



Geoprocessing and climate simulation applied to transposition between watershed in São Paulo state, Brazil

Geoprocessamento e simulação climática aplicado à transposição entre bacias hidrográficas em São Paulo

Rodrigo Cesar da Silva^{1*}, Thiago Adriano dos Santos¹, Gilberto Fisch¹

Abstract: The water crisis that hit the Southeast region of Brazil in the years 2014 and 2015 was generated by an atmospheric blocking associated with a high-pressure zone that persisted for more than 45 days, causing a drastic decrease in precipitation rates throughout the region. This fact had a major impact on the municipality of São Paulo, causing a crisis of lack of water availability. To face the problem of water shortages for the São Paulo Metropolitan Region, the water transposition from Paraíba do Sul River watershed to the Cantareira System was proposed to mitigate the referred crisis and other future ones. Therefore, to investigate the feasibility of the proposed solution becomes very important, given the changes in the rainfall profile generated by global climate changes that affect the climatic element precipitation. Geoprocessing techniques were associated with future rainfall data simulated by the HadCM3/Eta model using SRES (Special Report Scenarios Emission) A1B of IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) to investigate the long-term feasibility of this proposal. The results point to the possibility of the project's unsustainability until the year 2040, since only 35% of the year's transposition may occur, reducing to 30% if only considering the 2030s.

Key words: Transposition. Watershed. Viability.

Resumo: A crise hídrica que atingiu a região Sudeste do Brasil nos anos de 2014 e 2015 foi gerada por um bloqueio atmosférico associado a uma zona de alta pressão que persistiu por mais de 45 dias na região, causando diminuição drástica nos índices de precipitação em toda região. Este fato teve um grande impacto para o município de São Paulo, causando uma crise de falta de disponibilidade hídrica. Para enfrentar o problema da falta de água para a Região Metropolitana de São Paulo, foi proposto a transposição das águas da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira com a finalidade de mitigar a referida crise e outras futuras. Para tanto, investigar a viabilidade da solução proposta torna-se de demasiada importância com vistas às mudanças no perfil das precipitações geradas pelas mudanças climáticas globais que afetam o elemento climático precipitação. Foram associadas técnicas de geoprocessamento a dados de precipitação futuros simulados pelo modelo HadCM3/Eta, utilizando do SRES (*Special Report Scenarios Emission*) A1B do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), com a finalidade de investigar a viabilidade desta proposta em longo prazo (até o ano de 2040). Os resultados apontam para a possibilidade da insustentabilidade do projeto até o ano de 2040, visto que em apenas 35% dos anos poderá ocorrer a transposição, reduzindo-se para 30% se considerado apenas a década de 2030.

Palavras-chave: Transposição. Viabilidade. Bacia hidrográfica.

*Corresponding author

Submitted for publication on 20/10/2019, approved on 17/12/2019 and published on 27/01/2020

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, Brasil. E-mails: rodrigo.peb@gmail.com; thiagoadrianodossantos@hotmail.com; fisch.gilberto@gmail.com.

INTRODUCTION

The water crisis between 2014 and 2015 that hit the Southeast region of Brazil, specifically the Metropolitan Region of São Paulo (RMSP), was one of the most serious ever observed in the region (MARENGO; ALVES, 2015). This event severely impacted water storage in the main reservoirs that supply and generate energy for three of the major metropolitan regions of the country: São Paulo, Rio de Janeiro, and Vale do Paraíba (FISCH *et al.*, 2017). This severe drought was caused by an atmospheric blocking (NOBRE *et al.*, 2016).

The water crisis has imposed the challenge of using water more rationally, raising the need for more efficient management of water resources. The solution found to mitigate water shortages at the RMSP was water transposition from the Paraíba do Sul hydrographic basin, located in the Vale do Paraíba Metropolitan Region (RMVP), to the Cantareira System, which is the biggest supply system of RMSP.

According to Targa and Batista (2015), the water crisis in the Southeast region seriously affected the RMSP and RMVP, promoted reflection on its uses as a finite resource. Additionally, its availability (or unavailability) has an impact on civil society, affecting regional economic development, and makes long-term planning for its uses essential.

Transposition between watershed is a reality, and in the last few decades, great works of engineering and infrastructure that interconnect different river basins, have appeared. An example of this interconnection is the transposition of the São Francisco River in the Brazilian semiarid region.

Transposition is a relevant topic, and it requires a series of studies that effectively point out the need for interconnection among watersheds. Generally, research shows long-term environmental impacts outweigh short-term benefits when the water it is transposed among different ones. Although there are several studies, projects that involve transposition among river basins may not be sustainable in the long-term (WILSON *et al.*, 2017).

The advantages observed in transposition cases are the abundance of water resources, electric power generation, irrigation projects, flow and flood regulation (SUN *et al.*, 2016). On the other hand, Gohari *et al.* (2013) point out that water scarcity and stress are temporarily alleviated, as there is a false sense of water abundance, leading beneficiaries of transposition to mistaken actions regarding the use of water resources and waste.

INTRODUÇÃO

A crise hídrica entre os anos de 2014 e 2015 que atingiu a região Sudeste do Brasil, especificamente a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), foi uma das mais graves já observadas na região (MARENGO; ALVES, 2015). Este evento impactou, de forma severa, o armazenamento de água nos principais reservatórios que abastecem e geram energia para três das principais regiões metropolitanas do país: São Paulo, Rio de Janeiro e Vale do Paraíba (FISCH *et al.*, 2017), sendo esta seca severa ocasionada por um bloqueio atmosférico (NOBRE *et al.*, 2016).

A crise hídrica impôs o desafio de utilização da água com maior racionalidade, suscitando a necessidade de uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos. A solução encontrada para mitigar esta falta de água na RMSP foi a transposição das águas da bacia do rio Paraíba do Sul, localizada na Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVP) para o Sistema Cantareira, que é o maior sistema de abastecimento de água para RMSP.

Segundo Targa e Batista (2015), a crise hídrica na região Sudeste, e que afetou de forma severa a RMSP e RMVP, promoveu uma maior reflexão quanto ao uso da água enquanto um bem finito. Adicionalmente, a sua disponibilidade (ou indisponibilidade) tem amplo impacto sobre a sociedade civil, atingindo o desenvolvimento econômico regional, sendo de fundamental importância haver um planejamento de longo prazo quanto à sua utilização.

A transposição entre bacias hidrográficas é uma realidade e nas últimas décadas surgiram grandes obras de engenharia e infraestrutura que interligam bacias hidrográficas distintas. Um bom exemplo desta interligação é a transposição do rio São Francisco na região do semiárido brasileiro.

A transposição é um tema de relevante destaque, visto que para sua efetivação é necessária uma série de estudos que apontem, efetivamente, a necessidade de interligação entre bacias. Em geral, as pesquisas revelam que os impactos ambientais em longo prazo se sobressaem aos benefícios de curto prazo quando há a transposição de água entre bacias hidrográficas distintas e que, ainda que haja uma série de estudos, os projetos que envolvem transposição entre bacias hidrográficas podem não ser sustentáveis em longo prazo (WILSON *et al.*, 2017).

As vantagens observadas nos casos de transposição é a abundância de recursos hídricos, geração de energia elétrica, projetos de irrigação, regulação de vazões e enchentes (SUN *et al.*, 2016). Por outro lado, Gohari *et al.* (2013) apontam que a escassez e o estresse hídrico são aliviados de forma temporária, pois há uma falsa sensação de abundância hídrica, levando beneficiários da transposição a ações equivocadas quanto ao uso dos recursos hídricos e ao desperdício.

Given the interconnection between the Paraíba do Sul watershed and the Cantareira System, this study sought to analyze past historical rainfall data, coupled with future rainfall data and geoprocessing techniques to investigate future rainfall scenarios in the Paraitinga and Paraibuna rivers watershed. Additionally, the objective was to analyze the feasibility of the proposed transposition to mitigate the effects of droughts on the water reservoirs that supply the RMSP.

MATERIAL AND METHODS

It was applied this methodology to the Paraibuna dam that will offer water to the Cantareira System, which can be applied, also, in other Brazilians regions, especially the northeastern semi-arid region.

The Paraibuna dam was chosen as the research object because it has the largest useful water storage capacity of the Paraíba do Sul watershed. It has an equivalent reservoir with the Santa Branca, Jaguari, and Funil dams, having 73.8 % of the total water capacity of the system and 70.5% of its available useful volume, even though the transposition occurs only from the Jaguari Dam (ANA, 2017).

The research was carried out in the Paraitinga, Paraibuna watersheds and the Paraibuna dam, located in the municipalities of Natividade da Serra, Redenção da Serra, and Paraibuna, in the São Paulo state. The Paraibuna dam, which has a surface area of 4,437.5 km², is created when, the Paraitinga and Paraibuna water rivers, at the end of its basin, are blocked up by the dam.

These watersheds are part of the Paraíba do Sul river basin, with 1,180 km of extension and a total area of 57,000 km², approximately, located in the states of São Paulo, Minas Gerais, and Rio de Janeiro. Paraibuna dam has a 4,740 hm³ of total water storage capacity, with a useful volume of 2,636 hm³ (ANA, 2019).

To analyze the dynamics of the Paraibuna dam were used, through the Earth Explorer tool, Landsat 5 and 8 satellite scenes, available at <https://earthexplorer.usgs.gov/> (USGS, 2019), to know the real dam dimensions.

Through the total water storage data in the equivalent system of the Paraíba do Sul river basin collected from the National Water Agency (ANA, 2019), the periods with greater and lesser storage of the Paraibuna dam were selected and, based on these data. Then, satellite scenes without cloud cover were chosen for the respective analysis of dam surface data, as described in Table 1.

Diante da efetivação da interligação entre as bacias hidrográficas do rio Paraíba do Sul e o Sistema Cantareira, este estudo procurou analisar os dados históricos de precipitação do passado, aliados a dados futuros de precipitação e técnicas de geoprocessamento para investigar os cenários futuros de precipitação na bacia hidrográfica dos rios Paraitinga e Paraibuna. Adicionalmente, objetivou-se analisar a viabilidade da transposição proposta para mitigar os efeitos das secas sobre os reservatórios de água que abastecem a RMSP.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta metodologia foi aplicada à represa de Paraibuna, que ofertará água ao Sistema Cantareira, sendo que este procedimento pode ser aplicado em outras regiões do Brasil, em especial no semiárido do Nordeste.

A represa de Paraibuna foi escolhida como objeto da pesquisa por possuir a maior capacidade útil de armazenamento de água da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Ela tem um reservatório equivalente com as represas de Santa Branca, Jaguari e Funil, possuindo 73,8% da capacidade total de água do sistema e 70,5% de seu volume útil disponível, ainda que a transposição ocorra somente da represa de Jaguari (ANA, 2017).

A pesquisa foi realizada nas bacias hidrográficas dos rios Paraitinga, Paraibuna e na represa de Paraibuna, que estão localizadas nos municípios de Natividade da Serra, Redenção da Serra e Paraibuna, no estado de São Paulo. A bacia dos rios Paraitinga e Paraibuna, que ao seu final formam por meio de represamento a represa de Paraibuna, tem área superficial de 4.437,5 km².

Estas bacias hidrográficas fazem parte da bacia do rio Paraíba do Sul, que possui uma extensão de aproximadamente 1.180 km, com uma área total de aproximadamente 57.000 km², estando localizadas nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. A represa de Paraibuna possui capacidade de armazenamento total de água de 4.740 hm³, sendo seu volume útil de 2.636 hm³ (ANA, 2019).

Para a observação da dinâmica da represa de Paraibuna, foram utilizadas cenas dos satélites *Landsat 5 e 8*, utilizando a ferramenta *Earth Explorer*, disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov/> (USGS, 2019), com a finalidade de conhecimento das efetivas dimensões da represa.

A partir dos dados de armazenamento total de água no sistema equivalente da bacia do rio Paraíba do Sul coletados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), foram selecionados os períodos com maior e menor armazenamento da represa de Paraibuna e, a partir desses dados, selecionadas cenas dos satélites sem cobertura de nuvens para haver respectiva análise dos dados de superfície da represa, sendo descritas na Tabela 1.

The morphometric data of the region were collected in a TOPODATA project, available at <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/> (INPE, 2019), used to build a digital terrain model (Figure 1), and from this delimited the Paraitinga and Paraibuna rivers watershed and definition of precipitation simulation grids by the HadCM3/Eta model.

The data used in the research were the altitude grid. On the other hand, the municipal divisions of the state of São Paulo and Vale da Paraíba region were obtained from the page of the Brazilian Institute of Geography and Statistics, available at <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> (IBGE, 2019), in the area of geoscience *download* and territorial mesh.

Os dados morfométricos da região foram coletados no projeto TOPODATA, disponível em <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/> (INPE, 2019), utilizado para geração de modelo digital do terreno (Figura 1), e a partir deste realizar a delimitação das bacias hidrográficas dos rios Paraitinga e Paraibuna e definição dos pontos de simulação de precipitação pelo modelo HadCM3/Eta.

Os dados utilizados na pesquisa foram os de grade de altitude. Por outro lado, as divisões municipais do estado de São Paulo e da região do Vale do Paraíba foram adquiridas a partir da página do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> (IBGE, 2019), na área de *download* de geociência e malha territorial.

Table 1 - Scenes used for Paraibuna dam monitoring

Tabela 1 - Cenas utilizadas para monitoramento da represa de Paraibuna

Date	Satellite	Path/Row	Scene center time
2010/02/06	Landsat 5	218/076	12:49
2011/04/14	Landsat 5	218/076	12:47
2013/06/06	Landsat 8	218/076	13:00
2014/02/01	Landsat 8	218/076	12:59
2015/02/19	Landsat 8	218/079	12:58
2016/01/06	Landsat 8	218/076	12:58

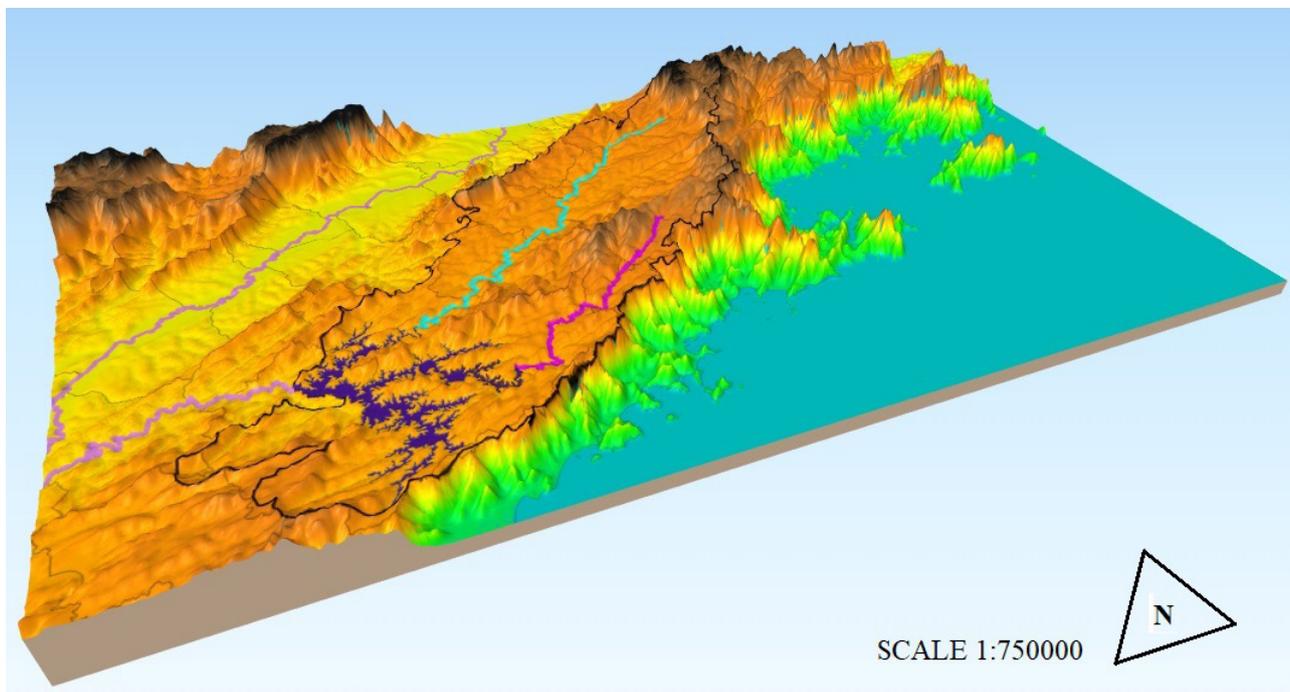


Figure 1 - 3D model of the study area.

Figura 1 - Modelo em 3D da área em estudo.

The climate simulation data used in the research were generated by the HadCM3 model, developed by the Hadley Center of the United Kingdom, and regionalized by the Eta model (CHOU, 2012). The resolution grid applied in the research was 20 x 20 km, using the IPCC scenario A1B as a reference. This scenario presents a rapidly growing world, with a population peak in the middle of the 21st century with subsequent decline and development of more efficient technologies (IPCC, 2007).

According to Santos and Fisch (2016), this scenario is compatible with the *Representative Concentration Pathway* (RCP) 4.5, used by the IPCC in its fifth report (AR5). Eleven simulation grids were used, numbered from 1 to 12. It is necessary to note the occurrence grid 11 was not considered for the development of this research, as it can be observed in Figure 2.

In the present research, we used two temporal clippings, one called past (1961-1990) and the second called future (2011-2040). The climate simulation data generated by the HadCM3/Eta model were related to field observations (DIAS *et al.*, 2016; SANTOS; FISCH, 2016), and the results were compatible with reference values of the climatological normal.

Os dados de simulação climática utilizados na pesquisa foram gerados pelo modelo HadCM3, desenvolvido pelo Hadley Centre do Reino Unido, e regionalizado pelo modelo Eta (CHOU, 2012). A grade de resolução utilizada na pesquisa foi de 20 x 20 km, sendo utilizado o cenário A1B do IPCC como referência. Este cenário apresenta um mundo em rápido crescimento, com pico populacional no meio do século XXI, com posterior declínio e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes (IPCC, 2007).

Segundo Santos e Fisch (2016), este cenário é compatível com o *Representative Concentration Pathway* (RCP) 4.5, utilizado pelo IPCC em seu quinto relatório (AR5). Foram utilizadas 11 grades de simulação climática, sendo numeradas de 1 a 12, ocorrendo que a grade 11 foi desconsiderada para o desenvolvimento desta pesquisa, podendo ser observada na Figura 2.

Na presente pesquisa, foram utilizados dois recortes temporais, um denominado passado (1961-1990) e outro denominado futuro (2011-2040). Os dados de simulação climática gerados pelo modelo HadCM3/Eta foram relacionadas a observações de campo (DIAS *et al.*, 2016; SANTOS; FISCH, 2016), sendo os resultados compatíveis com os valores da normal climatológica.

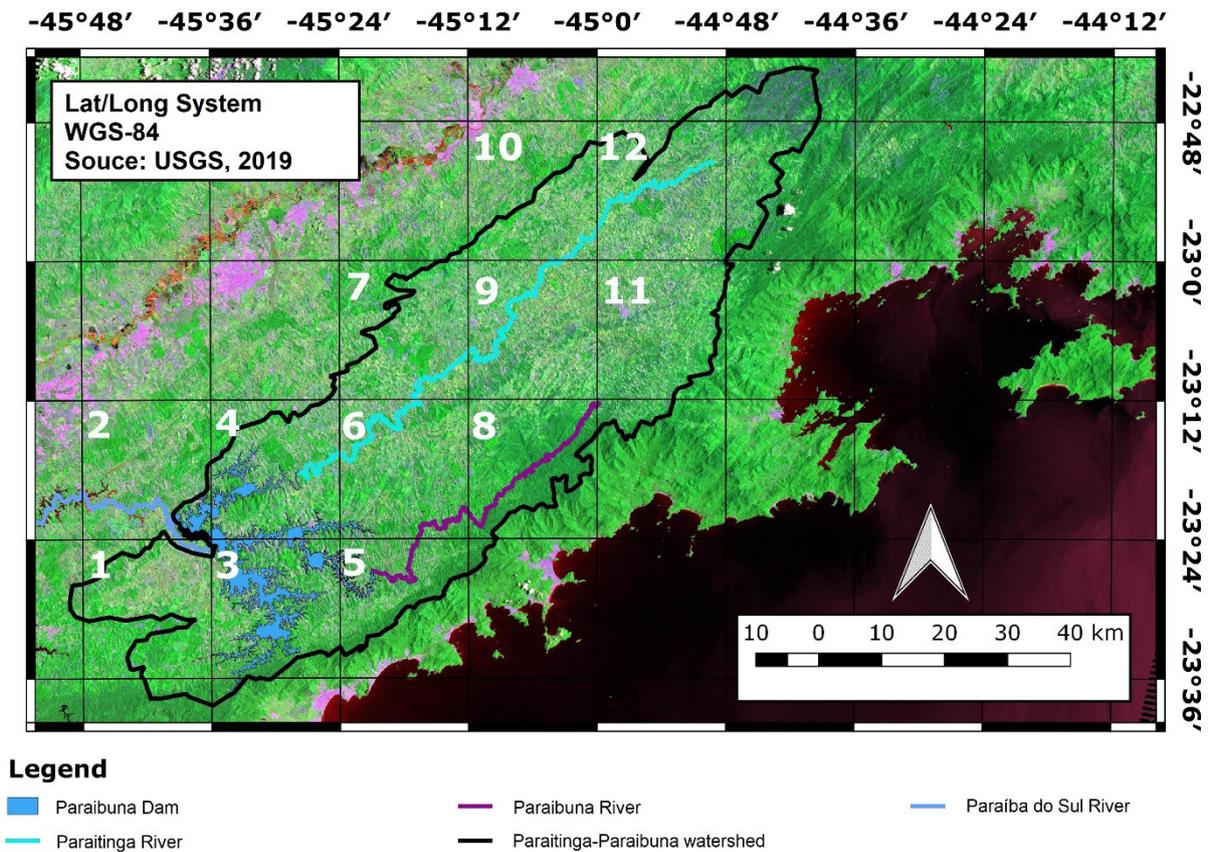


Figure 2 - Study area and climate simulation grids.

Figura 2 - Área de pesquisa e grades de simulação climática.

In order to verify the precipitation changes between the past and future periods, the statistical technique of testing the difference among averages was used (UFSC, 2019). A bilateral test was established, with a 95% significance level ($\alpha/2 = 0.025$), and the degrees of freedom is obtained from Student's t , using the following equations:

$$v = \left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)}{\left(\frac{\omega_1^2}{n_1+1} + \frac{\omega_2^2}{n_1+1} \right)} \right] - 2, \text{ were:} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\omega_1 = \frac{S_1^2}{n_1}, \text{ and} \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$\omega_2 = \frac{S_2^2}{n_2} \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$S_d = \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$t_v = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_d} \quad [\text{Eq. 5}]$$

From the results obtained in the equations of the differences between the averages and the critical values established, the values will be accepted when they are smaller than the maximum established for a 5% chance of error (therefore the increase is not significant), while the higher values that the established ones will be rejected (the increase is significant).

For the analysis of upward trend by waters demand of the Paraíba do Sul watershed, it was first considered the operating rules of the equivalent system of the Paraíba do Sul river. The values of discharge and drawdown flows have been changed and adjusted by several Resolutions until repealed by ANA Resolution n° 1,382 of 2015 (ANA, 2015).

Com o objetivo de verificar a mudança da precipitação entre os períodos passado e futuro, foi utilizada a técnica estatística de teste da diferença entre as médias (UFSC, 2019). Foi estabelecido um teste bilateral, com nível de significância de 95% ($\alpha/2 = 0,025$), e os graus de liberdade sendo obtidos a partir da t de Student, utilizando as seguintes equações:

A partir dos resultados obtidos nas equações das diferenças entre as médias e estabelecidos os valores críticos, serão aceitos os valores quando forem menores que o máximo estabelecido para 5% de chance de erro (portanto o aumento não é significativo), enquanto que os valores maiores que os estabelecidos serão rejeitados (o aumento é significativo).

Para a análise da tendência de aumento pela demanda das águas da bacia do rio Paraíba do Sul, primeiramente, foi considerada as regras de operação do sistema equivalente da bacia do rio Paraíba do Sul. Os valores de vazões de descarga e deplecionamento foram sendo alteradas e ajustadas por diversas Resoluções, até serem revogadas pela Resolução ANA n° 1.382 de 2015 (ANA, 2015).

Table 2 - Depletion operation of the Paraíba do Sul watershed equivalent system

Tabela 2 - Operação de deplecionamento do Sistema equivalente da bacia do rio Paraíba do Sul

Depletion order		Depletion stage (%)		
		1st stage	2nd stage	3rd stage
1st	Funil	30	30	30
2nd	Santa Branca	70	40	10
3rd	Paraibuna	80	40	5
4th	Jaguari	80	50	20

This resolution established the downstream flows of the dams that form the Paraíba do Sul river hydraulic system and must respect the following minimum limits: a) Paraibuna with $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; b) Santa Branca $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; c) Jaguari $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; d) Funil $70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; e) Pumped to the Guandu River in Santa Cecília $119 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (daily average); f) Pereira Passos $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Resolution n° 1,382 of 2015 also changed the operation of the Paraíba do Sul river hydraulic system, reestablishing minimum limits and order of depletion (Table 2). The increased demand for water from the Paraíba do Sul river system will be related to the effectuation of water transposition to the Cantareira System (ANA, 2017) and the population increase in the Paraíba Valley Metropolitan Region.

RESULTS AND DISCUSSION

Among the years 2010 and 2015, the Paraibuna dam had great variation in its available useful volume, varying from 104% of capacity on 02/06/2010 to 1% of its useful volume on 01/19/2015 (ANA, 2019). Through the use of remote sensing techniques, it was possible to observe that the dam's surface was 16,794.57 ha in 2010, decreasing to 8,023.03 ha in 2015, which represents a 51% reduction in its surface (Figure 3).

Esta resolução estabeleceu as vazões a jusante das represas que formam o sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul, devendo respeitar os seguintes limites mínimos: a) Paraibuna com $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; b) Santa Branca $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; c) Jaguari $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; d) Funil $70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; e) bombeada para o Rio Guandu em Santa Cecília $119 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (média diária); f) Pereira Passos $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

A Resolução n° 1.382 de 2015 alterou também a operação do sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul, restabelecendo limites mínimos e ordem de deplecionamento (Tabela 2). O aumento pelas águas do sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul estará relacionado a efetivação da transposição de água para o Sistema Cantareira (ANA, 2017) e ao aumento populacional da Região Metropolitana do Vale do Paraíba.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os anos de 2010 e 2015, a represa de Paraibuna teve grande variação quanto ao seu volume útil disponível, variando de 104% de capacidade em 06/02/2010 para 1% de seu volume útil em 19/01/2015 (ANA, 2019). Por meio da utilização de técnicas de sensoriamento remoto, foi possível observar que a superfície da represa era de 16.794,57 ha em 2010, diminuindo para 8.023,03 ha em 2015, o que representa uma redução de 51% de sua superfície (Figura 3).

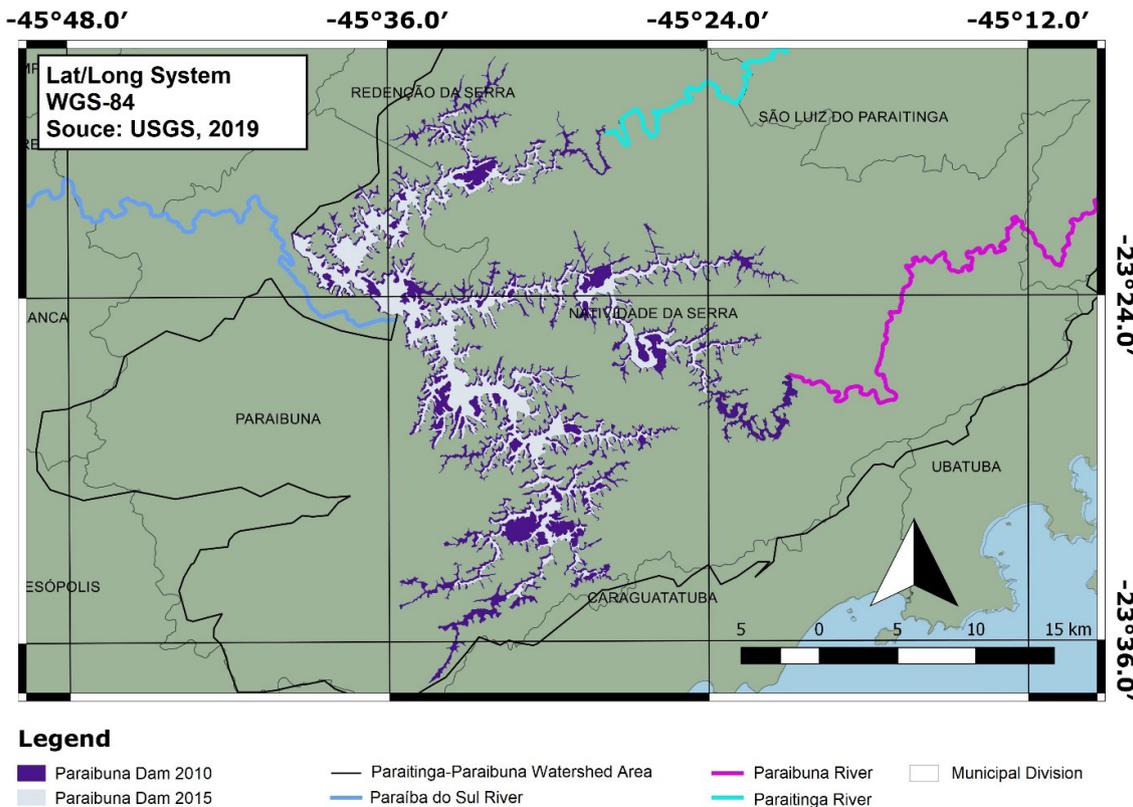


Figure 3 - Comparison of the surface of Paraibuna dam among 2010 and 2015.

Figura 3 - Comparação do espelho superfície da represa de Paraibuna entre os anos de 2010 e 2015.

It is important to highlight that the dam may reach available volumes greater than 100% of its capacity in times of precipitation above the historical average, thus increasing its storage condition. In this case, the excess water in the Paraibuna dam is drained directly to the Paraíba do Sul river by a drain installed inside it.

When the dam has a useful volume of 0%, it appears that it has reached its technical reserve or “dead volume”; what means the level of the dam is below the water intake (REIS; FERNANDES, 2016), even though there is 49% of the water mirror available. The characteristics of the dam can be seen in Table 3.

É relevante destacar que a represa pode atingir volumes disponíveis superiores a 100% de sua capacidade em momentos de precipitação acima da média histórica, aumentando desta maneira sua condição de armazenamento. Neste caso o excesso de água na represa de Paraibuna é escoado diretamente ao rio Paraíba do Sul por um dreno instalado no seu interior.

Quando a represa possui volume útil de 0%, verifica-se que esta atingiu sua reserva técnica ou “volume morto”, sendo este o nível da represa abaixo da captação de água (REIS; FERNANDES, 2016), ainda que haja 49% do espelho d’água disponível. As características da represa podem ser observadas na Tabela 3.

Table 3 - Observed data on Paraibuna dam

Tabela 3 - Dados observados sobre a represa de Paraibuna

Date	2010/02/06	2011/04/14	2013/06/06	2014/02/01	2015/01/19	2016/01/06	2017/01/08
Total Dam Area (ha)	16,804.69	16,544.64	14,738.96	12,255.08	8,023.03	9,451.51	12,256.01
Islands Area (ha)	1,706.25	1,489.41	1,311.27	1,195.13	321.93	498.12	1,196.02
Effective Area of the Dam (ha)	15,098.44	15,055.23	13,427.69	11,059.95	7,701.1	8,953.39	11,068.33
Islands Quantity	103	97	97	68	28	41	68
Cumulative Dam Useful Volume on Date (%)	104	95	65	51	1	12	52

Total annual precipitation values for the past period indicate an average of 1,363.1 mm. The total average precipitation for the rainy season, which considers the months from October to March was 959.5 mm, and for the summer period, which involves the months from December to February, 485.8 mm.

The data obtained from climate simulation were compatible with previous results for the same region. Folhes and Fisch (2006) found an average annual rainfall of 1,350 mm for the municipality of Taubaté/SP, a result similar to the climatological normal established by INMET (2019).

Villaron and Fisch (2013), by characterizing the beginning of the rainy season and future trends in the region, indicate an average rainfall for the municipality of Taubaté/SP and São José dos Campos/SP of $1,360 \pm 224$ mm and $1,224 \pm 204$ mm, respectively, results similar to those obtained in this research.

To future period, the values indicate an increase in the average annual rainfall to 1,488.5 mm. These simulated values for the rainy season demonstrate an average annual rainfall of 1,052.0 mm, while the average rainfall for the summer period was 544.0 mm.

Os valores totais de precipitação anual para o período passado indicam uma média de 1.363,1 mm. A média total de precipitação para o período chuvoso, que considera os meses de outubro a março, foi de 959,5 mm; e para o período de verão, que envolve os meses de dezembro a fevereiro, 485,8 mm.

Os dados obtidos a partir de simulação climática foram compatíveis com resultados anteriores para mesma região. Folhes e Fisch (2006), encontraram média de precipitação anual de 1.350 mm para a cidade de Taubaté, resultado semelhante à normal climatológica estabelecida pelo INMET (2019).

Villaron e Fisch (2013), ao caracterizar o início do período chuvoso e tendências futuras na região, apontam uma precipitação média para o município de Taubaté/SP e São José dos Campos/SP de 1.360 ± 224 mm e 1.224 ± 204 mm, respectivamente, resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa.

Para o período futuro, os valores indicam aumento do valor médio de precipitação anual para 1.488,5 mm. Estes valores simulados para o período chuvoso mostram uma média de precipitação anual de 1.052,0 mm, enquanto que a média de precipitação para o período de verão foi de 544,0 mm.

These data are also compatible with other researches that evaluated future precipitation trends for the region. As an example, the results obtained by Horikoshi and Fisch (2007) when analyzing precipitation trends and water balance for Taubaté/SP, indicating average annual precipitation of 1,421.0 mm for the period 2010-2039 considering the IPCC SRES A2.

Dias *et al.* (2016) and Santos and Fisch (2016), when analyzing the future climate trend for the Atlantic Forest domain area and the municipality of Taubaté, respectively, also observed increases in precipitation compatible with those obtained in the present research.

When performing a comparative analysis between the past and future periods, the results indicate that there will be an increase in precipitation volumes. The total annual means indicate an increase of 9.2% between the periods analyzed. According to seasonal analyzes, the rainy and summer period showed an increase of precipitation of 9.6% and 12%, respectively, presenting a trend of higher concentration of rainfall during the summer.

A statistical analysis of different tests among the averages was calculated to verify whether the increase in precipitation per simulated point has significance, with 95% confidence. The results indicate that in all simulated points the values between past and future analyzed should be discarded, once they were outside the significance established by the statistical treatment (t_v , 2.807), thus confirming that the increase in precipitation between the past and the future period has statistical significance, as can be seen in Table 4.

The results point to large spatial variability. For the past period, simulated point precipitation rates indicate a variation of up to 74.1% for the annual mean, while in the summer period, this variation reaches 99.8%. These results also agree with those obtained by Silva and Simões (2014) when analyzing the spatial distribution of the observed rainfall for the Paraíba do Sul watershed region.

Tais dados também são compatíveis com outras pesquisas que avaliaram as tendências futuras de precipitação para a região, como os resultados obtidos por Horikoshi e Fisch (2007) ao analisar as tendências de precipitação e balanço hídrico para Taubaté, indicando média de 1.421,0 mm de precipitação anual para o período de 2010 a 2039, considerando o SRES A2 do IPCC.

Dias *et al.* (2016) e Santos e Fisch (2016), ao analisarem a tendência climática futura para a área de domínio da Mata Atlântica e do município de Taubaté, respectivamente, também observaram acréscimos na precipitação compatíveis com os obtidos na presente pesquisa.

Ao se realizar uma análise comparativa entre os períodos do passado e futuro, os resultados indicam que haverá um aumento nos volumes de precipitação. As médias totais anuais indicam acréscimo de 9,2% entre os períodos analisados. Pelas análises sazonais, o período chuvoso apresentou aumento na precipitação de 9,6%, e o período de verão contará com um acréscimo de 12% na precipitação, demonstrando tendência de maior concentração das chuvas durante o verão.

Uma análise estatística de testes de diferença entre as médias foi calculada para verificar se o aumento da precipitação por ponto simulado possui significância, com 95% de confiança. Os resultados apontam que em todos os pontos simulados os valores entre passado e futuro analisados deveriam ser descartados, pois estavam fora da significância estabelecida pelo tratamento estatístico (t_v , 2,807), confirmando desta forma que o aumento da precipitação entre o período passado e futuro possui significância estatística, conforme pode ser observado na Tabela 4.

Os resultados apontam para uma grande variabilidade espacial. Para o período passado, os índices de precipitação por ponto simulado indicam variação de até 74,1% para os totais anuais, enquanto no período de verão esta variação atinge 99,8%. Estes resultados também concordam com aqueles obtidos por Silva e Simões (2014) ao analisar a distribuição espacial da precipitação observada para a região da bacia do rio Paraíba do Sul.

Table 4 - Precipitation test variable in the Paraitinga and Paraibuna watersheds

Tabela 4 - Variável de teste de precipitação na bacia hidrográfica dos rios Paraitinga e Paraibuna

Test Variable (t_v) of simulated precipitation grids			
Point 1	-3.453	Point 7	-4.264
Point 2	-4.330	Point 8	-3.061
Point 3	-3.388	Point 9	-4.063
Point 4	-3.986	Point 10	-4.482
Point 5	-2.939	Point 12	-4.457
Point 6	-3.541	-	-

Given the water crisis that occurred in 2014 and 2015 and with the effective transposition of waters from the Paraíba do Sul watershed to the Cantareira System in March 2018, the demand for waters of this watershed will increase sharply. Resolution ANA 1,931 of 2017 (ANA, 2017) establishes that the average flow to be transposed to the Cantareira System is $5.13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, with a maximum catchment flow of $8.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, which implies a daily transfer of approximately $443,232 \text{ m}^3$ of water.

About the daily water consumption of the population, and considering an average of 180 L day^{-1} (FISCH *et al.*, 2017). The daily consumption in 2018 was $440,373.7 \text{ m}^3$, and predicting to the year 2040, considering the population will be approximately 2,908,208 inhabitants, water consumption will reach $523,477.4 \text{ m}^3$. This projection is based on an annual increase of 1% p.a, concerning the last 9 years (SEADE, 2019) (Table 5).

Diante da crise hídrica ocorrida nos anos de 2014 e 2015 e com a efetivação da transposição das águas da bacia do rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira em março de 2018, a demanda pelas águas desta bacia tenderá a aumentar de forma acentuada. A Resolução ANA 1.931 de 2017 (ANA, 2017) estabelece que a vazão média a ser transposta para o Sistema Cantareira é de $5,13\text{m}^3\text{s}^{-1}$, com vazão máxima de captação de $8,5\text{m}^3\text{s}^{-1}$, o que implica em uma transferência diária de água de, aproximadamente, 443.232m^3 .

Com relação ao consumo diário de água da população, considerando uma média de 180 L dia^{-1} (FISCH *et al.*, 2017), o consumo diário da população em 2018 foi de $440.373,7 \text{ m}^3$, sendo que até o ano de 2040 atingirá um consumo de $523.477,4 \text{ m}^3$, uma vez que a população será de, aproximadamente, 2.908.208 habitantes, projeção com base em um crescimento anual de 1% a.a., tendo como referência os últimos 9 anos (SEADE, 2019) (Tabela 5).

Table 5 - Change in water demand profile in the Paraíba Valley region

Tabela 5 - Mudança no perfil de demanda de água na região do Vale do Paraíba

Year	Daily water demand - Paraíba Valley Region			
	Population	Transposition	Population consumption	Total
2018	2,446,521	-	$440,373.78 \text{ m}^3$	$440,373.78 \text{ m}^3$
2040	2,908,208	$443,232.00 \text{ m}^3$	$523,477.44 \text{ m}^3$	$966,709.44 \text{ m}^3$
Difference between 2018 and 2040 (%)	18.8%	-	18.8%	126.3%

Analyzing data from ANA (2019) referring to the storage capacity of the Paraibuna dam, it is possible to analyze its depletion behavior. The period where there is a recovery of water storage capacity in the region's reservoirs is from October to March, a period equivalent to the rainy season in the region. In the dry months, from April to September, there is a depletion of the storage capacity of the dams that form the Paraíba do Sul river hydraulic system.

Concerning the Paraibuna Dam, data from ANA (2019) show that the years in which the storage capacity of the dam is depleted stands out the years in which the recovery of its storage capacity occurs during the drought period, which from 1983 to 2002 there was an average storage loss of -12.5%. However, in the period from 2006 to 2016 the average depletion was -18.6%, generating an average loss of -15.5% in the analyzed period.

A partir dos dados da ANA (2019), referentes a capacidade de armazenamento da represa de Paraibuna, é possível analisar seu comportamento de deplecionamento. O período em que há recuperação da capacidade de armazenamento das águas nos reservatórios da região é de outubro a março, período equivalente à época chuvosa na região, já nos meses de estiagem, de abril a setembro, ocorre a deplecionamento da capacidade de armazenamento das represas que formam o sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul.

Com relação à represa de Paraibuna, os dados da ANA (2019) demonstram que os anos em que ocorrem deplecionamento na capacidade de armazenamento da represa se sobressaem amplamente quando comparados aos anos em que ocorrem recuperação de sua capacidade de armazenamento no período de estiagem, sendo que no período de 1983 a 2002 houve perda média de armazenamento de -12,5%, enquanto que no período de 2006 a 2016 o deplecionamento médio foi de -18,6%, gerando perda média entre os período analisados de -15,5%.

Understanding the average depletion behavior of the dams that form the hydraulic system of the Paraíba do Sul River, in particular from the Paraibuna dam, associated with future simulated precipitation data (2020-2040) to the rainy season and future scenarios of increased demand by the waters of the dams that form the equivalent reservoir of the Paraíba do Sul River, the results of future scenarios can be seen in Table 6.

Analyzing together the resolution of operation of Paraibuna dam, future precipitation data, average depletion of water storage during the drought period and the respective increase in demand for waters of the Paraíba do Sul watershed, it's possible obtain the future scenarios of water transposition capacity for the Cantareira System.

The Resolution ANA/DAEE/IGAM/INEA 1,382 of 2015 (ANA, 2015) establishes that the Paraibuna Dam must operate with a minimum of 5% of its useful storage capacity (Table 2), plus the average depletion of - 15.5% of its storage capacity in the dry season and the increase of 126.3% in its water demand, the scenarios for the proposed transposition can be established.

When the Paraibuna dam has a storage capacity of greater than 40.1% of its full capacity at the end of the rainy season, it will be possible to transpose it. Its average depletion plus increased demand for its waters will result in a higher storage volume of 5% at the end of the drought period (March to September).

Compreendendo o comportamento de deplecionamento médio das represas que formam o sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul, especificamente da represa de Paraibuna, aliado a dados futuros de precipitação simulada (2020-2040) para período chuvoso e cenários futuros de aumento da demanda pelas águas das represas que formam o reservatório equivalente do rio Paraíba do Sul, os resultados dos cenários futuros podem ser observados na Tabela 6.

Ao analisar em conjunto a resolução de operação da represa de Paraibuna, dados futuros de precipitação, deplecionamento médio de armazenamento de água durante o período de estiagem e o respectivo aumento da demanda pelas águas da bacia do rio Paraíba do Sul, pode-se obter os cenários futuro de capacidade de atendimento da transposição de água para o Sistema Cantareira.

A Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA 1.382 de 2015 (ANA, 2015), estabelece que a represa de Paraibuna deve operar com o mínimo de 5% de sua capacidade útil de armazenamento (Tabela 2), acrescido o deplecionamento médio de -15,5% de sua capacidade de armazenamento no período de estiagem e o aumento pela demanda de suas águas de 126,3%, podem ser estabelecidos os cenários para a ocorrência da transposição proposta.

Quando a represa de Paraibuna estiver com capacidade de armazenamento superior a 40,1% de sua capacidade ao final do período chuvoso será possível ocorrer a transposição, visto que seu deplecionamento médio acrescido do aumento da demanda por suas águas resultará em volume de armazenamento superior a 5% ao final do período de estiagem (março a setembro).

Table 6 - Future behavior of Paraibuna dam storage capacity as a function of rainfall in the rainy season

Tabela 6 - Comportamento futuro de capacidade de armazenamento da represa de Paraibuna em função da precipitação no período chuvoso

Year	Precipitation (mm)	Capacity (%)	Year	Precipitation (mm)	Capacity (%)
2021	925.3	20.7	2031	963.7	26.2
2022	1,127.3	51.4	2032	751.7	-5.8
2023	1,273.7	72.6	2033	961.7	25.9
2024	1,199.6	61.9	2034	970.5	27.2
2025	948.4	23.7	2035	869.7	12.0
2026	951.1	24.5	2036	934.9	21.9
2027	1,321.3	80.1	2037	939.5	22.5
2028	990.6	30.2	2038	934.2	21.7
2029	869.3	11.9	2039	1,480.8	104.2
2030	1,292.1	75.7	2040	1,167.0	56.9

At the time the dam has storage capacity of less than 40.1% at the end of the rainy season, it may not occur transposition since its storage capacity at the end of the dry season will be less than 5%, which is sealed by the ANA /DAEE /IGAM /INEA Joint Resolution of 2015 (ANA, 2015).

When analyzed together with the parameters for the occurrence of the transposition between the watersheds and the future precipitation, the data indicate that the transposition may occur in only 7 years of the 20 years analyzed (2021-2040), being: 2022; 2023; 2024; 2027; 2030; 2039 and 2040. Demonstrating that the proposed transposition will only be possible in 35% of years. If you look only at the 2030s, this possibility is even lower, reaching only 30% effectiveness.

CONCLUSION

The effective transposition of water from the Paraíba do Sul watershed to the Cantareira System, together with the population increase, indicates that the water demand of this watershed will increase by 126%. However, the increase in precipitation expected by future climate simulations will not be sufficient to meet this need. Despite the intrinsic uncertainties of these simulations, they generate useful information for decision-makers to establish public water conservation and management policies. The results suggest that the transposition of water may be unsustainable in a shorter period among 2 and 3 decades.

Na ocasião em que a represa tiver capacidade de armazenamento inferior a 40,1% ao final do período chuvoso, não poderá ocorrer a transposição, visto que sua capacidade de armazenamento ao final do período de estiagem será inferior a 5%, o que é vedado pela Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA de 2015 (ANA, 2015).

Quando analisados em conjunto, os parâmetros para a ocorrência da transposição entre as bacias hidrográficas e a precipitação futura, os dados indicam que a transposição poderá ocorrer em apenas 7 anos dos 20 anos analisados (2021-2040), sendo: 2022; 2023; 2024; 2027; 2030; 2039 e 2040. Demonstrando que em apenas 35% dos anos será possível acontecer a transposição proposta. Se analisar apenas a década de 2030, esta possibilidade é ainda inferior, atingindo apenas 30% de efetividade.

CONCLUSÃO

A efetivação da transposição de água da bacia do rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira, aliado ao aumento populacional, indica que a demanda pelas águas desta bacia hidrográfica aumentará em 126%. Entretanto, o aumento da precipitação esperado pelas simulações climáticas para o futuro não será suficiente para suprir esta necessidade. Apesar das incertezas intrínsecas destas simulações, elas geram informações úteis para os tomadores de decisão a estabelecerem políticas públicas de preservação e manejo da água. Os resultados sugerem que a transposição de água pode ser insustentável a um intervalo de tempo inferior entre 2 e 3 décadas.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

ANA. Agência Nacional de Água. **Bacia do rio Paraíba do Sul (2019)**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/saladesituacao/v2/RioParaibadoSul.aspx>>. Acesso em: 07 de outubro de 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Resolução ANA nº 1.382: Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA – Dispõe sobre as condições de operações a serem observadas para o Sistema Hidráulico Paraíba do Sul (2015)**. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/resolucoes-ana.php>>. Acesso em: 06 de outubro de 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório ANA nº 1.939: Esclarecimento da transposição do Reservatório Jaguari para o Sistema Cantareira (2017)**. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/resolucoes-ana.php>>. Acesso em: 06 de outubro de 2019.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A.; TAVARES, P. D. S. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3-4, p. 635-653, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8>

DIAS, V.; FISCH, G.; FISCH, S. T. V. Simulações de clima futuro no domínio da mata atlântica: transecto Ubatuba, SP e Extrema, MG, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 11, p. 1042-1055, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1894>

FISCH, G.; SANTOS, T. A.; SILVA, R. C. Water security in the Vale do Paraíba's basin: future scenarios. **Revista Ambiente e Água**, v. 12, n. 6, p. 881-887, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2156>

- FOLHES, M. T.; FISCH, G. Caracterização climática e estudo de tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). **Revista Ambiente e Água**, v. 1, n. 1, p. 61-71, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.6>
- GOHARI, A.; ESLAMIAN, S.; MIRCHI, A.; ABEDI-KOUPAEI, J.; BAVANI, A. M.; MADANI, K. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. **Journal of Hydrology**, v. 491, n. 1, p. 23–39, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021>
- HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. F. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 2, n. 2, p. 33-46, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.25>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Download Geociências**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 02 de janeiro de 2019.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológica (1981-2010)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 20 de setembro de 2019.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 03 de janeiro de 2019.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Fouth Assesment Report Climate change 2007: the physical science basis**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch> >. Acesso em 12 de outubro de 2019.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2015.100879>
- NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 02, p. 252, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>
- REIS, A.; FERNANDES, C. M. O Enquadramento da Crise Hídrica na Revista Veja. **Educação, Cultura e Comunicação**, v. 7, n. 13, p. 27-36, 2016.
- SANTOS, T. A.; FISCH, G. Temperatura e precipitação: futuros cenários do município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 11, n. 5, p. 1068-1087, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1896>
- SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **Informação dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.imp.seade.gov.br/frontend/#/>>. Acesso em: 05 de outubro de 2019.
- SILVA, W. M.; SIMÕES, S. J. C. Spatial Intra-Annual Variability of Precipitation Based on Geostatistics: a Case Study for the Paraíba do Sul Basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Geosciences**, v. 5, n. 4, p. 408-417, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.54039>
- SUN, T.; FERREIRA, V. G.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S. A. Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor. **Water**, v. 8, n. 5, p. 213-218, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w8050213>
- TARGA, M. S., BATISTA, G. T. Benefits and legacy of the water crisis in Brazil. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 2, p. 234-239, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1629>.
- VILLARON, M. A., FISCH, G. Caracterização do início do período chuvoso no Vale do Paraíba Paulista. **Revista Ambiente e Água**, vol. 8, n. 4, p. 36-49, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1254>
- UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. **Testes de diferenças entre médias**. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/testes2.html>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.
- USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 05 de outubro de 2019.
- WILSON, M. C.; LI, X.; MA, Y. J.; SMITH, A. T.; WU, J. A. Review of the economic, social, and environmental impacts of China's South–North water transfer project: A sustainability perspective. **Sustainability**, v. 9, n. 8 p.1489 -1500, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su9081489>