou com um algoritmo de saída para lagos naturais. Esse algoritmo é utilizado no modelo WaterGAP desde 2009 (DÖLL *et al.*, 2009; MÜLLER SCHMIED *et al.*, 2014).

Os algoritmos de Hanasaki *et al.* (2006) e de Haddeland *et al.* (2006) foram combinados nas simulações feitas com o LPJmL (Rost *et al.*, 2008; Biemans *et al.*, 2011). Wada *et al.* (2014) também utilizam o algoritmo de Hanasaki *et al.* (2006), o que mostra que esse foi um “padrão” até o surgimento de novas estimativas de regras de operação nos anos seguintes.

Recentemente, novos trabalhos têm tentado acessar os impactos de lagos e/ou reservatórios no ciclo hidrológico, considerando uma escala global ou continental. Zhou *et al.* (2016) rodaram uma versão modificada do modelo VIC de 1948 até 2010, com resolução espacial de 0,25° e passo de tempo diário. Eles utilizaram o algoritmo SCEM-UA (VRUGT *et al.*, 2003) para otimizar as vazões de saída mensais com base nas características do reservatório, demanda de água de irrigação a jusante, inundação e descarga mínima da barragem.

Zhao *et al.* (2016) integraram um módulo de reservatórios com múltiplos propósitos ao Modelo distribuído de Vegetação, Solo e Hidrologia (DSHVM, na sigla em inglês). Os reservatórios foram divididos em diversos volumes (volume morto, ou inativo; volume normal e volume para

controle de cheias; Figura 4). A vazão de saída é calculada com base na vazão de entrada, armazenamento atual, demanda de água e vazão a jusante da barragem. Outra contribuição importante desses autores é sua parametrização da relação cota-área-volume para modelos de hiper-resolução (conjunto de equações 2). Essas equações podem representar uma vasta gama de curvas, incluindo uma linear ( $\beta = 1$ ), côncava ( $\beta < 1$ ) ou convexa ( $\beta > 1$ ).

$$A = \alpha_A S^{\beta_A} + \gamma_A \quad (2a)$$

$$H = \alpha_H S^{\beta_H} + \gamma_H \quad (2b)$$

Onde:

$A$  = área do reservatório ( $m^2$ );

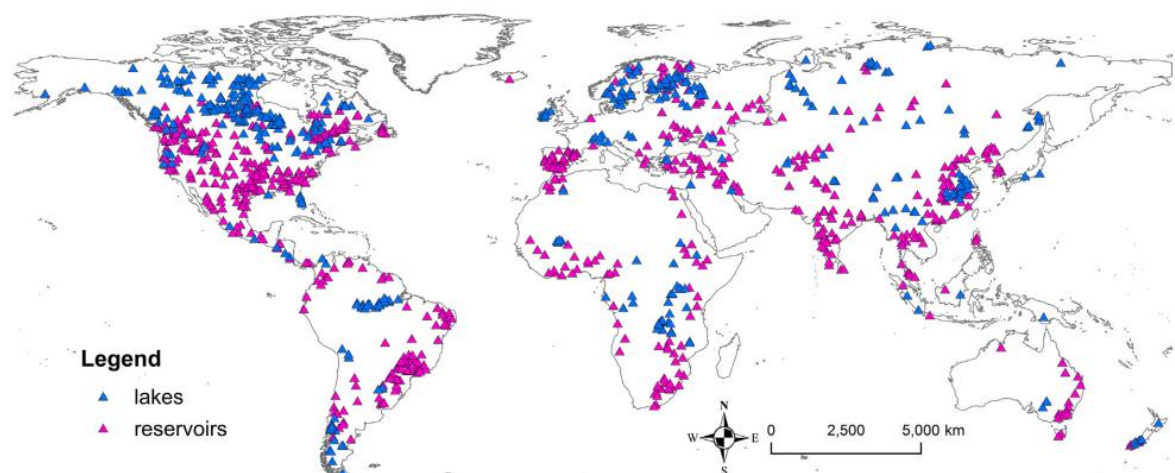
$S$  = volume do reservatório ( $m^3$ );

$H$  = nível d'água no reservatório (m);

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  = coeficientes da curva cota-área-volume, podem ser obtidos por regressão.

Os desenvolvedores do LISFLOOD (descrito na sessão 3.2.2.2) aplicaram este modelo para todo o globo (Figura 15) e incluíram um novo módulo de lagos e reservatórios. O algoritmo para os lagos é baseado na vazão de entrada, precipitação, evaporação, nível inicial e características da saída do lago, enquanto a rotina para reservatórios também leva em conta vazão a montante, precipitação e evaporação, mas também usa características específicas e regras de operação baseadas em diferentes parâmetros (ZAJAC *et al.*, 2017).

Figura 15 - Localização dos lagos e reservatórios dentro do modelo global LISFLOOD



(fonte: ZAJAC *et al.*, 2017)

Zajac *et al.* (2017) desenvolveram o seguinte algoritmo para calcular a vazão de saída, com base em quatro equações, conforme o nível atual do reservatório (conjunto de equações 3):

Onde:

$$Q_{res} = \min\left(Q_{min}, \frac{1}{\Delta t} F * S\right) \quad F \leq 2L_c \quad (3a)$$

$$Q_{res} = Q_{min} + (Q_{norm} - Q_{min}) \frac{(F - 2L_c)}{(L_n - 2L_c)} \quad L_n \geq F > 2L_c \quad (3b)$$

$$Q_{res} = Q_{norm} + \frac{(F - L_n)}{(L_f - L_n)} * \max\left[\left(I_{res} + \frac{(P - E) * A}{\Delta t} - Q_{norm}\right), (Q_{nd} - Q_{norm})\right] \quad L_f \geq F > L_n \quad (3c)$$

$$Q_{res} = \max\left(\frac{(F - L_f)}{\Delta t} * S, Q_{nd}\right) \quad F > L_f \quad (3d)$$

$S$  = capacidade de armazenamento projetada ( $m^3$ );

$Q_{res}$  = vazão de saída do reservatório, ou vazão defluente ( $m^3/s$ );

$F$  = fração preenchida, o armazenamento relativo do reservatório (entre 0 e 1);

$L_c$  = limite do volume inativo (limite de “cautela”);

$L_n$  = limite do volume normal;

$L_f$  = limite do volume de espera (para controle de cheias);

$Q_{min}$  = vazão defluente mínima ( $m^3/s$ );

$Q_{norm}$  = vazão normal ( $m^3/s$ );

$Q_{nd}$  = vazão para evitar danos a jusante ( $m^3/s$ );

$I_{res}$  = vazão afluente ao reservatório ( $m^3/s$ );

$P$  = precipitação no reservatório (m);

$E$  = evaporação do reservatório (m);

$A$  = área superficial do reservatório ( $m^2$ );

$\Delta t$  = passo de tempo utilizado (s).

Como não existem registros globais de operação de reservatórios que poderiam ser utilizados para derivar esses parâmetros, os autores assumiram que os volumes mínimo, normal e máximo são as frações 0.1, 0.3 e 0.97 da capacidade total de armazenamento, respectivamente. Enquanto as vazões de saída mínima, normal e máxima são assumidas como os percentis 5, 30 e 97 da vazão diária naturalizada do rio. Espera-se que essas estimativas de parâmetros necessitem de correção em vários níveis, levando em consideração cada reservatório, individualmente.

Hanasaki *et al.* (2018) fizeram uma simulação global com escala de 0.5° e passo de tempo diário dos reservatórios globais (segundo os autores, reservatórios presentes em grandes rios). Ainda compararam seus resultados com a missão GRACE. Foram os únicos a considerar transposição por aquedutos, e uns dos poucos com água originada por dessalinização. A alta variabilidade nas vazões de saída dos reservatórios não pode ser explicada por nenhuma propriedade do

reservatório (por exemplo, tamanho, uso, localização, etc.), destacando a variabilidade nas decisões humanas para realizar sua operação (BONNEMA *et al.*, 2017).

Como mostrado na seção 3.1.3, em regiões onde o leito do rio é composto por solos predominantemente argilosos e arenosos a sedimentação é importante, enquanto em rios rochosos não. Nessa pesquisa, apenas um modelo hidrológico global levou em consideração a diminuição do volume causada pela sedimentação. Zhao *et al.* (2016) não levaram em conta a precipitação sobre o reservatório para realizar o cálculo de balanço de massa e estimar a variação no armazenamento do reservatório (equação 4):

$$S_t = S_{t-1} + \Delta t * (Q_t^{in} - E_t * A - Q_t^{out} - \Delta_{sed}) \quad (4)$$

Onde:

$S_t$  = armazenamento no tempo  $t$  (m<sup>3</sup>);

$S_{t-1}$  = armazenamento no tempo  $t-1$ ;

$Q_t^{in}$  = vazão afluente (m<sup>3</sup>/passo de tempo);

$Q_t^{out}$  = vazão defluente (m<sup>3</sup>/passo de tempo);

$E_t$  = evaporação no reservatório (m/passos de tempo);

$A$  = área superficial do reservatório (m<sup>2</sup>);

$\Delta_{sed}$  = taxa de sedimentação (m<sup>3</sup>/passo de tempo);

$\Delta t$  = passo de tempo;

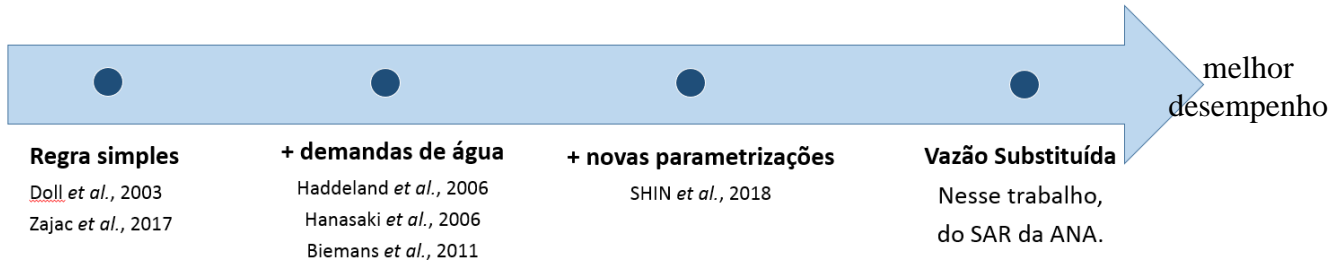
Coerver, Rutten e Van de Giesen (2018) usaram lógica fuzzy e redes neurais artificiais para descrever como os reservatórios são operados. O que há de mais novo e completo no assunto é o artigo de Shin *et al.*, 2018, descrito na seção anterior (3.3.2.3). Como já mencionado, seu esquema de saída é similar aos esquemas de Hanasaki *et. al* (2006) e Biemans *et al.* (2011), aos quais foram adicionadas novas parametrizações que melhoraram as simulações.

### 3.5 MODELOS COM VAZÕES SUBSTITUÍDAS

Uma alternativa à modelagem de reservatórios é a utilização de vazões substituídas nos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Ou seja, a vazão de saída simulada da célula de um barramento é substituída pela vazão observada naquele ponto. Alguns exemplos de trabalhos que utilizaram essa abordagem são o de Da Silva *et al.* (2004); o de Paiva *et al.* (2013), em que dados de duas estações fluviométricas foram condição de contorno na fronteira brasileira; Pontes (2016) uniu-se de dados de vazão defluente de Itaipu, obtidos pelo ONS, para considerar a operação dos reservatórios no seu modelo; de maneira semelhante, Fan (2015) substituiu seus dados

calculados pela vazão total defluente de Três Marias. Um resumo com alguns exemplos de esquemas de saída é dado na Figura 16.

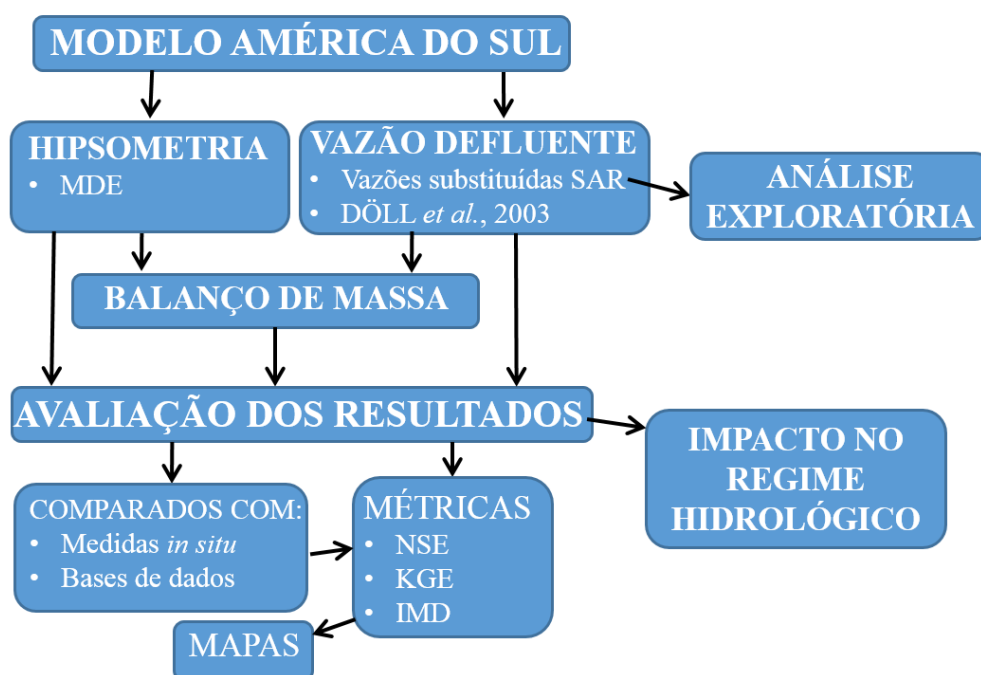
Figura 16 - Desempenho de modelos hidrológicos de acordo com seu esquema de saída de água



## 4 METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizada a simulação com vazões substituídas de **109** reservatórios controlados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), no Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB). Para tal, foi utilizado um modelo já calibrado e validado da América do Sul (SIQUEIRA *et al.*, 2018), descrito adiante. A simulação foi feita de 1º de janeiro de 1990 até 31 de dezembro de 2009. Os dois primeiros anos não foram contabilizados no cálculo de estatísticas e resultados, por serem considerados o aquecimento do modelo. O fluxograma a seguir apresenta um resumo da metodologia proposta (Figura 17).

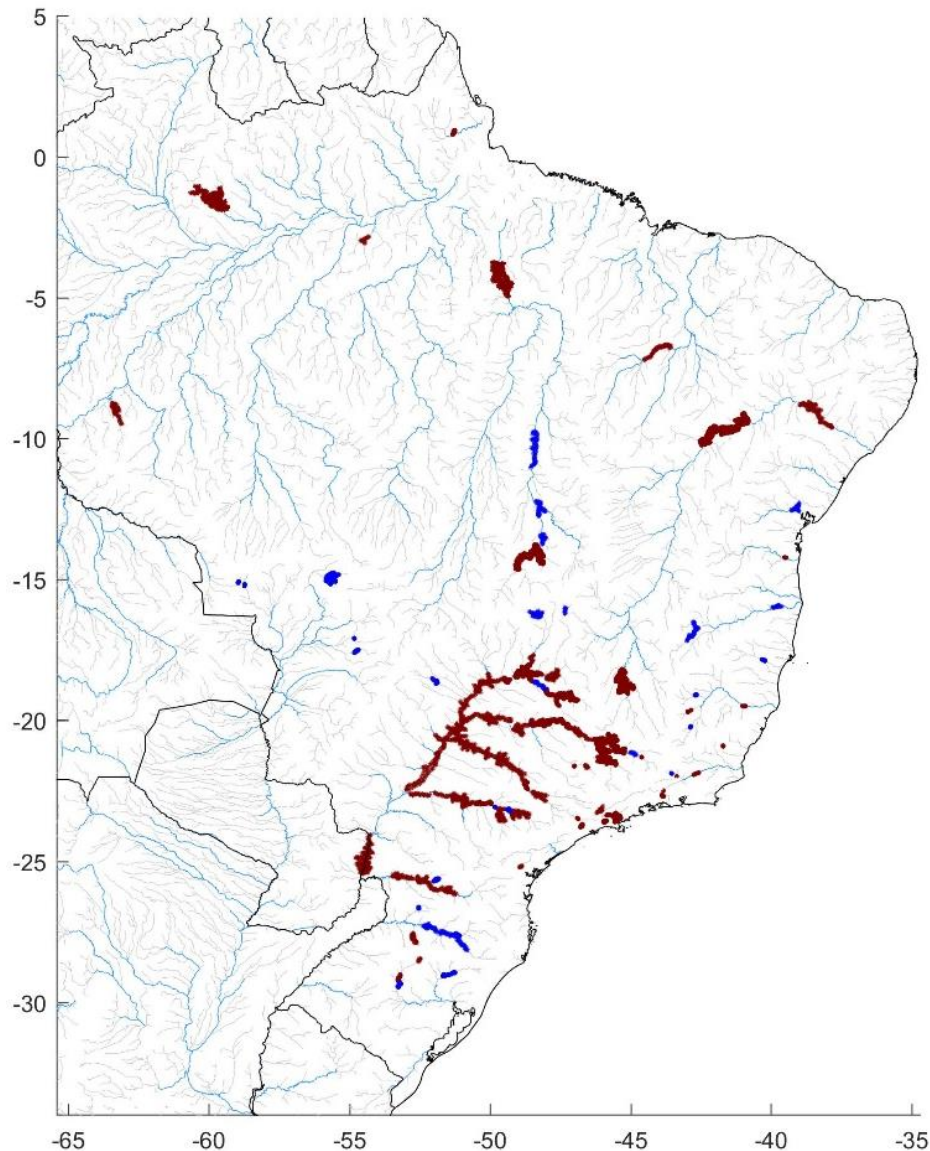
Figura 17 - Fluxograma resumo da metodologia



O SIN possui cerca de **155** reservatórios. Destes, apenas **150** estão no SAR. Entretanto, não foi simulado o reservatório que atende a um ou mais dos critérios: **a)** construído próximo à data final do modelo; **b)** que está na mesma célula e a montante de outro reservatório, já que na abordagem aqui utilizada só é possível um reservatório por célula; **c)** fora dos limites físicos do modelo; e **d)** com dados insuficientes de vazão. Trinta e quatro reservatórios foram simulados com uma regra de operação simples, descrita adiante. O ANEXO B – mostra as principais características de todos os reservatórios simulados, extraídas de uma tabela fornecida pelo ONS, enquanto a Figura 18 mostra seu nome e localização.



Figura 18 - Localização dos 109 reservatórios simulados.



Na Figura 18 aparecem, em azul, os 34 reservatórios que foram construídos após o lançamento da SRTM, e simulados com uma regra simples. Todos os 109 reservatórios da imagem foram inseridos no modelo com vazão substituída. Ou seja, os 34 são parte dos 109.

Conforme Goldemberg (2015), no sudeste do país já estão construídos todos os aproveitamentos disponíveis. A Figura 18 mostra a concentração de grandes reservatórios de usinas hidrelétricas na região, aproveitando a propícia topografia acidentada.

#### 4.1 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

As informações de vazões, cotas, volumes, tanto ao longo do tempo, quanto em curvas cota-volume, necessitaram ser baixadas dos sites do SAR e do ONS. Feito isso, todas as grandezas de interesse foram extraídas através de rotinas de programação em Matlab, gerando diversas

variáveis organizadas e sistematizadas. Foi realizada uma **análise exploratória** desses dados, para verificar a existência de padrões e relações entre variáveis como a vazão defluente, afluente, armazenamento (cota e volume) e época do ano.

## 4.2 O MÓDULO DE RESERVATÓRIOS NO MGB

A maioria dos estudos globais e regionais trata os reservatórios como um ponto, ou seja, o armazenamento não é distribuído entre as várias células. No MGB, o volume total do reservatório será dividido entre as minibacias que o contém, e a vazão de entrada propagada através do método inercial. O único registro na bibliografia de uma modelagem tão detalhada em modelos de grande escala é de Shin *et al.* (2018), no modelo *LEAF-Hydro-Flood-Dam*. Pode haver somente um reservatório (ou parte dele) por célula e por trecho de rio. A evaporação será calculada através de Penman-Monteith, utilizando a área inundada. A precipitação sobre o reservatório também será incluída, utilizando dados de chuva medida por satélite. A área do espelho d'água é descontada da área total da minibacia, e o balanço hídrico é realizado no restante do terreno, conforme o tipo e uso do solo.

### 4.2.1 Modelo com vazões substituídas

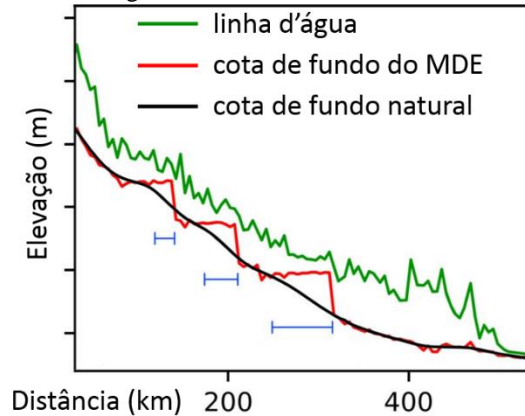
A maneira mais precisa para considerar reservatórios num modelo hidrológico é substituir a vazão defluente observada diretamente no modelo. Para tal, foram utilizados os dados dos 109 reservatórios disponíveis no SAR. Essa simulação foi chamada de **simulação S**.

### 4.2.2 Informação topo-batimétrica e demais características

As relações cota-área-volume podem ser descritas por dados tabulares, ou equações lineares ou não-lineares ajustadas a partir das observações. No MGB, para realizar a propagação através do método inercial são geradas curvas cota-área-volume para cada minibacia, baseadas na informação do modelo digital de elevação (MDE). Neste trabalho, será utilizado o *Bare Earth SRTM 1.0 DEM* (O'Loughlin *et al.*, 2016). Como a SRTM operou em fevereiro de 2000, para os reservatórios construídos após esta data pode-se utilizar a curva das suas minibacias. A curva cota-área é feita extraído do MDE, através de geoprocessamento, a área inundada correspondente à cada nível, de metro em metro. Em reservatórios mais antigos, o MDE da região corresponde à lâmina d'água (Figura 19). Por esta razão, apenas 34 reservatórios (dentro

os 109) foram simulados com a regra simples de operação. A localização do reservatório, área máxima, as células que ele ocupa e o local do exutório na rede de drenagem foram obtidos dos dados de massas d'água do país, da ANA ([http://dados.gov.br/dataset/inde\\_2](http://dados.gov.br/dataset/inde_2)).

Figura 19 - Perfil longitudinal do Rio White baseado no MDE da SRTM



As barras azuis horizontais representam a localização e extensão longitudinal das maiores barragens (fonte: baseado em Shin *et al.*, 2018)

### 4.2.3 Cálculo do balanço de massa no reservatório

O balanço de massa será calculado a partir de 1990, ou a partir do ano que a barragem foi construída, até 2010. Utilizou-se a equação 4, com duas pequenas modificações: a precipitação sobre o reservatório será incluída no balanço de massa e não se levará em conta a sedimentação. A hipótese utilizada é que, devido ao período de simulação, um horizonte de tempo decenal, a sedimentação ainda será pouco significativa. Além disso, as incertezas na hipsometria, dados de entrada e demais variáveis englobaria o ínfimo volume do reservatório preenchido por sedimentos. O método apresentado utiliza a equação da continuidade concentrada, que tem como hipótese principal a existência de um nível horizontal de água no reservatório. Além disso, é considerada apenas a perda de água por evaporação, não incluindo outras eventuais parcelas. É feito o balanço de massa em cada minibacia que compõe o reservatório (equação 5). Além disso, apenas parte da minibacia pode estar inundada, portanto ainda é feito o balanço hídrico do restante da área, com base nas URH.

$$S_t = S_{t-1} + \Delta t * \left[ Q_t^{in} + Q_t^{cel} - Q_t^{out} + (P_t^{res} - E_t^{res}) * \frac{A}{DTP} * 1000 \right] \quad (5)$$

Onde:

$S_t$  = armazenamento no tempo  $t$  (m<sup>3</sup>);

$S_{t-1}$  = armazenamento no tempo  $t-1$  (m<sup>3</sup>);

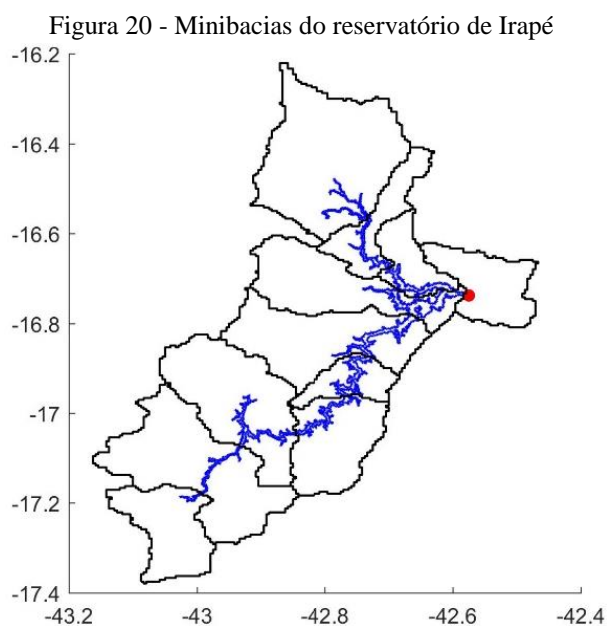
$\Delta t$  = passo de tempo do modelo inercial (s);

$Q_t^{in}$  = vazão afluente ( $m^3/s$ );  
 $Q_t^{cel}$  = vazão gerada na minibacia pelo balanço hídrico ( $m^3/s$ );  
 $Q_t^{out}$  = vazão defluente ( $m^3/s$ );  
 $P_t^{res}$  = precipitação sobre o reservatório (mm);  
 $E_t^{res}$  = evaporação no reservatório (mm);  
 $A$  = área superficial do reservatório ( $km^2$ );  
 $DTP$  = intervalo de tempo do cálculo principal (s).

#### 4.2.4 Estimativa da vazão defluente

Os algoritmos desenvolvidos por Hanasaki *et al.* (2006) (posteriormente usado em diversos modelos globais, como HANASAKI *et al.*, 2008b; DÖLL *et al.*, 2009; BIEMANS *et al.*, 2011; WADA *et al.*, 2014; HANASAKI *et al.*, 2018), Haddeland *et al.* (2006), por Zhao *et al.* (2016), Zhou *et al.* (2016) e Shin *et al.* (2018) não foram utilizados neste trabalho, pois levam em conta a demanda de água a jusante, que não é o foco no momento. O objetivo é avaliar regras simples e aplicáveis em modelos hidrológicos em grande escala sem simulação ou consideração dos usos d'água. A regra desenvolvida por Zajac *et al.* (2017) foi concebida para reservatórios com uso exclusivo para controle de cheias, e os reservatórios do SIN operam com diversos propósitos. Além disso, ela é complexa e de difícil aplicação, e depende bastante dos seus diversos parâmetros de entrada. Por estas razões, também não foi simulada neste trabalho.

O uso de regras não específicas provavelmente fará com que o modelo de reservatórios seja menos preciso. Entretanto, quando se trabalha em escala global ou regional, a abordagem normalmente utilizada e que é possível de ser feita é esta. A regra avaliada neste trabalho não leva em consideração o conhecimento sobre a vazão futura, não realiza uma operação conjunta de reservatórios e nem leva em conta transposição de águas. Utilizou-se a equação 1 (DOLL *et al.*, 2003). Daqui em diante, essa simulação será chamada de **simulação D**. O volume total armazenado no reservatório no passo de tempo atual é dado pela soma dos volumes de todas as minibacias que o compõem (por exemplo, Figura 20).



(em preto, as minibacias que compõem o reservatório; em azul, o espelho d'água; em vermelho, o exutório)

### 4.3 O MODELO HIDROLÓGICO DA AMÉRICA DO SUL

Uma desvantagem ao comparar o uso e a disponibilidade de água em nível nacional é a situação dos rios internacionais, onde a disponibilidade de água para um país a jusante depende muito de afluentes oriundos de outro país a montante ou vizinho. Consequentemente, para obter resultados significativos, as retiradas de água e a disponibilidade devem ser comparadas no nível da bacia hidrográfica ou da sub-bacia em vez do país (ALCAMO *et al.*, 2003).

O modelo MGB utilizado nessa pesquisa foi o modelo hidrológico da América do Sul (SIQUEIRA *et al.*, 2018). Esse modelo foi desenvolvido no âmbito do projeto SAME Water (*South America Water Studies*), termo que remete a “mesma” água, pois boa parte das bacias brasileiras são transfronteiriças (PAIVA *et al.*, 2017). A ideia do projeto é utilizar modelos hidrológicos (principalmente o MGB) e observações *in situ* e de sensoriamento remoto para estudar os processos hidrológicos, fazer reanálises e sistemas de previsão para a América do Sul (Figura 20). A Tabela 4 mostra as bases de dados utilizadas na elaboração do modelo.

Figura 21 - Projeto SAME Water

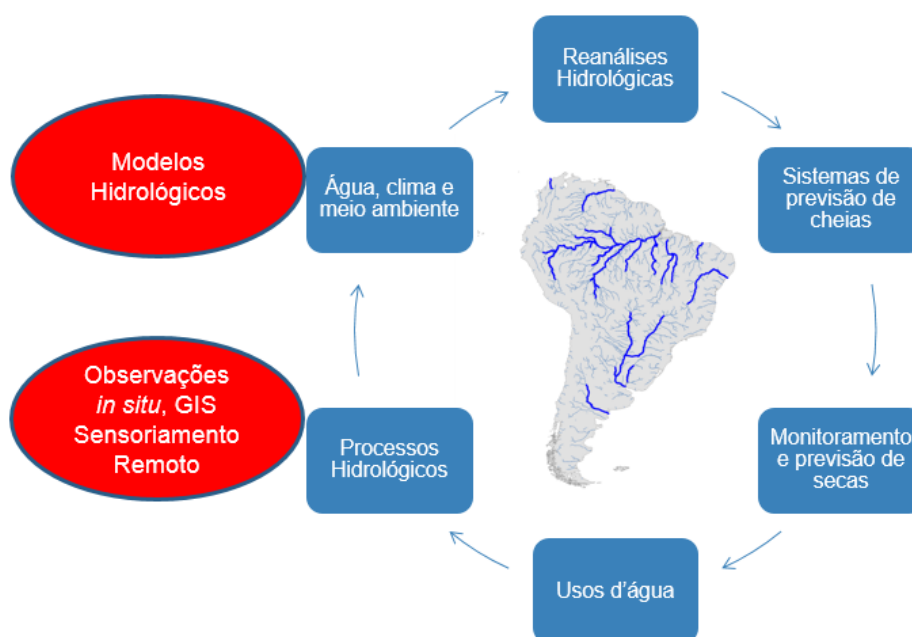
(fonte: baseado em PAIVA *et al.*, 2017)

Tabela 4 - Bases de dados utilizadas no modelo MGB para a América do Sul

Informação	Descrição dos dados	Referência
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Bare-Earth SRTM v 1.0 DEM, <i>upscaled</i> 450m	O'Loughlin <i>et al.</i> , 2016
Mapa de direções de fluxo	Global HydroSHEDS Flow Direction Map, 450m	Lehrer <i>et al.</i> , 2008
Precipitação	Global Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation v 1.1 (MSWEP), resolução de 0,25°	Beck <i>et al.</i> , 2017
Clima	Médias mensais climatológicas do <i>Climate Research Unit</i> (CRU Dataset v 2.0)	New <i>et al.</i> , 2002
Dados de vazão (> 10 000 km <sup>2</sup> )	Observações <i>in situ</i> – ANA (Brasil); Vazões naturalizadas de reservatórios (ONS – Brasil); INA (Argentina); IDEAM (colômbia); DGA (Chile), SENAMHI (Peru e Bolívia); ORE-HyBAM (Internacional); <i>Global Runoff Data Center</i> - GRDC (Internacional). Total de 612 postos utilizados.	-
Uso do Solo/Tipo do solo	Mapa de URHs para a América do Sul, <i>upscaled</i> 450m	Fan <i>et al.</i> , 2015
Geologia/Litologia	Global lithologic composition of the Earth's continental surfaces dataset	Durr <i>et al.</i> , 2005
Largura/profundidade dos rios	Global bankfull width and depth database; relações geomorfológicas de estudos regionais	Andreadis <i>et al.</i> , 2013; Paiva <i>et al.</i> , 2013; Pontes, 2016

(fonte: adaptado de SIQUEIRA *et al.*, 2017)

#### 4.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Recapitulando, foram comparadas duas diferentes simulações (D e S) com dados de vazão observada. Para tal, utilizaram-se vazões medidas *in situ* da rede de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram geradas séries temporais de vazões, comparando o cenário natural e o com reservatórios e também mapas de impacto nas vazões da rede de drenagem.

Utilizaram-se os índices de eficiência de Kling-Gupta (KGE, GUPTA *et al.*, 2009, equação 7) e de Nash-Suttcliffe (NSE, NASH e SUTTCIFFE, 1970, equação 8), correlação de Pearson (r, equação 6) e também a diferença percentual no volume. Outra métrica interessante utilizada por Zajac *et al.* (2017) é o que eles chamaram de *skill score*, traduzido aqui como “índice de melhoria de desempenho (IMD)”. Um IMD positivo significa que a performance do modelo com reservatórios melhorou, enquanto que negativo, piorou. É apresentado na equação 9 o exemplo para o KGE, mas pode ser aplicada também para qualquer outro índice de desempenho. O KGE<sub>ótimo</sub> é igual a 1.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

Onde:

r = correlação de Pearson;

n = tamanho da amostra;

$x_i$  e  $y_i$  = vazões simuladas e observadas;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  = médias das vazões simuladas e observadas;

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{s_o}{s_s} - 1\right)^2 + \left(\frac{\overline{Q_o}}{\overline{Q_s}} - 1\right)^2} \quad (7)$$

Onde:

r = correlação de Pearson;

$s_o$  = desvio padrão das vazões observadas;

$s_s$  = desvio padrão das vazões modeladas;

$\overline{Q_o}$  = média das vazões observadas;

$\overline{Q_s}$  = média das vazões simuladas;

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_s^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (8)$$

Onde:

$Q_s^t$  = vazão simulada no tempo t;

$Q_o^t$  = vazão observada no tempo t;

$\overline{Q_o}$  = média das vazões observadas;

$$IMD_{KGE} = \frac{KGE_{res} - KGE_{nat}}{KGE_{ótimo} - KGE_{nat}} \quad (9)$$

Onde:

$IMD_{KGE}$  = índice de melhoria de desempenho do KGE;

$KGE_{res}$  = KGE na simulação **com** reservatórios;

$KGE_{nat}$  = KGE na simulação **sem** reservatórios;

$KGE_{ótimo} = 1$ .

## 4.5 ANÁLISE DO IMPACTO DOS RESERVATÓRIOS NO REGIME DE VAZÕES

Foi calculada a média da diferença percentual absoluta entre as vazões anuais da simulação com vazões naturalizadas (N) e a simulação com vazões substituídas (S) para as principais bacias da América do Sul (Amazônica, Tocantins, São Francisco e Paraná, equação 10). Outras medidas de desempenho que podem ser utilizadas para analisar a mudança nas vazões são a raiz do erro médio quadrático percentual absoluto (RMSE), a correlação (r), o desvio padrão, e as diferenças absolutas na  $Q_{10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{média}$ , entre a simulação S e a N, como apresentado aqui.

$$Q_{média}^{anual} = \frac{\sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{ anos}} \left| \frac{Q_{nat}^{anual} - Q_{res}^{anual}}{Q_{nat}^{anual}} \right|}{n_{anos}} \quad (10)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DO COMPORTAMENTO DE RESERVATÓRIOS

É importante analisar o comportamento do armazenamento e defluências dos reservatórios para compreender quais variáveis regem esse comportamento (por exemplo, a vazão afluente, a época do ano). A Figura 23, Figura 24 e Figura 25 servem para observar o comportamento das vazões, cotas e volumes em cada um dos reservatórios. Isso foi feito para os 109 reservatórios estudados, e para os dados do ONS correspondentes a esses, quando existem. São apresentados resultados para seis reservatórios (Figura 22), escolhidos com o objetivo de abranger diferentes regiões e volumes de armazenamento.



Figura 22 - Localização dos seis reservatórios da análise exploratória

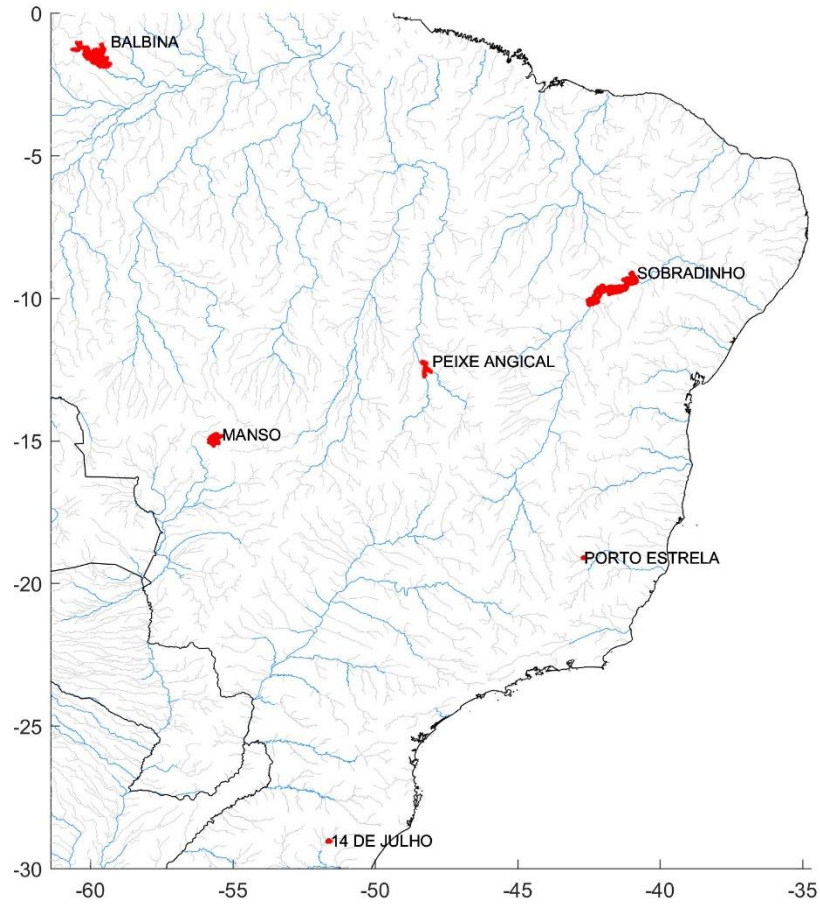
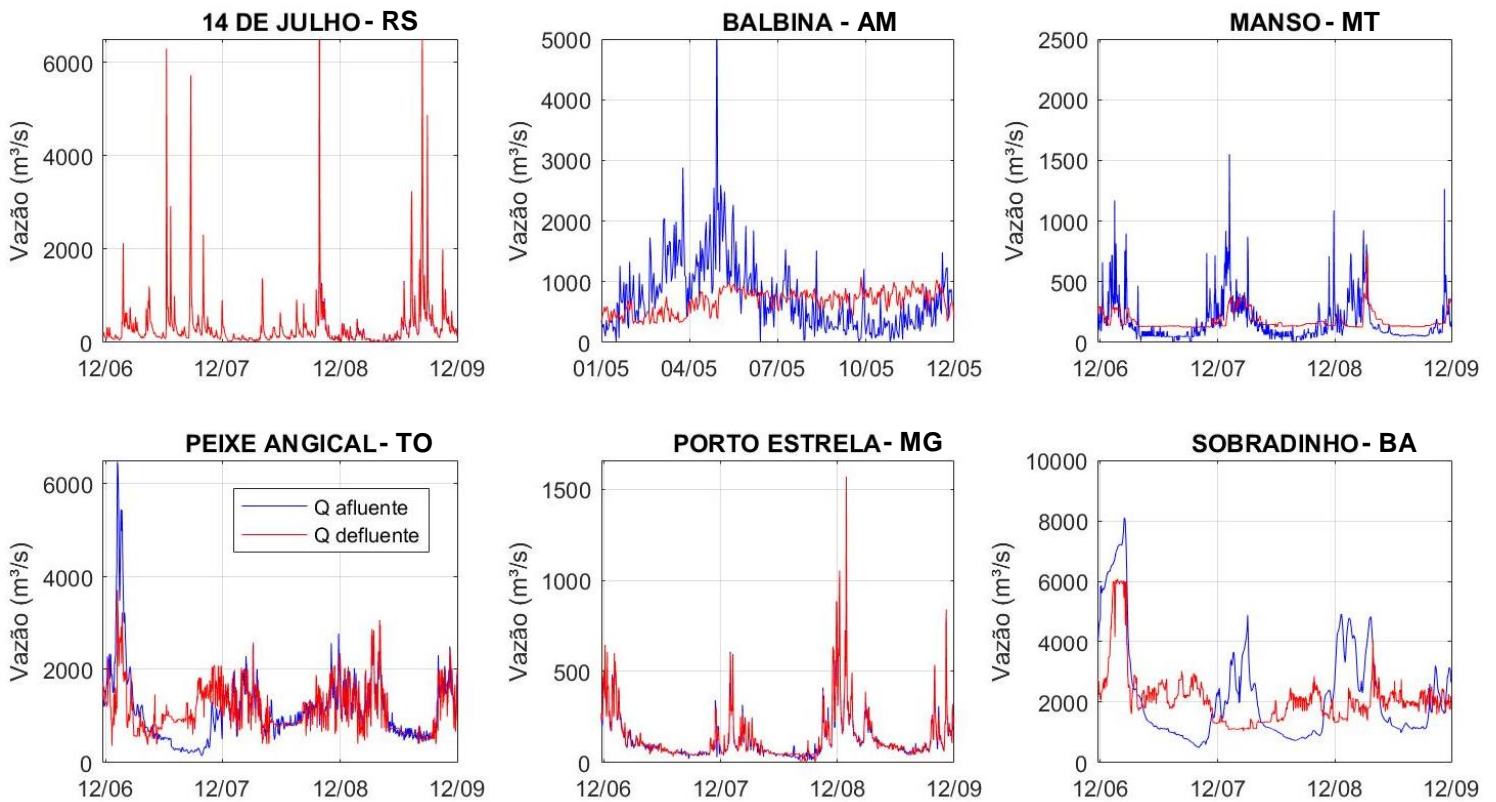
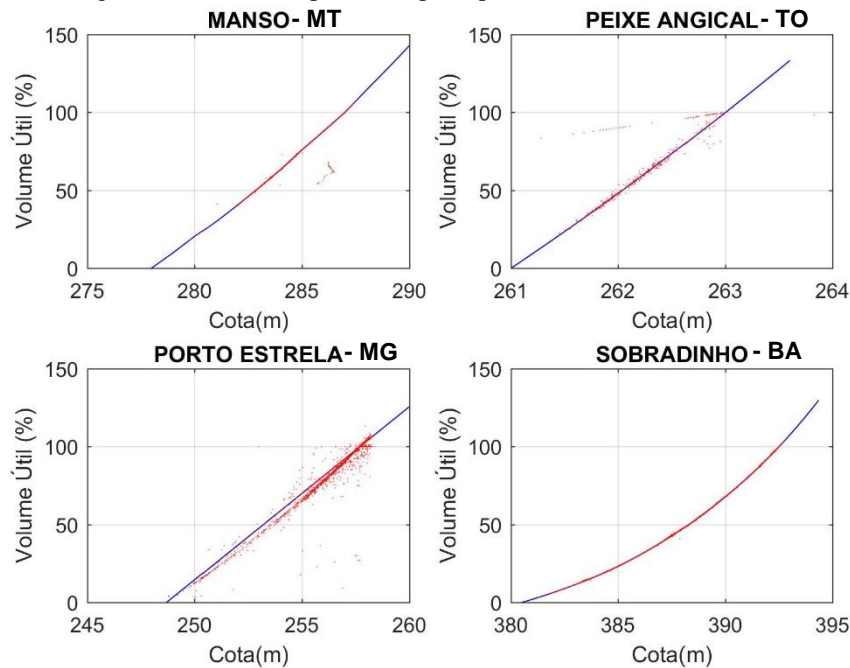


Figura 23 – Vazões afluentes e defluentes de seis reservatórios hidrelétricos brasileiros



(Vazões afluentes e defluentes em azul e vermelho, respectivamente)

Figura 24 – Porcentagem do volume útil pela cota, para quatro reservatórios hidrelétricos brasileiros



(Volumes do SAR ao longo do tempo em vermelho, curva cota-volume do ONS em azul. Os reservatórios de 14 de Julho e Balbina não disponibilizaram essas informações no SAR e ONS).

Figura 25 - Cota de seis reservatórios hidrelétricos brasileiros ao longo do tempo

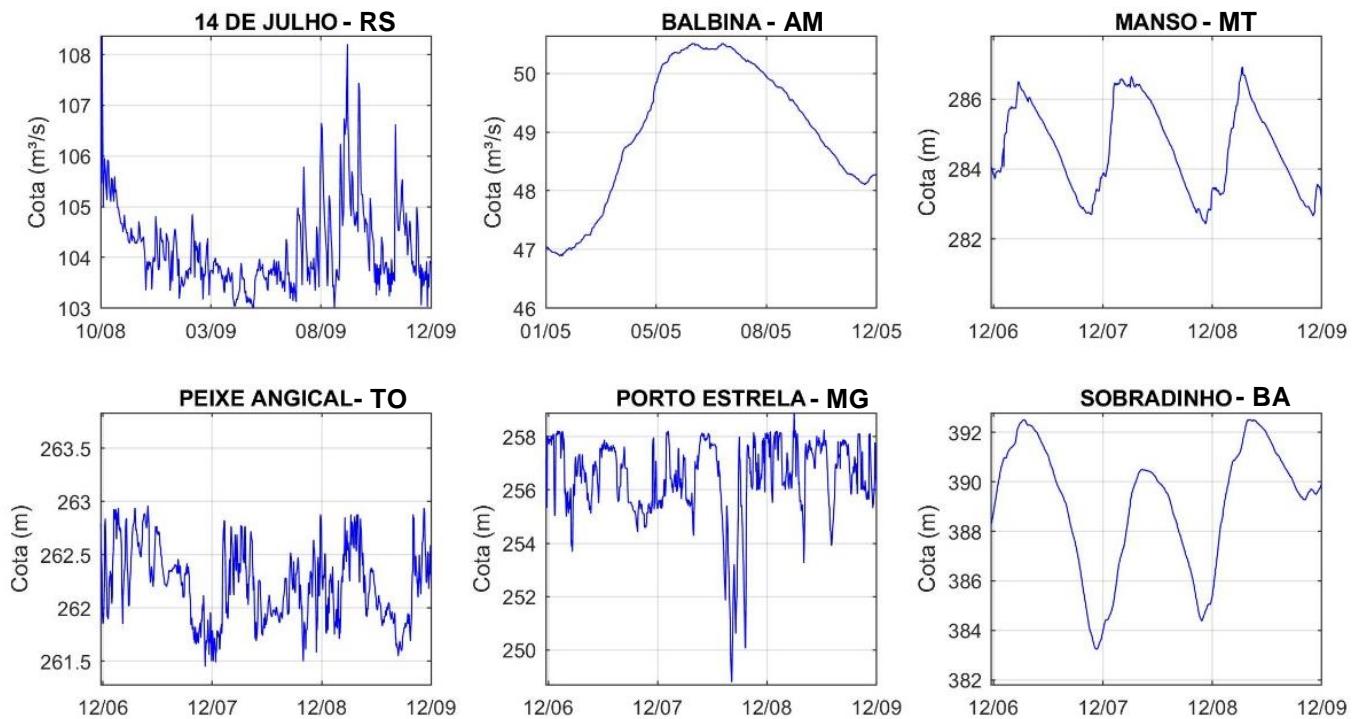
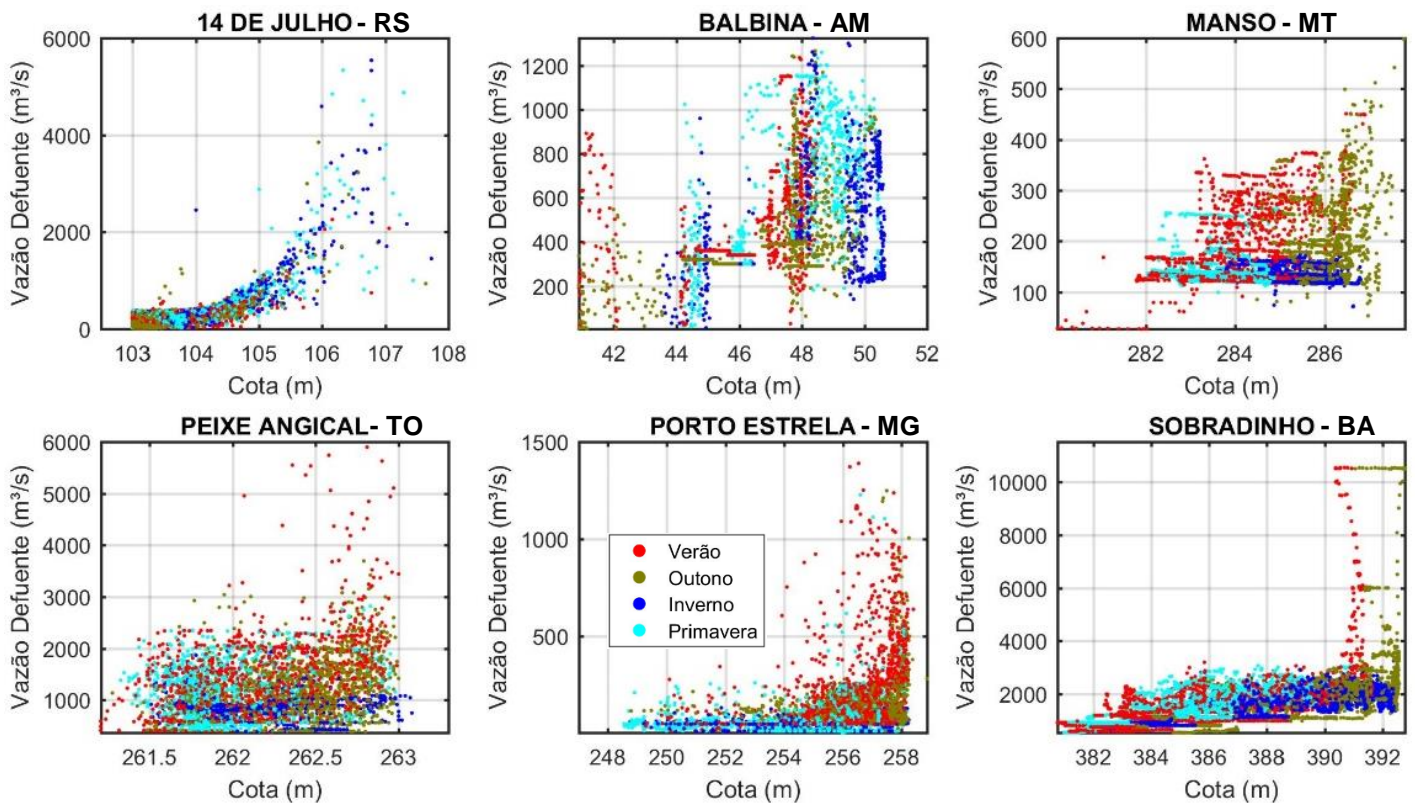


Figura 26 - Vazão defluente de seis reservatórios hidroelétricos brasileiros em função do armazenamento (cota d'água) e estação do ano

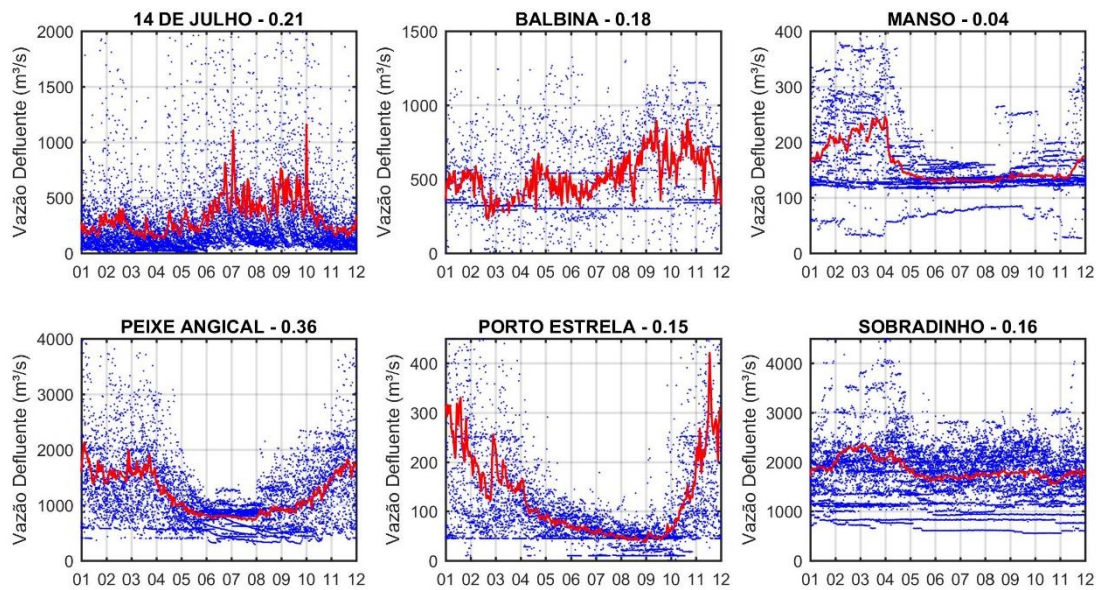


Analisando o comportamento das vazões e cotas no tempo, é possível observar a sazonalidade, com os períodos de seca e cheia bem demarcados em alguns reservatórios. As curvas cota por porcentagem do volume útil do SAR e do ONS se sobrepõem, indicando uma concordância dos dados de bases diferentes. Quanto à relação entre cota e vazão, é difícil deduzir qualquer regra de operação com base no seu comportamento. Entretanto, observa-se que os reservatórios de Manso, Porto Estrela e Sobradinho possuem seus maiores valores de vazão no verão e outono; enquanto 14 de Julho, no inverno e primavera, por estar localizado no Rio Grande do Sul. Balbina e Peixe Angical não possuem um padrão claro.

Investigou-se o comportamento médio de algumas variáveis ao longo do ano (Figura 27 a Figura 30). Com base na Figura 27, é possível dizer que, para os reservatórios de Manso, Peixe Angical e Porto Estrela, há um período com menor liberação de vazão, entre maio e meados de outubro, visto que nesses meses de outono e inverno chove menos, conforme o clima sazonal da região. Para todos os reservatórios, a vazão defluente pode variar centenas de m³/s para o mesmo dia, em diferentes anos. Visualmente a dispersão é grande, para a afluência e para a defluência. As correlações ficaram na ordem de 0,2, indicando baixa relação entre o dia do ano e a vazão defluente.

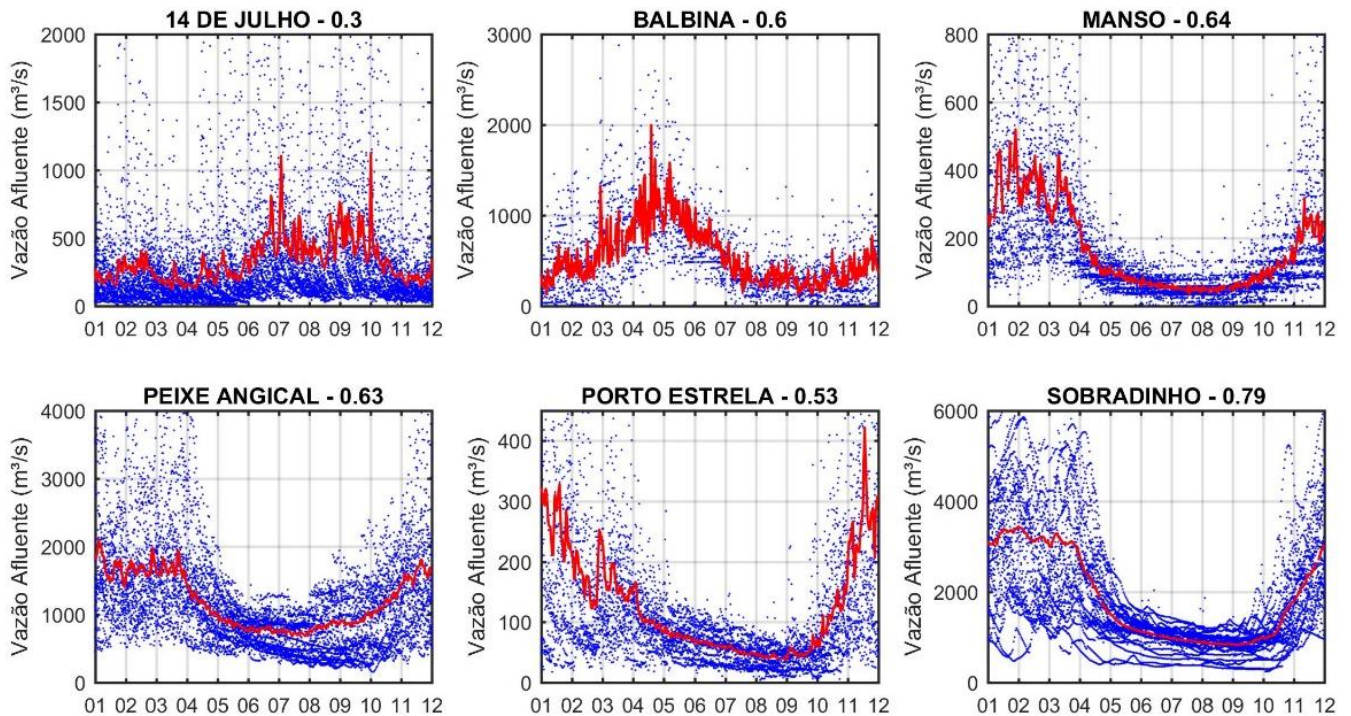


Figura 27 - Vazão defluente média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros



(média ao longo do ano em vermelho, demais pontos em azul; no título, nome do reservatório e a correlação da vazão defluente com o dia do ano)

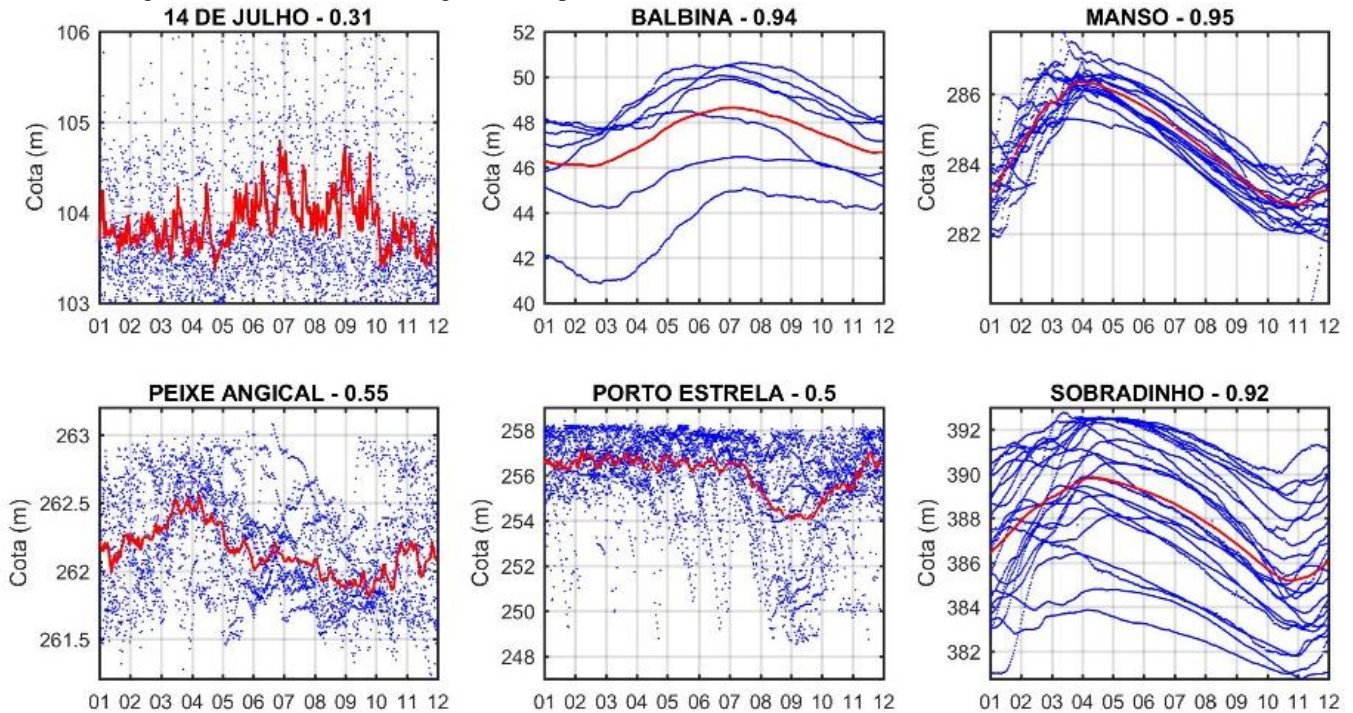
Figura 28 - Vazão afluente média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros



(média ao longo do ano em vermelho, demais pontos em azul; no título, nome do reservatório e a correlação da vazão afluente com o dia do ano)

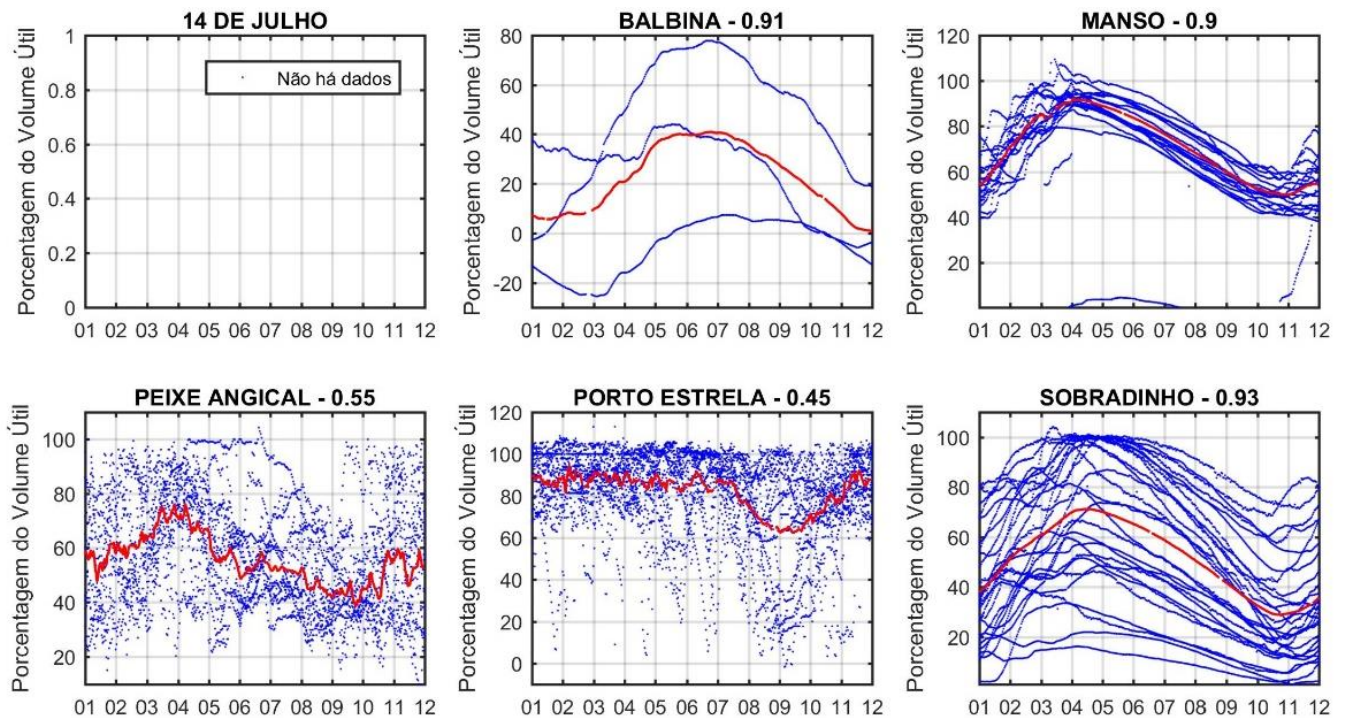


Figura 29 - Cota média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros



(média ao longo do ano em vermelho, demais pontos em azul; no título, nome do reservatório e a correlação da cota com o dia do ano)

Figura 30 - Porcentagem do volume útil média ao longo do ano, para seis reservatórios hidrelétricos brasileiros



(média ao longo do ano em vermelho, demais pontos em azul; no título, nome do reservatório e a correlação do volume útil com o dia do ano)

Pode-se concluir o mesmo da defluência para a afluência. A maior diferença é na correlação do reservatório de Sobradinho. Sua correlação na afluência é 0,79; e na defluência, 0,16; o que mostra sua grande capacidade de reserva e o impacto na hidrologia. Em bacias sazonais, espera-se uma correlação maior entre afluência e época do ano.

A cota (Figura 29) e a porcentagem do volume útil (Figura 30) foram analisados juntos, visto que o padrão é o mesmo. Isso acontece porque a cota e o volume se relacionam morfologicamente através de uma curva cota-volume. Não há dados de volume ao longo do tempo para o reservatório de 14 de Julho. Tanto a cota quanto o volume também apresentam alta dispersão para os reservatórios de 14 de Julho, Peixe Angical e Porto Estrela. Enquanto Balbina, Manso e Sobradinho seguem um padrão visível, também indicado pelos seus altos valores na correlação. Os dois últimos têm seu pico máximo em abril, e o mínimo em novembro.

A análise da relação entre a vazão defluente e possíveis fatores governantes (e.g. armazenamento, vazão afluente, época do ano) pode ser estudada através do coeficiente de correlação. A variável que mais explica a vazão defluente é a vazão afluente. A correlação média é 0.79. O segundo fator mais relevante é o armazenamento, representado aqui pelo volume e pela cota, com correlações médias de 0.31 e 0.22, respectivamente (Figura 31). A correlação circular entre vazão defluente e dia do ano apresentou correlação média de 0.19, sendo o fator menos importante.

Figura 31 - Histogramas de correlações

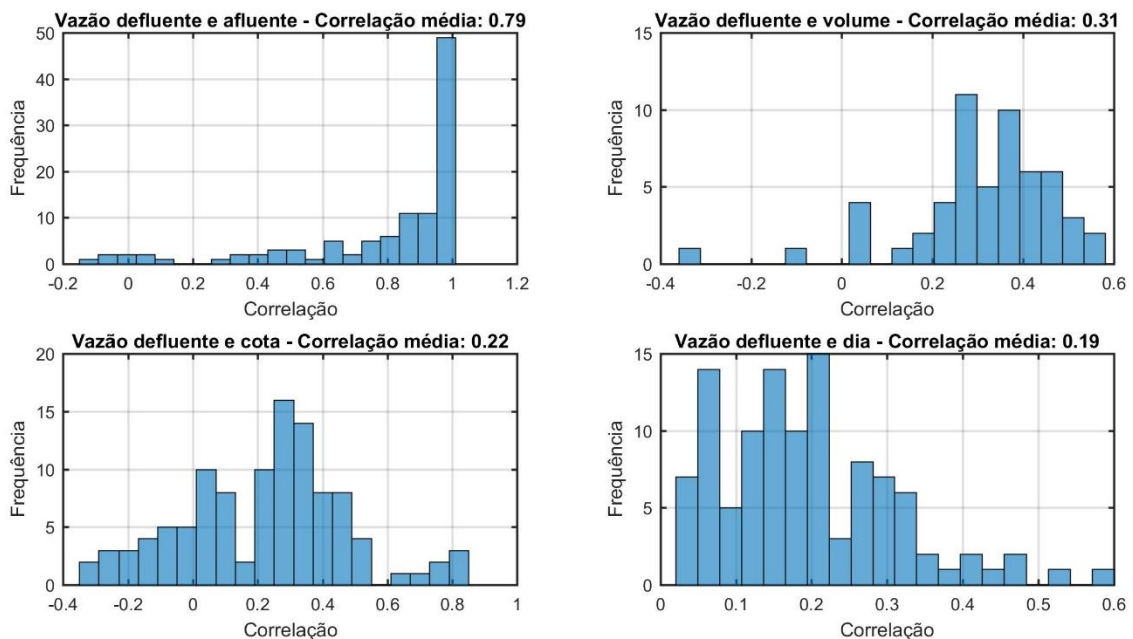


Figura 32 - Correlação pela capacidade de armazenamento do reservatório

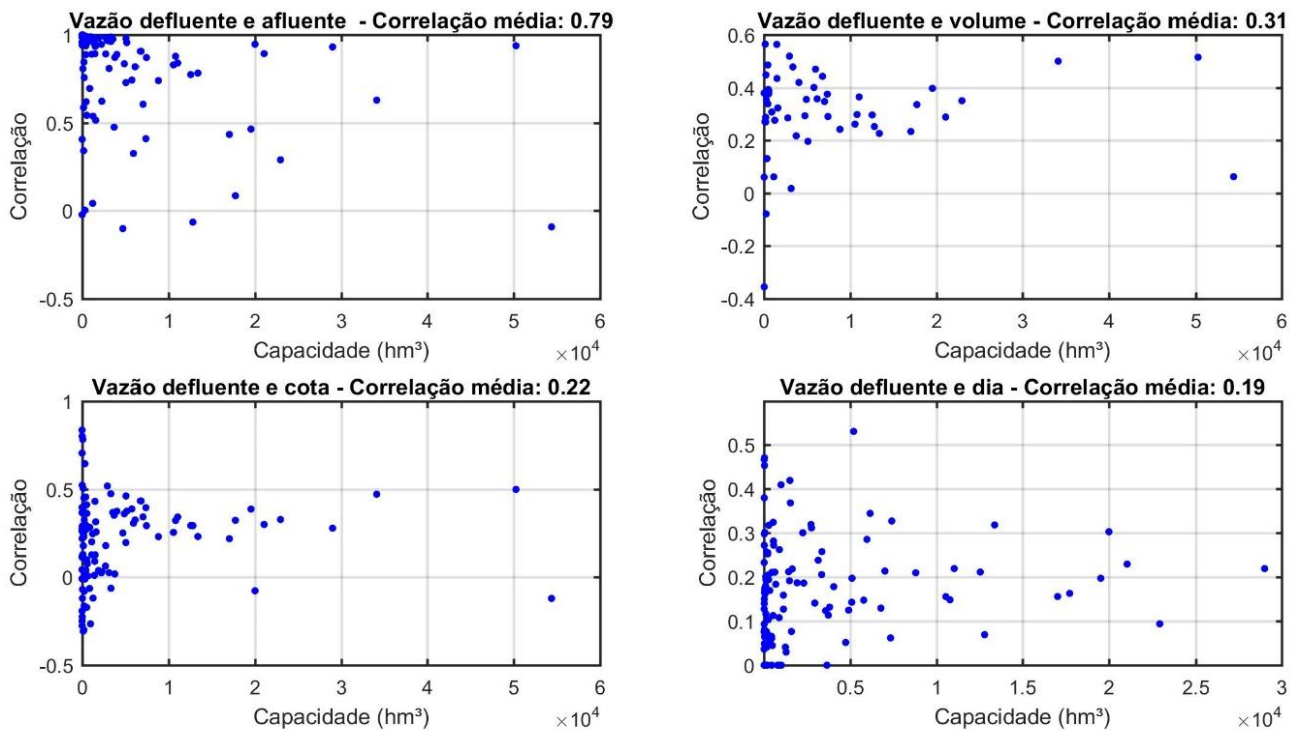
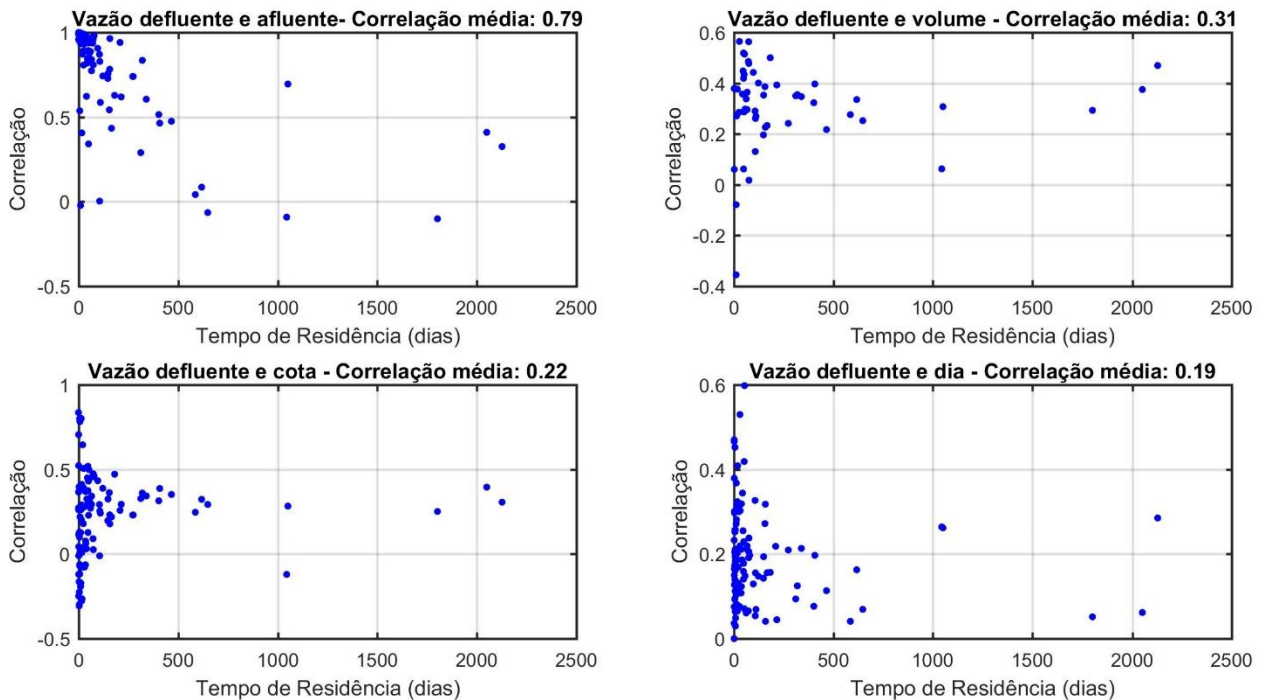


Figura 33 - Correlação pelo tempo de residência



Pelos reservatórios possuírem pouca capacidade de regularização, e boa parte operar a fio d'água, a correlação entre afluência e defluência é grande. Goldemberg (2015) mostra que, desde 1985, usinas a fio d'água são construídas em maior número, e houve um declínio sistemático do volume armazenado total brasileiro.



“À medida que os novos aproveitamentos se deslocaram para a região amazônica, que é muito mais plana, grandes reservatórios se tornaram mais difíceis de ser incorporados aos projetos por uma variedade de razões, que vão desde os problemas sociais e ambientais ocasionados por eles, até uma falta de interesse de empresas em despendar recursos para atenuá-los” (GOLDEMBERG, 2015).

Visualmente, não se pode concluir que quanto maior a capacidade de armazenamento do reservatório, maior a correlação entre a vazão defluente e demais variáveis (Figura 32). O volume do reservatório não parece ser fator determinante neste caso. Observando a Figura 33, tampouco o tempo de residência influencia a correlação entre vazão defluente e armazenamento (cota e volume). Entretanto, quanto menor o tempo de residência, maior a correlação entre vazão afluyente e defluente (Figura 33). E, pelo contrário, quanto maior o tempo de residência, menor a correlação entre vazão defluente e dia do ano.

Existem padrões no comportamento da vazão defluente. Em alguns casos é explicada pela vazão afluyente, outros pelo armazenamento ou época do ano. Entretanto, não se verificou uma forma sistemática de enquadrar todos os reservatórios em uma regra que pudesse ser resumida em um modelo simplificado de vazões defluentes. É por essa razão que os principais modelos globais com reservatórios utilizam algoritmos simplificados de defluência, ou então uma regra que leve em conta as demandas de água dos reservatórios.

## 5.2 MODELO COM VAZÕES SUBSTITUÍDAS

Para verificar a máxima melhoria em simulações hidrológicas ao longo dos rios da América do Sul e estudar o impacto de reservatórios sobre as vazões naturais, foi realizada uma simulação com vazões substituídas de 109 reservatórios brasileiros.

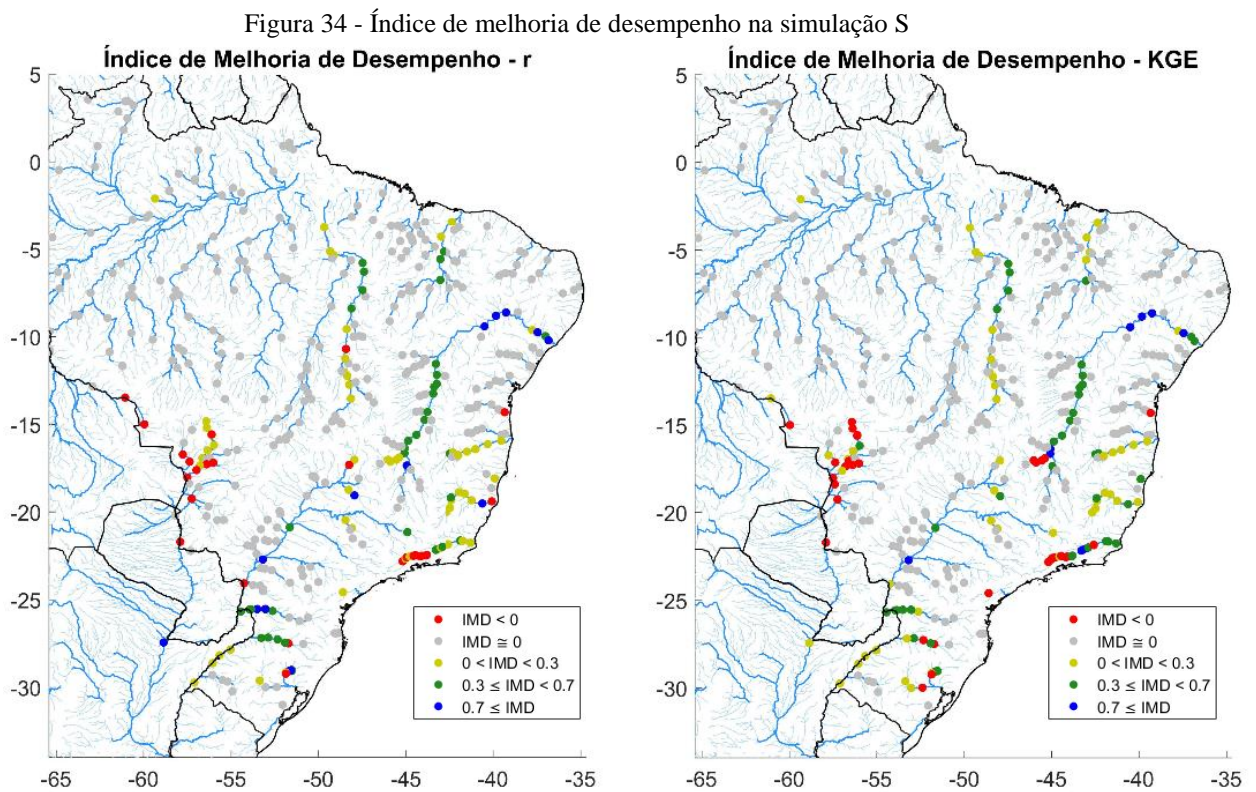
Para a maioria das estações fluviométricas, os índices de desempenho melhoraram (Figura 34). Os lugares onde houve piora dos índices são o litoral sudeste e extremo oeste do Brasil (Paraíba do Sul e Alto Paraguai). Isso pode ser causado por uma incerteza nos dados de entrada, ou também na localização do reservatório, sempre posicionado no exutório de uma célula do modelo, apesar desse último fator fazer pouca diferença. Além disso, como o modelo MGB da América do Sul foi calibrado para a situação sem reservatórios e, por mais que se tenha tomado o cuidado de utilizar vazões naturalizadas e postos sem influência de reservatórios, os parâmetros calibrados foram ajustados no cenário natural com o efeito dos reservatórios no escoamento. Ou seja, provavelmente o efeito dos reservatórios na simulação foi compensado nos parâmetros do modelo. Ao inserir o reservatório, seria necessário recalibrar o modelo, para



retirar essa compensação. Esse é o principal provável motivo para termos resultados inferiores com vazões substituídas.

Devido ao modelo original da América do Sul ainda não possuir um bom desempenho no Nordeste brasileiro (clima semi-árido), à jusante do rio São Francisco houve uma melhora considerável nos resultados, principalmente graças à substituição realizada nos reservatórios de Sobradinho e Luiz Gonzaga, próximos à foz do rio.

O impacto dos reservatórios brasileiros nas vazões pode ser sentido até fora do Brasil. Eles afetam outros países, como, por exemplo, o Paraguai e a Argentina, situados à jusante nos rios Paraguai e Paraná.



(linhas pretas são as fronteiras dos países. Rede de drenagem mais espessa com densidade > 30 000 km<sup>2</sup>. Rede de drenagem menos espessa com densidade > 8000 km<sup>2</sup>)

Escolheram-se seis reservatórios para mostrar o resultado (Figura 35). Para tal, utilizaram-se hidrogramas de saída a jusante (Figura 36) comparados com a simulação original, de vazões naturalizadas. Os reservatórios de Sobradinho e Irapé apresentaram melhora significativa no hidrograma, enquanto, para os outros reservatórios apresentados, o modelo com vazões naturalizadas já representava de maneira satisfatória as vazões.

Figura 35 - Localização dos seis reservatórios para os quais apresentaram-se resultados de vazões substituídas

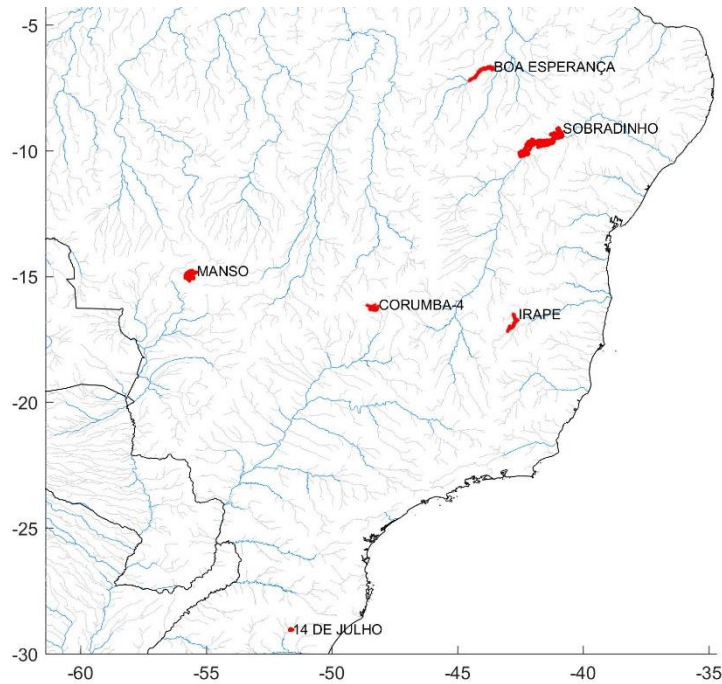
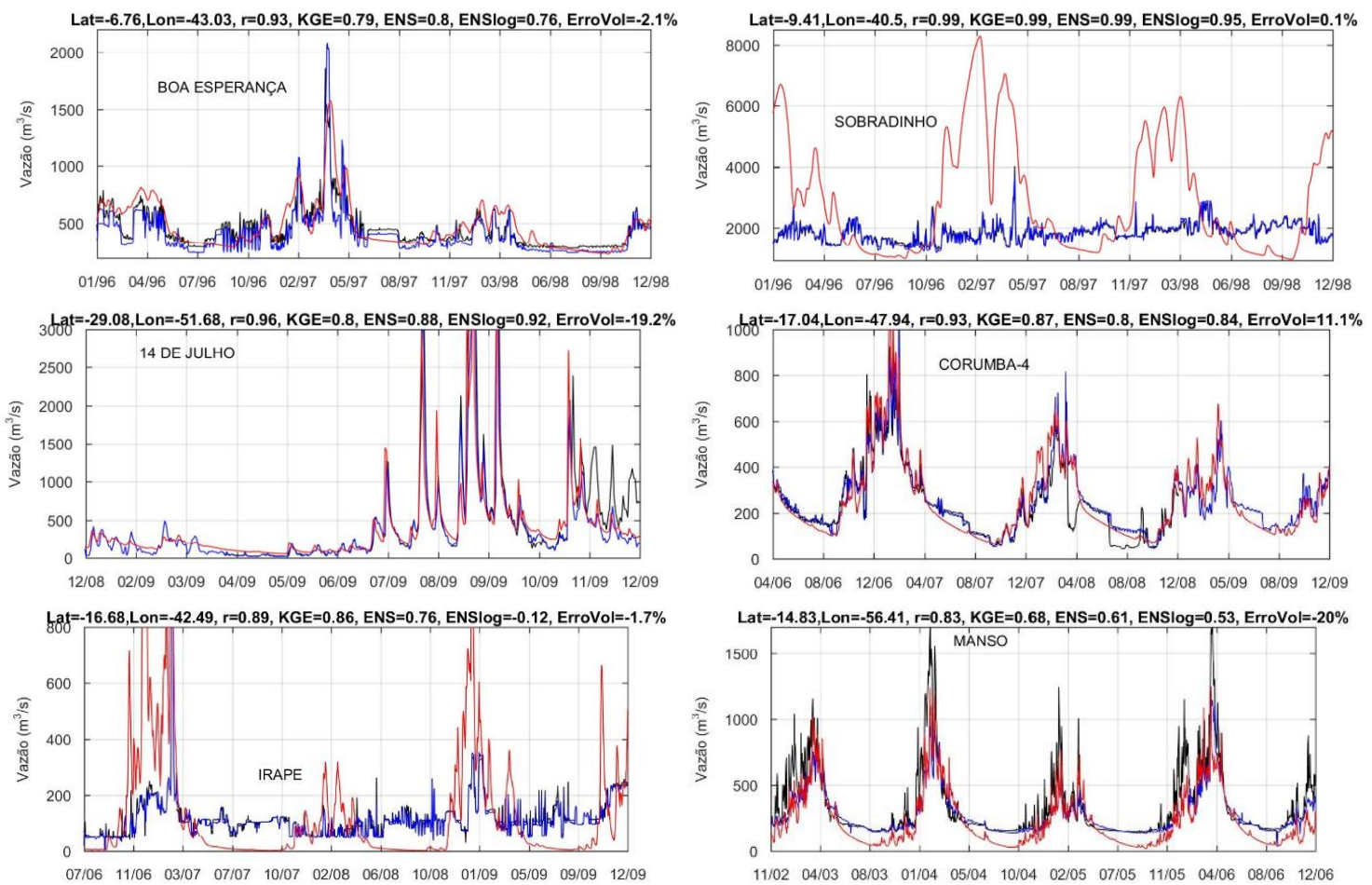


Figura 36 - Hidrogramas das simulações N e S

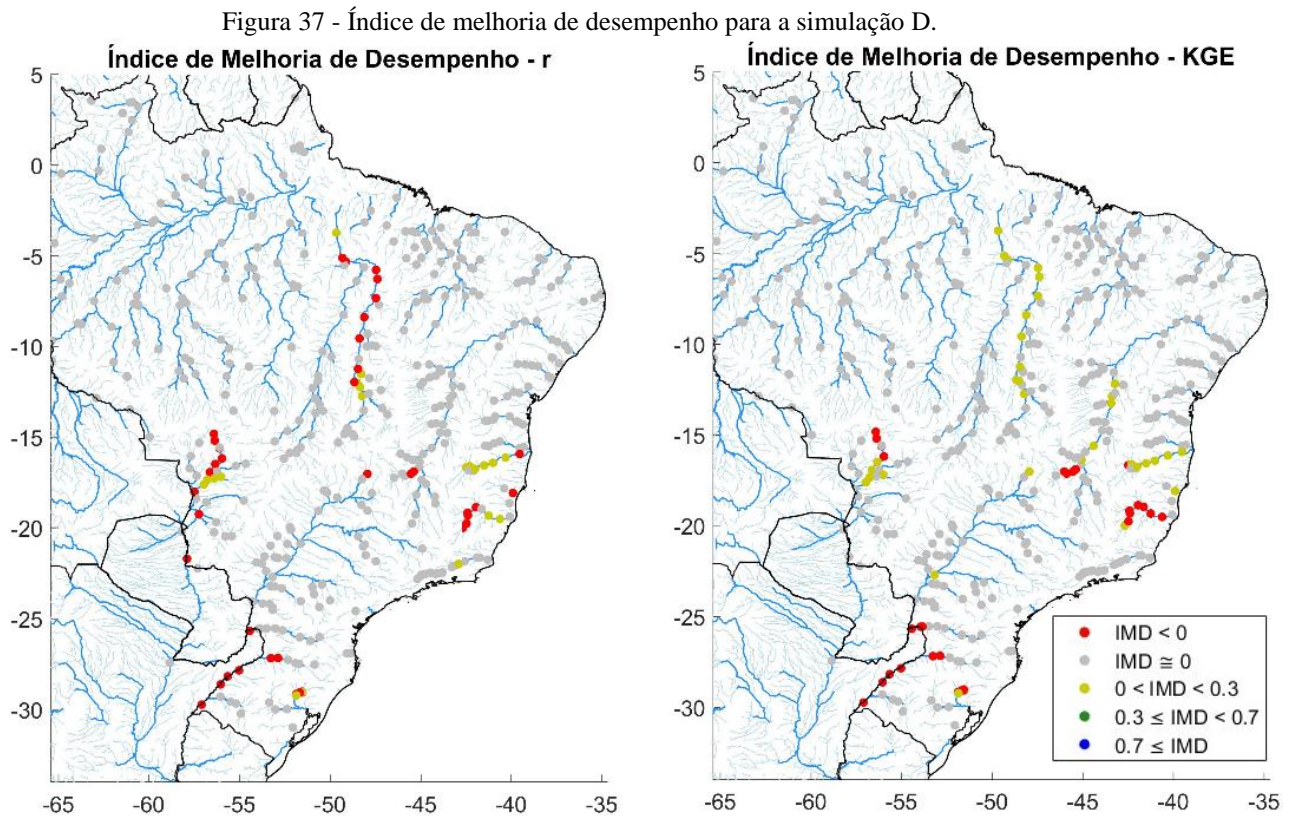


(Em preto a vazão observada, das estações da ANA; em azul, a simulação com vazões substituídas (S); em vermelho, a simulação com vazões naturalizadas (N), do modelo hidrológico original da América do Sul. As estatísticas no título de cada imagem correspondem à simulação com vazões substituídas)



### 5.3 MODELO COM REGRA DE OPERAÇÃO SIMPLES

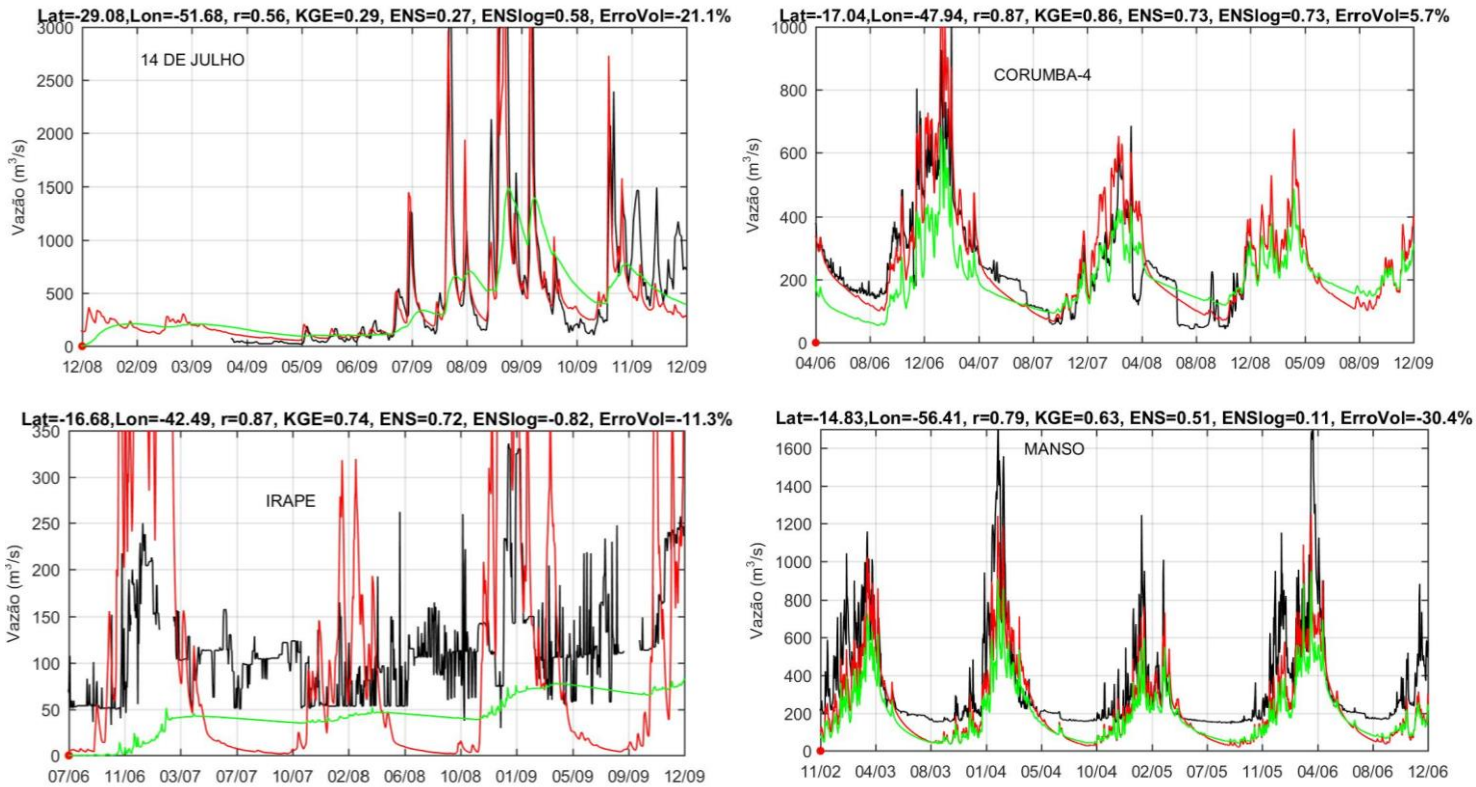
Para verificar o desempenho de um algoritmo simples de cálculo de vazão defluente, esta foi estimada com a regra de DOLL *et al.* (2003) – equação 1. Foram simulados 34 reservatórios, os construídos após fevereiro de 2000.



simulação com vazões naturalizadas para muitas estações fluviométricas analisadas.

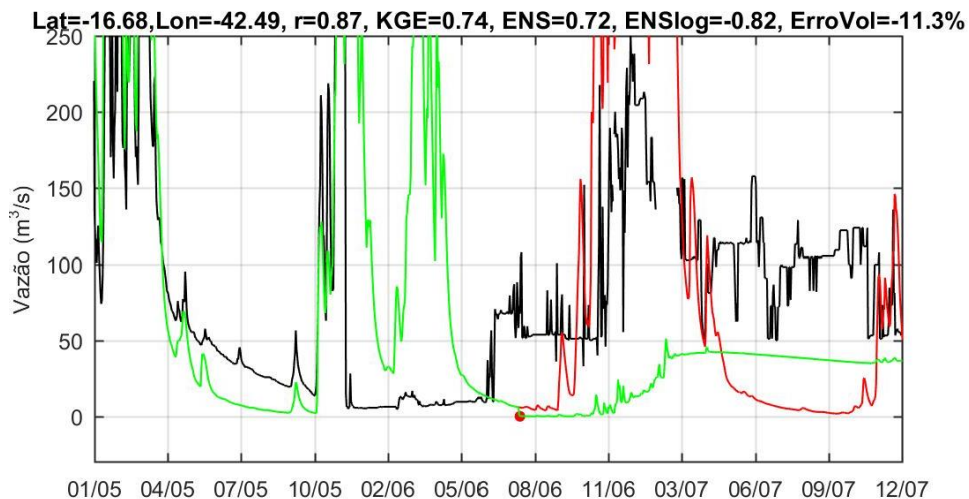
Apresentam-se os mesmos hidrogramas (Figura 38) dos reservatórios da seção anterior, exceto Sobradinho e Boa Esperança, construídos antes da SRTM. É visível que a regra de Döll *et al.* (2003) causa uma atenuação no hidrograma. As vazões foram subestimadas para o reservatório de Irapé, provavelmente devido à uma subestimativa em seu volume no passo de tempo atual.

Figura 38 - Hidrogramas das simulações D e N



(em preto a vazão observada, da ANA; em verde, a simulação com a regra de Doll *et al.* (2003, D); em vermelho, a simulação com vazões naturalizadas (N); o ponto vermelho é a data de construção do reservatório)

Figura 39 - Hidrograma a jusante do reservatório de Irapé



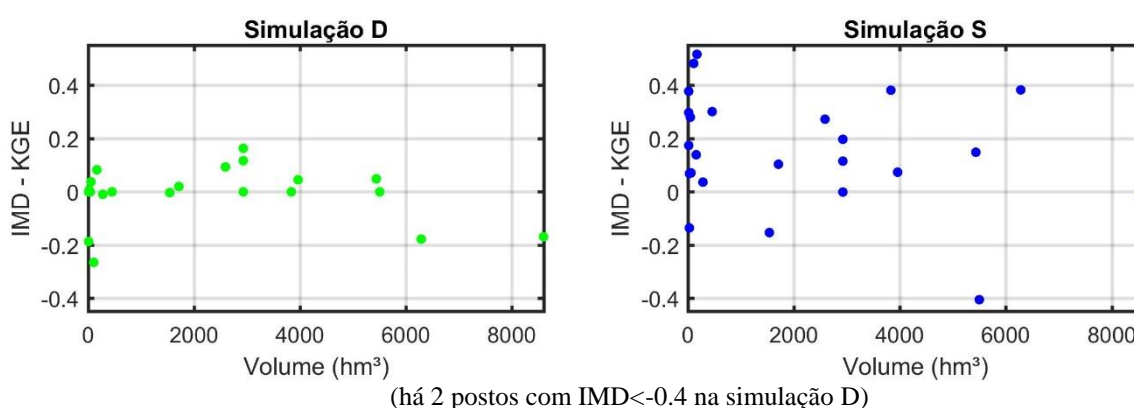
(em preto a vazão observada, da ANA; em verde, a simulação com a regra de Doll *et al.* (2003, D); em vermelho, a simulação com vazões naturalizadas (N); o ponto vermelho é a data de construção do reservatório)

Possivelmente, também houve uma imprecisão na data de início de operação do reservatório (31/07/2006). Essa informação foi extraída automaticamente do arquivo de massas d'água da ANA. Por volta do final de 2005 a vazão é ínfima, e o hidrograma ascende por volta de julho de 2006, sugerindo que o reservatório começou a liberar vazão nesta data (Figura 39). Todavia, na simulação D essa ascensão ocorre apenas em novembro do mesmo ano. Ou seja, a data

utilizada é a de início de operação do reservatório, embora se deveria ter o dia de início do enchimento do mesmo, para uma melhor simulação.

Não se observou uma relação clara entre o valor de IMD e o volume dos reservatórios (Figura 40). A simulação S teve um desempenho superior à D. Nesta última, aproximadamente 40% dos postos apresentaram melhora (IMD > 0), e a melhora máxima foi de 0.2, ou 20%. Enquanto a simulação S apresentou melhora em 80% dos postos, e destes, 40% melhoraram mais que 20% (IMD > 0.2).

Figura 40 - IMD x Volume do reservatório



Resumiram-se as métricas calculadas para os postos fluviométricos da América do Sul através do 10º percentil, mediana e 90º percentil (Tabela 5). As estatísticas ficaram muito parecidas entre as simulações, para todos os índices de desempenho, visto que boa parte do continente não possui reservatórios e, dos que existem, foram simulados “apenas” 34 e 109 reservatórios (simulações D e S, respectivamente). Por esta razão, o IMD é uma boa maneira para avaliarmos a melhora ou piora no desempenho. A simulação S teve um desempenho claramente superior à N. Enquanto a simulação D teve um desempenho inferior, quando comparada à N. A métrica com maior melhora foi o logaritmo do NSE, seguido do NSE, KGE e da r. O KGE apresentou melhora de 21% e 2%, para as simulações S e D, respectivamente. Os parâmetros da equação 1, utilizada para a defluência da simulação D, não foram calibrados nem corrigidos. Ou seja, se a única alternativa é utilizar um algoritmo simplificado para a vazão defluente dos reservatórios, talvez seja melhor nem simulá-los.

Foram utilizadas várias métricas pois uma avalia algo diferente da outra. A correlação mostra bem a sazonalidade, não consegue avaliar a média das vazões. Um NSE igual a zero mostra que as simulações são tão precisas quanto a média dos dados observados, e NSE negativo quer

dizer que a média é uma melhor estimativa do que o modelo. Para melhorar ainda mais a avaliação de modelos hidrológicos, foi criado o KGE, que leva em conta também a correlação, viés e variabilidade. Dessa maneira, garante-se que o viés e a variabilidade não são correlacionados.

Tabela 5 – Acima, percentil 10 (P10), percentil 90 (P90) e mediana (Ma) dos índices de desempenho para as 3 simulações; abaixo, o índice de melhoria de desempenho

Simulação	KGE			NSE			NSElog			r			DV (%)		
	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90
D	0.17	0.68	0.85	-0.97	0.58	0.81	-1.08	0.62	0.83	0.65	0.86	0.93	-16.77	8.50	51.36
S	0.23	0.70	0.87	-0.31	0.62	0.85	-0.84	0.67	0.87	0.67	0.87	0.95	-20.13	5.38	43.25
N	0.18	0.68	0.85	-0.97	0.58	0.81	-1.08	0.63	0.83	0.65	0.86	0.94	-16.77	8.98	52.19
	IMD KGE			IMD NSE			IMD NSElog			IMD r					
Simulação	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90	P10	Ma	P90			
D	-0.36	0.02	0.17	-0.70	0.03	0.32	-0.52	-0.02	0.21	-1.13	-0.10	0.07			
S	-0.13	0.21	0.68	-0.05	0.34	0.85	-0.35	0.39	0.82	-0.06	0.22	0.73			

(Para avaliar as métricas da primeira linha da tabela, todos os postos fluviométricos foram inclusos. Quanto à parte do IMD, foram desprezados os postos com  $IMD \approx 0$ , ou seja, somente os postos influenciados por reservatórios foram contabilizados)

## 5.4 ANÁLISE DO IMPACTO DOS RESERVATÓRIOS NO REGIME DE VAZÕES

Uma das potencialidades do trabalho desenvolvido é permitir compreender qual a alteração no regime de vazões causada pelos reservatórios, para então quantificar seu impacto, seja nas vazões, sedimentação ou na biota.

Foi calculada a média da diferença percentual absoluta entre as vazões anuais da simulação com vazões naturalizadas (N) e a simulação com vazões substituídas (S) para as principais bacias da América do Sul (Tabela 6). A bacia Amazônica é pouco impactada pelos



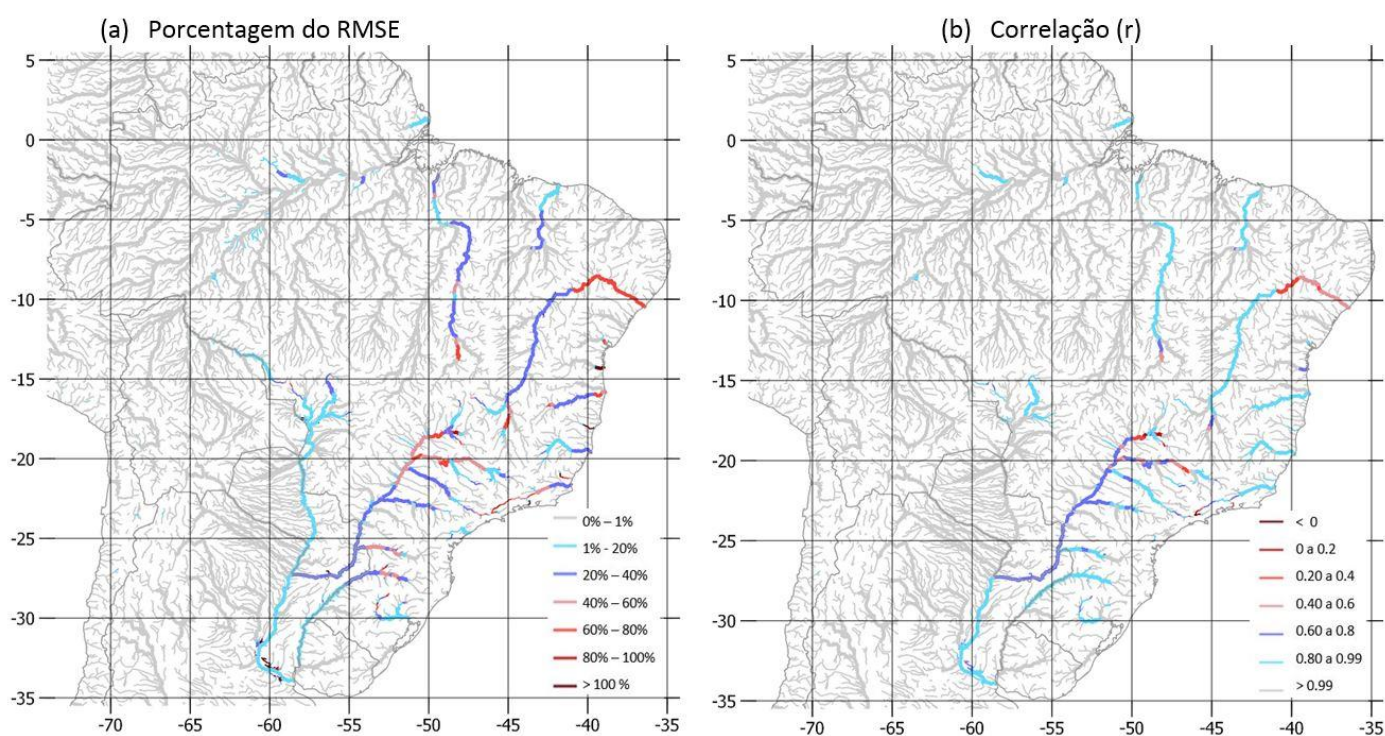
reservatórios, com uma diferença média de 0,1 %. As bacias do Tocantins e do São Francisco são bastante impactadas, com diferenças de 16,3 e 18%, respectivamente. A bacia do Paraná possui 6% de diferença, também sofrendo bastante influência da operação dos reservatórios. É notável que a simulação N sempre gera resultados de vazões maiores do que a S.

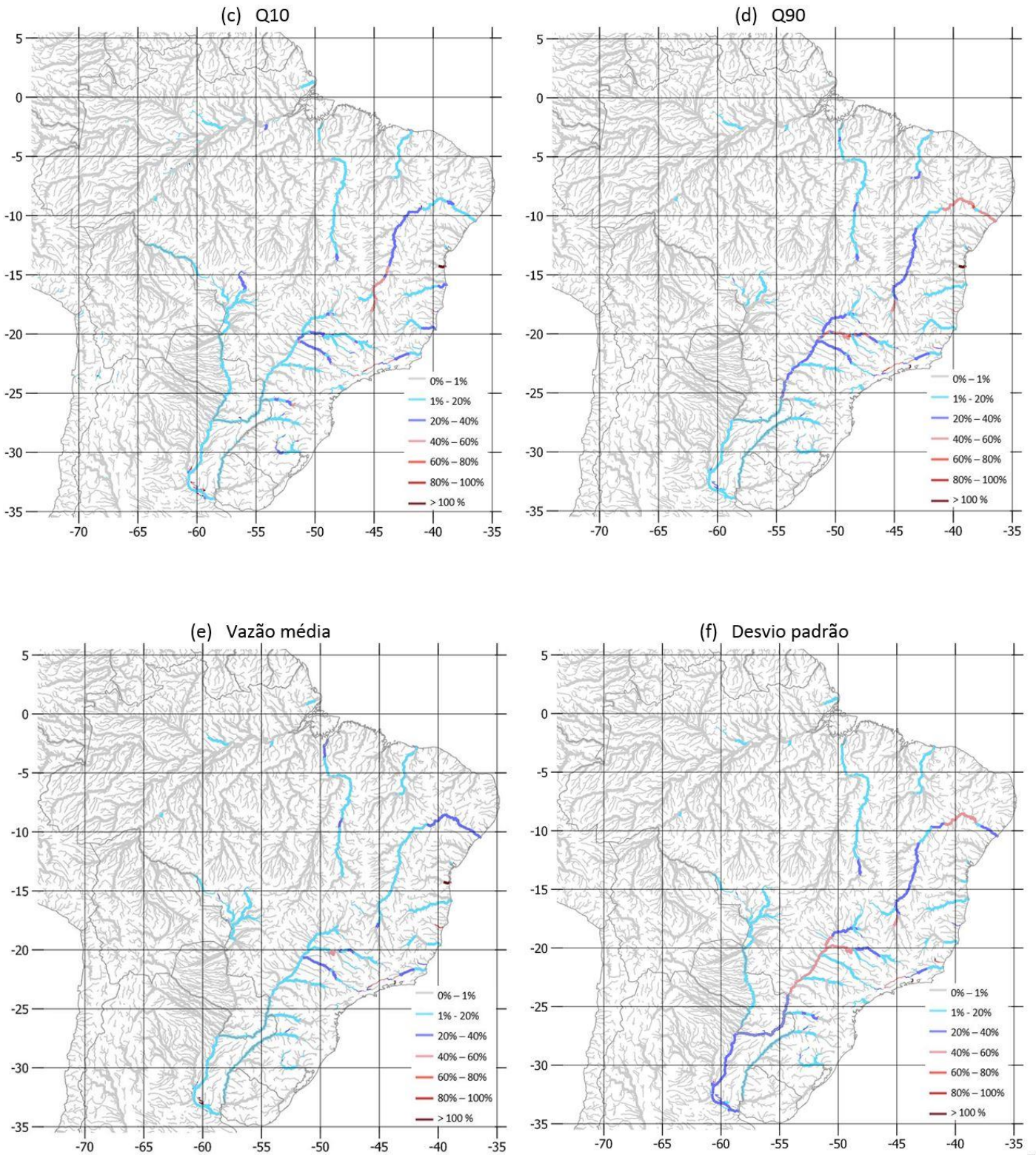
Tabela 6 - Média da diferença na vazão anual no exutório das principais bacias brasileiras

Bacia	América do Sul	Amazonas	Tocantins	São Francisco	Paraná
Média da diferença na vazão anual	1.8 %	0.1 %	16.3 %	18.0 %	6.0 %

Avaliou-se a mudança nas vazões através de diversas métricas, como o RMSE,  $r$ , desvio padrão, e as diferenças absolutas na  $Q_{10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{média}$ , entre a simulação S e a N (Figura 41 *a, b, f, c, d, e* respectivamente). O RMSE ultrapassou 80% na parte final do São Francisco, e ficou entre 20 e 40% sua na metade a montante. O rio Paraná apresenta RMSE superior à 60 % na sua porção de montante, RMSE entre 20 e 40% até atravessar a fronteira brasileira, e então menor de 20% até chegar à sua foz. A bacia amazônica é pouco afetada por reservatórios. Em geral, a diferença na  $Q_{10}$  e na vazão média foi, sua maioria, menor do que 20%, enquanto a diferença na  $Q_{90}$  foi maior para o rio Paraná e seus tributários (de 20 a 40%).

Figura 41 - Mapas mostrando a alteração no regime de vazões nos trechos de rios devido à presença de reservatórios





(Entre as vazões das simulações S e N foram calculados o desvio padrão, RMSE e correlação ( $r$ ); para a Q10, Qmédia e Q90 foi calculada a diferença entre as vazões; em cinza claro a fronteira entre os países)

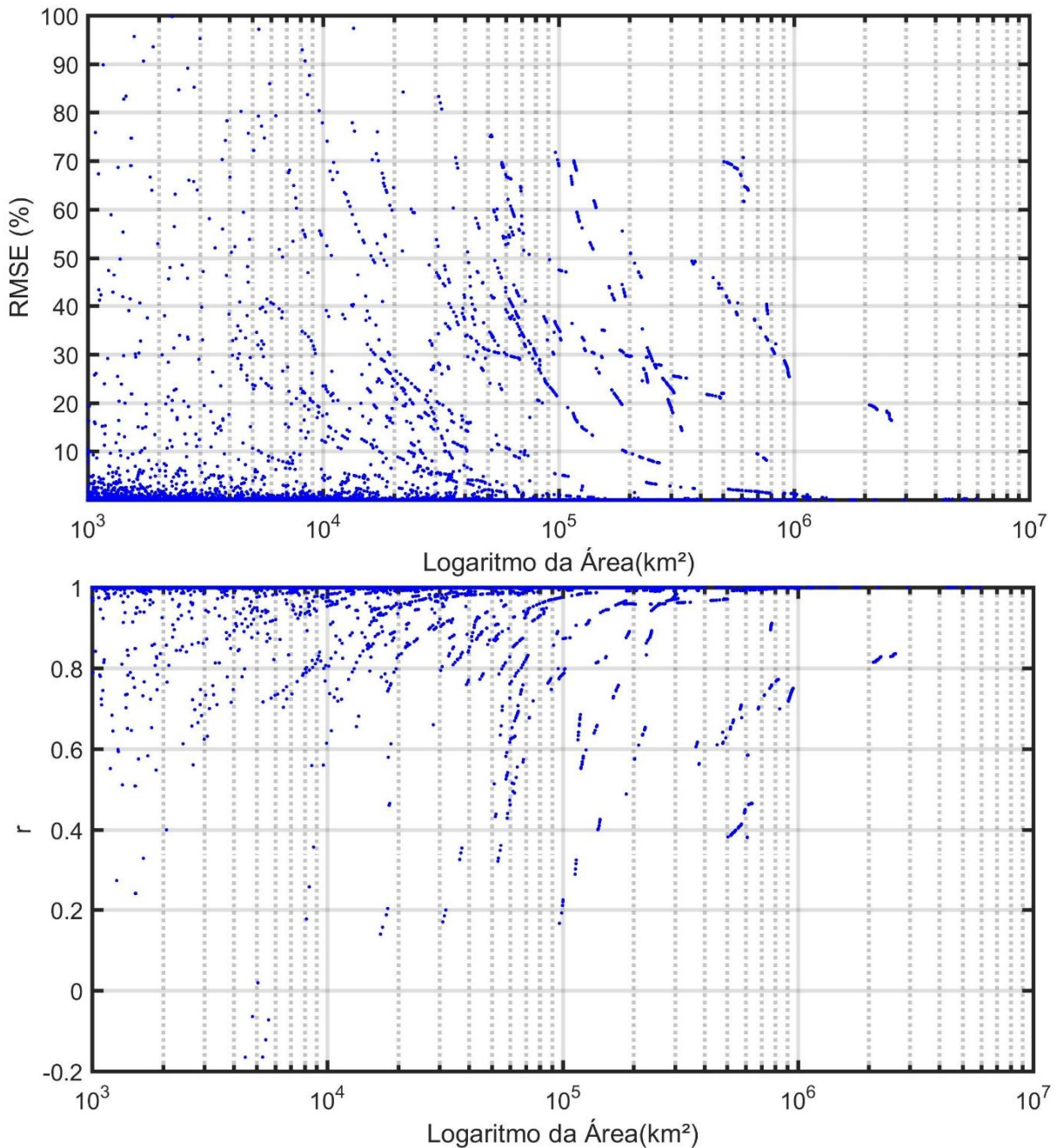
A vazão média diminui pois com o reservatório aumenta a evaporação. Além disso, podem ocorrer mais perdas de água para o solo. Alguns dos objetivos dos reservatórios é regularizar a



vazão e proteger contra inundações. Logo, a diminuição na Q10 é esperada, visto que o reservatório acumulará a água que seria liberada num tempo menor.

Há uma pequena tendência à diminuição do RMSE com o aumento da área (Figura 42a). A correlação entre as vazões naturalizadas e substituídas tende a diminuir com a área (Figura 42b).

Figura 42 – RMSE e  $r$  (correlação) entre as vazões naturalizadas e substituídas pelo logaritmo da área da bacia



(há 69 pontos RMSE > 100 %, não mostrados no gráfico superior)

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar uma proposta de sistematização de simulação de reservatórios em um modelo hidrológico de escala continental, com passo de tempo diário, e verificar seus impactos no regime de vazões em escala nacional. Para tal, foi utilizado o Modelo Hidrológico da América do Sul (SIQUEIRA *et al.*, 2018) para simular 109 reservatórios do SIN através de vazões substituídas, e 34 destes com a regra de operação de Döll *et al.* (2003).

Também se analisaram padrões e correlações entre vazões, níveis e volume destes reservatórios. Vazões afluentes e defluentes possuem um padrão claro de similaridade, visto que a maioria dos reservatórios são a fio d'água. Quanto às relações entre a vazão defluente e outras variáveis, não é possível afirmar que uma delas explica a outra com grande força. Não foi observada alta correlação entre a vazão defluente e o aumento do volume do reservatório

A simulação com vazões substituídas (simulação S) mostrou, em geral, uma melhora em relação ao modelo original da América do Sul com vazões naturalizadas (simulação N), apresentando uma melhora de 21% no KGE. A simulação com a regra de Döll *et al.* (simulação D) foi pouco melhor (2% para o KGE). Ambas possuem capacidade para representar vazões de maneira satisfatória (Mediana do KGE = 0.68).

Embora existam discrepâncias entre a descarga dos reservatórios simulados e a observada, a correspondência é bastante boa considerando a natureza rudimentar da regra de operação utilizada. É importante frisar que a simplicidade do esquema de saída implica num desempenho inferior ao de um modelo de reservatório detalhado, que utiliza regras de operação específicas para cada local.

Sugere-se desenvolver um modelo de usos d'água, e então utilizar os esquemas de saída desenvolvidos para atender à demanda de água a jusante. Provavelmente os resultados melhorarão. Além disso, se pode utilizar curvas cota-área-volume fornecidas pelo ONS, em vez do MDE feito através da SRTM, e os novos produtos de usos d'água da ANA. Também recomenda-se mudar a abordagem de reservatórios individuais para conjuntos de reservatórios.

O impacto no regime de vazões foi demonstrado através de mapas, e também medido diretamente. Três dos principais rios brasileiros (Tocantins, Paraná e São Francisco) possuem diferenças na vazão de seu exutório de pelo menos 20%. Não se observou relação entre a área a montante do rio e alteração na sua vazão.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2018**. Brasília: ANA, 2018.
- AGOSTINHO, Angelo Antonio; JÚLIO JR, Horacio Ferreira; BORGHETTI, José Roberto. Considerações sobre os impactos dos represamentos na ictiofauna e medidas para sua atenuação. Um estudo de caso: reservatório de Itaipu. **Revista Unimar**, v. 14, n. supl, p. 89-107, 1992.
- ALCAMO, Joseph *et al.* Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 3, p. 317-337, 2003.
- ALMEIDA, Gustavo AM *et al.* Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. **Water Resources Research**, v. 48, n. 5, 2012.
- ALMEIDA, Gustavo AM; BATES, Paul. Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling. **Water Resources Research**, v. 49, n. 8, p. 4833-4844, 2013.
- ALTERMATT, Florian. Diversity in riverine metacommunities: a network perspective. **Aquatic Ecology**, v. 47, n. 3, p. 365-377, 2013.
- ANA/ANEEL Resolução Conjunta nº 3, de 10 de Agosto de 2010.
- ANDREADIS, K. M.; SCHUMANN, G. J. P.; PAVELSKY, T. A simple global river bankfull width and depth database. **Water Resources Research**, 49, n.10, pp. 7164-7168, 2013
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, 1998.
- ARCHFIELD, Stacey A. *et al.* Accelerating advances in continental domain hydrologic modeling. **Water resources research**, v. 51, n. 12, p. 10078-10091, 2015.
- ARTHINGTON, Ángela H. *et al.* Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. **Freshwater Biology**, v. 55, n. 1, p. 1-16, 2010.
- AVISSE, Nicolas *et al.* Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 12, p. 6445, 2017.
- BALMER, Michelle B.; DOWNING, John A. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake. **Inland Waters**, v. 1, n. 2, p. 125-132, 2011.
- BANDEIRA, Jefferson Vianna *et al.* Resposta morfológica da foz do Rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos nos reservatórios. 2013.

BATES, Paul D.; HORRITT, Matthew S.; FEWTRELL, Timothy J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **Journal of Hydrology**, v. 387, n. 1-2, p. 33-45, 2010.

BATES, P. *et al.* LISFLOOD-FP user manual. Code release, v. 5, n. 6, 2013.

BECK, H.E. *et al.* 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.21, pp. 589-615, 2017

BEVEN, Keith J.; KIRKBY, Michael J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Journal**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BEVEN, Keith. Spatially distributed modeling: Conceptual approach to runoff prediction. **Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems**. Springer, Dordrecht, 1991. p. 373-387.

BEVEN, K. Rainfall-runoff modelling: the primer. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell. 457 páginas, 2012.

BIEMANS, H. *et al.* Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, 2011

BIERKENS, Marc FP. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. **Water Resources Research**, v. 51, n. 7, p. 4923-4947, 2015.

BONNEMA, Matthew; HOSSAIN, Faisal. Inferring reservoir operating patterns across the Mekong Basin using only space observations. **Water Resources Research**, v. 53, n. 5, p. 3791-3810, 2017.

BRAVO, Juan Martín *et al.* Otimização de regras de operação de reservatórios com incorporação da previsão de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 181-196, 2008.

BRAVO, J. M. *et al.* Incorporating forecasts of rainfall in two hydrologic models used for medium-range streamflow forecasting. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 5, p. 435-445, 2009.

BRAVO, J. M. *et al.* Coupled hydrologic-hydraulic modeling of the Upper Paraguay River basin. **Journal of hydrologic engineering**, v. 17, n. 5, p. 635-646, 2011.

BUARQUE, Diogo Costa. Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do Rio Madeira. 2015.

BUNN, Stuart E.; ARTHINGTON, Angela H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. **Environmental management**, v. 30, n. 4, p. 492-507, 2002.

BUREK, Peter *et al.* LISFLOOD, distributed water balance and flood simulation model revised user manual, 2013.

BUSKER, Tim *et al.* A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2018

CARLISLE, Daren M.; WOLOCK, David M.; MEADOR, Michael R. Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, n. 5, p. 264-270, 2011.

CEPEL. Projeto Newave: Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes – Manual do Usuário – Versão 17.5.3. Rio de Janeiro, 2013.

CHAO, Benjamin F.; WU, Y. H.; LI, Y. S. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level. **Science**, v. 320, n. 5873, p. 212-214, 2008.

COE, Michael T. Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: Testing the accuracy of an atmospheric GCM. **Journal of Climate**, v. 13, n. 4, p. 686-704, 2000.

COERVER, Hubertus M.; RUTTEN, Martine M.; VAN DE GIESEN, Nick C. Deduction of reservoir operating rules for application in global hydrological models. **Hydrology & Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, 2018.

COLE, Jonathan J. *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 172-185, 2007.

COLLINS, Robert; KRISTENSEN, Peter; THYSSEN, Niels. Water resources across Europe—confronting water scarcity and drought. **Office for Official Publications of the European Communities**, 2009.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, 2001.

COLLISCHONN, W. *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007a.

COLLISCHONN, B. *et al.* Reconstituição das vazões naturais do Rio Caí (RS) a jusante da transposição de vazões do Sistema Salto. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007b.

COLLISCHONN, Bruno *et al.* Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 119-134, 2011.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre, 2013

COLLISCHONN, Bruno; CLARKE, Robin Thomas. Estimation and uncertainty of remote-sensing-based Depth-Area-Volume (DAV) relationships. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016.

COMISSÃO ECONÔMICA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EUROPA (UNECE). Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes, GE.13-26823—February 2014—3,129—ECE/MP.WAT/41, U. N. Off. at Geneva, Geneva, 2014

COTE, David *et al.* A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 1, p. 101-113, 2009.

CRÉTAUX, Jean-François; BIRKETT, Charon. Lake studies from satellite radar altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14-15, p. 1098-1112, 2006.

CRÉTAUX, J.-F. *et al.* Lake volume monitoring from space. **Surveys in Geophysics**, v. 37, n. 2, p. 269-305, 2016.

CRUZ, J. C.; SILVEIRA, G. L. Disponibilidade hídrica para outorga em bacias com elevado uso consuntivo (i): avaliação por SHR. Volume 4 n° 2 (jul/dez/2007). REGA. **Revista de Gestão de Águas da América Latina**, v. 4, p. 51-64, 2007.

DA SILVA, Benedito Cláudio; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Simulação da Bacia do Rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH. 2004.

DELTARES. Delft3D-FLOW: Simulation of Multidimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, including Sediments, User Manual. Delft, Holland, 2014.

DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; VAN DEURZEN, W.P.A. Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. **Hydrological Processes**, v. 14, pp. 1981–1992, 2000

DHI Danish Hydraulic Institute. **Mike 11: A modeling system for Rivers and Channels User Guide**. p. 510, Horsholm, 2017.

DI BALDASSARRE, Giuliano *et al.* Drought and flood in the Anthropocene: feedback mechanisms in reservoir operation. **Earth System Dynamics**, v. 8, n. 1, p. 225, 2017.

DIRMEYER, P. A. *et al.* Climate change and sectors of the surface water cycle In CMIP5 projections. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 12, p. 5317, 2014.

DÖLL, Petra; KASPAR, Frank; LEHNER, Bernhard. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. **Journal of Hydrology**, v. 270, n. 1-2, p. 105-134, 2003.

DÖLL, Petra; FIEDLER, Kristina; ZHANG, Jing. Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 12, p. 2413, 2009.

DÖLL, Petra *et al.* Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and prospects. **Surveys in Geophysics**, v. 37, n. 2, p. 195-221, 2016.

DOOGE, J. C. I. Linear theory of hydrologic systems, **Technical Bulletin** n. 1948, ARS, US Department of Agriculture, 1973.

DOWNING, John A. *et al.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. **Limnology and Oceanography**, v. 51, n. 5, p. 2388-2397, 2006.

DUAN, Zheng; BASTIAANSEN, W. G. M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 403-416, 2013.

DÜRR, H.H.; MEYBECK, M.; DÜRR, S.H. Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. **Global Biogeochemical Cycles**, v.19, n.4, GB4S10, doi:10.1029/2005GB002515, 2005

EAGLESON, Peter S. The emergence of global-scale hydrology. **Water Resources Research**, v. 22, n. 9S, 1986.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

FAGUNDES, Hugo *et al.* Simulação hidrossedimentológica preliminar na bacia do Rio Doce com o modelo MGB-SED. **Anais do Congresso Internacional de Hidrossedimentologia de 2017**. Foz do Iguaçu, 2017.

FAMIGLIETTI, J. S. *et al.* Satellites provide the big picture. **Science**, v. 349, n. 6249, p. 684-685, 2015.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

FAN, F.M.; PONTES, P.R.M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, 2014a.

FAN, Fernando Mainardi *et al.* Operational flood forecasting system to the Uruguay River Basin using the hydrological model MGB-IPH. **ICFM-6 Proceedings**. São Paulo, Brasil, 2014b.

FAN, Fernando *et al.* Ensemble flood forecasting on the Tocantins River-Brazil. **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2014c.

FAN, Fernando Mainardi *et al.* Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of hydrology**, v. 519, p. 2906-2919, 2014d.

FAN, Fernando Mainardi. Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras. 2015.

FAN, F.M.; BUARQUE, D.C.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)**, Brasília, 2015.

FAN, Fernando Mainardi *et al.* Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. **Journal of Flood Risk Management**, v. 9, n. 3, p. 278-288, 2016.

FLEISCHMANN, A. S. *et al.* Desenvolvimento do módulo de reservatórios do modelo hidrológico MGB. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2015.

FLEISCHMANN, Ayan; PAIVA, Rodrigo; COLLISCHONN, Walter. **Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison**. **Journal of Hydrology X**, v. 3, p. 100027, 2019.

FREEZE, R. A.; HARLAN, R. L. Blueprint for a physically-based, digitally simulated hydrologic response model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, NL, v. 9, p. 237-258, 1969.

FUKUSHIMA, Michio *et al.* Modelling the effects of dams on freshwater fish distributions in Hokkaido, Japan. **Freshwater Biology**, v. 52, n. 8, p. 1511-1524, 2007.

GALLEGO-ELVIRA, B. *et al.* Energy balance and evaporation loss of an agricultural reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain). **Hydrological Processes**, v. 24, n. 6, p. 758-766, 2010.

GAO, Huilin; BIRKETT, Charon; LETTENMAIER, Dennis P. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. **Water Resources Research**, v. 48, n. 9, 2012.

GAO, Huilin. Satellite remote sensing of large lakes and reservoirs: From elevation and area to storage. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 2, p. 147-157, 2015.

GÖKBULAK, Ferhat; ÖZHAN, Süleyman. Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. **Official Publication of the European Water Association (EWA)**, p. 1-6, 2006.

GOLDEMBERG, José. O estado atual do setor elétrico brasileiro. **Revista USP**, n. 104, p. 37-44, 2015.

GRILL, Günther *et al.* An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 1, p. 015001, 2015.

GUPTA, Hoshin V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1-2, p. 80-91, 2009.

HADDELAND, Ingjerd; SKAUGEN, Thomas; LETTENMAIER, Dennis P. Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 8, 2006.

HADDELAND, Ingjerd *et al.* Global water resources affected by human interventions and climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3251-3256, 2014.

HANASAKI, Naota; KANAE, Shinjiro; OKI, Taikan. A reservoir operation scheme for global river routing models. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 1-2, p. 22-41, 2006.

HANASAKI, N. *et al.* An integrated model for the assessment of global water resources—Part 1: Model description and input meteorological forcing. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1007-1025, 2008a.

HANASAKI, N. *et al.* An integrated model for the assessment of global water resources—Part 2: Applications and assessments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1027-1037, 2008b.

HANASAKI, Naota *et al.* A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, p. 789, 2018.



HATTERMANN, F. F. *et al.* Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 561-576, 2017.

HE, Xiaogang *et al.* Intensification of hydrological drought in California by human water management. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 4, p. 1777-1785, 2017.

HEC/USACE (2016). **HEC-RAS User's Manual, Version 5.0**. Institute of Water Resources. Hydrological Engineering Center.

HORTON, Robert E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 20, n. 4, p. 693-711, 1939.

HOWARD, Charles DD. Death to rule curves. **WRPMD'99: Preparing for the 21st Century**. 1999. p. 1-5.

HUNGER, Martin; DÖLL, Petra. Value of river discharge data for global-scale hydrological modeling. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, n. 6, p. 4125-4173, 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, 2018. **World Register of Dams 2018 – General Synthesis**. Disponível em [http://www.icold-cigb.org/GB/world\\_register/generalsynthesis](http://www.icold-cigb.org/GB/world_register/generalsynthesis), acessado dia 23 de fevereiro de 2018.

KLEIN GOLDEWIJK, Kees *et al.* The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 73-86, 2011.

KUMMU, M. *et al.* Climate-driven interannual variability of water scarcity in food production potential: a global analysis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 2, p. 447-461, 2014.

LARENTIS, D., G., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. (2008). Simulação da qualidade de água em grandes bacias: rio Taquari-Antas, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 13(3), pp. 5-22.

LEHNER, Bernhard; DÖLL, Petra. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, v. 296, n. 1-4, p. 1-22, 2004.

LEHNER B, VERDIN K, JARVIS A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 89, n. 10, pp.: 93–94, 2008.

LEHNER, Bernhard *et al.* High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, n. 9, p. 494-502, 2011.

LETTENMAIER, Dennis P.; MILLY, P. C. D. Land waters and sea level. **Nature Geoscience**, v. 2, n. 7, p. 452, 2009.

LIERMANN, Catherine Reidy *et al.* Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. **BioScience**, v. 62, n. 6, p. 539-548, 2012.

LIGON, Franklin K.; DIETRICH, William E.; TRUSH, William J. Downstream ecological effects of dams. **BioScience**, v. 45, n. 3, p. 183-192, 1995.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; CHAVES, AG de M.; SCILEWSKI, L. R. Diagnostico do fluxo de sedimentos em suspensao na Bacia do Rio Sao Francisco. **Embrapa Cerrados-Livro científico (ALICE)**, 2001.

LOPES, Hélio Leandro; NETO, Alfredo Ribeiro; CIRILO, José Almir. Modelagem batimétrica no reservatório de sobradinho: ii–avaliação do volume atual e da taxa de sedimentação no espaço de tempo entre 1978 e 2009. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 6, 2015.

LOPES, Vitória Ache Rocha *et al.* A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes. **Journal of hydrology**, v. 565, p. 177-196, 2018.

LUDWIG, K.; BREMICKER, M. **The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications**, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie, Uni Freiburg i. Br., 2006.

MAMEDE, George L. *et al.* Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 12, p. 05018020, 2018.

MASAKI, Yoshimitsu *et al.* Intercomparison of global river discharge simulations focusing on dam operation—multiple models analysis in two case-study river basins, Missouri–Mississippi and Green–Colorado. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 5, p. 055002, 2017.

MCCARTHY, Gerald T. The unit hydrograph and flood routing. **Proceedings of Conference of North Atlantic Division**, US Army Corps of Engineers, 1938. p. 608-609.

MCGUIRE, Marketa *et al.* Use of satellite data for streamflow and reservoir storage forecasts in the Snake River Basin. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 132, n. 2, p. 97-110, 2006.

MEIGH, J. R.; MCKENZIE, A. A.; SENE, K. J. A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. **Water Resources Management**, v. 13, n. 2, p. 85-115, 1999.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling and Software**, v. 18, n. 8–9, p. 761–799, 2003.

MESSAGER, Mathis Loïc *et al.* Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. **Nature communications**, v. 7, p. 13603, 2016.

MEYBECK, Michel. Global distribution of lakes. In: **Physics and chemistry of lakes**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995. p. 1-35.

MIGUEZ-MACHO, Gonzalo; FAN, Ying. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 1. Influence on seasonal streamflow, flooding and wetlands. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D15, 2012.

MOILANEN, Atte; HANSKI, Ilkka. On the use of connectivity measures in spatial ecology. **Oikos**, v. 95, n. 1, p. 147-151, 2001.

MOSTAFAVI, Hossein *et al.* A new fish-based multi-metric assessment index for cyprinid streams in the Iranian Caspian Sea Basin. **Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters**, v. 51, p. 37-52, 2015.

MOY, Wai-See; COHON, Jared L.; REVELLE, Charles S. A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. **Water Resources Research**, v. 22, n. 4, p. 489-498, 1986.

MÜLLER SCHMIED, Hannes *et al.* Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 9, p. 3511-3538, 2014.

MÜLLER SCHMIED, Hannes *et al.* Variations of global and continental water balance components as impacted by climate forcing uncertainty and human water use. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 7, p. 2877-2898, 2016.

NASH, J. Eamonn; SUTCLIFFE, Jonh V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NAZEMI, Ali; WHEATER, Howard S. On inclusion of water resource management in Earth system models—Part 1: Problem definition and representation of water demand. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 33-61, 2015a.

NAZEMI, Ali; WHEATER, Howard S. On inclusion of water resource management in Earth system models—Part 2: Representation of water supply and allocation and opportunities for improved modeling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 63, 2015b.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21. pp. 1-25, 2002.

NILSSON, Christer *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. **Science**, v. 308, n. 5720, p. 405-408, 2005.

NILSSON, Christer *et al.* The role of hydrochory in structuring riparian and wetland vegetation. **Biological Reviews**, v. 85, n. 4, p. 837-858, 2010.

NÓBREGA, M. T. *et al.* Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 585, 2011.

OKI, Taikan; KANAE, Shinjiro. Global hydrological cycles and world water resources. **science**, v. 313, n. 5790, p. 1068-1072, 2006.

O'LOUGHLIN, F. E. *et al.* A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49-59, 2016.

ONS - Relatório Executivo de Prevenção de Cheias – Ciclo 2013/2014. Rio de Janeiro, 2014.

PAIVA, Rodrigo CD; COLLISCHONN, Walter; BUARQUE, Diogo Costa. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 3, p. 333-346, 2013a.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias *et al.* Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013b.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias *et al.* SAMEWATER: Uma agenda de pesquisa integrada da hidrologia da América do Sul. **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2017

PARK, Edward; LEWIS, Quinn W.; SANWLANI, Nivedita. Large lake gauging using fractional imagery. **Journal of environmental management**, v. 231, p. 687-693, 2019.

POFF, N. LeRoy *et al.* Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 14, p. 5732-5737, 2007.

POFF, N. LeRoy; ZIMMERMAN, Julie KH. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. **Freshwater Biology**, v. 55, n. 1, p. 194-205, 2010.

POKHREL, Yadu *et al.* Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, n. 1, p. 255-269, 2012.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia do Rio da Prata. 2016.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro *et al.* MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1-20, 2017.

POOLE, Geoffrey C.; BERMAN, Cara H. An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. **Environmental management**, v. 27, n. 6, p. 787-802, 2001.

PRINGLE, Catherine M.; FREEMAN, Mary C.; FREEMAN, Byron J. Regional effects of hydrologic alterations on riverine macrobiota in the new world: tropical-temperate comparisons: the massive scope of large dams and other hydrologic modifications in the temperate New World has resulted in distinct regional trends of biotic impoverishment. While neotropical rivers have fewer dams and limited data upon which to make regional generalizations, they are ecologically vulnerable to increasing hydropower development and biotic patterns are emerging. **AIBS Bulletin**, v. 50, n. 9, p. 807-823, 2000.

PRINGLE, Catherine. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important?. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 13, p. 2685-2689, 2003.

PULS, L. G. Flood regulation of the Tennessee River. **Proc., 70th Congress, 1st Session**. 1928.

RIBEIRO, A. *et al.* Hydrological modelling in Amazonia-use of the MGB-IPH model and alternative data base. **Predictions in Ungauged Basins: Promise and Progress**. p. 246-254. Foz do Iguaçu, 2006.

RICHTER, Brian D. *et al.* Lost in development's shadow: The downstream human consequences of dams. **Water Alternatives**, v. 3, n. 2, p. 14, 2010.

RICHEY, Jeffrey E. *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Nature**, v. 416, n. 6881, p. 617, 2002.

ROST, Stefanie *et al.* Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. **Water Resources Research**, v. 44, n. 9, 2008.

SAINT-VENANT, AJC Barré. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leurs lits. **Comptes Rendus des séances de l'Académie des Sciences**, v. 73, p. 237-240, 1871.

SCHEWE, Jacob *et al.* Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014.

SHIN, Sanghoon, POKHREL, Yadu, et MIGUEZ-MACHO, Gonzalo. High Resolution Modeling of Reservoir Release and Storage Dynamics at the Continental Scale. **Water Resources Research**, 2018.

SCHYNS, Joseph Franciscus; HOEKSTRA, Arjen Ysbert; BOOIJ, Martijn J. Review and classification of indicators of green water availability and scarcity. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 11, p. 4581, 2015.

SHIKLOMANOV, Igor A. Appraisal and assessment of world water resources. **Water international**, v. 25, n. 1, p. 11-32, 2000.

SIEBERT, Stefan *et al.* A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 3, p. 1521-1545, 2015.

SILANS, A. M. B.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J.; PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe – Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5 n. 3 p.5-19, 2000.

SIQUEIRA, V. A. *et al.* Desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul: parte 1. **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2017.

SIQUEIRA, Vinícius Alencar, PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de, FLEISCHMANN, Ayan Santos, *et al.* Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**. Göttingen: Copernicus. Vol. 22, n. 9 (set. 2018), p. 4815-4842, 2018.

SMITH, Laurence C.; PAVELSKY, Tamlin M. Remote sensing of volumetric storage changes in lakes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 10, p. 1353-1358, 2009.

SWBD, 2005. **Shuttle Radar Topography Mission Water Body Data set**. Disponível em <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>, acessado em fevereiro de 2018.

SYVITSKI, J. P. M. *et al.* Sinking deltas due to human activities. **Nat. Geosci.** 2009.

TISCHENDORF, Lutz; FAHRIG, Lenore. On the usage and measurement of landscape connectivity. **Oikos**, v. 90, n. 1, p. 7-19, 2000.

TRANVIK, Lars J. *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6part2, p. 2298-2314, 2009.

TOCKNER, Klement; STANFORD, Jack A. Riverine flood plains: present state and future trends. **Environmental conservation**, v. 29, n. 3, p. 308-330, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**; colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. — 2.ed. — Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, Carlos EM *et al.* Short-and long-term flow forecasting in the Rio Grande watershed (Brazil). **Atmospheric Science Letters**, v. 9, n. 2, p. 53-56, 2008.

TWDB - Texas Water Development Board. Volumetric Survey of Lake Whitney, 2006 Disponível em [https://www.twdb.texas.gov/hydro\\_survey/Whitney/2005-06/Whitney2005\\_FinalReport.pdf](https://www.twdb.texas.gov/hydro_survey/Whitney/2005-06/Whitney2005_FinalReport.pdf), acessado dia 15 de março de 2018.

UNIÃO EUROPEIA. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks, 2017

VAN DER KNIJFF, J. M.; YOUNIS, Jalal; DE ROO, A. P. J. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, n. 2, p. 189-212, 2010.

VERPOORTER, Charles *et al.* A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 18, p. 6396-6402, 2014.

VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. A conceptual model of sediment transport : application to the Avon River Basin in Western Australia Abstract : **Hydrological processes**, v. 743, n. May 1998, p. 727-743, 1999.

VOROSMARTY, C. J. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. **Ambio**, v. 26, p. 210-219, 1997.

VRUGT, Jasper A. *et al.* A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. **Water resources research**, v. 39, n. 8, 2003.

WADA, Yoshihide; VAN BEEK, L. P. H.; BIERKENS, Marc FP. Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 12, p. 3785-3805, 2011.

WADA, Yoshihide *et al.* Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 3, p. 034036, 2013a.

WADA, Yoshihide *et al.* Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 17, p. 4626-4632, 2013b.

WADA, Y.; WISSER, D.; BIERKENS, M. F. P. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. **Earth System Dynamics**, v. 5, n. 1, p. 15, 2014.

WADA, Y. *et al.* Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 1, p. 175, 2016.

WADA, Yoshihide *et al.* Human–water interface in hydrological modelling: current status and future directions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 8, p. 4169, 2017.

WARD, James V.; STANFORD, J. A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. **River Research and Applications**, v. 11, n. 1, p. 105-119, 1995.

WU, Huan *et al.* A new global river network database for macroscale hydrologic modeling. **Water resources research**, v. 48, n. 9, 2012.

WURBS, Ralph Allen. **Modeling and analysis of reservoir system operations**. Prentice Hall, 1996.

YAMAZAKI, Dai *et al.* Development of the global width database for large rivers. **Water Resources Research**, v. 50, n. 4, p. 3467-3480, 2014.

YIGZAW, Wondmagegn *et al.* A New Global Storage-Area-Depth Dataset for Modeling Reservoirs in Land Surface and Earth System Models. **Water Resources Research**, 2018.

Yen, B. C., Tsai, C. W.-S. Noninertial wave vs. diffusion wave in flood routing. **J. Hydrol.**, 244, 1-2, 97–104, 2001

ZAJAC, Zuzanna *et al.* The impact of lake and reservoir parameterization on global streamflow simulation. **Journal of hydrology**, v. 548, p. 552-568, 2017.

ZAMBON, Renato Carlos. A operação dos reservatórios e o planejamento da operação hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional. **Revista USP**, n. 104, p. 133-144, 2015.

ZARFL, Christiane *et al.* A global boom in hydropower dam construction. **Aquatic Sciences**, v. 77, n. 1, p. 161-170, 2015.

ZHAO, Gang *et al.* Integrating a reservoir regulation scheme into a spatially distributed hydrological model. **Advances in water resources**, v. 98, p. 16-31, 2016.

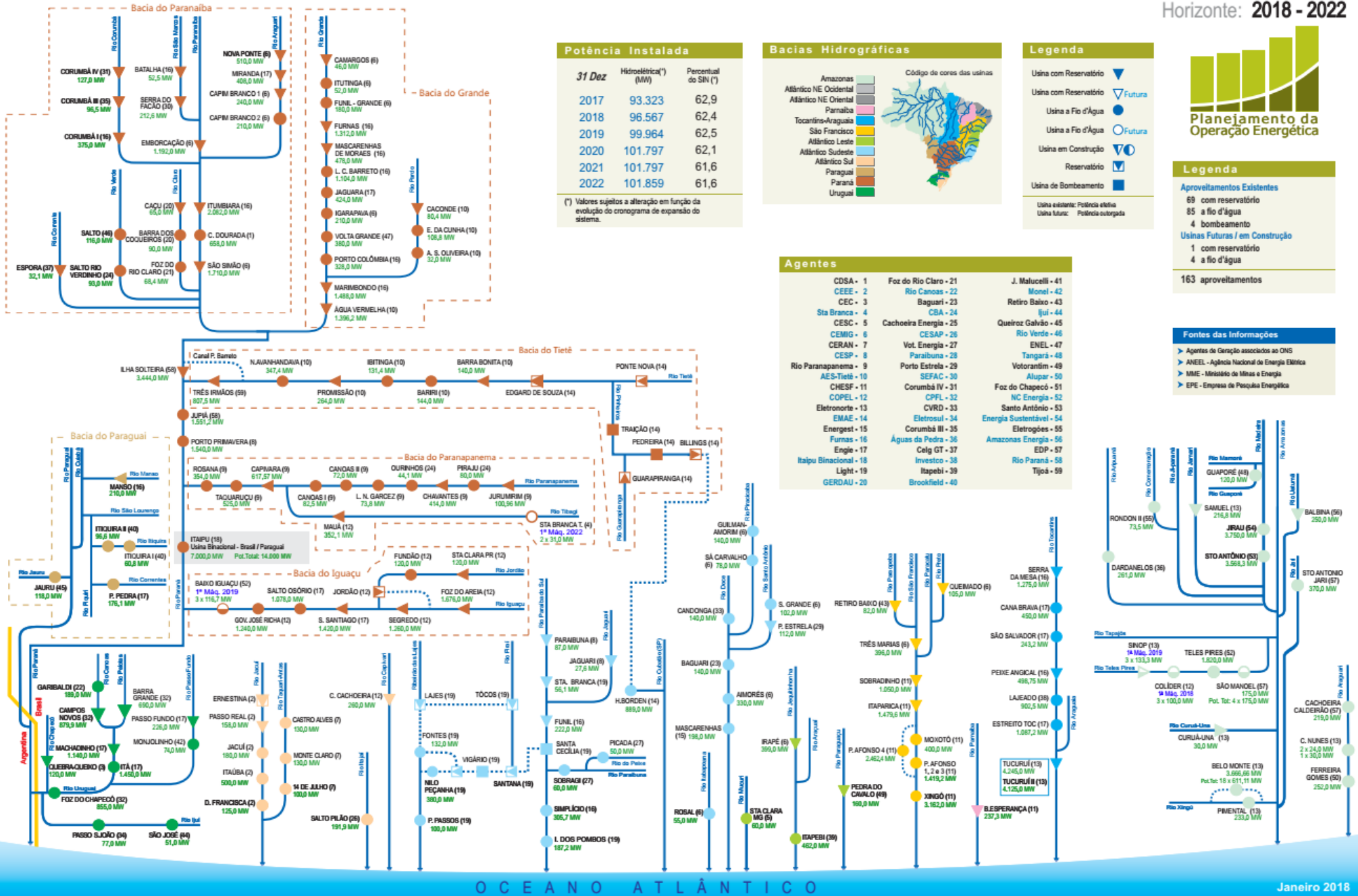
ZHOU, Tian *et al.* The contribution of reservoirs to global land surface water storage variations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 1, p. 309-325, 2016.

ZIV, Guy *et al.* Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 15, p. 5609-5614, 2012.

# Diagrama Esquemático das Usinas Hidroelétricas do SIN

## Usinas Hidroelétricas Despachadas pelo ONS na Otimização da Operação Eletroenergética do Sistema Interligado Nacional

Horizonte: 2018 - 2022



### Potência Instalada

31 Dez	Hidroelétricas(*) (MW)	Percentual do SIN (*)
2017	93.323	62,9
2018	96.567	62,4
2019	99.964	62,5
2020	101.797	62,1
2021	101.797	61,6
2022	101.859	61,6

(\*) Valores sujeitos a alteração em função da evolução do cronograma de expansão do sistema.



### Legenda

- Usina com Reservatório (▼)
- Usina com Reservatório Futura (▼ Futura)
- Usina a Fio d'Água (●)
- Usina a Fio d'Água Futura (● Futura)
- Usina em Construção (▼○)
- Reservatório (■)
- Usina de Bombeamento (■)
- Usina existente: Potência efetiva
- Usina futura: Potência outorgada

### Planejamento da Operação Energética

#### Legenda

**Aproveitamentos Existentes**

- 69 com reservatório
- 85 a fio d'água
- 4 bombeamento

**Usinas Futuras / em Construção**

- 1 com reservatório
- 4 a fio d'água

163 aproveitamentos

### Agentes

CDSA - 1	Foz do Rio Claro - 21	J. Malucelli - 41
CEEE - 2	Rio Canoas - 22	Monel - 42
CEC - 3	Baguari - 23	Retiro Baixo - 43
Sta Branca - 4	CBA - 24	Ijuí - 44
CEC - 5	Cachoeira Energia - 25	Queiroz Galvão - 45
CEMIG - 6	CESAP - 26	Rio Verde - 46
CERAN - 7	Vot. Energia - 27	ENEL - 47
CESP - 8	Paraibuna - 28	Tangará - 48
Rio Parapanema - 9	Porto Estrela - 29	Votorantim - 49
AES-Tietê - 10	SEFAC - 30	Alupur - 50
CHESF - 11	Corumbá IV - 31	Foz do Chapeco - 51
COPEL - 12	CPFL - 32	NC Energia - 52
Eletronorde - 13	CVRD - 33	Santo Antônio - 53
EMAE - 14	Eletrosul - 34	Energia Sustentável - 54
Energest - 15	Corumbá III - 35	Eletrogões - 55
Furnas - 16	Águas da Pedra - 36	Amazonas Energia - 56
Engie - 17	Celg GT - 37	EDP - 57
Itaipu Binacional - 18	Investco - 38	Rio Paraná - 58
Light - 19	Itapebi - 39	Tijoa - 59
GERDAU - 20	Brookfield - 40	

### Fontes das Informações

- Agentes de Geração associados ao ONS
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- MME - Ministério de Minas e Energia
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ANEXO A - AS USINAS HIDROELÉTRICAS DO SIN



## ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS SIMULADOS

Em azul, os reservatórios construídos após a SRTM. A Tabela ocupa 3 páginas.

Nome do Reservatório	Capacidade (hm <sup>3</sup> )	Latitude	Longitude	Data Const.
14 DE JULHO	55	-29.04	-51.62	31/12/2008
ÁGUA VERMELHA	11025	-19.94	-49.79	31/08/1978
BARRA BONITA	3135	-22.69	-48.26	31/05/1963
BALBINA	20006.22	-1.46	-59.99	31/01/1988
BARIRI	544	-22.29	-48.73	31/12/1969
BARRA GRANDE	4904.45	-27.96	-50.99	30/11/2005
BOA ESPERANÇA	5085	-6.94	-44.06	31/05/1970
CACHOEIRA DOURADA	460	-18.58	-49.40	31/01/1959
AMADOR AGUIAR I	241.13	-18.84	-48.09	28/02/2006
AMADOR AGUIAR II	879	-18.70	-48.30	31/03/2007
CACONDE	555	-21.63	-46.57	31/08/1966
CAMPOS NOVOS	1477	-27.60	-51.21	28/02/2007
CANA BRAVA	2300	-13.59	-48.11	31/05/2002
RISOLETA NEVES	54.44	-20.22	-42.87	30/09/2004
CANOAS I	212	-22.92	-50.41	31/05/1999
CANOAS II	151	-22.93	-50.15	31/07/1999
CAPIVARA	10540	-22.83	-50.94	31/03/1977
CASTRO ALVES	92	-28.96	-51.31	31/03/2008
CHAVANTES	8795	-23.34	-49.61	30/11/1970
COARACY NUNES	138.8	0.87	-51.29	31/12/1975
CORUMBÁ-4	3708	-16.24	-48.38	30/04/2006
CORUMBÁ	1500	-17.83	-48.52	31/10/1996
CURUA-UNA	530	-2.96	-54.45	31/01/1977
DONA FRANCISCA	330	-29.38	-53.23	28/02/2001
EDGARD DE SOUZA	1	-23.47	-46.89	31/01/1931
EMBORCAÇÃO	17725	-18.41	-47.78	31/08/1982
ERNESTINA	259	-28.49	-52.51	31/01/1958
ESFORA	209	-18.61	-51.96	30/09/2006
FUNDÃO	35	-25.69	-51.99	30/06/2006
FUNIL-MG	304	-21.17	-44.90	31/12/2002
FUNIL	888	-14.23	-39.49	31/08/1962
FURNAS	22950	-21.02	-45.76	30/09/1963
G. B. MUNHOZ	5779	-26.05	-51.42	31/10/1980
G. P. SOUZA	179	-25.18	-48.92	30/09/1971
GUAPORÉ	21	-15.11	-58.95	30/04/2003
GUARAPIRANGA	189.96	-23.73	-46.75	31/01/1931
GUILM. AMORIM	12	-19.71	-42.97	30/02/1997
ILHA SOLTEIRA	21060	-19.80	-50.95	31/07/1973
IBITINGA	985	-21.94	-48.88	30/04/1969
IGARAPAVA	480	-20.01	-47.59	31/12/1998
ILHA POMBOS	8	-21.88	-42.67	31/01/1924
IRAPÉ	5963.92	-16.84	-42.80	31/07/2006

ITAIPU	29403.91	-24.75	-54.48	30/04/1989
ITAPEBI	1634	-15.96	-39.77	28/02/2002
ITAUBA	620	-29.20	-53.25	31/01/1979
ITIQUEIRA I	5	-17.10	-54.83	30/06/2003
ITUMBIARA	17027	-18.32	-48.64	30/04/1980
ITUTINGA	11	-21.29	-44.61	31/01/1955
ITÁ	5100	-27.36	-52.13	30/06/2000
JACUÍ	29	-29.05	-53.20	31/01/1962
JAGUARA	450	-20.09	-47.37	31/01/1971
JAGUARI	1236	-23.15	-46.10	31/12/1973
JAURU	17.15	-15.20	-58.73	30/06/2003
JUPIÁ	3354	-20.58	-51.64	30/04/1969
JURUMIRIM	7008	-23.32	-48.92	30/09/1962
ESTREITO	1423	-20.19	-47.21	31/03/1969
LUIS EDUARDO MAGALHÃES	4940	-10.40	-48.44	31/12/2001
LIMOEIRO	25	-21.61	-47.00	31/12/1958
LUIZ GONZAGA	10782	-8.91	-38.60	31/01/1988
MASCARENHAS DE MORAES	4040	-20.46	-46.69	30/04/1957
MACHADINHO	3340	-27.56	-51.59	28/02/2002
MANSO	7337	-14.97	-55.61	30/11/2002
MARIMBONDO	6150	-20.31	-48.88	31/10/1975
MASCARENHAS	21.68	-19.50	-40.97	30/09/1973
MIRANDA	1120	-19.01	-47.90	31/05/1998
MONTE CLARO	11.28	-29.02	-51.49	31/12/2004
MOXOTÓ	1226	-9.30	-38.24	30/04/1977
NOVA AVANHANDAVA	2720	-21.17	-49.99	31/12/1982
NOVA PONTE	12792	-19.25	-47.29	31/01/1994
OURINHOS	20.82	-23.07	-49.82	31/12/2005
PORTO COLÔMBIA	1524	-20.08	-48.39	30/06/1973
PARAIBUNA	4732	-23.44	-45.50	30/04/1978
PASSO FUNDO	1589	-27.72	-52.70	31/03/1973
PEDRA DO CAVALO	3072	-12.43	-39.15	31/12/2004
PEIXE ANGICAL	2741	-12.48	-48.19	30/06/2006
PEREIRA PASSOS	17	-22.69	-43.84	31/01/1962
PICADA	7	-21.87	-43.55	31/07/2006
PIRAJU	84	-23.17	-49.33	30/09/2002
PONTE DE PEDRA	199	-17.55	-54.75	31/07/2005
PONTE NOVA	2	-23.59	-45.91	01/01/1971
PORTO ESTRELA	89	-19.10	-42.69	30/09/2001
PORTO PRIMAVERA	14400	-21.63	-52.30	31/01/1999
PROMISSÃO	7408	-21.46	-49.39	31/07/1975
QUEBRA QUEIXO	137	-26.64	-52.53	31/12/2003
QUEIMADO	557	-16.11	-47.33	30/06/2004
ROSAL	11	-20.90	-41.72	31/01/2000
ROSANA	1918	-22.62	-52.51	31/05/1987
SÁ CARVALHO	1	-19.65	-42.86	31/01/1951
SALTO CAXIAS	3573	-25.52	-53.28	28/02/1999
SALTO GRANDE CS	45	-22.92	-49.98	31/05/1958
SALTO OSÓRIO	1124	-25.56	-52.87	31/01/1975

SALTO SANTIAGO	6775	-25.65	-52.38	31/01/1980
SAMUEL	3493.44	-9.11	-63.27	31/07/1989
SANTA BRANCA	439	-23.35	-45.77	31/05/1999
SANTA CECÍLIA	6	-22.48	-43.84	31/01/1952
SANTA CLARA-PR	431	-25.64	-51.89	31/07/2005
GOVERNADOR NEY AMINTHAS	2950	-25.92	-51.93	30/09/1992
SERRA DA MESA	54400	-14.22	-48.60	30/04/1998
SOBRADINHO	34116	-9.67	-41.67	31/03/1982
SOBRAGI	1	-21.98	-43.36	31/07/1998
STA.CLARA-MG	146	-17.87	-40.26	28/02/2002
SÃO SIMÃO	12540	-18.67	-50.04	31/01/1978
TAQUARUÇU	677	-22.62	-51.68	30/11/1992
TRÊS IRMÃOS	13372	-20.87	-50.75	30/11/1993
TRÊS MARIAS	19528	-18.62	-45.21	31/01/1962
TUCURUÍ	50275	-4.36	-49.58	31/12/1984
NILO PEÇANHA	38	-22.66	-43.88	31/01/1953
VOLTA GRANDE	2244	-20.09	-47.99	30/04/1974
XINGÓ	3800	-9.52	-37.98	31/12/1994