

INFLUÊNCIA DA PLUVIOSIDADE NA ÁREA SUPERFICIAL DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA CANTAREIRA (2003-2014)

*Rainfall Influence on the Surface Area of Cantareira
Water Supply System (2003-2014)*

Carolynne Bueno Machado & Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão

**¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Tropical Ecosystems and Environmental Sciences Laboratory - TREES**

Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR

Av. dos Astronautas, 1.751. Jd. Da Granja, São José dos Campos, São Paulo, CEP: 12.227-010, Brasil
carolynne.bmachado@gmail.com; laragao@dsr.inpe.br

*Recebido em 23 de Julho, 2016/ Aceito em 23 de Maio, 2017
Received on July 23, 2016/ Accepted on May 23, 2017*

RESUMO

O Brasil vem sendo marcado por intensa crise hídrica em diversas regiões, levando a população ao racionamento de água. Os reservatórios do sistema Cantareira, principal sistema de abastecimento da região metropolitana de São Paulo, atingiram níveis críticos em 2014. Este trabalho teve como objetivo avaliar a relação entre precipitação acumulada na área de estudo, sub-bacias do Rio Piracicaba/Alto Tietê e a área superficial do reservatório Jaguari-Jacareí, durante o período chuvoso de 2003-2014. Além disso, uma análise de tendência temporal de precipitação foi conduzida nas sub-bacias hidrográficas principais onde o sistema está inserido. O comportamento do reservatório principal possui correlação positiva significativa com a precipitação acumulada em dezembro, janeiro e fevereiro em 80 % de toda a área de estudo (p -valor $<0,05$) e sua correlação com a precipitação na área de contribuição dos reservatórios teve $R^2=0,79$ (p -valor $=0,0001$). Aproximadamente 80 % da área de contribuição apresentaram tendências negativas de precipitação, porém não significativas. Assim, os baixos índices pluviométricos somados ao abastecimento já insuficiente e ao constante crescimento dos municípios abastecidos causaram a crise dos reservatórios do Cantareira em 2014.

Palavras-chave: Sistema Cantareira, Crise Hídrica, Abastecimento Urbano.

ABSTRACT

Brazil has been marked by severe water crisis in many regions, taking the population to water rationing. The reservoirs of Cantareira system, the main supply system of São Paulo metropolitan region, reached critical levels in 2014. This work aimed to evaluate the relationship between accumulated rainfall in the study area, sub-basins of Rio Piracicaba/Alto Tiete and the surface area of Jaguari-Jacareí reservoir during rainy seasons from 2003 to 2014. Furthermore, an analysis of rainfall trend was carried out in the main sub-basins where the system is inserted. The behavior of the main reservoir presented significant positive correlation with the accumulated precipitation in December, January and February in 80% of the entire study area (p -value <0.05) and its correlation with the area of reservoirs contribution had $R^2=0.79$ (p -valor $=0.0001$). About 80% of the reservoirs contribution area presented negative precipitation trends, but not significant. Thus, the low rainfall rates added to the already inadequate supply and constant growth in supplied cities caused the crisis of Cantareira reservoirs in 2014.

Keywords: Cantareira System, Water Crisis, Urban Supply.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande disponibilidade hídrica em relação a outros países, porém o acesso à água passa por grande desigualdade regional. As regiões úmidas do Sul e Sudeste, onde vivem 60% da população, contavam, no passado, com amplas reservas de recursos hídricos. Porém, atualmente essas áreas passaram a enfrentar ameaça crescente de escassez de água, local ou generalizada, em decorrência do crescimento econômico e da urbanização acelerada, que só pode ser enfrentada através de um aprimoramento de gestão (MARENGO, TOMASELLA, NOBRE, 2010). A problemática da escassez de água no país é resultante também da falta de saneamento básico adequado em muitos municípios. O diagnóstico dos serviços de água e esgoto de 2014, disponibilizado no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), estima que 17 % dos municípios brasileiros ainda não são atendidos com rede de distribuição de água, sendo que na região Sudeste esse percentual é acima de 8 %. É importante considerar ainda as perdas de água tratada no processo de distribuição, onde este é existente, que chega a um valor médio no país de 36,7 %. Além disso, somente 40,8 % do total de esgotos gerados no país são tratados e cerca de 30 % do montante coletado é lançado nos corpos hídricos sem tratamento, o que obviamente prejudica o abastecimento urbano (BRASIL, 2016).

As mudanças climáticas, sejam naturais ou de origem antrópica, têm sido motivo de discussão e preocupação da comunidade científica e política, principalmente em relação ao setor de recursos hídricos. Este setor é um dos mais impactados, tanto no que se refere à qualidade, como também à quantidade da água (BREKKE *et al.*, 2009). Eventos extremos no Sul e partes do Sudeste do Brasil vêm sendo mais recorrentes desde 1950 (MARENGO, TOMASELLA, NOBRE, 2010). As mudanças climáticas podem aumentar a demanda por água e a pressão sobre as fontes de abastecimento. Isto se deve, principalmente, pelo aumento do uso de água na irrigação, consequência das chuvas irregulares, sendo este o setor de maior consumo (WANG *et al.*, 2014a). As projeções do CPTEC/INPE para 2071-2100, considerando um cenário de alta emissão de carbono, são de anomalias nulas a negativas de precipitação para todo o país, tanto no inverno quanto no verão (CPTEC, 2007), assim, existe uma tendência simulada de redução dos índices pluviométricos para toda a região. Os relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que as fontes de água doce são extremamente vulneráveis para suportar as mudanças climáticas previstas e que, somadas à variabilidade natural do clima, podem impactar o pressuposto fundamental da estacionariedade (BREKKE *et al.*, 2009), ou seja, podem alterar a variabilidade dos índices pluviométricos com o passar do tempo, prejudicando sua previsão.

Em 2013 e 2014 a pluviosidade total no sistema Cantareira apresentou um déficit de 30,7 % em relação à média histórica (2003-2014), correspondendo à pior seca dos últimos 84 anos em São Paulo (CERQUEIRA *et al.*, 2015). O volume útil original do sistema Cantareira (981,55 hectômetros cúbicos - hm³) esgotou-se no dia 11

de julho de 2014. Com os níveis de precipitação abaixo da média, foi utilizado o primeiro volume morto (182,47 hm³), esgotado após 4 meses de consumo, sendo necessário o acesso ao segundo volume morto (105,00 hm³). Os reservatórios do sistema Cantareira são abastecidos com as chuvas de outubro a março, que iniciaram o ano de 2015 com valores 51 % abaixo da média climatológica (CEMADEN, 2015a) e fecharam o mês de agosto de 2015 com volume útil de 12,3 % do volume original somado às duas cotas de volume morto (CEMADEN, 2015b).

A crise hídrica na região metropolitana de São Paulo levou a uma discussão inconsistente para encontrar o culpado pela situação: a falta de chuvas ou a falta de planejamento adequado? O fato é que a Agência Nacional de Águas (ANA) já destacava que o sistema de abastecimento de água na região não estava sendo satisfatório desde 2010, antes do atual período crítico (ANA, 2010). Além disso, diante do aumento no consumo, é equivocado atribuir a crise hídrica unicamente à redução da precipitação e sim como sendo um problema também de gestão (MARENGO, TOMASELLA, NOBRE, 2010).

Diante da atual situação torna-se essencial o estudo dos padrões de precipitação e das condições ambientais das áreas de contribuição dos mananciais de abastecimento. Essas medidas podem auxiliar em tomadas de decisão e na implantação de políticas públicas que diminuam a vulnerabilidade da população, posto que a crise é real, o consumo de água é crescente e as projeções climáticas são preocupantes.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a precipitação acumulada e o comportamento do reservatório Jaguari-Jacareí no período chuvoso de 2003 a 2014. Uma análise de tendência temporal de precipitação acumulada também foi conduzida nas sub-bacias hidrográficas principais onde o sistema Cantareira está inserido.

A análise aqui proposta visa verificar se a precipitação foi fator determinante para o abaixamento do reservatório, medido de forma indireta com o mapeamento de sua área superficial. Isso é importante para compreender a capacidade do reservatório em suprir a demanda de água independente da variação de precipitação disponível.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção descreve-se sucintamente a área de estudo do trabalho, assim como sua importância para o abastecimento urbano (item 2.1). Além disso, apresenta-se a metodologia utilizada, que compreende: a análise de índices pluviométricos, obtidos com dados observacionais da ANA (item 2.2); a análise da área superficial do principal reservatório do sistema Cantareira (item 2.3); e a análise da relação entre o comportamento do reservatório e os padrões de precipitação (item 2.4).

2.1 Área de estudo

A área de estudo pertence às sub-bacias

hidrográficas do Rio Piracicaba e do Alto Tietê, situadas no estado de São Paulo com divisa em Minas Gerais, que juntas possuem uma área de aproximadamente 24.140 km² (Figura 1-a). Ambas correspondem às *ottobacias* de nível quatro, disponibilizadas pela ANA. Esta codificação de bacias tem grande aplicação e é utilizada por diversas instituições, consistindo em uma delimitação com maior detalhamento a cada nível. Trata-se de um método hierárquico, proposto por Otto Pfafstatter em 1989, baseado na topografia e na área de drenagem dos afluentes e do rio principal de cada bacia (PFAFSTETTER, 1989).

A região de maior interesse corresponde à área de contribuição dos reservatórios do sistema Cantareira (Figura 1-b), correspondente à área de 11 *ottobacias* de nível seis, com cerca de 2.670 km², também disponibilizadas pela ANA.

O sistema de abastecimento do Cantareira

abrange seis reservatórios, ligados por túneis e canais: Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras. Todo o sistema consiste no maior produtor de água da região metropolitana de São Paulo, sendo responsável pelo abastecimento de cerca de nove milhões de pessoas na capital e nos municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Guarulhos (parte), Barueri (parte), Taboão da Serra (parte), Carapicuíba, Osasco, Santo André (parte) e São Caetano do Sul (ANA, 2015). Sua área produtora de água é de aproximadamente 227.950 ha, com vazão de 33 mil litros por segundo, dos quais 22 vêm do reservatório Jaguari-Jacareí (Figura 1-b). Este reservatório entrou em operação em maio de 1982, sendo formado por duas barragens e um canal de interligação de 670 m de extensão conectando os dois corpos centrais receptores dos rios Jaguari e Jacareí, constituindo-os em um só reservatório (WHATLEY e CUNHA, 2007).

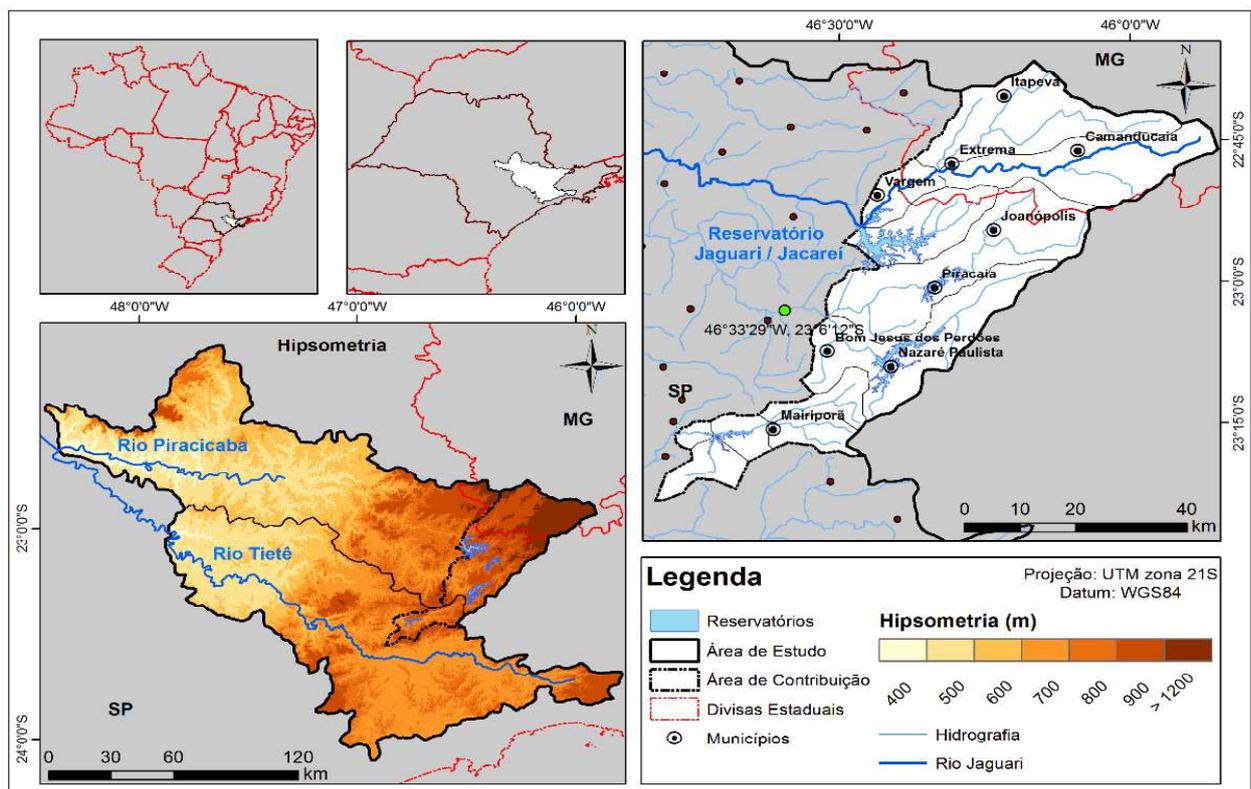


Fig. 1 - (a) Localização e hipsometria da área de estudo, abrangendo as sub-bacias do Rio Piracicaba e do Alto Tietê. (b) Área de contribuição dos reservatórios do sistema Cantareira e municípios inseridos.

Neste trabalho foi estudado o comportamento do reservatório principal Jaguari-Jacareí, que se origina e comunica com o restante da bacia pelo Rio Jaguari (Figura 1-b), se tornando o Rio Piracicaba em determinada altura da bacia

(Figura 1-a).

2.2 Análise da precipitação

Os dados de precipitação utilizados foram obtidos no portal *Hidroweb* da ANA,

compreendendo séries históricas de precipitação diária, medidas em estações pluviométricas. Estes dados são de responsabilidade de diversas entidades, com período de medição e qualidade bastante variável.

A ANA disponibiliza em sua plataforma o banco de dados Hidro 1.2, que contém um inventário de todas as estações com dados hidrológicos no país, além do programa Manejo de Dados Hidroweb, para conversão dos arquivos. O total de estações pluviométricas disponíveis dentro da área de estudo foi de 553 pontos.

As precipitações diárias foram convertidas para chuva acumulada no período chuvoso de 2003 a 2014, considerando os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF). No entanto, os dados de precipitação passaram por uma seleção de acordo com sua qualidade, já que muitos pontos possuíam falhas de vários anos de medição. Para cada ano foram selecionados somente os pontos com no mínimo 90% de dias com medição durante os três meses de estação chuvosa (80 dias), retornando 95 pontos disponíveis em 2003 e somente 30 em 2014, por exemplo. A Figura 2 apresenta a densidade de anos considerados no estudo por ponto amostral, de acordo com a escala de cor. É possível observar regiões com diferentes densidades de medição e que grande parte dos pontos disponíveis não foi considerada (pontos vazios). Cerca de 30 % dos pontos válidos possuem menos de seis anos considerados, devido a essa irregularidade nas medições, cada ano foi considerado de forma independente para aplicar o modelo geoestatístico.

Para verificar o comportamento da precipitação acumulada, na área de estudo, os dados pontuais foram espacializados por meio de interpolação dos valores no software Spring 5.2, gerando grades retangulares de resolução de 1 km x 1 km. Foram separados em cada ano, de forma aleatória, 75% dos pontos de medição disponíveis para interpolação e o restante para validação.

O método de interpolação utilizado foi a krigagem ordinária, sendo um método bastante utilizado na estimativa de dados pluviométricos (WANDERLEY, AMORIM & CARVALHO, *et al.*, 2013). Trata-se de um método probabilístico baseado na estacionariedade das amostras.

O estimador atribui pesos para as amostras de acordo com a correlação espacial entre elas, analisada através de um semivariograma (CAMARGO, FUCKS, CÂMARA, 2002). Foi realizada a krigagem para a precipitação do período chuvoso de cada ano estudado, após a análise do semivariograma (ver Figura 3), identificação da anisotropia das amostras, do raio de alcance e definição de um modelo de ajuste, variando entre: exponencial, gaussiano e esférico, como realizado por Mello e Oliveira (2016).

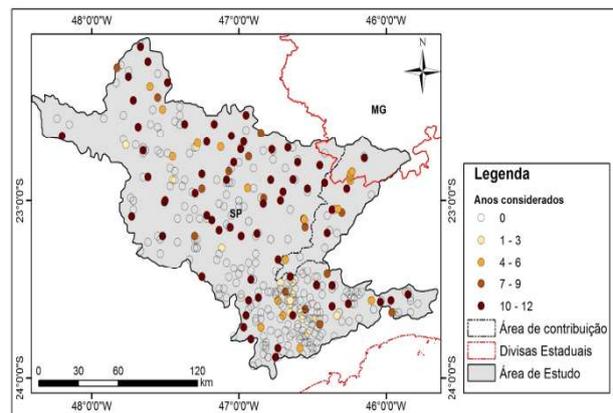


Fig. 2 - Número de anos de medição disponíveis em cada ponto amostral, na área de estudo.

O patamar, identificado na Figura 3, é o valor correspondente ao alcance do semivariograma, sendo a distância acima do qual não existe mais dependência espacial entre as amostras. Já o efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, representando, assim, a componente da variabilidade espacial que não se relaciona a uma causa específica, portanto, seu valor deve tender a zero e sua proporção ao valor do patamar deve ser a mínima possível (CAMARGO, FUCKS, CÂMARA, 2002; ANDRIOTTI, 2005). Dessa forma, a escolha do modelo de ajuste para cada ano teve como base esses preceitos, além da melhor correlação entre o semivariograma das amostras e do modelo.

A validação das grades interpoladas de precipitação acumulada também foi gerada no *Spring 5.2* (Tabela 1).

A verificação com pontos aleatórios, que não foram utilizados na interpolação, é importante para identificar a capacidade do modelo em estimar a variável estudada nas

regiões onde não houve medição. É esperado também que com um número maior de pontos de verificação a correlação com os pontos interpolados diminua (MARQUES *et al.* 2012). Isso se evidencia na Tabela 1, no qual 2014, que contou somente com 8 amostras de validação, obteve a correlação mais alta entre os valores gerados e observados. Porém, mesmo que alguns anos tenham apresentado baixo valor de R, como 2011, o erro médio é pequeno em proporção, já que o somatório de precipitação é relativamente mais alto. Assim, esse também é um resultado do arranjo espacial das amostras e da distribuição dos valores, não somente do número de amostras de verificação. Em 2006, por exemplo, a precipitação acumulada em DJF, para toda a área de estudo, oscilou de 434 a 896 mm, enquanto o erro médio gerado de 26,5 mm. Porém, os valores máximos e mínimos do erro aparentemente foram expressivos. Este pode ser um resultado característico de dados obtidos em redes pluviométricas, que apresentam uma série de incertezas e erros sistemáticos em relação à medição e à densidade de pontos amostrais (COLLISCHONN *et al.*, 2007). Tal característica dificulta o ajuste do modelo e a análise da variância espacial das amostras, podendo inserir erros nas análises realizadas. No entanto, os dados provenientes das estações meteorológicas ainda são uma fonte de informação em fina escala, a princípio, mais próxima da realidade. Através da interpolação desses dados é possível obter a precipitação em uma resolução muito mais detalhada, por exemplo, que a do dado orbital do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), de 0,25° (aproximadamente 25 km na região) (COLLISCHONN *et al.*, 2007). A krigagem ordinária pode ser recomendada para os dados pluviométricos, pois, de acordo com Camargo, Fucks e Câmara (2002), este interpolador consegue tratar melhor os grupos de dados, por atribuir diferentes pesos às amostras, o que não ocorre na utilização de outros modelos determinísticos. Como o resultado da interpolação também é dependente da qualidade e distribuição dos pontos de medição, em alguns casos os modelos determinísticos, como o *Spline* e o Inverso da Distância Ponderada, podem gerar melhores resultados (MAGALHÃES *et al.*, 2013), por criarem superfícies mais suavizadas. Porém, a krigagem ordinária possui grande

potencial de representar a variabilidade espacial dos dados pluviométricos (SILVA *et al.*, 2011; MELLO; OLIVEIRA, 2016). Os modelos aqui ajustados após diversos testes, e verificados segundo a Tabela 1, foram considerados como satisfatórios, pois a maioria dos anos estudados ou tiveram forte correlação positiva ou baixo erro médio entre os dados gerados e observados.

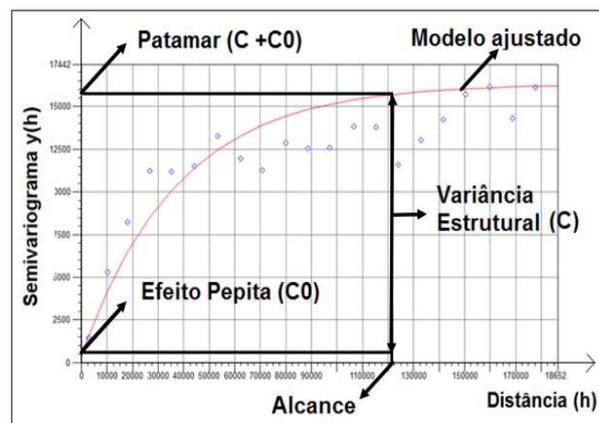


Fig. 3 - Exemplo de semivariograma de um modelo ajustado para as amostras de precipitação acumulada.

Tabela 1: Validação das grades geradas de precipitação acumulada na interpolação por krigagem

Ano	Nº de Amostras	Estatística do Erro				Coef. de Pearson (R)
		Média	Desvio padrão	Valor mín.	Valor máx.	
2003	25	-39,3	148,3	-533,6	244,1	0,222
2004	23	1,6	133,0	-274,1	260,3	0,537
2005	25	5,5	107,8	-184,9	182,0	0,461
2006	21	26,5	98,5	-214,6	216,1	0,070
2007	22	21,8	85,0	-143,9	179,7	0,778
2008	21	18,2	72,3	-141,1	140,0	0,534
2009	18	-55,5	109,7	-303,5	175,3	0,643
2010	25	-47,9	190,4	-565,1	353,9	0,298
2011	24	1,3	173,2	-474,6	419,9	0,285
2012	24	34,8	196,5	-237,8	655,8	0,079
2013	25	-58,8	157,1	-667,1	110,6	0,532
2014	8	10,5	32,9	-43,2	63,0	0,928

As grades retangulares de precipitação foram incorporadas em uma matriz de dimensão N com mesmo número de linhas e colunas, correspondentes aos pixels da área de estudo, onde N é cada ano estudado. Cada pixel foi então considerado como uma série com 12 anos (N=12) de precipitação acumulada no período

chuvoso (DJF). Através da regressão linear da série de cada pixel, conduzida no software *MATLAB*, obteve-se a medida de tendência anual da precipitação, associada ao coeficiente angular da reta. Assim, coeficientes positivos foram atribuídos como tendência de aumento de precipitação e coeficientes negativos à tendência de diminuição na precipitação acumulada.

2.3 Análise da área superficial do reservatório Jaguari-Jacaré

O comportamento do reservatório Jaguari-Jacaré foi avaliado a partir da área do espelho d'água, obtida por meio da classificação de imagens orbitais.

Foi utilizada a banda 5 das imagens *TM/Landsat*, obtidas no catálogo do INPE e identificadas na Tabela 2. A banda 5 corresponde ao infravermelho médio, faixa do espectro eletromagnético de grande interação com a água (JENSEN, 2011). As imagens foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de cenas sem cobertura de nuvens. Isso influencia nos resultados encontrados, pois devido à pouca disponibilidade de imagens nem todos os anos tiveram uma representação do reservatório próxima ao período chuvoso. Porém, tal influência pode ter sido minimizada ao correlacionar a área classificada com a precipitação acumulada e não com a precipitação mensal.

Tabela 2: Imagens utilizadas na classificação da área superficial do reservatório Jaguari-Jacaré

Ano	Sensor/ Plataforma	Órbita/ ponto	Data	Resol.
2003	TM/ Landsat 5	219/ 076	20/07/2003	30 m
2004			03/05/2004	
2005			06/05/2005	
2006			12/07/2006	
2007			25/03/2007	
2008			17/07/2008	
2009			01/05/2009	
2010			18/04/2010	
2011			21/04/2011	
2012			LISS/ Resourcesat	
2013	04/05/2013			
2014	19/11/2014			

Utilizou-se a classificação supervisionada por pixel para as classes: água, vegetação e solo. O treinamento das amostras foi realizado com mesmo critério para as 12 imagens analisadas. O classificador utilizado foi o

maxver do software *Spring 5.2*, com limiar de aceitação de 100 %, baseado na máxima verossimilhança entre os níveis digitais das classes. Após a classificação da imagem de cada ano foi feito o mapeamento somente da classe água. Posteriormente foi realizada uma análise visual da qualidade da classificação do reservatório, corrigindo manualmente suas bordas e obtendo assim um único polígono, correspondente a área superficial em cada ano.

2.4 Relação entre precipitação e área superficial do reservatório

Foi verificada a correlação da precipitação, na área de estudo, com o comportamento do reservatório. Portanto, cada pixel das grades de chuva acumulada, de 2003 a 2014, foi considerado como um vetor de 12 posições, assim como a área do reservatório. O coeficiente de correlação de *Pearson* (R) foi utilizado como medida de correlação, em cada pixel, através da regressão linear dos vetores de chuva com o vetor de área superficial do reservatório, conduzida no software *MATLAB* (nível de confiança de 95%). O R é um coeficiente adimensional que mede o grau e a direção da correlação linear, podendo variar de -1 a 1, no qual o valor 0 significa correlação nula entre as duas variáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no trabalho. No item 3.1 é possível compreender a variação anual e a tendência dos índices pluviométricos na área de estudo, assim como a evolução da demanda hídrica. Já no item 3.2 discute-se a forte influência dos índices de precipitação no comportamento do reservatório.

3.1 Análise da precipitação

A Figura 4 apresenta a precipitação acumulada nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, para toda a área de estudo, interpolada por meio da krigagem ordinária, de 2003 a 2014. As regiões em cores quentes correspondem a valores abaixo de 800 mm.

Os anos de 2010 e 2011 apresentaram os maiores índices pluviométricos, com valores acima de 1200 mm em algumas regiões, inclusive na área de contribuição dos reservatórios. Em 2005 a precipitação acumulada foi relativamente baixa em grande parte da área de estudo, já nos demais anos, até 2009, valores médios de precipitação entre 400 e 900 mm foram observados. A partir de 2012 a precipitação

acumulada volta a diminuir, apresentando em 2014 valores anômalos para o período, no qual os índices não atingiram os 400 mm em toda a área de estudo, e, algumas regiões não alcançaram 200 mm (Figura 4).

A precipitação no Sul e Sudeste do país é fortemente influenciada pelos eventos de El Niño - Oscilação Sul (ENOS), devido à alteração da circulação atmosférica, como resposta às anomalias na temperatura do Oceano Pacífico Equatorial. Os anos de 2004 e 2005 foram marcados com a ocorrência de El Niño Modoki, que desencadeou anomalias negativas de precipitação no Sul e Sudeste do Brasil. Já 2009 e 2010 apresentaram a ocorrência de El Niño Canônico, que, ao contrário do Modoki, gera anomalias positivas de precipitação (TEDESCHI & CAVALCANTI, 2010). No ano de 2014 o ENOS não caracterizou nenhum evento predominante (NOAA, 2015a).

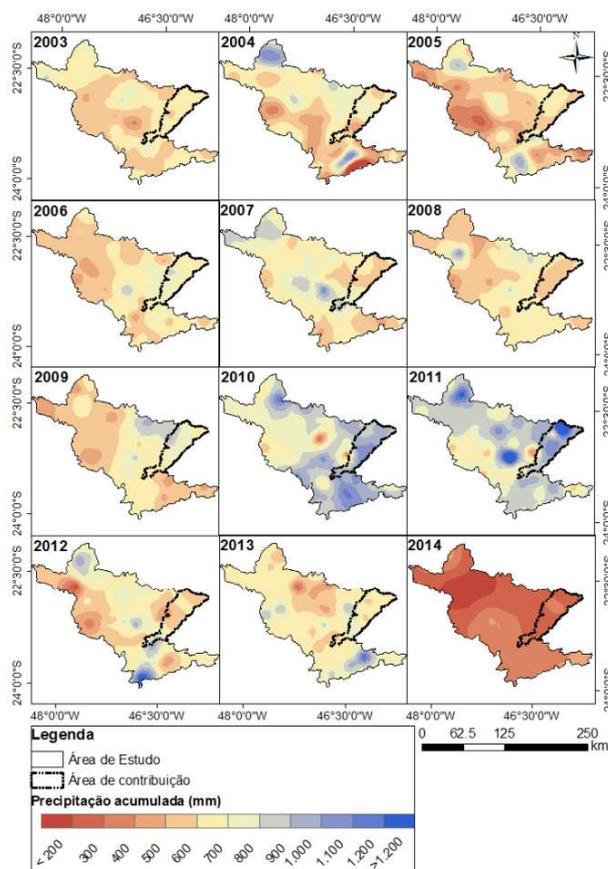


Fig. 4 - Precipitação acumulada (DJF) de 2003 a 2014 na área de estudo e destaque para a área de contribuição do sistema Cantareira.

A Figura 5-a apresenta o coeficiente angular da regressão linear, associado à tendência da chuva acumulada de 2003 a 2014. As regiões em

amarelo e vermelho são associadas à tendência de diminuição da precipitação, já as regiões em azul à tendência de aumento. É importante ressaltar que mesmo as regiões com coeficientes positivos apresentaram índices pluviométricos muito baixos em 2014 (Figura 4), porém, a alta precipitação de 2010 e 2011 pode ter influenciado na regressão linear.

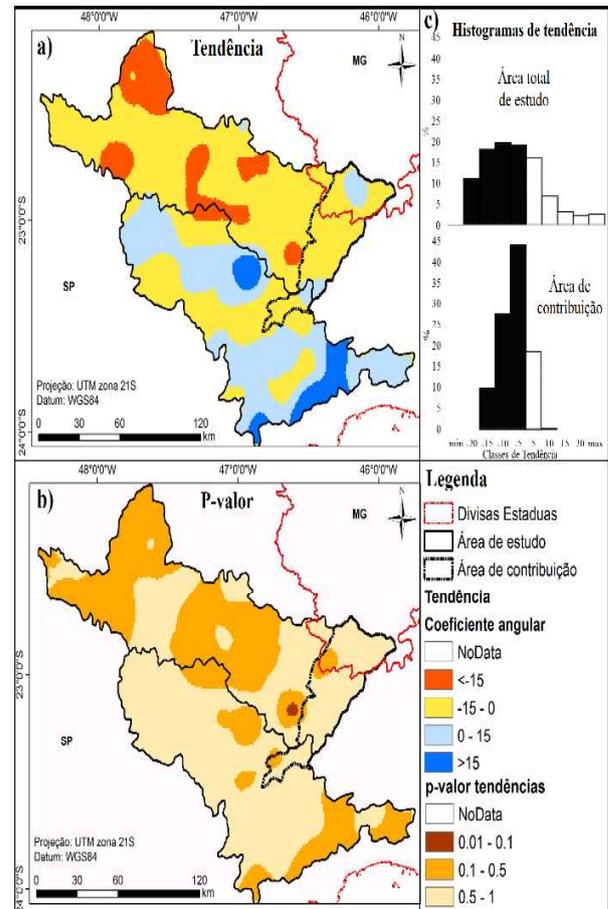


Fig. 5 - (a) Coeficiente angular da regressão linear, relativo à tendência de precipitação acumulada (DJF) de 2003 a 2014; (b) p-valor referente à significância das tendências; (c) histogramas das classes de tendência na área de estudo e na área de contribuição dos reservatórios.

Existe predominância de coeficientes negativos na sub-bacia do Rio Piracicaba, enquanto a sub-bacia do Alto Tietê apresenta valores positivos expressivos (ver Figura 1 e 5-a). Já a área de contribuição dos reservatórios, em comparação com a área total de estudo, apresentou predominância de coeficientes negativos, 81,5 % contra 68,9 %, respectivamente. Esse comportamento também pode ser observado na Figura 5-c, que apresenta os histogramas das classes de tendência, no qual nota-se maior

porcentagem de área com classes negativas dentro da área de contribuição dos reservatórios.

A Figura 5-b apresenta as significâncias dos coeficientes angulares gerados na regressão linear. Como pode ser observado, mesmo que os coeficientes sejam predominantemente negativos estes não são significativamente diferentes de zero pela estatística *t*, o que indica que não há tendência significativa nas séries de precipitação acumulada de cada pixel. Pode-se considerar uma significância mínima de 10 % em apenas uma pequena área em marrom na Figura 5-b próxima à divisa da área de contribuição.

Ficou evidente que para o período estudado (2003 - 2014) o ano de 2014 apresentou os índices pluviométricos mais baixos e anômalos (Figura 4 e 6), ou seja, distantes da média. Porém, avaliando a série histórica das anomalias de precipitação acumulada no período chuvoso de uma única estação pluviométrica (calculada em referência a 1940-2014), localizada no município de Atibaia (a aproximadamente 23 km a sudoeste do reservatório Jaguari-Jacareí), observam-se outros períodos com sinais negativos também bastante expressivos (Figura 6). As anomalias foram obtidas pela diferença da precipitação acumulada de cada ano com a média histórica (1940-2014), normalizadas com o desvio padrão. Exemplo é o período de 1984 a 1986 e o ano de 1992, com forte anomalia negativa, que veio seguindo um período contínuo de anomalias negativas, com exceção de 1987 e 1991. Nos anos de 1996 e 2001 também se observam fortes sinais negativos, no entanto, estes anos sucederam períodos longos de anomalia positiva, o que pode não ter afetado tão drasticamente o reservatório, devido à recarga anterior.

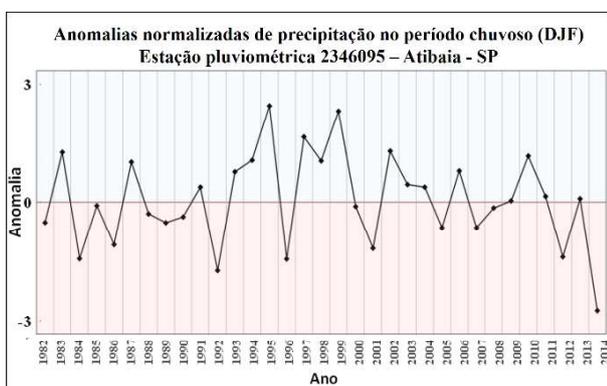


Fig. 6 - Anomalias normalizadas da precipitação acumulada em DJF em Atibaia-SP de 1982 a 2014 (referência 1940-2014).

De acordo com Wang *et al.* (2014b) efeitos do ENOS e de eventos extremos de seca podem ser fortemente intensificados quando a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) está em fase com o ENOS, sendo que 1986 e 1991/1992 foram alguns dos anos em que a fase quente de PDO coincidiu com a fase positiva do ENOS, já em 2005, 2007 e 2008 ambos estiveram em fase fria. De 2013 para 2015 ambos os índices passaram de fase fria para fase quente (NOAA, 2015a; NOAA, 2015b), podendo ter agravado os eventos de anomalia negativa de precipitação.

Segundo a Defesa Civil o número de registros de desastres naturais por seca ou estiagem vem aumentando exponencialmente, e tiveram picos expressivos em 1991, 2002, 2003, 2005, 2009 e 2012 (CEPED, 2013). O ano de 2014 teve um total de 1.265 municípios brasileiros com decreto de emergência por seca ou estiagem, sendo que a situação se prolongou por 2015. As consequências das anomalias de precipitação foram fortemente sentidas pela população dependente do sistema Cantareira, no qual vários municípios recorreram ao racionamento de água (COSTA, 2015). A situação se agrava ao verificar o crescimento da população dos municípios abastecidos, de 1991 a 2010, diretamente relacionado ao consumo de água (Tabela 3). Um crescimento populacional acima de 50% foi observado em oito de 11 municípios de 1991 a 2015, sendo no total quase 3,4 milhões de pessoas. Isto denota o aumento de demanda por água, e, aumento de pessoas vulneráveis aos desastres naturais. A combinação do aumento da demanda e a escassez de chuva podem ser, portanto, considerada causadora da severidade da crise hídrica, durante o período analisado. A demanda de água desses municípios presentes na Tabela 3, que em parte são abastecidos pelo Cantareira, alcançou em 2015 mais de 55 mil L.s⁻¹ e as projeções para 2025 é que esse valor ultrapasse 58 mil L.s⁻¹, e, de acordo com a ANA (2015), todos esses municípios requerem novo manancial de abastecimento. Assim, o planejamento do setor de abastecimento de água não acompanhou o crescimento demográfico, que por si só foi um problema.

Tabela 3: População e demanda de água dos municípios abastecidos pelo sistema Cantareira

Município	População			Demanda Média (L/s)	
	1991**	2005*	2015*	2005*	2015*
São Paulo	9.646.185	10.363.201	11.372.883	44.736	45.903
Guarulhos	787.866	1.224.640	1.546.812	3.395	4.160
Osasco	568.225	701.234	784.153	2.864	3.161
Carapicuíba	283.661	377.477	438.174	1.134	1.332
Barueri	130.799	249.716	329.856	979	1.233
Francisco Morato	83.885	143.177	172.127	448	518
S. Caetano do Sul	149.519	143.560	151.737	551	567
Franco da Rocha	85.535	112.875	145.173	507	619
Santana de Parnaíba	37.762	93.574	129.479	263	363
Caieiras	39.069	75.220	96.882	278	382
Cajamar	33.736	52.907	69.426	141	174
Total	11.846.242	13.537.581	15.236.702	52.129	55.789

Fonte*: ANA (2015). Fonte**: IBGE (2015).

3.2 Precipitação versus reservatório

A Figura 7 apresenta a área superficial do reservatório Jaguari-Jacareí em 2003 (Figura 7-a) e em 2014 (Figura 7-b), classificadas com imagens *TM/Landsat 5* e *LISS/Resourcesat*, respectivamente. O reservatório perdeu 51 % de sua área superficial em 2014 em relação a 2003, e, 44 % em relação a 2013, o que caracteriza uma resposta muito rápida em relação às anomalias de precipitação.

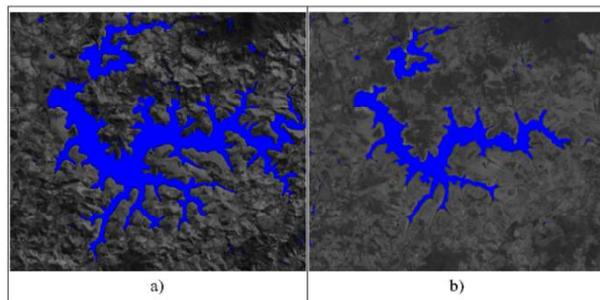


Fig. 7 - Área do Reservatório Jaguari-Jacareí classificada em a) 2003 e b) 2014.

A Figura 8 apresenta a média espacial da precipitação acumulada (DJF) em toda a área de contribuição, para cada ano, e a respectiva área do reservatório. A precipitação média do período também pode ser visualizada. É possível verificar

que o reservatório foi fortemente afetado pelos índices pluviométricos na sua área de contribuição, principalmente de 2013 para 2014. A correlação de Pearson (R) entre as duas variáveis foi de 0,89 e o modelo explicou 78,5 % dos valores observados (R^2) (p-valor = 0,0001). No entanto, as transições 2003/2004 e 2012/2013 mostraram queda na área do reservatório mesmo sem a precipitação ter apresentado alteração, o que pode ser relativo à alta demanda de água. O comportamento inverso foi observado em 2004/2005 e 2007 e 2008. Além disso, em 2009 o reservatório praticamente apresentou sua maior área superficial no período, enquanto a precipitação esteve próxima da média. Dessa forma, a recarga do reservatório, por meio da precipitação, não explica totalmente seu comportamento, mas possui forte relação. É também importante ressaltar que a data de obtenção das imagens orbitais pode ter influenciado nesse comportamento. Por exemplo, em 2003, 2008, 2012 e 2014 as imagens correspondem à estação seca, favorecendo que a lâmina d'água seja menos extensa. Assim, essa correlação poderia ser ainda mais alta se todas as imagens fossem correspondentes ao mesmo período do ano.

O coeficiente de correlação de *Pearson* (R) entre cada pixel de chuva acumulada em DJF e a área do reservatório, de 2003 a 2014, pode ser observado na Figura 9.

Cerca de 80 % da área de estudo apresenta coeficiente de correlação significativo (p-valor<0,05) entre precipitação e área do reservatório, sendo que a classe de R acima de 0,82 (p-valor<0,001) ocupa quase 20 % da área de estudo. Na área de contribuição os valores de R foram predominantemente superiores a 0,7 (p-valor<0,01).



Fig. 8 - Precipitação média na área de contribuição e área superficial do Reservatório Jaguari-Jacareí 2003-2014.

É fato que os reservatórios dependem dos períodos chuvosos para recuperação das cotas, no entanto, como cita Cerqueira *et al.* (2015), o represamento se justifica exatamente para acumular água em períodos úmidos e transferir o estoque ao longo do tempo, de forma a suprir a demanda em períodos secos, o que não ocorreu satisfatoriamente na crise hídrica de 2014.

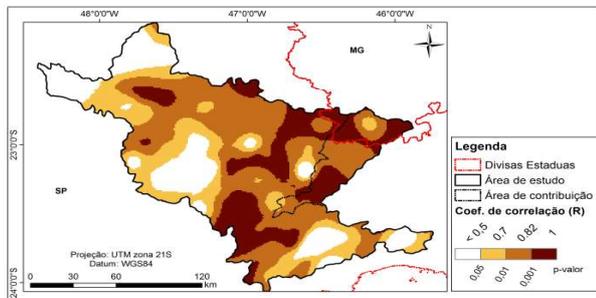


Fig. 9 - Coeficiente de correlação por pixel entre precipitação acumulada em DJF e a área superficial do reservatório 2003-2014.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A precipitação acumulada na estação chuvosa foi extremamente mais baixa em 2014 em relação aos 12 anos estudados, causando um drástico abaixamento no reservatório principal do sistema Cantareira. A situação se agravou devido ao sistema de abastecimento da região já não estar satisfatório antes deste evento de estiagem, e, aos municípios abastecidos terem apresentado grande crescimento populacional nas últimas décadas. Isso demonstra que a gestão da bacia hidrográfica não foi satisfatória para conter a variabilidade climática, afinal o crescimento da população/demanda é gradativo. Contudo, as devidas providências não foram tomadas para que o sistema de abastecimento pudesse suportar um período anômalo de precipitação, ou seja, os esforços no gerenciamento hídrico não aumentaram também gradativamente, sendo esta uma medida imprescindível em uma região tão vulnerável a eventos extremos. Portanto, a crise hídrica foi potencializada, já que outros eventos de anomalia negativa de precipitação acumulada, também de forte magnitude, foram observados desde a implantação do reservatório. Por exemplo, em 1992 (ano em que ocorreu forte anomalia negativa de precipitação) a área superficial do reservatório, classificada conforme a mesma metodologia aplicada, foi de 33,4 km² (dados não apresentados aqui), similar à área no ano de 2007, que apresentou precipitação acumulada próxima à média do período, enquanto em 2014 esse valor foi de 15,5 km².

A estiagem se mostrou crítica para o abastecimento de água, pois o comportamento do Reservatório Jaguari-Jacaré teve forte correlação com a precipitação acumulada em dezembro, janeiro e fevereiro, em toda a área de estudo e principalmente em sua área de contribuição. Isso confirma que o sistema não está sendo capaz de suportar

períodos anômalos, pois nos últimos anos o reservatório está respondendo diretamente à precipitação disponível. Esperava-se que seu funcionamento permitisse uma menor variabilidade no abastecimento, contrária, por exemplo, à das vazões dos cursos superficiais de água, que são diretamente proporcionais ao regime pluviométrico. Assim, se torna bastante preocupante a situação deste sistema de abastecimento urbano se a crise de 2014 for subestimada pelos tomadores de decisão, podendo gerar colapsos ainda maiores.

A área de contribuição do sistema Cantareira apresenta predominância de tendências negativas de precipitação acumulada, o que aumenta a preocupação com a crise hídrica na região. Porém, estas tendências não são significativas, o que pode ser devido à ocorrência também de anos com alta precipitação acumulada no período (2003-2014) e/ou ao período da série analisada, de apenas 12 anos. O comportamento da precipitação acumulada pode ter sido resultado das oscilações climáticas de ENSO e PDO, no entanto, tal relação necessita de um estudo mais aprofundado.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES pela bolsa de pós-graduação e ao CNPq pela bolsa de produtividade concedida ao segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Atlas Brasil: Abastecimento de água urbano**. Agência Nacional de Águas, 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=6>> Acesso em 07 de setembro de 2015.

ANA. **Sistema Cantareira**. Agência Nacional de Águas, 2015. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/sistemacantareira.aspx>> Acesso em 05 de junho de 2015.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Coleção Manual Universitário. São Leopoldo/RS. 1ª reimpressão. 2005. 165 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.

BREKKE, L. D.; KIANG, J. E.; OLSEN, J. R.; PULWARTY, R. S.; RAFF, D. A.; TURNIPSEED, D. P.; WEBB, R. S.; WHITE, K. D. **Climate Change and Water Resources Management: A**

- Federal Perspective. **United States Geological Survey Circular 1331**, 2009. 65 p.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. Capítulo 3. In: **Análise espacial de dados geográficos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2002. 38 p.
- CEPED. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012**. 2ª edição revisada e ampliada. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 127 p.
- CEMADEN. **Relatório da Situação Atual e Previsão Hidrológica para o Sistema Cantareira**. São José dos Campos, 29 de janeiro de 2015. 2015a. 11 p.
- CEMADEN. **Relatório da Situação Atual e Previsão Hidrológica para o Sistema Cantareira**. São José dos Campos, 26 de agosto de 2015. 2015b. 8 p.
- CERQUEIRA, G. A. *et al.* **A Crise Hídrica e suas Consequências**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, abril/2015. (Boletim Legislativo nº 27, de 2015). 32 p. Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/boletins-legislativos/bol27>> Acesso em 05 de junho de 2015.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satellite TRMM na estimativa de precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 59, ed. 1, p. 93-99, 2007.
- COSTA, L. M. 2015 já registra 932 municípios em situação de emergência por seca ou estiagem. **Sanear**, n. 26, p. 14-16, 2015.
- CPTEC. **Atlas de Cenários Climáticos Futuros para o Brasil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Cachoeira Paulista, 2007. 124 p.
- HIDROWEB. **Sistema de Informações hidrológicas**. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <hidroweb.ana.gov.br> Acesso em 22 de abril de 2015.
- IBGE. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>> Acesso em 10 de set de 2015.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**. 2º Edição Traduzida. Editora Parêntese. 2011. 598 p.
- MAGALHÃES, I. A. L.; ALMEIDA, K. L.; THIAGO, C. R. L.; JUNIOR, B. S. G.; ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A. Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo, Brasil. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. Foz do Iguaçu, p. 5651-5657, 2013.
- MARENGO, J.; TOMASELLA, J.; NOBRE, C. (2010) Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos. Capítulo 12, (pp-200-215). Em BICUDO, C.E.M.; TUNDISI, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B. Águas do Brasil: análises estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica. 222 p.
- MARQUES, A. P. S.; JUNIOR, J. M.; AMORIM, A.; FLORES, E. F. Aplicação do interpolador krigagem ordinária para a elaboração de planta de valores genéricos. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 64, vol. 2, p. 175-186, 2012.
- MELLO, Y. R. de; OLIVEIRA, T. M. N. de. Análise Estatística e Geoestatística da Precipitação Média para o Município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Cartografia**. v.31, n.2, p.229-239, 2016.
- NOAA. Climate Prediction Center: **El Niño Southern Oscillation (ENSO)**. 2015a. Disponível em: <www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml> Acesso em: 09 de set de 2015.
- NOAA. National Centers for Environmental Information: **Pacific Decadal Oscillation (PDO)**. 2015b. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>> Acesso em: 09 de set de 2015.
- PPAFSTETTER, O. **Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação**. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989. 19 p. Trabalho não publicado.
- SILVA, K. R.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; GARCIA, G. O. Interpolação Espacial da Precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, p.417-427, 2011.
- TEDESCHI, R. G.; CAVALCANTI, I. F. A.

Influência dos ENOS Canônico e Modoki na precipitação da América do Sul. São José dos Campos: INPE, 2010. 14 p.

WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C.; CARVALHO, F. O. Interpolação Espacial da precipitação no estado de Alagoas utilizando técnicas geoestatística. **Campo Digital: Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias.** v.8, n.1, p. 34-42, 2013.

WANG, X.; ZHANG, J.; SHAHID, S.; GUAN, E.; WU, Y.; GAO, J.; HE, R. Adaptation to climate change impacts on water demand. **Mitigation Adaptation Strategies for Global Change**, n. 21, p. 81-99, 2014a. DOI: 10.1007/

s11027-014-9571-6.

WANG, S.; HUANG, J.; HE, Y.; GUAN, Y. Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry-Wet Changes. **Scientific Reports**, v. 4, n. 6651, p. 1-8, 2014b. DOI: 10.1038/srep06651.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006:** Um olhar sobre o maior manancial de água da região metropolitana de São Paulo. Resultados do diagnóstico socioambiental participativo do Sistema Cantareira. Instituto Socioambiental, São Paulo, 2007. 67 p.