

**CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH
PARA A BACIA DO PARANÁ**

Paulo R.M. Pontes¹, Fernando M. Fan², Walter Collischonn³, Diogo C. Buarque⁴, Mino Viana Sorribas⁵,

Resumo - A bacia hidrográfica do rio Paraná é uma das maiores bacias presentes no território brasileiro, e é a mais importante sob o ponto de vista de geração de energia hidroelétrica. Até a Usina de Itaipu a área de drenagem da bacia é de 823 mil km² distribuídos nos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo e Distrito Federal. Além de Itaipu, existem dezenas de outras usinas hidroelétricas no rio Paraná e seus afluentes. A descarga fluvial necessária para a geração de energia nestas usinas depende fortemente da variabilidade climática e de alterações nas características da cobertura vegetal e uso da terra. Uma ferramenta importante para auxiliar na avaliação do clima e do uso da terra numa bacia com estas dimensões é um modelo hidrológico capaz de representar os processos hidrológicos. O presente trabalho apresenta a etapa de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia do rio Paraná até Itaipu, buscando representar adequadamente as vazões naturais em todas as usinas hidrelétricas que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN). As informações necessárias para o uso do modelo foram extraídas de modelos digitais de elevação da região, de imagens de satélites e dos dados hidrometeorológicos disponíveis na ANA e no INMET. Os resultados indicaram que o modelo MGB-IPH é capaz de reproduzir as vazões naturais nas hidroelétricas – incluindo Itaipu – de maneira satisfatória. As aplicações futuras do modelo MGB-IPH na bacia do rio Paraná incluem análises dos impactos hidrológicos de cenários de mudanças climáticas.

Abstract – This paper presents the calibration and verification process of the MGB-IPH model in the Paraná river basin. The objective was to represent the natural flows in 65 hydroelectric in the basin. The information required for the use of the model was extracted from digital elevation models of the region, satellite images and hydrometeorological data available on ANA and INMET. The results indicated that the MGB-IPH model is able to reproduce the natural flows in hydroelectric - including Itaipu - satisfactorily.

Palavras-chave: Bacia do Paraná, Calibração, Hidroelétricas, Vazões Naturais, Itaipu, MGB-IPH.

¹ Doutorando do IPH-UFRGS. Email: p.rogenes@gmail.com

² Mestrando do IPH-UFRGS. Email: fernando.fan@bol.com.br

³ Professor adjunto do IPH-UFRGS. Email: collischonn@iph.ufrgs.br

⁴ Doutorando do IPH-UFRGS. Email: diogo.buarque@gmail.com

⁵ Doutorando do IPH-UFRGS. Email: mino_vs@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paraná é um dos mais importantes sistemas hidrográficos da América do Sul, devido à magnitude de sua descarga, grande extensão de sua área de drenagem, extensão total de seus cursos de água e aos usos da água. A bacia é de vital importância para o sistema hidrelétrico brasileiro. Nela está mais de 50% da capacidade hidrelétrica instalada em operação do Brasil, incluindo a usina de Itaipu, que ainda cobre praticamente 100% da demanda de energia do Paraguai.

Juntamente com o rio do Uruguai e Paraguai, o rio Paraná forma o sistema hidrográfico do rio da Prata que possui uma área de aproximadamente 3.100.00 km² (Conway & Mahé, 2009).

Dentro do escopo desse artigo, a bacia do Paraná foi delimitada até a usina hidroelétrica (UHE) Itaipu, totalizando 823 mil km² distribuídos nos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo e o Distrito Federal.

A elevação da região mais alta da bacia é de aproximadamente 1200 metros, enquanto o ponto mais baixo é de aproximadamente 250 metros. O aproveitamento hidroelétrico abrange um total de 65 grandes UHE. Essas usinas possuem ampla importância no cenário energético brasileiro. O aproveitamento energético na bacia gera 18715 MW/ano, o que corresponde a mais de 50% do total gerado em todo Brasil (Conway & Mahé, 2009).

Dentre as UHE's, destacam-se Ilha Solteira, Jupiá, Porto Primavera e Itaipu. A primeira, concluída em 1978, é a maior usina da CESP e de São Paulo e a terceira maior do Brasil. Sua potência instalada é de 3444 MW. Sua importância vai além da produção energética, sendo fundamental também para o controle da tensão e frequência do Sistema Interligado Nacional. A segunda, concluída em 1974, possui uma potência instalada de 1551 MW. Jupiá possui uma eclusa que possibilita a navegação no rio Paraná e a integração hidroviária com o rio Tietê. Porto Primavera é a segunda maior usina hidroelétrica de São Paulo. Possui a barragem mais extensa do país (10186.20 metros de comprimento) e potencial de geração de 1430 MW. A última usina citada, Itaipu, possui uma potência instalada de 14000 MW, sendo, ainda, a maior usina geradora de energia do mundo.

A bacia hidrográfica tem apresentado variabilidade das vazões em função de diversos fatores, entre os quais são apontadas a variabilidade climática e as mudanças de uso da terra (Muller, et al., 1998).

A modelagem hidrológica pode ajudar a compreender os impactos da variabilidade climática e das mudanças de uso da terra sobre a vazão dos rios. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo apresentar uma calibração do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB-IPH - para a bacia do Paraná, até a UHE Itaipu, com verificação de resultados em todas as 65 usinas na bacia. As informações necessárias para o uso do modelo foram extraídas de modelos digitais de elevação da região, de satélites e dos dados disponíveis na ANA.

A grande finalidade deste trabalho é que, com o modelo hidrológico calibrado para a bacia do rio Paraná, o mesmo seja utilizado para diferentes fins, incluindo a realização do estudo de impactos de mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água e geração de energia nas UHEs, elaboração de sistemas operacionais de previsão de vazão para as usinas, e análises de impactos de mudança de uso e ocupação do solo na bacia.

O MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH

Para a simulação hidrológica da bacia hidrográfica foi selecionado o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, que foi desenvolvido para representar os processos de transformação chuva-vazão em bacias de grande escala (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007; Paiva et al., 2011).

O modelo MGB-IPH foi desenvolvido especificamente para permitir a simulação hidrológica em bacias de grande escala (tipicamente maiores do que 10^4 km^2). Outra característica do MGB-IPH que o torna adequado para a aplicação no presente artigo é a forma como é representada a evapotranspiração, que é baseada no uso da equação de Penman-Monteith, utilizando como dados de entrada as variáveis meteorológicas que são tipicamente produzidas por modelos climáticos, como a temperatura do ar, a velocidade do vento, a radiação solar, e a umidade relativa do ar. O método de cálculo de evapotranspiração por Penman-Monteith adotado no MGB-IPH permite representar de forma diferenciada diferentes tipos de vegetação, e foi testado de forma independente por Ruhoff et al. (2012) que compararam as estimativas de evapotranspiração do modelo com dados medidos in loco e por estimativas feitas a partir de imagens de satélite.

Recentemente a integração do modelo MGB-IPH com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu melhorar as etapas de pré e pós-processamento. Técnicas específicas de pré-processamento a partir de dados de Modelos Digitais de Elevação foram desenvolvidas e testadas (Buarque et al., 2008; Buarque et al., 2009; Fan et al., 2010; Collischonn et al., 2010; Paz e Collischonn, 2007; Paz et al., 2008) e o modelo foi integrado a um software livre de SIG, facilitando a interpretação de resultados e as etapas pós processamento (Fan, 2011; Fan e Collischonn, 2012).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: BACIA DO RIO PARANÁ

A bacia do Paraná foi delimitada até a usina hidroelétrica (UHE) Itaipu, totalizando 823 mil km^2 (Figura 1). A elevação da região mais alta da bacia delimitada para esse trabalho é de aproximadamente 1200 metros, enquanto o ponto mais baixo é de aproximadamente 250 metros. O comprimento do rio Paraná é cerca de 1500 km na bacia delimitada, enquanto a largura do rio é bastante variada, alcançando valores de até 3 km aproximadamente.

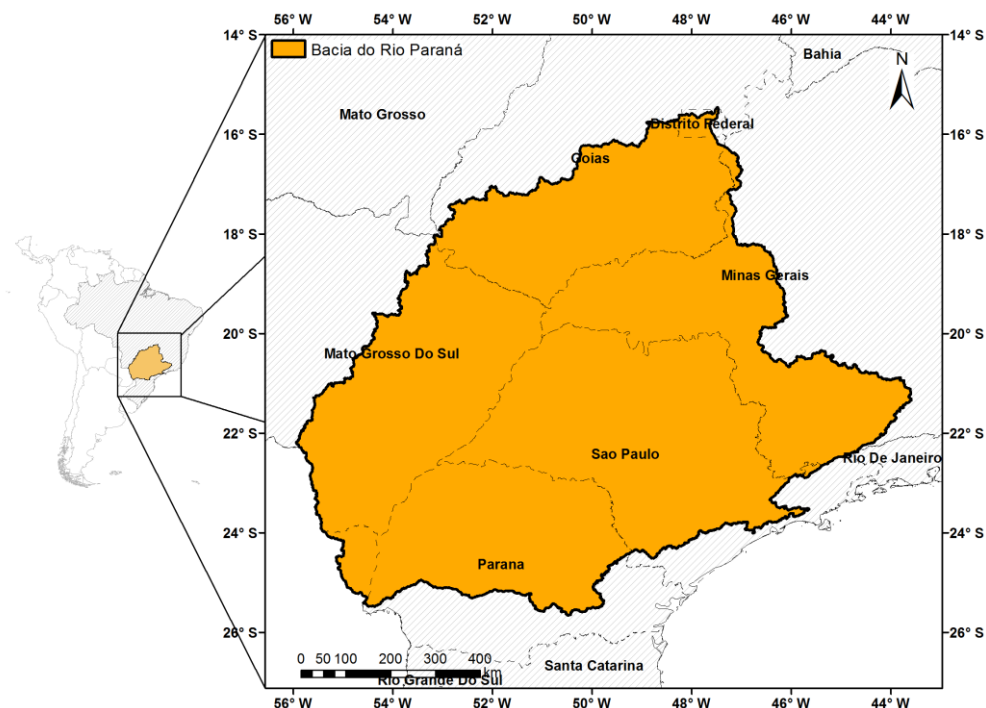


Figura 1: Localização da bacia do rio Paraná, até a sua foz.

Verifica-se uma variedade espacial da chuva média na bacia vai de aproximadamente 1300 mm a cerca de 1750 mm.

O sistema hidrelétrico da bacia é constituído de 65 usinas hidroelétricas, sendo a principal delas a usina de Itaipu. A localização das UHE é apresentada na Figura 2 e listada na Tabela 1.

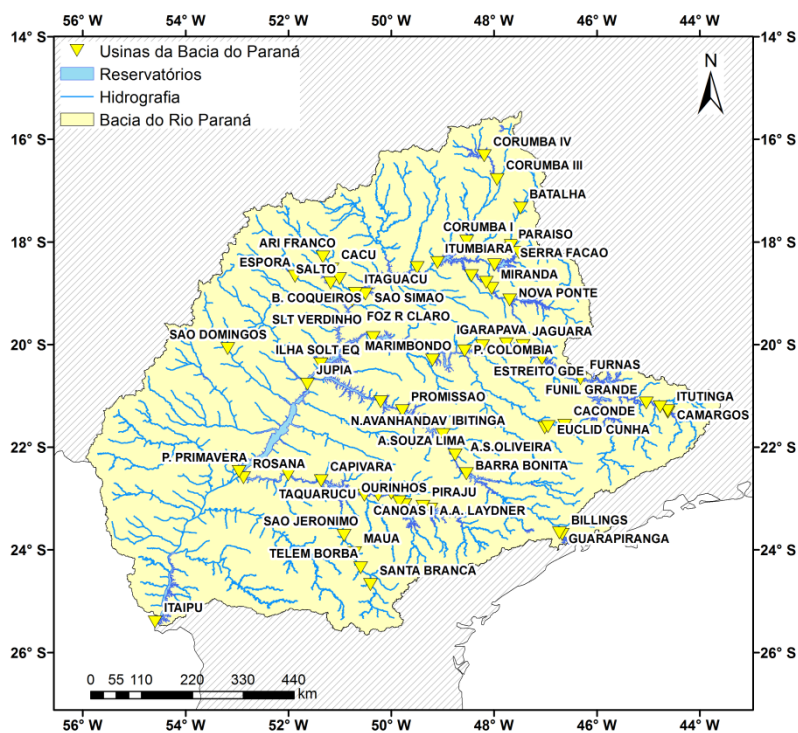


Figura 2: Localização das UHEs existentes na bacia do rio Paraná.

Tabela 1: Lista das UHEs existentes e ou planejadas na bacia do rio Paraná.

UHE	LAT	LONG	UHE	LAT	LONG
ITAIPU	-25.4074	-54.5892	ILHA SOLTEIRA	-20.3822	-51.3636
SANTA BRANCA	-24.6808	-50.4003	MARIMBONDO	-20.305	-49.197
TELEM BORBA	-24.3517	-50.5908	MASC MORAES	-20.285	-47.0636
MAUA	-24.0586	-50.7116	ESTREITO GDE	-20.1506	-47.2794
SAO JERONIMO	-23.7228	-50.9136	P COLOMBIA	-20.1287	-48.5711
BILLINGS	-23.7031	-46.6742	SAO DOMINGOS	-20.0833	-53.1747
GUARAPIRANGA	-23.6716	-46.7266	VOLTA GRANDE	-20.0289	-48.2208
EDGAR SOUZA	-23.4544	-46.9097	JAGUARA	-20.0231	-47.4344
AA LAYDNER	-23.2108	-49.2304	IGARAPAVA	-19.99	-47.7563
PIRAJU	-23.1544	-49.38	A VERMELHA	-19.8669	-50.3464
CHAVANTES	-23.1286	-49.7314	SLT VERDINHO	-19.1428	-50.7555
OURINHOS	-23.0684	-49.8381	NOVA PONTE	-19.1331	-47.6936
CANOAS I	-22.9414	-50.5169	FOZ R CLARO	-19.1178	-50.6456
CANOAS II	-22.9378	-50.2509	SAO SIMAO	-19.0181	-50.4992
L N GARCEZ	-22.9041	-49.9983	ITAGUACU	-19.007	-50.693
CAPIVARA	-22.658	-51.3598	MIRANDA	-18.9122	-48.0414
ROSANA	-22.6	-52.8694	SALTO	-18.8082	-51.1719
TAQUARUCU	-22.5419	-52	CAPIM BRANC1	-18.7903	-48.1472
BARRA BONITA	-22.5194	-48.5344	B COQUEIROS	-18.7217	-51.0032
P PRIMAVERA	-22.478	-52.9561	ESPORA	-18.6758	-51.8656
ASOUZA LIMA	-22.1533	-48.7525	CAPIM BRANC2	-18.6602	-48.4371
IBITINGA	-21.7592	-48.9906	CACU	-18.5318	-51.1486
ASOLIVEIRA	-21.6253	-47.0094	CACH DOURADA	-18.5025	-49.4931
EUCLID CUNHA	-21.6031	-46.9492	EMBORCACAO	-18.4519	-47.9859
CACONDE	-21.5767	-46.6242	ITUMBIARA	-18.4077	-49.0983
CAMARGOS	-21.3256	-44.6161	ARI FRANCO	-18.301	-51.325
PROMISSAO	-21.2961	-49.7831	DAVINOPOLIS	-18.2097	-47.5161
ITUTINGA	-21.2922	-44.623	PARAISO	-18.1311	-47.7017
SAO MIGUEL	-21.2179	-44.7672	SERRA FACA0	-18.0739	-47.6645
FUNIL GRANDE	-21.1436	-45.0372	CORUMBA I	-17.9893	-48.531
N.AVANHANDAVA	-21.1189	-50.2011	BATALHA	-17.3482	-47.4838
JUPIA	-20.7758	-51.6267	CORUMBA III	-16.7873	-47.9412
FURNAS	-20.6702	-46.3165	CORUMBA IV	-16.3253	-48.1875
TRES IRMAOS	-20.6688	-51.2999			

Relevo

Os dados de relevo foram obtidos diretamente do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e está apresentado na Figura 3, com resolução de 90 m. O MDE do SRTM está disponível em escala global e pode ser obtido de diversas fontes, como a EMBRAPA, o INPE, ou do projeto HydroSheds.

O MDE do SRTM foi obtido com base em um processo de interferometria de dados de radar obtidos por sensores a bordo da nave espacial Endeavour, e cobrem quase todo o globo, com resolução espacial de

cerca de 90 m, e resolução vertical de 1 m. O MDE do SRTM tipicamente apresenta erros em locais com vegetação densa ou declividade extremamente elevada. Entretanto, avaliações anteriores do MDE do SRTM em locais com vegetação menos densa ou de menor altura média revelam excelentes correlações com dados topográficos obtidos em mapas em escala 1:50.000.

De qualquer forma, para os objetivos de modelagem hidrológica de grande escala propostos neste artigo, o MDE do SRTM foi amplamente testado em trabalhos anteriores (Paz et al., 2008) tendo sido desenvolvidas técnicas específicas para derivar do MDE informações relevantes do ponto de vista hidrológico (Buarque et al., 2009; Buarque et al., 2008; Collischonn et al., 2010; Paz e Collischonn, 2008; Paz e Collischonn, 2007).

Hidrografia

As informações de hidrografia foram obtidas nas páginas da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que disponibilizam arquivos vetoriais dos principais rios brasileiros. O arquivo vetorial foi utilizado para realizar a operação DEM Reconditioning (AgreeDEM) e corrigir uma falha no MDE utilizado para delimitar a bacia do Paraná. Essa falha proporcionava um erro na drenagem entre as bacias do Paraná e São Francisco. As informações de hidrografia estão apresentadas na Figura 3.

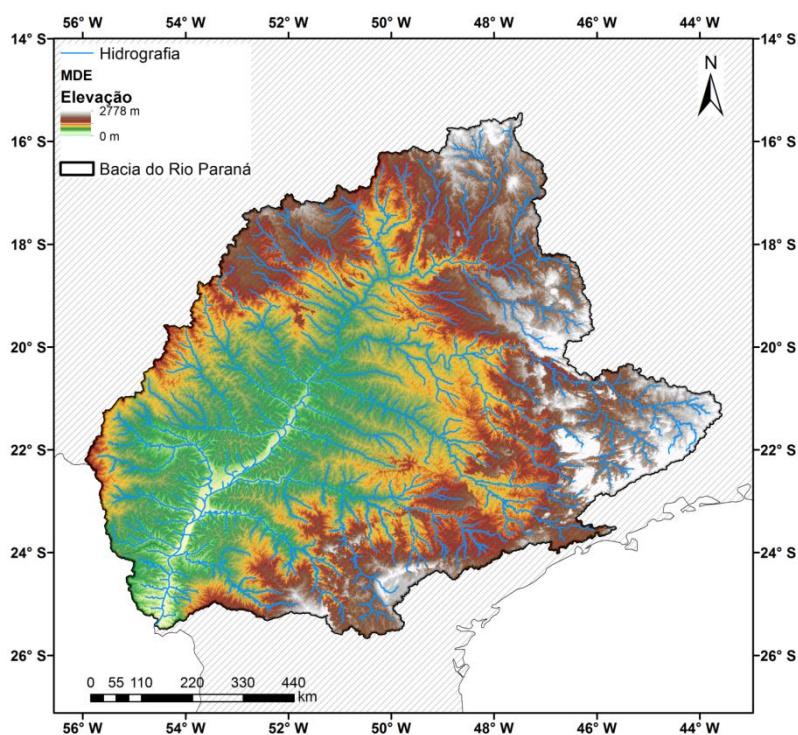


Figura 3: Hidrografia da bacia do rio Paraná, até a foz.

Tipos de solos

O mapa de tipos de solos da bacia hidrográfica em área brasileira foi obtido a partir do projeto Radam Brasil, em escala 1:1.000.000. Para a região fora do Brasil foi utilizada a base de dados disponibilizada pela FAO-UNESCO, em escala 1:5.000.000.

A Figura 4 apresenta o mapa de tipos de solos da bacia do Paraná. É possível observar que uma expressiva parte da bacia apresenta solos do tipo latossolo e argissolo, ambos solos relativamente profundos. Esses dois tipos de solos ocupam praticamente toda a área da bacia. Na parte norte da bacia é possível detectar pequenas áreas de cambissolos e neossolos (solos mais rasos).

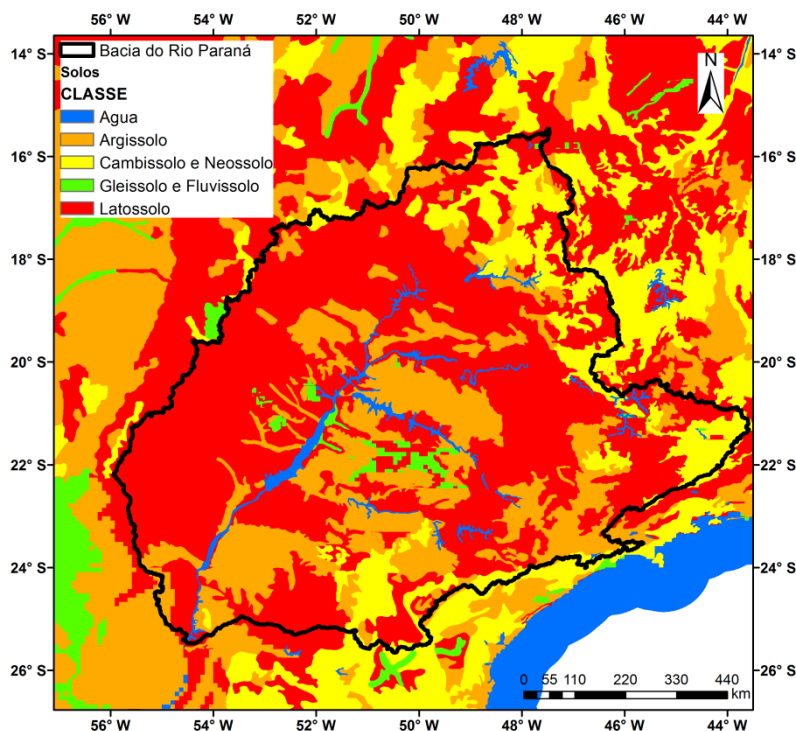


Figura 4: Mapa de tipos de solos na bacia do rio Paraná.

Tipos de vegetação e uso da terra

O mapa de tipos de vegetação e classes de uso da terra foi obtido do Mapa de Vegetação de América do Sul (“A Vegetation Map of South America”), desenvolvido por Eva et al (2002). Este mapa possui resolução espacial de aproximadamente 1 km e foi desenvolvido a partir de revisões de levantamentos de cobertura vegetal anteriores e múltiplas imagens de satélite de diferentes resoluções e finalidades. Outras informações relativas às áreas alagadas (dados de radar do JERS-1), à cobertura de nuvens (DMSP) e ao relevo (GTOPO30) também foram incluídas. A Figura 5 apresenta o mapa com suas classes de vegetação simplificadas.

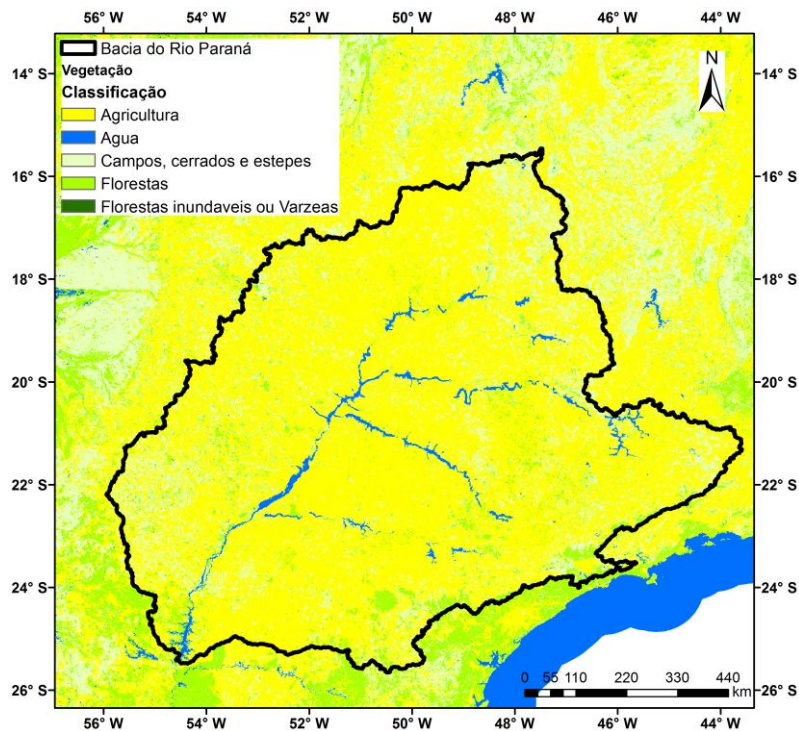


Figura 5: Mapa de classes de vegetação e tipos de usos da terra na bacia do rio Paraná.

Unidades de Respostas Hidrológicas

A subdivisão da bacia em unidades que teoricamente possuem o mesmo comportamento hidrológico, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica, ou URH, é um processo fundamental na aplicação do modelo MGB-IPH.

Os mapas de unidades de respostas hidrológicas são obtidos pela composição e reclassificação de mapas de tipo de solo e uso de solo. As URH têm influência direta nos processos hidrológicos representados no modelo. Enquanto as características de tipo de solo influenciam no armazenamento do solo e no escoamento, o uso de solo influencia no balanço vertical (i.e. evapotranspiração e interceptação). A Figura 6 apresenta as URH construídas para a bacia do rio Paraná.

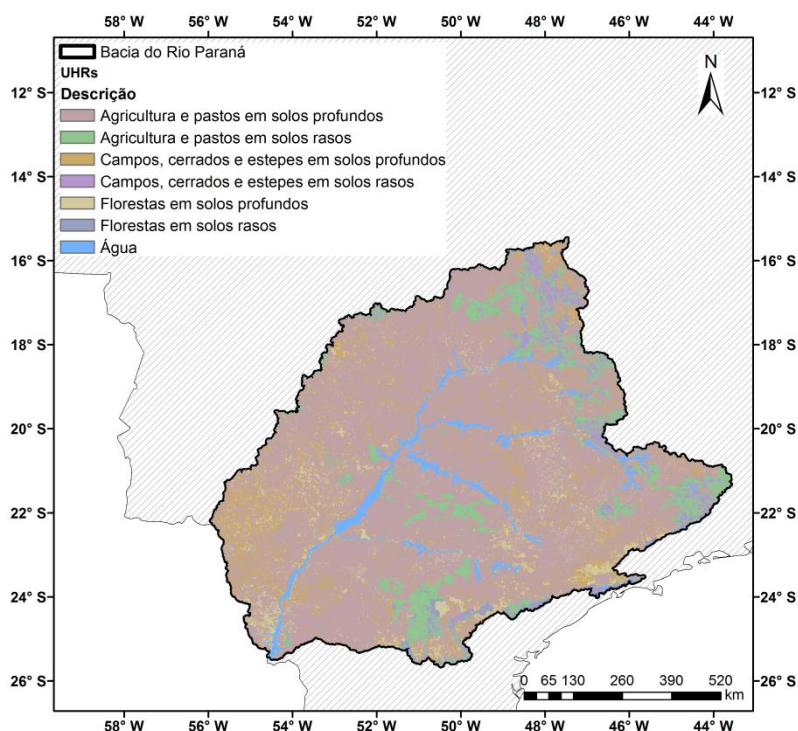


Figura 6 - Mapa de unidades de respostas hidrológicas (URH) da bacia do rio Paraná.

DADOS HIDROLÓGICOS

Dados de Vazão Natural

Conforme definição do ONS (2005), os postos naturais são aproveitamentos (em operação ou em expansão) cuja vazão corresponde à vazão natural, obtida com a retirada do efeito da operação de aproveitamentos a montante e a incorporação das vazões relativas à evaporação líquida dos reservatórios e aos usos consuntivos da água em toda a bacia, através de processos de reconstituição das vazões naturais.

Estes dados foram obtidos a partir do site em Internet (www.ons.org.br) do Operador Nacional do Sistema (ONS) para os locais de interesse na bacia do Paraná. Os locais com dados de vazões naturais obtidos são os mesmos pontos onde existem UHEs na bacia.

Dados da ANA

Os dados diários de estações pluviométricas utilizados para a modelagem da bacia hidrográfica foram obtidos no sistema *Hidroweb* mantido pela Agência Nacional de Águas - ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Foram obtidas as informações de 4751 postos pluviométricos, porém foram utilizadas apenas 3753 estações, devido à pouca disponibilidade de dados das demais. Considerando o conjunto de dados de precipitação obtidos, a disponibilidade temporal pode ser considerada boa para o período de 1960 a 1990 e de 1995 a 2010.

Dados meteorológicos

A aplicação do modelo MGB-IPH também exige dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação), utilizados para calcular a evapotranspiração nas unidades de resposta hidrológica que compõem a bacia hidrográfica. Estes dados são normalmente coletados em estações meteorológicas, que no Brasil são geralmente mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para este trabalho, foram utilizadas como fonte de dados meteorológicos as normais climatológicas mensais publicadas pelo próprio INMET.

DADOS PARA CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO

A quantidade e a representatividade das informações necessárias para uma calibração de um modelo hidrológico é fundamental para permitir um resultado de qualidade, principalmente quando se busca a aplicação do modelo para previsão de vazões. Neste sentido, os dados fluviométricos são utilizados para a calibração e devem ser confiáveis, pois as tendências nestas informações são transferidas para os resultados e prognósticos.

Seleção das estações e período para calibração e verificação do modelo

Todos dados de vazões naturais disponíveis foram utilizados para a calibração do modelo. Todos os dados de vazão natural possuem uma disponibilidade temporal de 1930 até 2010, englobando os períodos de calibração e verificação.

Com base na disponibilidade temporal dos dados fluviométricos, e como existe uma boa disponibilidade de dados de chuva para a bacia hidrográfica, o período escolhido para calibração foi de 01/01/1960 até 31/12/1990. A verificação será realizada entre 01/01/1995 até 31/12/2010.

DISCRETIZAÇÃO DA BACIA

Para a representação física da bacia hidrográfica, o modelo MGB-IPH utiliza uma discretização da bacia em unidades irregulares denominadas mini-bacias, definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE).

No modelo hidrológico, também, a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias, que são macro áreas de drenagem que abrangem várias mini-bacias e compõem a bacia hidrográfica estudada. Esta subdivisão opcional pode ser utilizada para facilitar a calibração do modelo hidrológico. A Tabela 2 apresenta um sumário do esquema de subdivisão de bacia hidrográfica que é adotado no MGB-IPH.

Tabela 2 - Esquema de subdivisão da bacia hidrográfica de estudo adotado no MGB-IPH.

Unidade	Descrição
Bacia Hidrográfica	Região hidrográfica de estudo simulada pelo modelo.
Sub-bacia Hidrográfica	Subdivisão da bacia hidrográfica de estudo em

	grandes áreas de drenagem.
	Subdivisão das bacias hidrográficas em pequenas regiões. São formadas pela área de drenagem de cada trecho da hidrografia.
Mini-bacia Hidrográfica	

Para a discretização da bacia do rio Paraná visando sua utilização no modelo MGB-IPH, foram utilizadas as informações de hidrografia e relevo, apresentadas anteriormente. A seguir, são sumarizados os principais resultados da discretização.

Trechos de rios e Mini-bacias

Antes de iniciar o processo, foi necessário considerar a possibilidade de existência de áreas planas, as quais são sempre um problema para a definição da direção de escoamento entre os pixels do MDE e posterior definição da drenagem (Buarque et al, 2009). A solução adotada neste trabalho para a bacia ser subdividida utilizando o MDE, iniciou-se com uma imposição forçada da hidrografia vetorial à sua topografia, utilizando um procedimento conhecido como AgreeDEM disponível na ferramenta ArcHYDRO. Desta forma buscou-se ajustar a rede gerada a partir do MDE com a rede hidrográfica da ANA, assumindo esta como sendo confiável do ponto de vista hidrológico, evitando assim problemas com áreas planas.

Para a definição da rede de drenagem foi adotado um valor de área de cabeceira igual a 405 km² (aproximadamente 50 mil pixels), com o qual foi possível gerar uma rede de drenagem composta por 1239 trechos de rios.

Uma vez definida a rede de drenagem, foram delimitadas as bacias de contribuição correspondentes a cada trecho de rio, denominadas de mini-bacias. O resultado final dessa etapa gerou um total de 1239 mini-bacias.

Definição das Sub-bacias

Ainda, para a calibração do modelo, a bacia do Paraná foi subdividida em sub-bacias. Para a definição dos exutórios e delimitação das sub-bacias foram utilizadas as localizações dos dados de vazões naturais (mensais), e os postos fluviométricos selecionados a partir da base de dados da ANA com dados diários.

Para cada sub-bacia pode ser admitido um conjunto diferente de parâmetros, caso necessário. Isto flexibiliza o processo de calibração, permitindo representar espacialmente as múltiplas características de uso de solo e tipo de solo que compõem a bacia hidrográfica. No total foram geradas 154 sub-bacias. A Figura 7, a seguir, apresenta os resultados da discretização da bacia do Paraná.

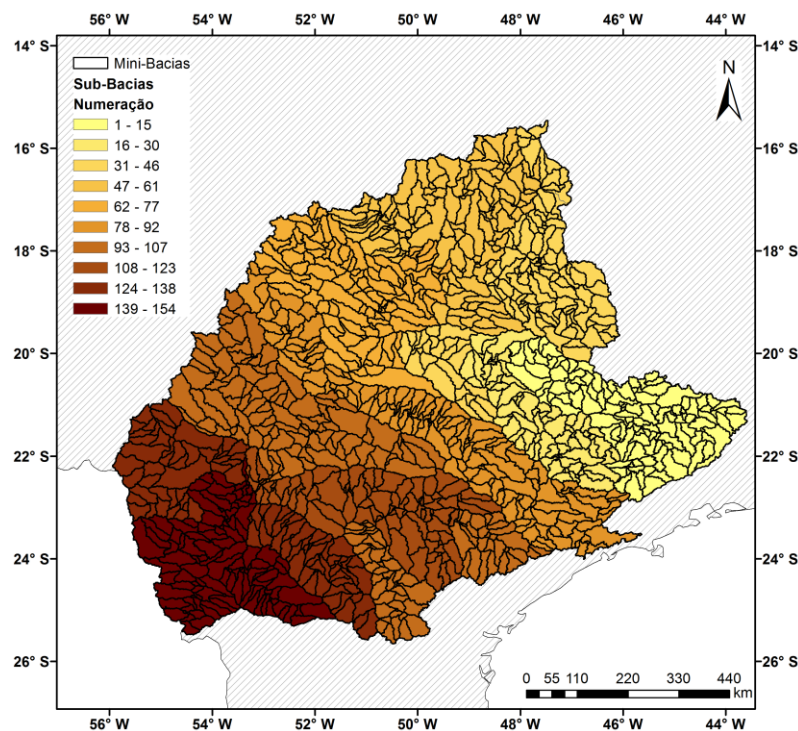


Figura 7 - Discretização da bacia hidrográfica do Paraná.

CALIBRAÇÃO DO MODELO

A simulação de um sistema hidrológico é afetada pelas incertezas nos dados de entrada, simplificações no modelo e técnicas inadequadas para a estimativa dos parâmetros, que, finalmente se refletem na estimativa dos parâmetros do modelo de simulação. É necessário encontrar o valor dos parâmetros de um modelo matemático que resultem em uma boa concordância entre dados observados e calculados.

No procedimento de calibração são consideradas avaliações subjetivas de ajuste dos hidrogramas e medidas de desempenho quantitativas, ou funções objetivo.

As medidas de desempenho consideradas na calibração são: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (E); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (E_Log); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV). Também será realizada uma análise visual dos hidrogramas calculados e observados.

O coeficiente Nash-Sutcliffe das vazões

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é uma forma de medir o quanto o modelo proposto (MGB-IPH) é melhor do que um modelo alternativo, que, no caso particular deste coeficiente, é a média de longo termo. O valor é adimensional e pode variar entre $-\infty$ a 1. Valores próximos de 1 indicam que o modelo é bastante superior a média de longo termo. Valores próximos de zero indicam que o modelo é tão ruim como a média. Valores positivos indicam que o modelo é melhor do que a média. Valores negativos indicam que o modelo é pior do que a média.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é calculado pela equação 1:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QOm)^2} \quad (1)$$

onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; e QOm é a média das vazões observadas no período de N intervalos de tempo.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão, quando a vazão é mais baixa.

O coeficiente Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser utilizado com os dados de vazão ou com os dados de vazão transformados por algum procedimento, como a raiz quadrada, o inverso ou os logaritmos. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão.

Da mesma forma que o coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões tem um valor adimensional que pode variar entre $-\infty$ e 1. Valores próximos de 1 indicam que o modelo é bastante superior a média de longo termo. Valores próximos de zero indicam que o modelo é tão ruim como a média. Valores positivos indicam que o modelo é melhor do que a média. Valores negativos indicam que o modelo é pior do que a média.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões é calculado pela equação 2:

$$E_{\text{Log}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QO_i) - QOm\text{Log})^2} \quad (2)$$

onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; e $QOm\text{Log}$ é a média dos logaritmos das vazões observadas no período de N intervalos de tempo.

O erro de volume

O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão. O erro relativo de volume é adimensional mas pode ser apresentado em termos percentuais. Um erro relativo de -20%, por exemplo, indica que o modelo hidrológico gera, ao longo de todo o período de simulação, uma vazão média 20% inferior à vazão observada. Idealmente os erros de volume deveriam se manter numa faixa de -10% a +10%, que pode ser considerada razoável em função das incertezas dos próprios dados medidos.

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (3)$$

onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo.

Definição dos parâmetros fixos do modelo hidrológico

Os parâmetros fixos do modelo hidrológico são: Índice de Área Foliar, Albedo, Resistência Superficial e Altura média das árvores. Eles foram estimados com auxílio de dados contidos na literatura (ex. Shuttleworth, 1993; Collischonn, 2001), bem como em aplicações anteriores do modelo (ex: Silva et al., 2007; Tucci et al., 2007; Collischonn, 2008; Ribeiro Neto, 2006; Paiva et al., 2011).

Definição dos parâmetros calibráveis do modelo hidrológico

Os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico MGB-IPH foram associados às propriedades físicas das URHs. A calibração destes parâmetros sensíveis foi realizada em duas etapas na bacia do Paraná. Na primeira foi feito um ajuste dos parâmetros fazendo alterações manuais nos seus valores, buscando assim aproximar ao máximo os hidrogramas calculados dos observados. Na segunda etapa, os parâmetros previamente estimados por calibração manual foram ajustados automaticamente utilizando o algoritmo de otimização MOCOM-UA (Yapo et al, 1998).

Dada a abordagem do modelo MGB-IPH em Unidades de Resposta Hidrológica, foram ajustados diferentes conjuntos de parâmetros, cada um associado a uma determinada URH, cujos valores buscaram refletir seus comportamento hidrológico esperado. Em uma URH, o tipo de solo (litologia) influencia principalmente nos parâmetros de profundidade do solo (W_m) e nos parâmetros de escoamento, enquanto o uso do solo (i.e. vegetação) influencia nos processos verticais, como a interceptação e a evapotranspiração.

Para a calibração da bacia do Paraná foram utilizados dados de postos fluviométricos e usinas hidroelétricas, onde os resultados foram focados nas vazões naturais das UHEs existentes na bacia, conforme os propósitos da utilização deste trabalho.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO

A Tabela 3 apresenta as medidas de desempenho do modelo resultante da calibração, para a usina de Itaipu. A Tabela 4 apresenta as medidas de desempenho do modelo resultante da verificação.

É importante citar que o intervalo de tempo de simulação do modelo é diário, porém, como as vazões naturais são mensais, são apresentados hidrogramas mensais.

Tabela 3: Medidas de desempenho de algumas usinas hidroelétricas (UHE) no período de calibração.

Nome	E	E_log	ΔV
Itaipu	0.921	0.934	5.823
Rosana	0.945	0.925	-2.391
Porto Primavera	0.929	0.932	0.329
Nova Avanhandava	0.802	0.806	7.327
Ilha Solteira	0.914	0.918	-6.859
Jupia	0.916	0.93	5.569
Água Vermelha	0.945	0.94	2.505

Furnas	0.931	0.93	-1.988
--------	-------	------	--------

Tabela 4: Medidas de desempenho de algumas usinas hidroelétricas (UHE) no período de verificação.

Nome	E	E_log	ΔV
Itaipu	0.942	0.947	1.272
Rosana	0.949	0.911	-2.369
Porto Primavera	0.952	0.955	1.074
Nova Avanhandava	0.75	0.769	7.015
Ilha Solteira	0.941	0.949	-5.299
Jupia	0.936	0.951	4.781
Água Vermelha	0.948	0.916	8.275
Furnas	0.916	0.896	13.266

A Figura 8 mostra os histogramas de frequência absoluta para cada uma das medidas de desempenho durante o período de calibração. A Figura 8 também apresenta os erros de volume para cada usina para o mesmo período. A **Figura 9** mostra os erros de volume da calibração e da verificação.

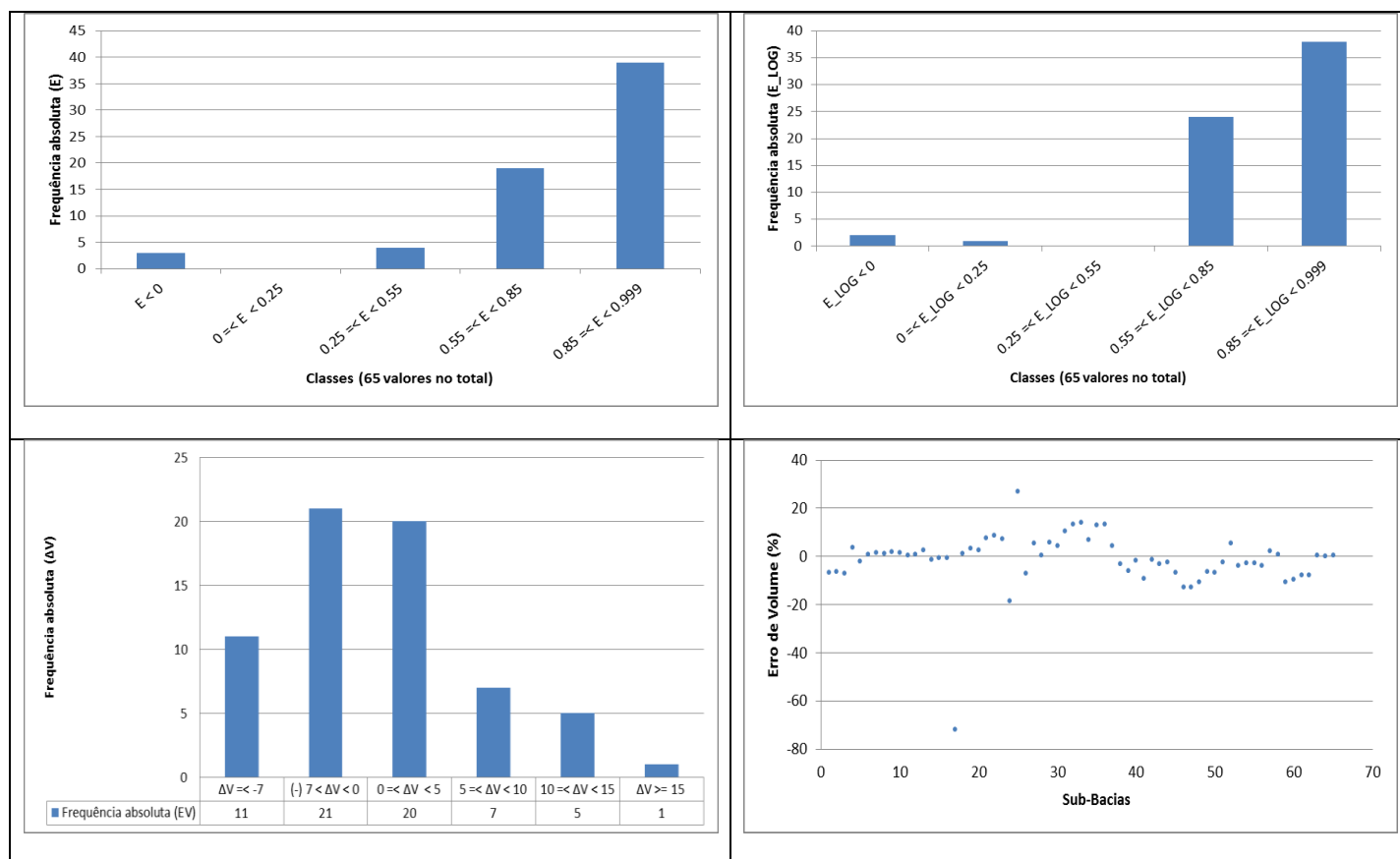


Figura 8 – Histograma de frequências do coeficiente E, E_LOG e ΔV . O último gráfico mostra o erro de volume em cada sub-bacia.

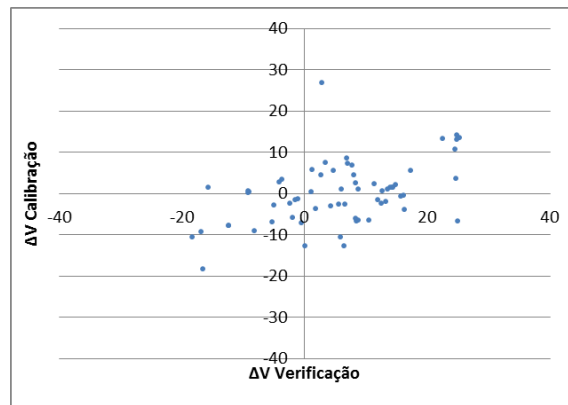
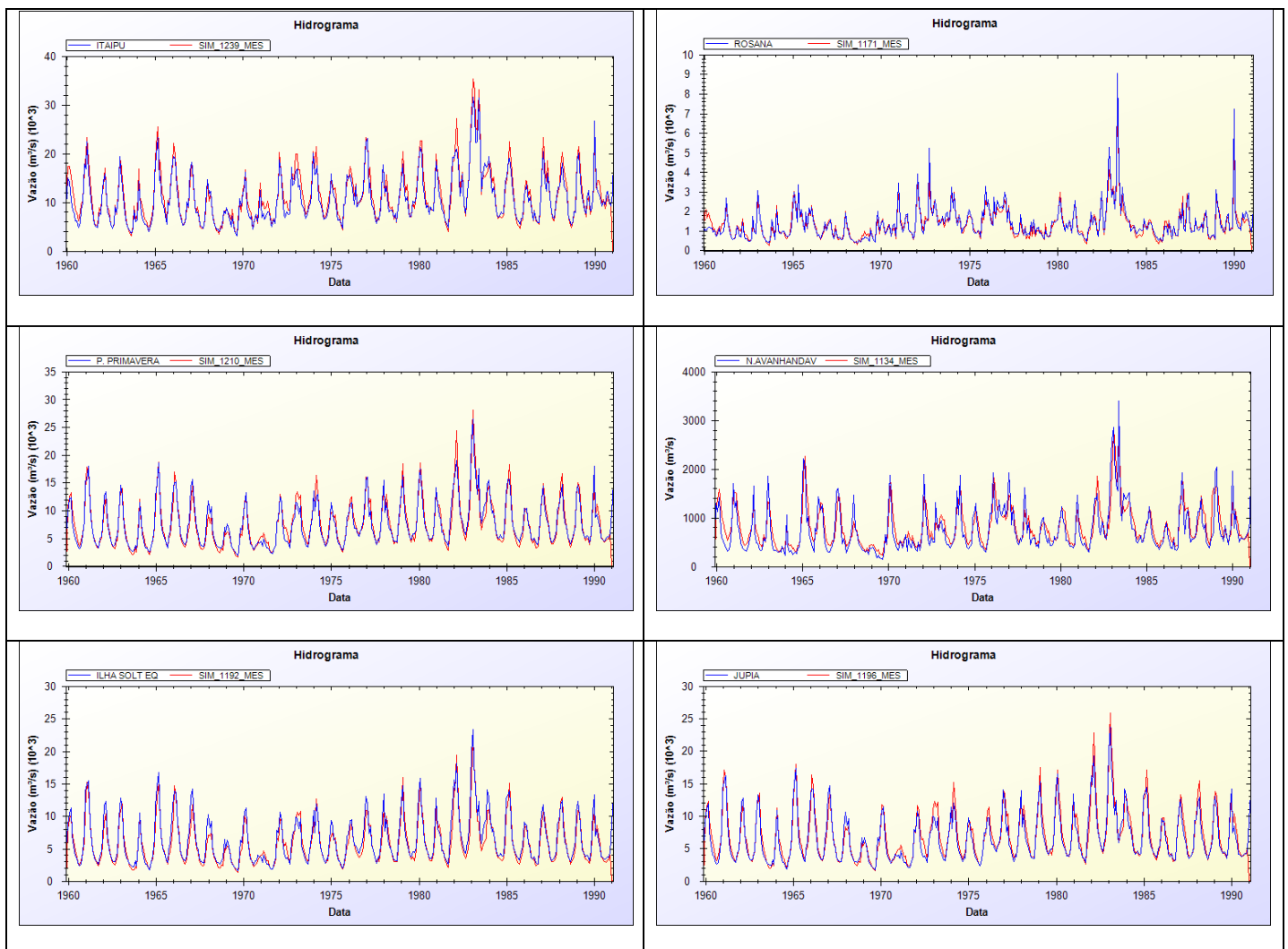


Figura 9 – Relação entre os erros de volume no período de calibração e verificação.

A Figura 10 e Figura 11 apresentam os hidrogramas resultantes da calibração e verificação do modelo hidrológico nas 8 usinas.



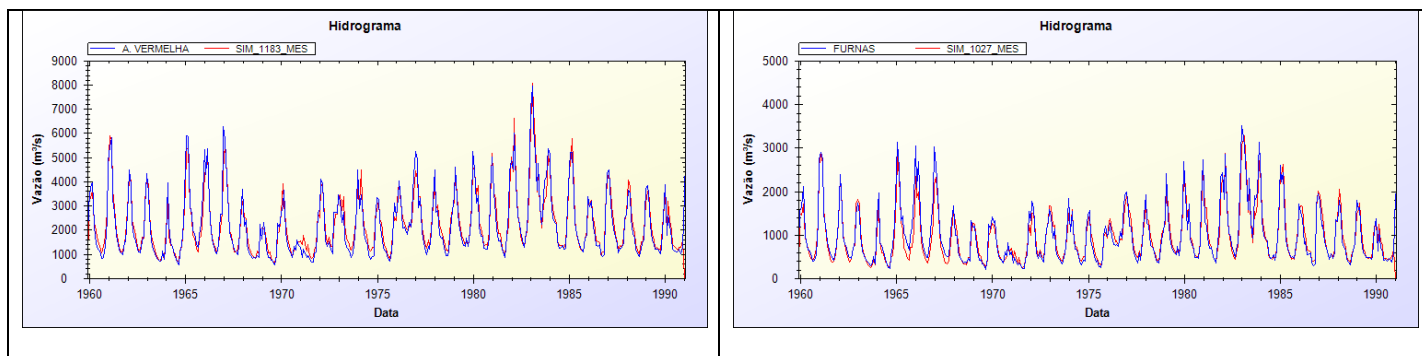


Figura 10: Hidrogramas da calibração nas 8 usinas selecionadas.

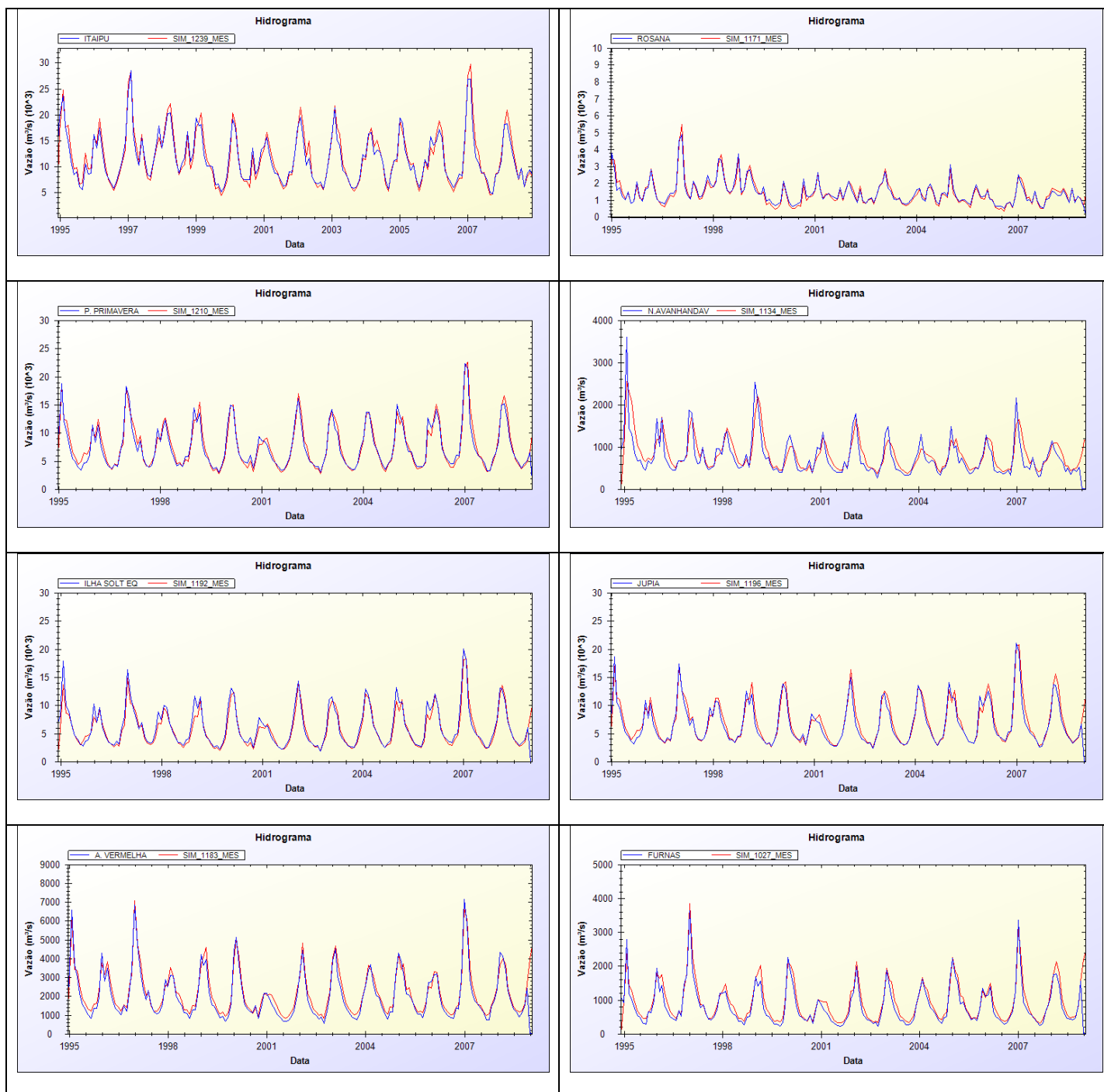


Figura 11 - Hidrogramas da verificação nas 8 usinas selecionadas.

AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO

Os resultados da calibração do modelo hidrológico podem ser considerados muito satisfatórios. Com relação às medidas de desempenho do modelo MGB-IPH pode-se afirmar que o coeficiente E nas UHE apresentam 58 valores acima de 0.55 (Figura 8) mostrando que o modelo está representando de maneira satisfatória as vazões naturais das usinas.

O coeficiente E_LOG das vazões é semelhante ao coeficiente E. O resultado para a maioria das UHE (62 usinas) foram superiores a 0.55, o que pode ser considerado satisfatório.

O erro de volume entre as vazões simuladas e calculadas será alvo de maiores estudos. Almeja-se deixar os erros o mais próximo de zero possível. Ainda assim, os resultados são muito bons. São 41 usinas com um erro de volume variando dentro do intervalo entre -7% e 5%. Os piores resultados estão nas usinas situadas no lado direito do rio Paraná, onde a distribuição de estações pluviométricas é bem inferior ao outro lado da bacia. Provavelmente a precipitação é um forte indicativo dos maiores erros de volume nessa região.

Devem ser destacados os hidrogramas apresentados acima. Os resultados estão muito bons e as vazões simuladas e observadas muito próximas, o que indica que o modelo MGB-IPH está representando satisfatoriamente as vazões naturais.

Frisam-se ainda os resultados das UHE de maior porte. A usina Porto Primavera está com os resultados das medidas de desempenho praticamente perfeitos. Isso pode ser confirmado observando os hidrogramas mensais da usina. Os resultados da calibração nas usinas Rosana, Água Vermelha e Furnas são igualmente bons. A calibração de Itaipu também merece destaque. Os coeficientes E e E_LOG foram superiores a 0.9 e o erro de volume aproximadamente 5%.

Os resultados da calibração indicam que o modelo não está sobreparametrizado ou subparametrizado, isto é, que os seus parâmetros da calibração não estão representando apenas o período de calibração. Observando a Figura 9 percebe-se que os resultados continuam satisfatórios, apesar dos erros de volume terem aumentado em alguns casos. Apesar de um aumento nos erros de volume em algumas usinas foi observado uma diminuição desses erros em outras (Tabela 4). Os hidrogramas da verificação demonstram que os resultados continuam satisfatórios.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma aplicação completa do modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do Rio Paraná, que é uma bacia hidrográfica estrategicamente vital para o sistema hidrelétrico brasileiro.

Dadas às dimensões da bacia, um dos grandes desafios do trabalho foi a consolidação e o processamento de uma base de dados espaciais consistente, que permitisse a representação da bacia para a aplicação do modelo. Em relação a dados hidrológicos, foram utilizadas informações de diferentes fontes,

incluindo dados de postos pluviométricos disponibilizados pela ANA, normais climatológicas do INMET, e vazões mensais naturais disponibilizadas pela ONS.

O modelo hidrológico foi calibrado com foco na melhor representação possível das vazões naturais mensais em todos os pontos dentro da bacia hidrográfica onde existem usinas hidrelétricas. O modelo foi calibrado para o período compreendido entre 1960 e 1990 e os resultados foram verificados para o período de 1995 a 2010. Tanto os resultados da calibração quanto os da verificação podem ser considerados muito satisfatórios.

Pretende-se a partir deste trabalho que os resultados obtidos sejam utilizados para a realização de estudos de impactos de mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água e geração de energia na bacia, elaboração de sistemas operacionais de previsão de vazão para as UHEs locais, e realização de estudos e análises de impactos de mudança de uso e ocupação do solo sobre o regime hidrológico da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R. E COLLISCHONN, W. 2009. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, p. 91-103.
- BUARQUE, D. C.; PAZ, A. R. E COLLISCHONN, W. 2008. *Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos*. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Rio de Janeiro. Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste.
- Conway, D.; Mahé, Gil. (2009). River flow modeling in two large river basins with non-stationary behavior: The Paraná and the River. *Hydrological Processes*, vol. 23, 3186 – 3192.
- COLLISCHONN, W. E TUCCI, C. E. M. 2001. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 2.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C. AND TUCCI, C. E. M. 2007. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895.
- COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAZ, A. R.; MENDES, C. A. B. AND FAN, F. M. 2010. *Impact of pit removal methods on DEM derived drainage lines in flat regions*. In: AWRA 2010 Spring Specialty Conference, Orlando, FL.
- COLLISCHONN, W.; KAYSER, R.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D. E FAN, F. M. 2010. *Manual de Discretização de Bacias para Aplicação do Modelo MGB-IPH - Versão 2.0*, Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico, FINEP/ANA/IPH-UFRGS, Porto Alegre (RS), 51 p. Disponível on-line: <http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/MGB-IPH/MGBIPH2010/Downloads.html>.
- EVA, H.D.; DE MIRANDA, E.E.; DI BELLA, C.M. AND GOND, V., ET AL. 2002. *A Vegetation map of South America*, EUR 20159 EN, European Commission, Luxembourg.
- FAN, F. M. 2011. *Acoplamento entre SIG e modelos hidrológicos: Integração do modelo MGB-IPH*. Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil.

- FAN, F. M. AND COLLISCHONN, W. 2012. *Coupling the MGB-IPH hydrological model with MapWindow GIS platform*. MapWindow International Open Source Conference. Velp.
- Muller, I. I.; Kruger, C. M.; Kaviski, E. (1998). Análise de Estacionariedade de Séries Hidrológicas na Bacia Incremental de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos hídricos – RBRH*, vol. 3, n. 4, 51 – 71.
- ONS (2005). Estudos de Consistência e Reconstituição de Séries de Vazões Naturais na Bacia do Paraná: Relatório Final.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. AND TUCCI, C. E. M. 2011. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, v. 406, p. 170-181.
- PAZ, A. R. AND COLLISCHONN, W. 2007. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, v. 343, p. 127-139.
- PAZ, A ; COLLISCHONN, W.; RISSO, A. AND MENDES, C. 2008. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. *Computers & Geosciences*, v. 34, p. 1584-1596, 2008.
- RIBEIRO NETO, A. 2006. *Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira*. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ.
- RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E.O.C.; ROCHA, H. R. AND MALHI, Y. S. 2012. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. *Remote Sensing*, v. 4, p. 703-725.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M. C. 2007. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 31-42, 2007.
- SHUTTLEWORTH, W. J. 1993. Evaporation. In: Maidment, D. R. (Ed.), *Handbook of hydrology*, MCGRAW-Hill, New York.
- TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W.; CLARKE, R. T. AND ALLASIA, D. G. 2007. *Short and long term flow forecasting in Rio Grande watershed*. In: 3rd HEPEX Workshop, Stresa. Book of Abstracts of the 3rd HEPEX Workshop.
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V. AND SOROOSHIAN, S., 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*. 204, 83-97.