



Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v14n12020p131-151

Submetido em: 21 fev. 2020

Aceito em: 09 mar. 2020

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio  <https://orcid.org/0000-0002-3323-5522>

Mestrado em Engenharia de Biosistemas pela Universidade Federal Fluminense (UFF) – Rio de Janeiro/RJ. Professor da Universidade Estácio de Sá (UNESA) Campus Resende, Rio de Janeiro/RJ – Brasil. E-mail: ericksantanaamancio@gmail.com

A bacia do rio Paraíba do Sul é importante para a região metropolitana do Rio de Janeiro e de São Paulo, no que tange ao abastecimento de água, devido aos seus usos múltiplos. O presente estudo tem como objetivo identificar os principais impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia a montante do Reservatório de Funil (BMRF), que contém o reservatório equivalente da bacia do Rio Paraíba do Sul, incumbido do abastecimento de água da região Metropolitana do Rio de Janeiro. Para modelar a bacia, foi utilizado o modelo SMAP Mensal, caracterizado por ser concentrado e conceitual matemático. Os cenários climáticos utilizados foram o RCP 2.6, 4.5 e 8.5 fornecidos pelos modelos MIROC-ESM e GFDL-CM3. Os dados de precipitação projetados serviram para estimar a vazão, e, a partir desses, foram analisadas as médias-móveis de 30 anos para cada cenário e anomalias de vazão entre 2011 e 2100. Observou-se, de forma geral, que as vazões médias tendem a ser menores em todos os cenários a partir da década de 2070.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Projeção de precipitação. Projeção de vazão. IPCC





Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

.....

Flow projection for Paraíba do Sul river basin and water availability study from IPCC scenarios

The Paraíba do Sul river basin is important for the metropolitan region of Rio de Janeiro and São Paulo, in terms of water supply, due to its multiple uses. The present study aims to identify the main impacts of climate change on water availability in the basin upstream of the Funil Reservoir (BMRF), which contains the equivalent reservoir of the Paraíba do Sul River basin, charged with water supply in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro. To model the basin, the Monthly SMAP model was used, characterized by being concentrated and mathematical conceptual. The climatic scenarios used were RCP 2.6, 4.5 and 8.5 provided by both the MIROC-ESM and GFDL-CM3 models. The projected precipitation data served to estimate the flow and from this, the 30-year moving averages for each scenario and flow anomalies between 2011 and 2100 were analyzed. It was observed, in general, that the average flows tend to be lower in all scenarios from the 2070s.

Keywords: Climate changes. Precipitation projection. Flow projection. IPCC.

Proyección de flujo para la cuenca del río Paraíba do Sul y estudio de disponibilidad de agua desde escenarios del IPCC

La cuenca del río Paraíba do Sul es importante para la región metropolitana de Río de Janeiro y São Paulo, en términos de suministro de agua, debido a sus múltiples usos. Este estudio tiene como objetivo identificar los principales impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca aguas arriba del embalse de Funil (BMRF), que contiene el reservorio equivalente de la cuenca del río Paraíba do Sul, a cargo del suministro de agua de la Región Metropolitana de Rio de Janeiro. Para modelar la cuenca, se utilizó el modelo SMAP mensual, caracterizado por ser concentrado y conceptual matemático. Los escenarios climáticos utilizados fueron RCP 2.6, 4.5 y 8.5 proporcionados por los modelos MIROC-ESM y GFDL-CM3. Los datos de precipitación proyectados sirvieron para estimar el flujo y de ellos se analizaron los promedios móviles de 30 años para cada escenario y las anomalías de flujo entre 2011 y 2100. Se observó, en general, que el flujo promedio tiende a ser más pequeño en todos los escenarios desde la década de 2070.

Palabras clave: Cambio climático. Proyección de precipitación. Proyección de flujo. IPCC.



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

1 Introdução

A água é um recurso natural indispensável para o desenvolvimento de qualquer ser vivente, sendo apenas a espécie humana capaz de manejá-la e conseguir outros usos que a natureza não disponibiliza diretamente. A partir da reservação da água, por exemplo, é possível gerar energia elétrica, aduzir água para utilização humana cotidiana, dessedentar animais, irrigar plantações, resfriar máquinas, entre outros usos. Dito isso, é notório que o gerenciamento dos recursos hídricos é estratégico para qualquer comunidade.

Entender quais fatores influenciam a precipitação, reduzindo ou intensificando, é importante para que sejam tomadas decisões para manejar os recursos hídricos de maneira mais eficiente. Nos últimos 30 anos, houve aumento na frequência de chuvas fortes, tanto no verão quanto no inverno nas regiões sul e sudeste brasileiras; nesse período, foram observadas as piores secas dos últimos 80 anos, principalmente entre 2013/2014 e 2014/2015 (MARENGO, 2014).

Quando em destaque apenas a Bacia do rio Paraíba do Sul (BRPS), uma região onde estão inseridos os maiores polos industriais e populacionais brasileiros, observa-se uma região de conflitos. Durante o período de seca, por exemplo, a região metropolitana de São Paulo sofreu com a indisponibilidade hídrica, chegando ao ponto de o governo paulista elaborar um estudo de impacto ambiental (EIA) e um relatório de impacto ambiental (RIMA) para uma obra de interligação entre as represas de Jaguari, pertencente à BRPS, e a represa Atibainha (pertencente à região das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que abastecem o Sistema Cantareira) (GALVÃO; BERMANN, 2015; SABESP, 2015).

O presente estudo tem como objetivo principal identificar os principais impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia a montante do Reservatório de Funil (BMRF), que comporta o reservatório equivalente¹ da BRPS. Para tanto, consideraram-se as projeções de chuva dadas por modelos climáticos globais do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para diferentes taxas de concentração de dióxido de carbono.

2 Material e Método

2.1 Bacia a montante do rio Paraíba do Sul (BMRF)

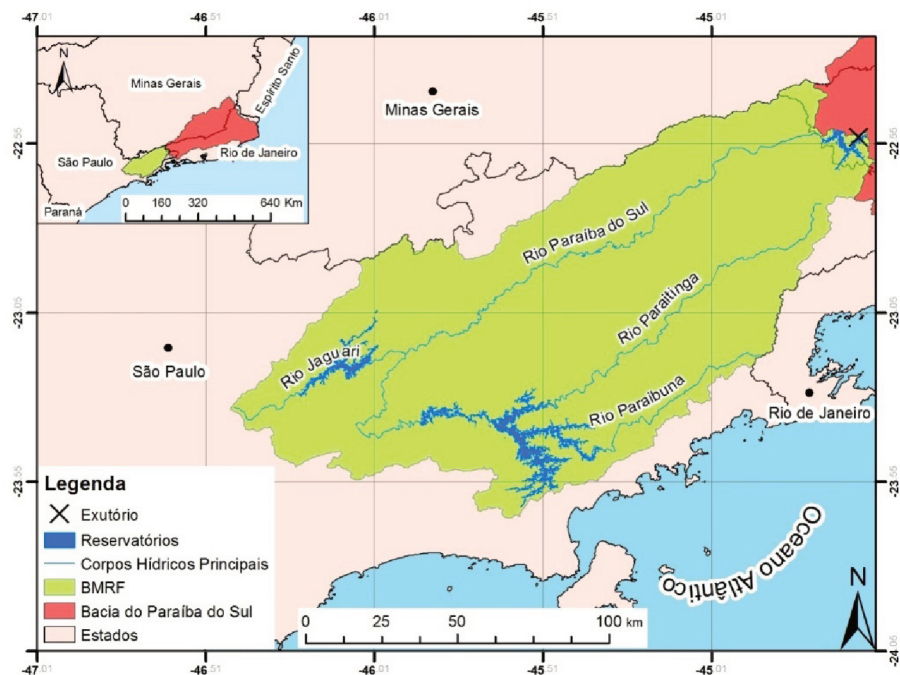
A BMRF abrange uma área de 13.428 km² que representa, aproximadamente, 22% da bacia do rio Paraíba do Sul (BRPS), cujo curso principal, que dá nome à bacia, possui como tributários os rios Paraitinga, Paraibuna e Jaguari. A nascente da BMRF localiza-se em São Paulo, na cidade de Areais, a uma cota de 1.800 m; já seu exutório localiza-se na cidade de Itatiaia, no estado do Rio de Janeiro, sendo que a extensão entre esses dois pontos é de aproximadamente 1.800km. Na Figura 1, podemos observar a BMRF.

¹ Denomina-se como reservatório equivalente a sub-bacia da BRPS que comporta todos os principais barramentos que fornecem água para o rio Paraíba do Sul, que é formado pelas barragens do rio Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil.

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Figura 1 - Bacia a montante do Reservatório de Funil (BMRF)



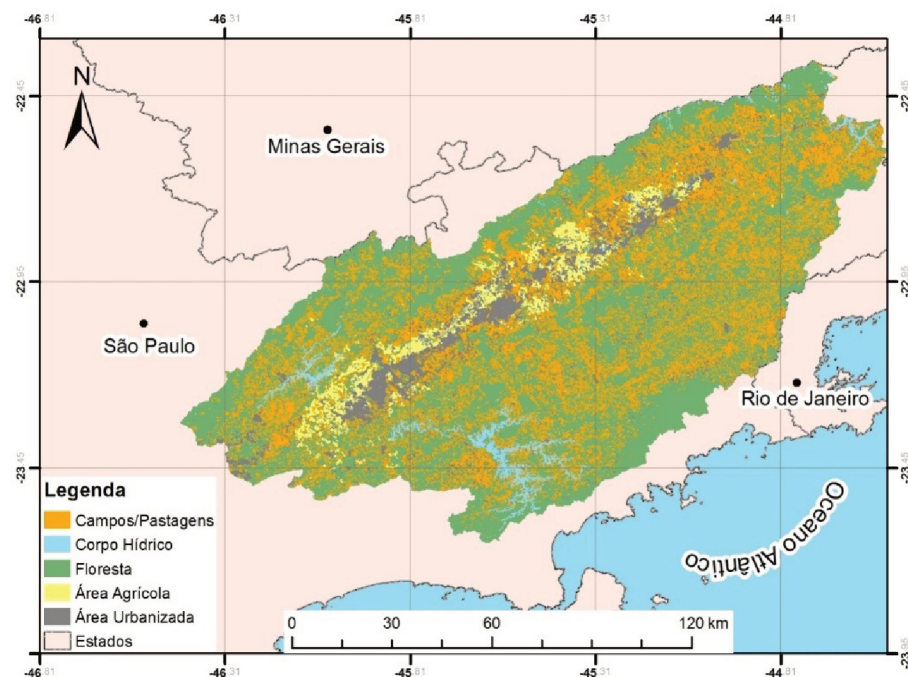
Fonte: Amancio (2018)

O solo da BMRF é composto por três unidades de mapeamento: Latossolo (42%), que possui baixa erodibilidade e baixa capacidade de geração de escoamento; Cambissolo Háplico (29%) e Argissolo vermelho-amarelo (29%), que provê ao solo alto potencial de erosão e alto potencial de escoamento (IBGE, 2001; SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005). No que tange ao uso e ocupação do solo, campos e pastagens ocupam 32% da bacia, florestas 52%, áreas urbanizadas 9%, áreas agrícolas 4% e corpo hídrico 3% (AMANCIO, 2018; CEIVAP, 2014), como se pode observar na Figura 2.

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Figura 2 - Uso e Ocupação do solo da BMRF



Fonte: Amancio (2018)

O período chuvoso na região sudeste do Brasil ocorre durante o verão austral, que inicia no dia 22 de dezembro quando os raios solares incidem perpendicularmente no trópico de Capricórnio (latitude 23,5°S), o que gera um aquecimento na superfície e, segundo Reboita *et al.* (2012), provoca a convecção do ar quente e úmido, que torna o ambiente propício para a condensação e a formação de nuvens.

As maiores médias mensais de precipitação na BMRF ocorrem entre os meses de dezembro e fevereiro. A precipitação acumulada mensal média, nesse período, é de 225,41mm, enquanto na temporada mais seca, entre os meses de maio a agosto, a precipitação acumulada mensal média é de 48,91mm². As maiores médias de precipitação anual ocorrem nas serras do Mar e Mantiqueira, alcançando, aproximadamente 2.000 mm/ano (CPRM, 2003).

2.2 Dados climatológicos

Os dados de chuva são da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), HidroWeb (www.hidroweb.com.br), em que foi possível observar 141 informações de postos pluviométricos que estavam dentro da bacia ou muito próximos das bordas da bacia, sendo essa uma forma de incluir eventuais postos que tenham ficado fora dessa delimitação e podem ser representativos para o cálculo da precipitação média. A série histórica de dados foi composta tanto por dados consistidos³ pela ANA quanto por dados brutos. Por isso, foram necessárias análises de correlação a partir da regressão linear múltipla, para o preenchimento de falhas, e análise de consistência segundo o método das curvas de dupla-massa, que serviu para verificar a representatividade dos dados observados.

² A chuva média mensal foi calculada partir da série histórica pluviométrica entre os anos de 1982 e 1995 de postos pluviométricos consistidos da ANA inseridos na BMRF, cujos códigos são: 2244048, 2245048, 2245032, 2245007, 2345067, 2345065, 2344009, 2345063, 2345062 e 2245055.

³ No banco de dados HidroWeb da ANA é possível encontrar séries de dados brutos, que são aqueles obtidos a partir de pluviômetros e que não passaram por nenhum tratamento. Já os dados consistidos são aqueles que foram comparados a outras séries pluviométricas de postos próximos e compõem uma série representativa para uma determinada área da bacia hidrográfica.



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Para o preenchimento de falhas e lacunas vazias em séries históricas de precipitação, Bertoni e Tucci (2002), Oliveira *et al.* (2010) e ANA (BRASIL, 2011) recomendaram os seguintes métodos: ponderação regional, regressão linear múltipla, regressão linear com ponderação regional, potencial e vetor regional. Para este estudo, foi utilizado método de regressão linear múltipla (RLM), pois, comprovando a linearidade das séries e assumindo a hipótese de normalidade e homoscedasticidade (mesma dispersão ou variância de dados), é possível estimar coeficientes para uma equação linear que forneçam estimativas de chuva centradas na menor variância possível (FARIA, 2011; NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Para distribuição espacial dos dados de chuva foi utilizado o Método do Polígono de Thiessen, ou do vizinho mais próximo (Equação 1), que está baseado na hipótese de que qualquer chuva que atinja uma área qualquer da bacia é exatamente igual àquela que atinge o pluviômetro mais próximo, ou seja, pelo critério de menor distância é definida a área de influência de cada posto, e a precipitação é calculada a partir da média ponderada de chuva das áreas de influência (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015, p. 62). Segundo Linsley *et al.* (1958), a principal limitação desse método é que ele não considera a variação topográfica para delimitar a área de influência de um posto. O Método dos Polígonos de Thiessen é indicado para regiões planas onde as feições geográficas não proporcionam variações atípicas de chuva às médias ponderadas obtidas pelo método (DI BELLO, 2005).

$$P_m(t) = \frac{\sum_{i=1}^S A_i P_i(t)}{A_d} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde P_m é a precipitação média ponderada dos Polígonos de Thiessen; P_i é o posto pluviométrico $i=1,2,3...S$; A_i é a área de influência do posto P_i ; A_d é a área total da bacia pluviométrica e t refere-se ao tempo de medição.

As precipitações médias também podem ser analisadas a partir das isoietas, que são isolinhas de precipitação que podem ser traçadas para um evento específico ou para uma duração específica, tendo como produto final o Mapa de Isoietas (BERTONI; TUCCI, 2002; LINSLEY JR.; KOHLER; PAULHUS, 1958). Além de ser possível extrair precipitação média ponderada de uma bacia, a partir de informações contidas no mapa de isoietas é possível discutir a influência orográfica na precipitação.

A partir das isoietas disponíveis no website da CPRM (2006), da distribuição de cotas e postos pluviométricos da BMRF, foi possível observar se a precipitação média de chuva pelo método dos polígonos de Thiessen se aproximava das médias calculadas pelas isoietas; se este fato for confirmado, então o cálculo das médias ponderadas dos métodos é semelhante para a BMRF.

Esse caminho para obtenção da precipitação média ponderada foi tomado devido à indisponibilidade dos postos pluviométricos utilizados para obtenção das isoietas; dessa forma, optou-se por utilizar o método dos polígonos de Thiessen e posteriormente realizar a verificação, comparando os dados encontrados com as médias das isoietas da CPRM (2006).

Os dados de evapotranspiração potencial foram estimados a partir do SisEvapo, Sistema de avaliação da evapotranspiração líquida dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (EVAPORAÇÕES, 2004). Tais dados estão disponíveis no *website* do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no qual foi possível obter doze dados de evapotranspiração potencial que representam a média histórica para cada mês do ano.

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

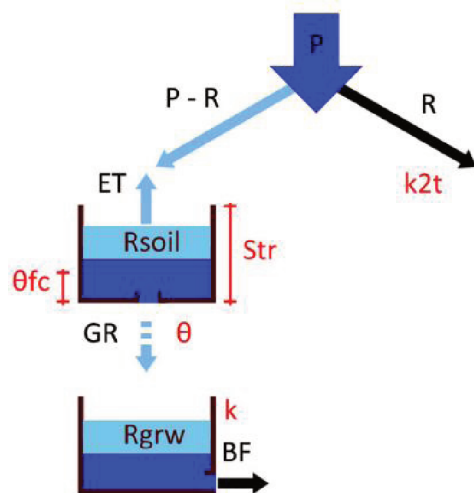
A série histórica de vazão natural entre janeiro de 1930 e dezembro de 2015 também foi fornecida pelo ONS (Operador do Sistema Nacional). Para obter esse dado, o ONS estimou os usos consuntivos da água⁴ e também a evapotranspiração dos lagos formados por barramentos, sendo esses últimos as perdas a montante de um ponto onde foi medida a vazão (ESTUDOS... , 2008). Dessa forma, tem-se a vazão natural, que é aquela que ocorreria caso não houvesse interferência humana. Essa informação é necessária para estimar a disponibilidade de água a partir da precipitação.

2.3 Modelo SMAP mensal

O modelo SMAP Mensal é uma adaptação do modelo clássico realizada por Bou, Sá e Cataldi (2015), que ajustou um modelo que até então era conceitual determinístico para outro em que os parâmetros físicos da bacia são ajustados a partir de calibração semiautomática, ou seja, o modelo SMAP mensal tornou-se conceitual matemático. Para tanto, utiliza-se uma aplicação de otimização, *Solver*, do *software* Excel, utilizando o método GRG não linear, que estima os valores dos parâmetros físicos da bacia e distribuição temporal, todos esses a partir de uma estimativa inicial com base em modelos SMAP para bacias próximas e das características de tipo, uso e ocupação do solo da BMRF.

No modelo mensal, é possível simular o armazenamento da chuva em dois reservatórios matemáticos conceituais lineares denominados como R_{soil} , que representa o solo e não é saturado, e R_{grw} , que contém a água do subsolo e é saturado, como pode ser observado na figura 3. Pela comunicação entre esses dois reservatórios é possível transferir as funções de balanço de massa e calcular a vazão disponível na calha do rio em cada mês (BOU; SÁ; CATALDI, 2015; DI BELLO, 2005).

Figura 3 – Representação esquemática do modelo chuva-vazão SMAP mensal



Fonte: Bou, Sá e Cataldi (2015)

Onde: "P" representa a chuva; "ET" a evapotranspiração total; "R" é o escoamento superficial, a parte que não infiltra no solo; "Str" é a capacidade de saturação do solo, ou seja, a capacidade total de armazenamento de água no solo; " k_{2t} " representa a permeabilidade do solo; " θ_{fc} " representa a umidade do solo; "k" é o coeficiente de recarga do reservatório subsuperficial (R_{grw}); "BF" é o escoamento de base, que representa o escoamento subsuperficial da bacia; R_{soil} é o reservatório do solo, que não é saturado, diferentemente do R_{grw} , que representa o subsolo e é saturado.

⁴ Os usos da água podem ser divididos em consuntivo e não consuntivo. Quando se retira água de qualquer corpo hídrico para abastecimento humano, dessedentação animal, agricultura, entre outros, define-se esse uso como consuntivo. Porém, caso o uso da água seja para fins recreativos, pesca, criadouros de animais aquáticos, ou qualquer uso em que não se retire água do manancial, denomina-se esse uso como não consuntivo.

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

A sequência lógica do modelo inicia-se pelo cálculo da chuva acumulada média ponderada a partir da Equação 1, que é atualizada para cada mês.

$$P(t) = \sum_{m=-1}^0 m_i \cdot (\sum_{i=1}^S P_i(t) \cdot w_i) \quad (\text{Equação 2})$$

A Equação 2 é uma adaptação da equação dos Polígonos de Thiessen (Equação 1) que realiza a distribuição espacial dos postos pluviométricos, sendo assim possível calcular a chuva média em função da representatividade dos postos para a bacia. Ainda abordando a equação, t corresponde ao mês em que se observa a precipitação acumulada mensal; P_i , $i = 1, 2, 3 \dots S$, corresponde à precipitação acumulada no mês t em cada posto i , e esse valor é dado em mm/mês; S é quantidade total de postos considerados no estudo; w_i é o coeficiente de ponderação especial de Thiessen para cada posto P_i . O que diferencia a Equação 1 da Equação 2 é o coeficiente m_i , que pondera a chuva que ocorre no mês t . Para essa bacia, foi determinado que as chuvas que ocorrem no mês t seriam representadas, em parte, pelas chuvas que ocorreram no mês $(t-1)$, ou seja, no mês anterior ao mês corrente.

O escoamento superficial E_s foi calculado pela Equação 3:

$$R(t) = P(t) \cdot \theta_{fc}(t)^{k_{zt}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde θ_{fc} representa a umidade do solo, que foi calculada pela Equação 4, indica a relação entre a quantidade de água no tempo t e o limite de saturação para aquele determinado tipo de solo (Str). O θ_{fc} é dado em forma percentual, que pode variar entre 0 e 100%; 0% representa um solo completamente seco e 100% representa um solo saturado. k_{zt} é coeficiente de escoamento superficial (*runoff*), que é adimensional, que representa o quanto de chuva não infiltra; tal coeficiente é estimado e deve representar o solo da bacia e por otimização na planilha SMAP Mensal. Por fim, “R” é o escoamento superficial, que é dado em mm/mês.

$$\theta_{fc}(t) = \frac{R_{solo}}{Str} \quad (\text{Equação 4})$$

A Equação 4 representa a umidade no solo. R_{solo} representa a quantidade de água que há no solo no momento t (Equação 8).

A quantidade de água na superfície pode sofrer perdas tanto por infiltração (Gr) quanto por evapotranspiração real (ET), calculadas pelas Equações 5 e 6:

$$ET(t) = \theta_{fc}(t) \cdot Ep \cdot ecof \quad (\text{Equação 5})$$

$$Gr(t) = Crec \cdot \theta_{fc}(t)^4 \cdot R_{Solo}(t) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde ET é a evapotranspiração potencial acumulada mensal média para a bacia em questão, dada em mm/mês; $ecof$ é o coeficiente de correção para a evapotranspiração potencial que é adimensional e calculado por otimização na planilha SMAP Mensal; e $Crec$ é o coeficiente de recarga do reservatório subsolo que também é adimensional. Er e Rec são dados em mm/mês.

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Parte da quantidade de água que infiltra para o reservatório R_{grw} é confinada nele próprio, e a outra parte se torna escoamento de base (BF), que é calculado pela Equação 7:

$$BF(t) = R_{Sub} \cdot (1 - K) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde K é a constante de recessão do escoamento, cuja unidade de medida é mês⁻¹, enquanto BF é dado em mm/mês.

As quantidades de água nos reservatórios matemáticos são definidas pelas Equações 8 e 9:

$$R_{Soil}(t) = R_{Soil}(t-1) + P(t) - (R(t) + ET(t) + Gr(t)) \quad (\text{Equação 8})$$

$$R_{grw}(t) = R_{grw}(t-1) + Gr(t) - Gr(t) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde R_{Soil} e R_{grw} são os reservatórios do solo e reservatórios do subsolo, respectivamente, e suas unidades de medida são mm/mês.

Os níveis iniciais dos modelos, ou seja, para $t=1$, são definidos pelas Equações 10 e 11:

$$R_{Soil}(1) = \theta_{fc_0} \cdot Str \quad (\text{Equação 10})$$

$$R_{grw}(1) = \frac{BF_0 \cdot AJ}{(1-K) \cdot Ad} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde θ_{fc_0} é a umidade inicial do solo; BF_0 é o escoamento base inicial; AJ é o coeficiente de ajuste de unidade responsável por transformar mm/mês em m³/s, cujo valor é 2.629,80; e A_d é a área de drenagem da bacia hidrográfica, cuja unidade de medida é km².

Por fim, é definida a vazão pela soma do escoamento superficial e o escoamento de base por meio da Equação 12:

$$Q(t) = \frac{(R(t) + BF(t)) \cdot A_d}{AJ} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde Q é a vazão gerada pelo modelo dada em m³/s.

Os parâmetros A_p , AJ , Tu_0 e Eb_0 serão determinados *a priori*, ou seja, não estarão sujeitos a calibração semiautomática, diferentemente dos parâmetros K , K_{2t} , Str e $Crec$, sendo essa etapa chamada de análise de sensibilidade.

A faixa de variação dos parâmetros calibráveis foi obtida por Lopes (1999) a partir da aplicação desse modelo para várias bacias hidrográficas brasileiras, como podemos observar na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros calibráveis do modelo SMAP

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Str	100	2.000
K_{2t}	0.2	10
Crec	0	70
K_k	1	6

Fonte: Adaptado de Lopes (1999)

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

O modelo SMAP não gera resultados para os três primeiros meses da série, pois ele os utiliza para inicializar as variáveis; dessa forma, as previsões de vazão iniciam-se no quarto mês em vez de no primeiro (BOU; SÁ; CATALDI, 2015; DI BELLO, 2005).

2.4 Métricas de avaliação, calibração e validação do modelo SMAP mensal

Após a inserção dos dados de entrada no modelo SMAP Mensal, é necessário verificar a qualidade de projeção de vazão por meio de métricas de performances tanto na etapa de calibração, cujo objetivo é determinar os parâmetros físicos mais representativos para uma determinada bacia, quanto na etapa de validação, que verifica se tais parâmetros projetam dados de vazão natural que continuam próximos aos fornecidos pelo ONS. Para tanto, foram utilizados os coeficientes Nash-Log e MAPE.

O coeficiente Nash-Log (equação 13) aplica logaritmos no coeficiente de Nash-Sutcliffe, tornando-o mais sensível às vazões mais baixas, ou seja, essa métrica é menos sensível a cheias (GUILHON; ROCHA; MOREIRA, 2007).

$$NASHLOG = \frac{\sum_{t=3}^t [\ln(Q_{ONS}(t)) - \ln(\tilde{Q}_{ONS}(t))]^2}{\sum_{t=3}^t [\ln(Q(t)) - \ln(Q_{ONS}(t))]^2} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde Q_{ONS} é a vazão média natural mensal dos dados fornecidos pelo ONS; \tilde{Q}_{ONS} é a vazão média de longo termo (média de toda série histórica); e Q é a vazão calculada pelo modelo SMAP.

Já o MAPE calcula o erro médio absoluto entre os pontos medidos e estimados a partir da equação 14.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=3}^t \frac{Q_{ONS}(t) - Q(t)}{Q_{ONS}(t)} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde n é a quantidade de meses que compõem a série de vazão considerada para gerar as vazões calculadas. MAPE representa o quanto as vazões calculadas se distanciam da vazão natural; sua eficiência aumenta quanto mais próximo esse índice estiver de zero (BOU; SÁ; CATALDI, 2015). Por fim, calcula-se o coeficiente de eficiência global, a partir da equação 15, cujo melhor valor é 2.

$$CEG = NASHLOG + 1 - MAPE \quad (\text{Equação 15})$$

2.5 Modelos de projeção climáticas do IPCC e projeção dos dados de vazão

Foram analisados os resultados dos modelos GFDL CM3 e MIROC-ESM para os cenários RCP 2.6, 4.5 e 8.5 do IPCC. Tais cenários foram gerados a partir de panoramas socioeconômicos, dos quais foram obtidos as possíveis projeções de emissão de gases do efeito estufa e aerossóis na atmosfera, sendo assim possível avaliar os efeitos dessas emissões no sistema climático para diferentes características populacionais e ambientais (IPCC, 2018).



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Os modelos globais subdividem quase todo o globo em malhas, onde cada quadrícula é responsável por conter os dados climáticos que representam a região. A BMRF está inserida parcialmente ou totalmente nas quadrículas dos modelos supracitados; sendo assim, a chuva apresentada pelo modelo é relativa não só à sub-bacia, mas também à região de entorno. Para que os dados sejam mais representativos, fez-se uso do coeficiente de correção de médias, como se pode observar na equação 16.

$$C_m = 1 + \frac{P_{pond} - P_{proj}}{P_{proj}} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde P_{pond} é o somatório de precipitação média mensal da ANA trabalhada no modelo SMAP distribuída temporal e espacialmente relativa a todos os meses “m” do ano; P_{proj} é o somatório de precipitação mensal projetada pelo modelo climático, sob as mesmas condições de distribuição dos dados pluviométricos supracitados também relativas ao mês “m”; e C_m é o coeficiente de correção de médias do mês “m”. A partir das projeções de vazão, foi possível gerar médias-móveis de 30 anos e avaliar as anomalias de vazão para todos os cenários entre 2011 e 2100.

3 Resultados e discussão

3.1 Análise da série histórica de precipitação

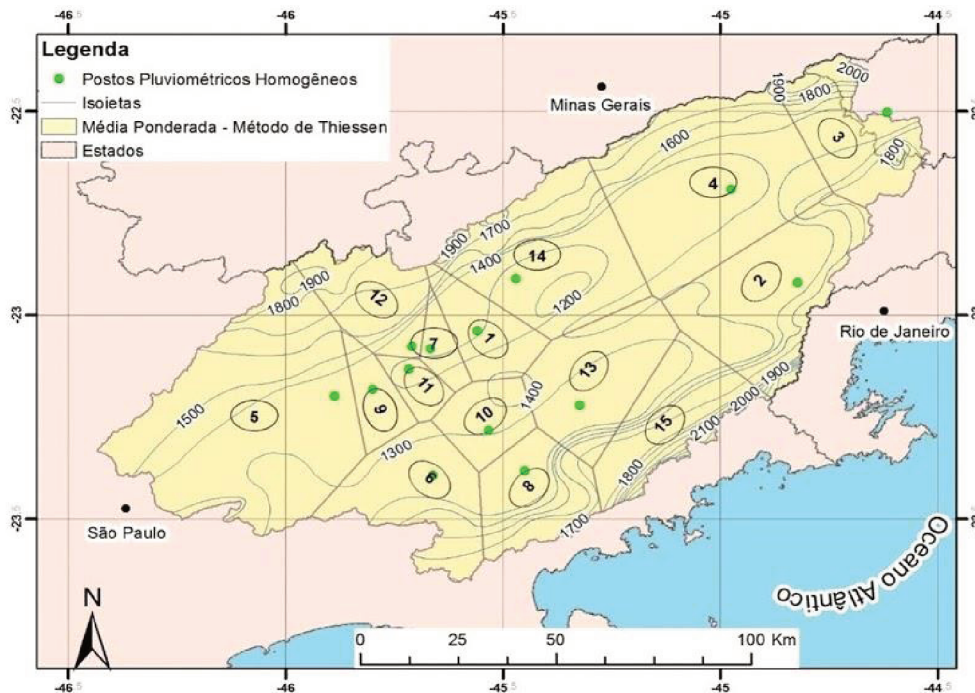
Dos 141 postos pluviométricos analisados, apenas 37 apresentaram dados suficientes para que fosse possível a análise de regressão linear múltipla (RLM) e consistência; o intervalo máximo obtido foi entre 1982 e 2002. Desses, apenas quinze (15) foram considerados representativos para gerar a precipitação média da BMRF.

Na análise estatística da RLM, apenas um posto não apresentou colinearidade com pelo menos três postos pluviométricos; este localiza-se próximo à Serra do Mar, região onde se têm as maiores médias pluviométricas anuais da bacia. Quanto à análise de consistência pelo método da Dupla-Massa, verificou-se que os postos próximos à Serra do Mar foram considerados não homogêneos, com exceção do posto Ponte Alta (Código ANA: 2345067), o que corrobora para a hipótese da influência orográfica na BMRF. Dessa forma, a maioria dos postos analisados não estão inseridos nas regiões de cotas mais altas da sub-bacia, justificando o uso do método de Thiessen para calcular a representatividade de cada posto pluviométrico (Figura 4).

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Figura 4 - Postos pluviométricos consistidos e a área de representatividade pluviométrica na bacia



Fonte: Amancio (2018)

É possível observar que as médias anuais dos postos são próximas das médias anuais calculadas pelo método das isoietas pelo IBGE

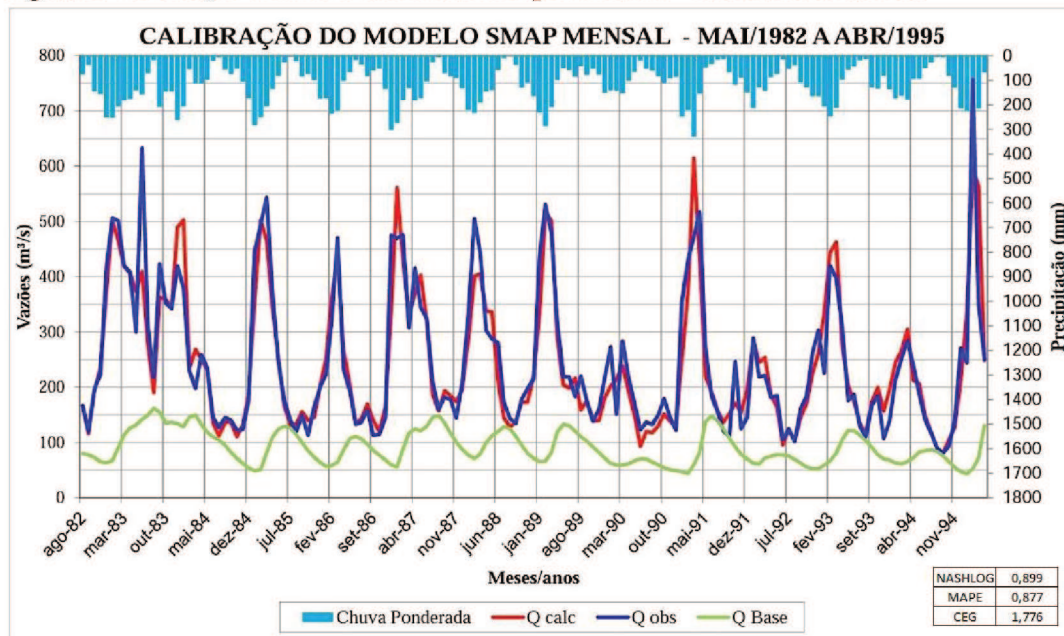
3.2 Calibração e validação do modelo SMAP Mensal

Na Figura 5, podem-se observar os resultados de calibração; essa etapa representou dois terços da série histórica de precipitação, período entre maio de 1982 e abril de 1995. Para a validação, Figura 6, do modelo, destinou-se o último terço restante, intervalo entre maio de 1995 e dezembro de 2002. Os coeficientes de eficiência global (CEG) de calibração e validação foram, respectivamente, 1,776 e 1,756, sendo considerados satisfatórios para a BMRF, pois, mesmo utilizando como dados de entrada dados estáticos de evapotranspiração potencial e a quantidade diminuta de postos pluviométricos, as projeções não se distanciaram demasiadamente dos dados observados. Inclusive, pode-se observar, ainda nas Figuras 5 e 6, que o modelo tende a acertar todos os períodos de seca e cheia, se aproximando tanto dos valores máximos quanto mínimos.

Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

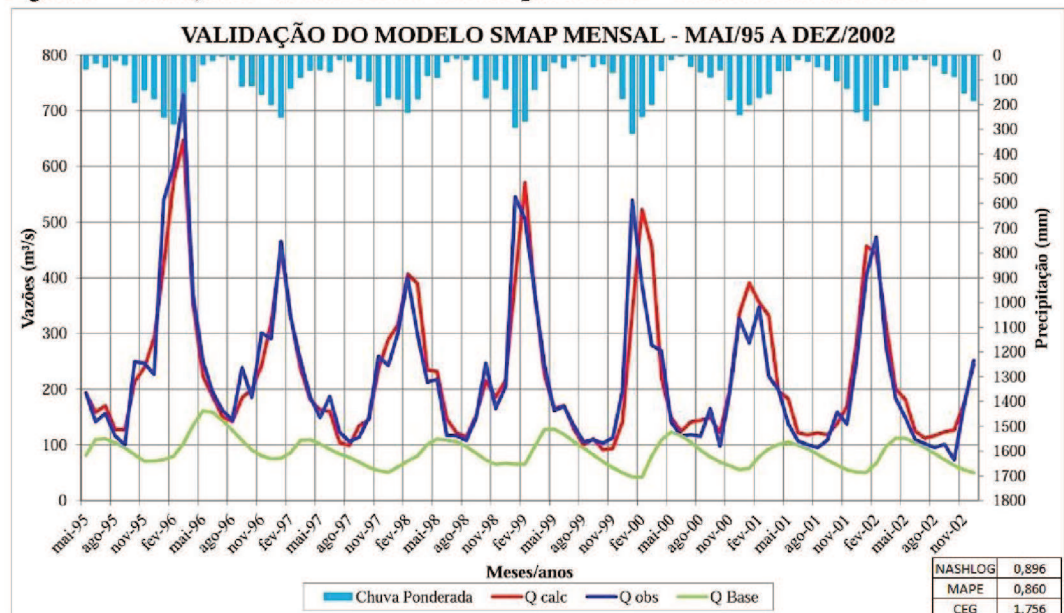
Erick Santana Amancio

Figura 5 - Calibração do modelo SMAP Mensal para BMRF - mai/1982 a abr/1995



Fonte: Amancio (2018)

Figura 6 - Validação do modelo SMAP Mensal para BMRF - mai/1995 a dez/2002



Fonte: Amancio (2018)



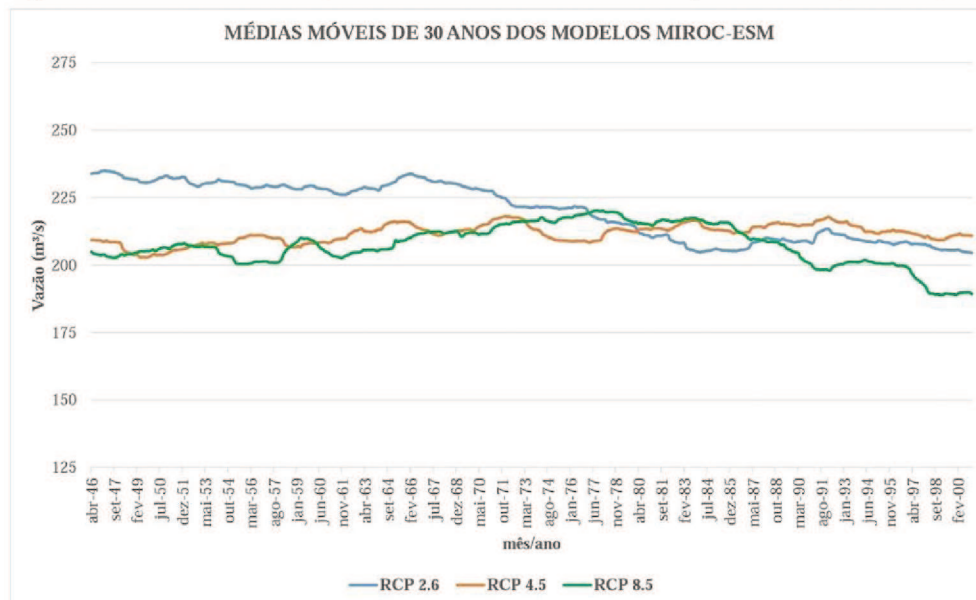
Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

3.3 Projeção dos dados de vazão

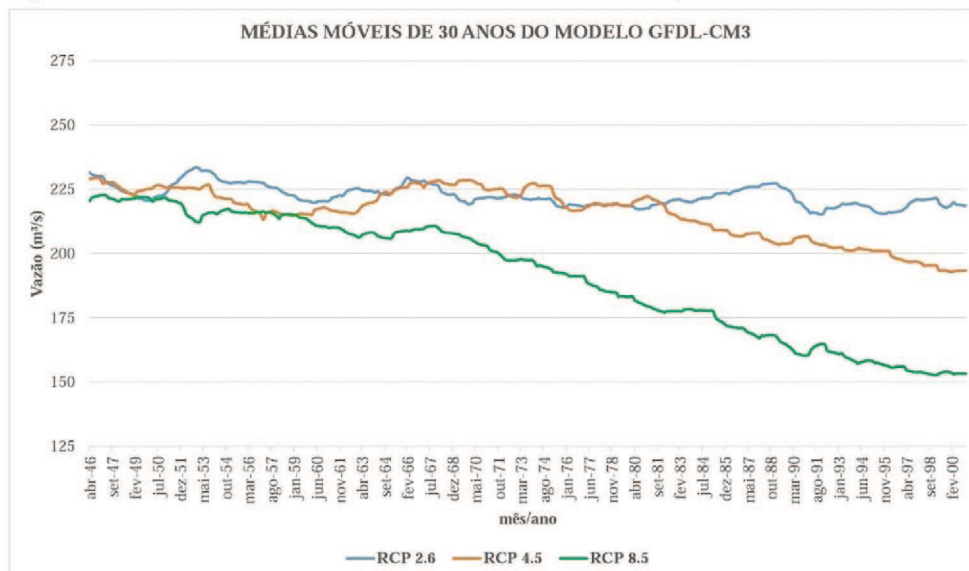
Corrigidas as precipitações médias dos modelos MIROC-ESM e GFDL CM3, foram inseridas no modelo SMAP e em seguida foram projetadas as vazões entre os anos de 2006 e 2100 para o RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, sendo assim possível elaborar as médias móveis de 30 anos para ambos os modelos (Figura 7 e Figura 8).

Figura 7 - Médias móveis de 30 anos do modelo MIROC-ESM para RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5



Fonte: Amancio (2018)

Figura 8 - Médias móveis de 30 anos do modelo GFDL-CM3 para RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5



Fonte: Amancio (2018)



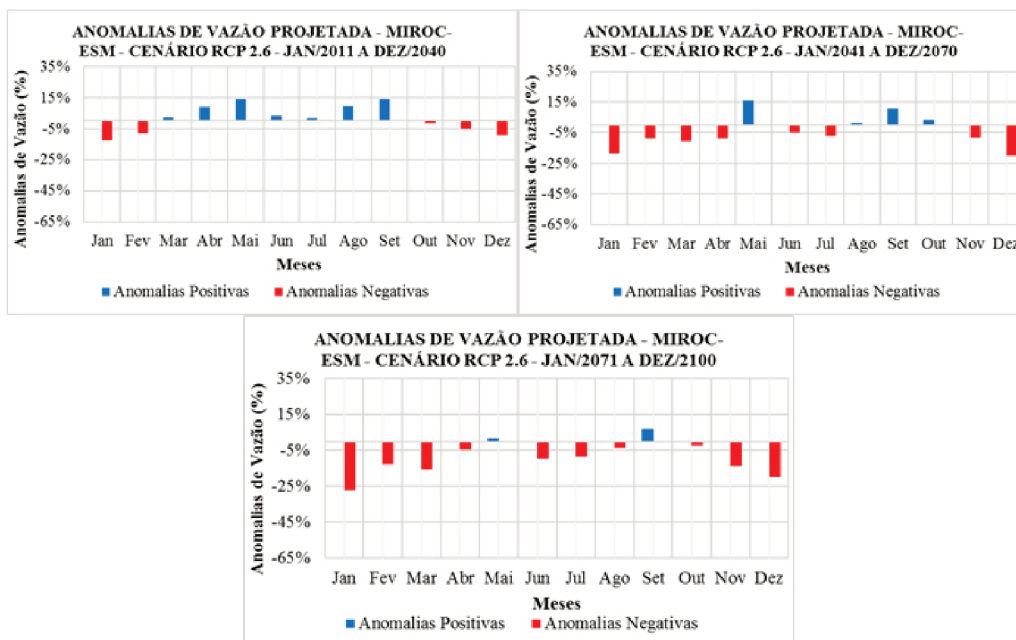
Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Ambos os modelos, MIROC-ESM e GFDL-CM3, apresentam queda a partir da década de 2070, e os cenários RCP 8.5 são os mais secos, porém não há unanimidade para o cenário menos seco. No modelo MIROC-ESM, o cenário que apresenta menor perda de vazão é o RCP 4.5, enquanto para o modelo GFDL-CM3 foi o RCP 2.6.

Para auxiliar a análise dos dados de projeção de vazão, foram analisadas as anomalias de vazão entre 2011 e 2100; tais dados foram obtidos a partir das séries de vazão projetadas para BMRF (Figuras 9 a 14).

Figura 9 – Anomalias das vazões médias mensais projetadas no SMAP Mensal a partir do modelo MIROC-ESM – RCP 2.6 para os períodos jan/2011-dez/2040, jan/2041-dez/2070 e jan/2071-dez/2100.



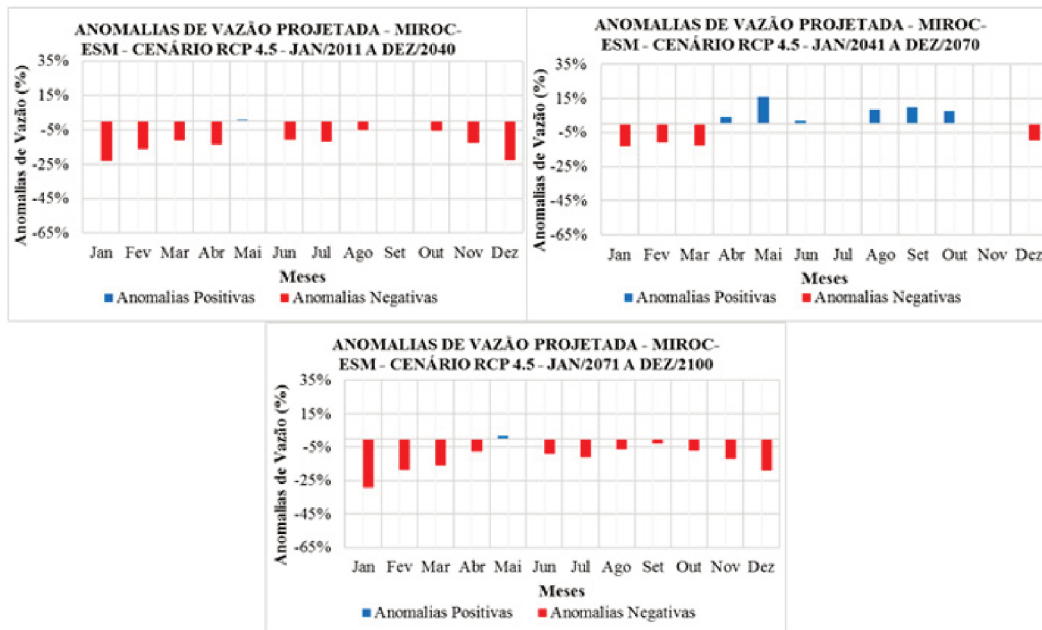
Fonte: Amancio (2018)



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

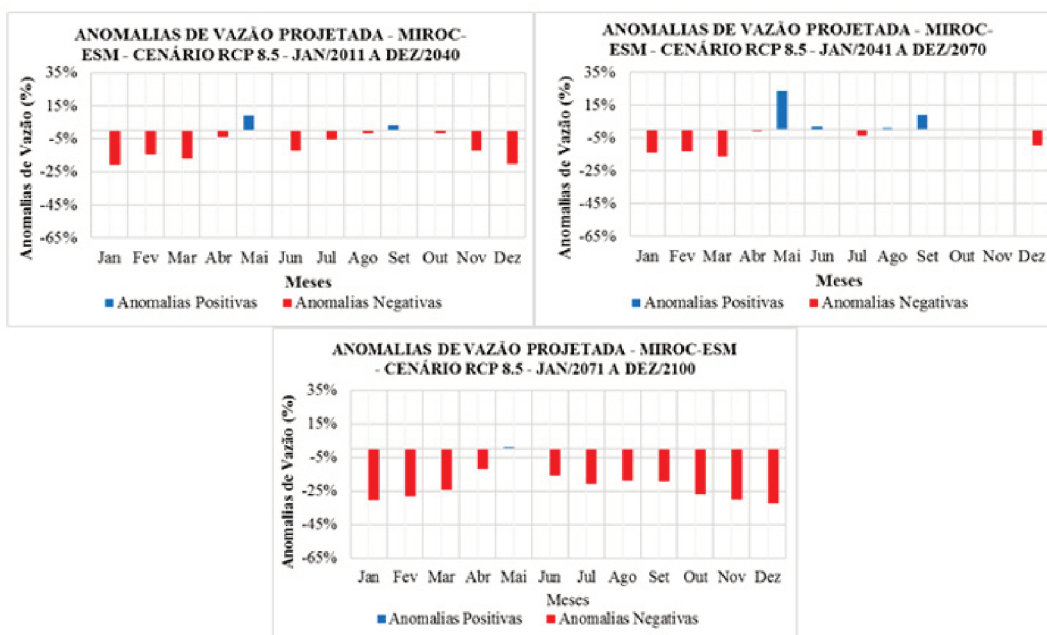
Erick Santana Amancio

Figura 10 – Anomalias das vazões médias mensais projetadas no SMAP Mensal a partir do modelo MIROC-ESM – RCP 4.5 – jan/2011-dez/2040, jan/2041-dez/2070 e jan/2071-dez/2100



Fonte: Amancio (2018)

Figura 11 – Anomalias das vazões médias mensais projetadas no SMAP Mensal a partir do modelo MIROC-ESM – RCP 8.5 – jan/2011-dez/2040, jan/2041-dez/2070 e jan/2071-dez/2100.



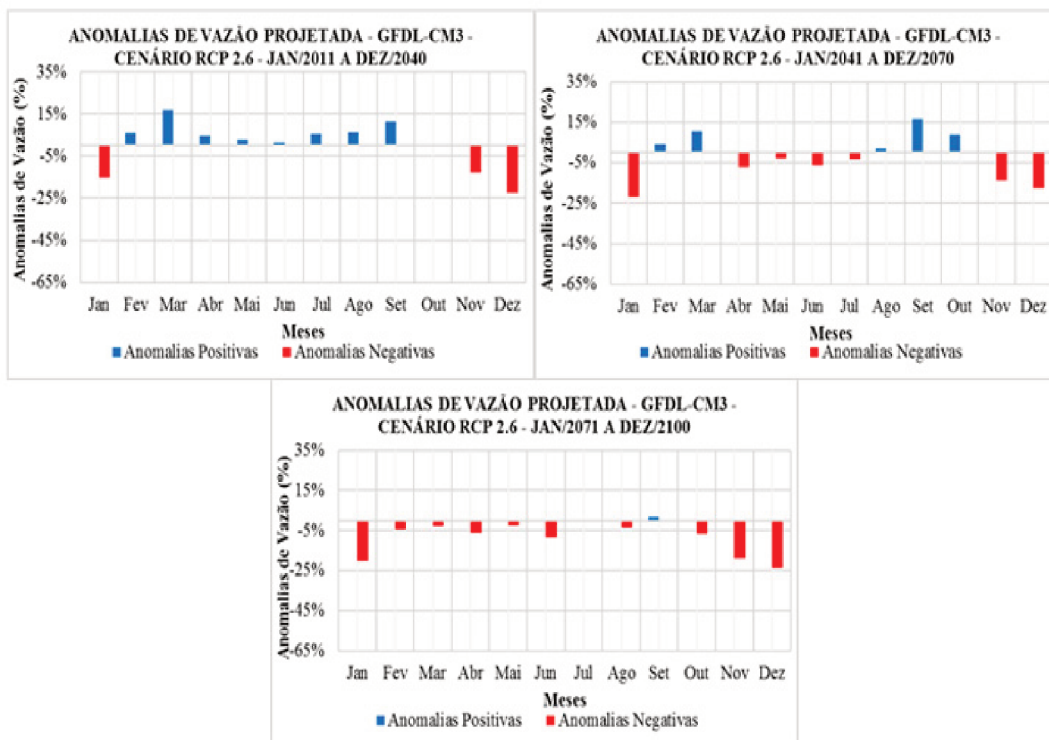
Fonte: Amancio (2018)



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

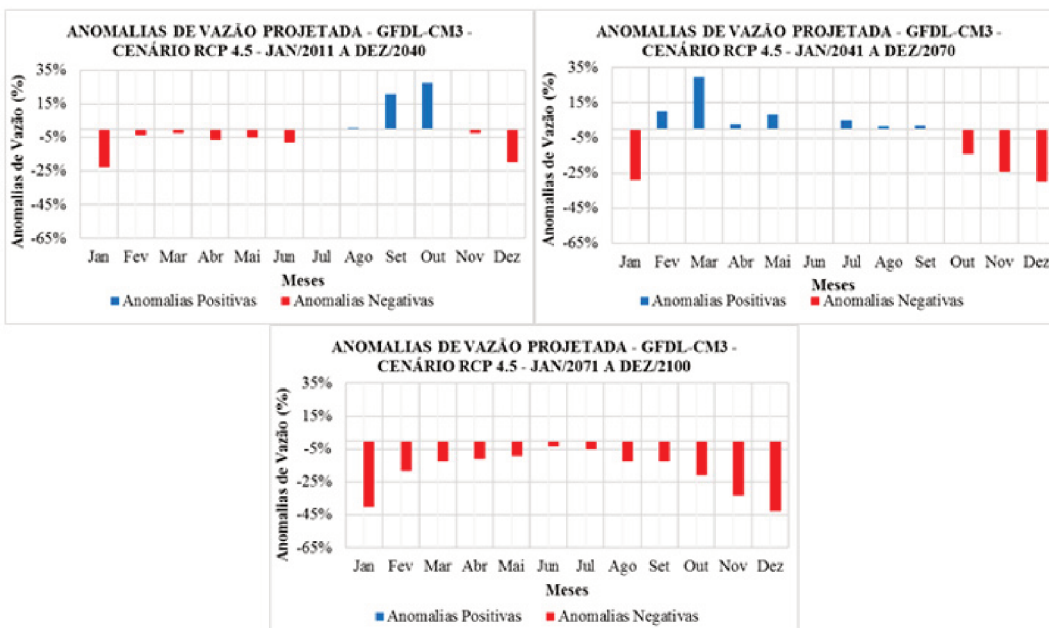
Erick Santana Amancio

Figura 12 – Anomalias das vazões médias mensais projetadas no SMAP Mensal a partir do modelo GFDL-CM3 – Cenário RCP 2.6– jan/2011-dez/2040, jan/2041-dez/2070 e jan/2071-dez/2100.



Fonte: Amancio (2018)

Figura 13 – Anomalias das vazões médias mensais projetadas no SMAP Mensal a partir do modelo GFDL-CM3 – RCP 4.5– jan/2011-dez/2040, jan/2041-dez/2070 e jan/2071-dez/2100.



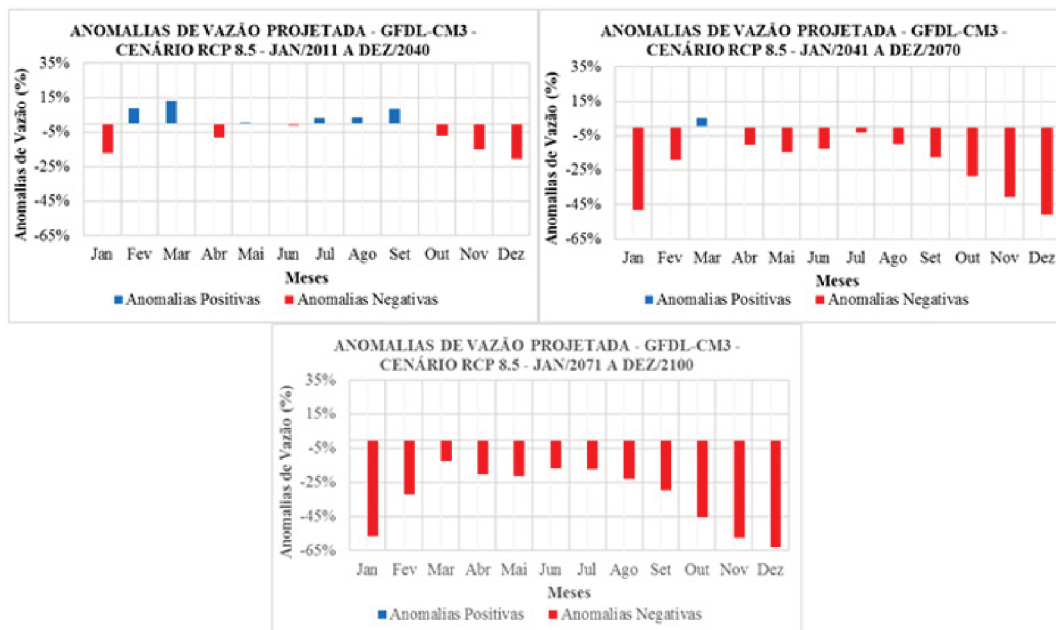
Fonte: Amancio (2018)



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Figura 14 – Anomalias das vazões médias mensais projetadas no SMAP Mensal a partir do modelo GFDL-CM3 – RCP 8.5– jan/2011-dez/2040, jan/2041-dez/2070 e jan/2071-dez/2100.



Fonte: Amancio (2018)

As projeções de vazão obtidas a partir do modelo MIROC-ESM (Figuras 9 a 11) geram anomalias negativas para todos os cenários, mesmo entre os meses de dezembro e fevereiro, que são os períodos mais chuvosos desta bacia. Assim como foi observado nas médias-móveis, o cenário RCP 8.5 (Figura 11) é o mais seco e, para todos, a partir do último período tri-decadal (2071 a 2100), observam-se apenas anomalias negativas.

Diante do modelo GFDL-CM3 (Figuras 12 a 14), faz-se uma observação análoga à relativa ao modelo supracitado. No momento em que se esperam as maiores médias de vazão para a BMFR, durante o verão austral, observaram-se as maiores reduções das médias pluviométricas. O cenário GFDL-CM3 RCP 8.5 (Figura 14) também é aquele que apresenta maiores anomalias negativas, e, a partir da década de 2070, todas anomalias são negativas.

4 Considerações finais

O estudo apresentado teve como objetivo identificar os impactos das mudanças climáticas a partir dos cenários RCP 2.6, 4.5 e 8.5 do IPCC, para vazões a montante do Reservatório de Funil, localizado na bacia do Rio Paraíba do Sul, a fim de discutir como esses cenários impactam a disponibilidade hídrica da região.

Para alcançar esse objetivo, buscou-se: calibrar e validar o modelo concentrado de chuva-vazão SMAP de discretização mensal para a Bacia a montante do Reservatório de Funil (BMRF) que engloba todo o Reservatório Equivalente do Rio Paraíba do Sul e, por fim, utilizar o modelo SMAP Mensal para projetar cenários futuros de vazão a partir da precipitação dos cenários do IPCC, para que fosse possível a discussão sobre a disponibilidade hídrica nesse ponto de interesse.



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

.....

A partir dos dados gerados pelo modelo MIROC-ESM, observou-se que o cenário mais e menos seco serão, respectivamente, RCP 8.5 e RCP 4.5. Notou-se que, em média, o escoamento durante o verão austral tende a ser mais baixo com o avançar do tempo para todas as projeções. Nesse intervalo, seriam esperadas as vazões que recarregariam os níveis subsuperficiais de água, que sustentam o escoamento superficial (rio Paraíba do Sul) nos períodos mais secos.

Assim como no modelo MIROC-ESM, o cenário mais seco gerado a partir de precipitação do GFDL-ESM foi o RCP 8.5. Neste cenário houve intervalos entre 2011-2040 e 2041-2070 com anomalias positivas. Para esse mesmo cenário, as anomalias negativas foram as maiores em módulo, sendo inferiores a - 60% entre novembro e janeiro no período 2071-2100.

De forma geral, verificou-se que houve tendência de diminuição de vazão, sendo esta verificada de forma unânime e mais consistente a partir da década de 2070. Salienta-se que houve concordância entre as anomalias de vazão nesse mesmo período para todos os cenários. Dessa forma, pode-se inferir que possíveis diminuições das vazões na bacia do rio Paraíba do Sul, de forma sistemática, devem ocorrer somente após um grande acúmulo de gases do efeito estufa na atmosfera.

Sendo assim, não é possível afirmar que as atuais crises hídricas observadas nessa bacia entre os anos de 2013/2014 e 2014/2015 sejam reflexos diretos de uma condição de mudança climática, pois, de acordo com os resultados deste estudo, somente a partir da década de 2070 a BMRF seria afetada de forma sistemática e considerável por esse tipo de alteração climática.

Este estudo serve como alerta em relação às atuais emissões de gases do efeito estufa, que podem levar o estado do Rio de Janeiro a um verdadeiro caos no que diz respeito ao abastecimento de água daqui a 50 anos, caso nenhuma alteração drástica nesses padrões de emissão de gases do efeito estufa seja realizada, não só no Brasil, mas em todo o globo.

No entanto, salienta-se que este estudo possui limitações metodológicas, e os padrões observados devem ser vislumbrados apenas como hipóteses para o futuro de disponibilidade hídrica da bacia. Essas restrições estão vinculadas à quantidade e à qualidade de postos pluviométricos locais, por exemplo. Antes de calibrar o modelo, foi necessário verificar quais desses possuíam falhas, sendo utilizados apenas 15 postos dos 141 presentes na bacia, ou seja, aproximadamente 10% dos postos pluviométricos. Além disso, as séries de dados de postos pluviométricos consistidos eram curtas, alguns apresentavam falhas e, com exceção de um ponto, o restante se localiza fora das regiões de serra.

Porém, existem muitos postos pluviométricos cujas séries de dados são recentes. Sendo assim, com o avançar do tempo, a quantidade de dados disponíveis será maior, aumentando, por consequência, a variabilidade deles. Isso conduzirá a um modelo que tende a ser mais bem calibrado e capaz de representar com maior eficiência a variabilidade pluviométrica da região estudada. Sob condições atuais, a quantidade de variáveis é escassa, mas ainda assim foi capaz de gerar coeficientes de eficiência global (CEG) superiores a 1,70, tanto para calibração quanto para validação.

Outras restrições foram as constâncias dos índices físicos da bacia e da evapotranspiração. Espera-se que todos esses fatores apresentem alteração com a avançar do tempo, porém a bacia foi calculada para a situação presente, tanto durante o período de calibração e validação quanto para projeção de vazão. Isso indica que o cenário pode ser mais preocupante, caso a evapotranspiração aumente, o que afeta diretamente a disponibilidade de água na superfície.



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

Referências

AMANCIO, E. S. *Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC*. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, 2018.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 2002. p. 177–231. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).

BOU, A. S. F.; SÁ, R. V.; CATALDI, M. Flood forecasting in the upper Uruguay River basin. *Natural Hazards*, v. 79, n. 2, p. 1239–1256, 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Diretrizes e análises recomendadas para a consistência de dados pluviométricos*. Brasília: ANA, 2011.

CEIVAP. ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. *SIGA-CEIVAP: Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da Bacia do rio Paraíba do Sul*. Disponível em: <http://sigaceivap.org.br/map#>. Acesso em: 3 mar. 2017.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015.

CPRM. *Atlas Pluviométrico do Brasil*. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>. Acesso em: 22 fev. 2017.

CPRM. *Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 58 Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 2003.

DI BELLO, R. C. *Análise do Comportamento da Umidade do Solo no Modelo Chuva-Vazão SMAP II - Versão com Suavização Hiperbólica Estudo de Caso: Região de Barreiras na Bacia do Rio Grande-BA*. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <file:///C:/Users/Edmo%20Virgens/Downloads/Rafael%20Carneiro%20Di%20Bello.pdf>. Acesso em: 2019.

ESTUDOS de Consistência e Reconstituição de Séries de Vazões Naturais nas Bacias dos Rios Paraíba, Jequitinhonha e Doce: Relatório final. Rio de Janeiro: NOS; HICON, 2008. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/RelatorioFinal_Parnaiba_Jequitinhonha_Doce_Vol%20I_Rev3.pdf. Acesso em: 2019.

EVAPORAÇÕES líquidas nas usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro: NOS, 2004.

FARIA, B. F. P. *Teste F na Regressão Linear Múltipla para Dados Temporais com Relação Serial*. 2011. Dissertação (Mestrado em Estatística, Matemática e Computação) - Universidade Aberta, Lisboa, 2011.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. *Estudos Avançados*, v. 29, n. 84, p. 43–68, 2015.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n.3, p. 13–20, 2007.



Projeção de vazão para bacia do rio Paraíba do Sul e estudo de disponibilidade hídrica a partir de cenários do IPCC

Erick Santana Amancio

IBGE. EMBRAPA. *Mapa de Solos do Brasil*. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/amb_data/Shapefiles/soloEmbrapa.zip. Acesso em: 22 fev. 2017.

IPCC. *Scenario process for AR5*. Disponível em: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/index.html. Acesso em: 29 out. 2017.

LINSLEY JR., R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. *Hydrology for engineers*. 1. ed. New York-Toronto-London: MacGraw-Hill, 1958. v. 1.

LOPES, J. E. G. *Manual Modelo SMAP*. [S.l.: s.n.], 1999

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, v. 103, p. 25-32, 2014.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. D. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OLIVEIRA, L. F. C. *et al.* Comparação e metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.

REBOITA, M. S. *et al.* Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul O Sol como Fonte de Energia. *Terra e Didática*, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

SABESP. *Interligação Jaguari/Atibainha*. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=548>. Acesso em: 14 abr. 2018.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2 : Aplicação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 19-29, 2005.