**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Balanço hídrico climático distribuído como suporte a decisão para
ações de restauração florestal na bacia do rio Piracicaba**

Cássio Bueno Maia

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

**Piracicaba
2016**

Cássio Bueno Maia
Licenciatura Plena em Geografia

**Balanço hídrico climático distribuído como suporte a decisão para ações
de restauração florestal na bacia do rio Piracicaba**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SILVIO FROSINI DE BARROS FERRAZ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Conservação de
Ecossistemas Florestais

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Maia, Cássio Bueno

Balanço hídrico climático distribuído como suporte a decisão para ações de restauração florestal na bacia do rio Piracicaba / Cássio Bueno Maia. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
79 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Disponibilidade hídrica 2. Balanço hídrico 3. Reflorestamento 4. Restauração florestal I. Título

CDD 634.9224
M217b

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Finalmente. O sonho de uma vida está um passo mais próximo. Para todos aqueles que acreditaram que era possível e que valeria a pena, *muitas vezes mais do que eu era capaz de imaginar*. Dedico.

AGRADECIMENTOS

Para as pessoas que me ofereceram tanto e que nunca poderei retribuir toda a generosidade reconheço e agradeço a realização deste trabalho. Ao prof. Silvio Ferraz por nunca duvidar da minha capacidade, não permitir desistir e que nos momentos mais complicados sempre me apoia e incentiva. Ao pessoal do Laboratório de Hidrologia Florestal - LHF, que pode ser comparado à uma floresta, onde as pessoas são árvores nobres, envoltas em águas puras e abundantes, apaixonadas pelo que fazem e que contagiam os "próximos" (tanto os que estão por perto como os que vão chegar). Ao inspirador prof. Walter de Paula Lima sempre presente com sua paciência, perspicácia e conhecimento. Ao Frederico Miranda, Vinícius Guidotti de Faria, Yuri Arten Forte e Carla Cristina Cassiano que dividem comigo este projeto desde o processo seletivo, quando fizemos a mesma prova, até chegar aqui muitos desafios foram superados (a Carla ainda vai mais longe até terminar o doutorado).

Ao chegar ao LHF havia bastante gente, Maureen Voigtlaender, Carolina Bozetti Rodrigues, Aline Fransozi, Lara Gabrielle Garcia, Paulo Guilherme Molin, Ricardo Hideo Taniwaki, Vanessa Erler Sontag, Rodrigo Anzolin Begotti, Jéssica Villela Sampaio e Leandro Balistieri, esses eram os mais assíduos em uma época em que eu precisava de um "mapa" com as coordenadas e o nome de cada um para não confundir as pessoas...

Alguns foram de época e passagem como a Maíra Ometto Bezerra, Rodrigo Hakamada, Nathalia da Mota P. V. Ribeiro, Ana Cristina André, Daniela Veras, Tatima Kerbauy M. Cardoso, Bruno Portes, Carlos Divino Guimarães Silva, Nathália Bernardes Ribeiro, Mathiew Almeida, Rafaela Freitas Pavani, Felipe Rossetti de Paula, Gabriel Lourenço Brejão, Laura de Melo Azevedo, Caio Soares Gallego, Victor Rosário, Bruna Caroline Juliani, Arthur Vrechi e certamente alguém que eu não consigo lembrar o nome agora e que entre conversas e ideias ajudaram.

Mais pessoas se juntaram, a Clarissa de Araújo Barreto, Renata Siqueira Melo, Carla Riovani Chiles, Luiz Felipe Salemi e como nada é eterno muitas pessoas continuaram suas jornadas em outras vizinhanças. Assim como alguns "vizinhos" tiveram importante contribuição, prof. Luciano Martins Verdade, prof. Felipe Gustavo Pilau, Rafael Mingoti, Michel Metran da Silva, Clayton Alcarde Alvares, Rogério Oliveira Naressi, Jefferson Lordello Polizel, Giovana Oliveira, não

poderia deixar de agradecer também aos docentes com quem cumpri os créditos exigidos e que muito me ensinaram, profa. Teresa Cristina Magro, profa. Maria Antonia Ramos de Azevedo, prof. Rubens Angulo Filho, prof. Peterson Ricardo Fiorio, prof. Carlos Alberto Vettorazzi e prof. Silvio Frosini de Barros Ferraz.

Em outra vertente tive o suporte e o apoio dos amigos do CLQ, Cléber, Viviani, Douglas, Maurício, Nanci, Satie, Fabio, Marcos, Tais e todos aqueles que torceram, incentivaram, acreditaram e tiveram a paciência em aguardar nos momentos em que era impossível estar presente na empresa. E também nos momentos em que mesmo presente o peso da jornada me consumia o ânimo e o humor. Vocês foram incríveis.

Algumas pessoas se fizeram fundamentais neste projeto e dispuseram de tempo, disposição, empenho e trabalho, muito trabalho, especialmente a Lara que de maneira desprendida e desmedida me ajudou mais do que é possível agradecer, a Carol com sua determinação me instiga a enfrentar minhas limitações, o Vinícius que pacientemente me ajuda em todos os momentos que preciso, a Aline que sempre dá um jeito de colocar um tempo para colaborar no seu dia de 30 horas, a Carla que além de ajudar têm a risada mais legal que eu já ouvi, o Garmin que é o cara mais "sortudo" que conheço e me ensinou os primeiros passos com SIG.

Pessoas muito especiais me acolheram, me aceitaram e me incentivaram no caminho dessa retomada aos estudos. Encontrei na convivência e em meio a avalanche de coisas que aconteceram neste tempo de LHF, pessoas que valem muito a pena passar o tempo e tenho o privilégio de desfrutar a amizade, dividir as angústias, receber o incentivo, compartilhar o café e as risadas.

As horas infindáveis de estudo durante as madrugadas, finais de semana, que me custaram as conversas sem compromisso nos cafés da tarde dos sábados, muitos almoços de domingo, os passeios de férias, todas as coisas importantes que precisei abrir mão, aos aniversários que não pude estar presente, e aos desafios que só pude suportar por ter a melhor família que alguém pode desejar. Denir e Regina, Thomaz e Bete, Camila, Caroline, Caio, Daniel, Tata e todo mundo. Paula Fernanda a pessoa mais importante da minha vida e Matheus Henrique o meu maior orgulho. Agradeço.

“O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência acumula conhecimento mais rapidamente que a sociedade acumula sabedoria”.

Isaac Asimov - 1988.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 MATERIAL E MÉTODOS	27
2.1 Área de estudo.....	27
2.2 Balanço Hídrico Climático Distribuído (BHCD).....	28
2.3 Métodos	29
2.4 Modelo digital de elevação.....	30
2.5 Solos	30
2.6 Variáveis atmosféricas	31
2.7 Análise de agrupamento	38
2.8 Uso do solo	39
3 RESULTADOS	41
3.1 Balanço hídrico climático distribuído (BHCD)	41
3.2 Comparação entre o BHC e o BHCD.....	46
3.3 Análise de agrupamento das variáveis	49
3.4 Caracterização dos agrupamentos	52
4 DISCUSSÃO	55
5 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS.....	65
ANEXOS	71
APÊNDICE	77

RESUMO

Balanço hídrico climático distribuído como suporte a decisão para ações de restauração florestal na bacia do rio Piracicaba

A escassez hídrica devido às baixas vazões e problemas de captação de água são objeto de debates e conflitos na bacia hidrográfica do rio Piracicaba. A restauração florestal é tida como uma alternativa para a minimização destes conflitos. No entanto, as florestas modificam significativamente os processos hidrológicos, influenciando a dinâmica da água na bacia hidrográfica. Portanto, a fim de se obter disponibilidade hídrica a longo prazo, é necessário identificar as áreas aptas para a restauração florestal, onde os efeitos sejam positivos para os recursos hídricos. Dentro deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo utilizar um modelo hídrico climático distribuído para espacializar as características hídricas e climáticas favoráveis, ou não, à restauração florestal. Para isto, foi utilizada a bacia hidrográfica do rio Piracicaba como área de estudo (12.500 km²). Foram obtidos dados mensais normais de precipitação, temperatura, radiação solar, topografia e capacidade de armazenamento de água no solo, distribuídos espacialmente na bacia hidrográfica. A partir destas informações, foi calculado o balanço hídrico climático distribuído (BHCD) através da ferramenta “Water Balance”, que calcula a evapotranspiração potencial e real, o déficit e o excedente hídrico em um ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas). Os resultados foram comparados com o balanço hídrico climático (BHC), tradicional ou pontual, e uma análise estatística de agrupamentos de áreas com características hidrológicas semelhantes foi realizada. A divisão da bacia hidrográfica em classes (ou grupos) com características semelhantes permite compreender a sensibilidade natural das áreas e possíveis efeitos na disponibilidade hídrica. A capacidade de determinar, em diferentes escalas de estudo, a dinâmica dos recursos hídricos possibilitou melhores condições de análise diante da heterogeneidade natural da bacia hidrográfica. Os dados gerados permitiram identificar áreas onde as recomendações locais podem ser feitas com base nas variáveis do balanço hídrico. Dessa forma, a espacialização das variáveis e o agrupamento por características hidrológicas são ferramentas que podem ser utilizadas em projetos de restauração florestal, uma vez que podem subsidiar decisões a respeito das áreas mais favoráveis a restauração florestal.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica; Balanço hídrico; Reflorestamento;
Restauração florestal

ABSTRACT

Climatic water balance distributed as decision support for forest restoration in Piracicaba river basin

Water shortage due to low flows and water basin capitation problems are subject of debates and conflicts in Piracicaba river basin. Forest restoration is an alternative to minimize these conflicts. However, forests significantly modify the hydrological processes, influencing the dynamics of the water in the watershed. Therefore, in order to obtain water availability in the long term, it is necessary to identify suitable areas for forest restoration, where effects are positive for water resources. In this context, this study aimed at using a climatic model water to spatialize the water features and favorable climate, or not, to forest restoration. For this purpose, the Piracicaba river basin was used as study area (12,500 km²). Monthly data were obtained from precipitation, temperature, solar radiation, topography, and water storage capacity in the soil. Trough these data, distributed climatic water balance was calculated by the Water Balance tool, integrated in a GIS (Geographic Information System) which calculates the potential and actual evapotranspiration, deficit and the surplus water. Results were compared with traditional climatic water balance. Later statistical analyses was performed to identify areas with similar hydrological characteristics. This division of the watershed into classes (or groups) with similar characteristics allows us to understand the natural sensitivity of the areas and possible effects on water availability. The ability to determine, in different study scales, the dynamics of water resources, has enabled better analysis of conditions on the natural heterogeneity of the basin. Raised info has identified areas where local recommendations can be made based on the variables of water balance. Thus, spatial distribution of variables and grouping by hydrological characteristics are tools that can be used in forest restoration projects as it can subsidize decisions regarding the most favorable areas for forest restoration.

Keywords: Water Crisis; Water balance; Afforestation; Forest restoration

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica regional registrada no Brasil, particularmente no Estado de São Paulo, provocada pela diminuição das chuvas e pelo aumento da demanda de água em locais com alta densidade populacional e concentração industrial, tem reforçado a ideia de que o plantio de florestas proveria água em quantidade suficiente para atender às demandas existentes. Essa perspectiva pressupõe que a restauração florestal (aqui também entendida como sinônimo de reflorestamento), sendo executada a partir do presente momento, resolveria o problema atual. Além disso, a atribuição da responsabilidade de produzir água às áreas restauradas gera uma demanda para esse uso do solo que pode entrar em conflito com os usos já existentes (LATAWIEC et al., 2015).

Para suprir a demanda crescente de abastecimento de água da cidade de São Paulo desde 1860 há estudos que apontavam a região da Serra da Cantareira como opção viável. O Cantareira Velho agregou continuamente aduções de seus recursos hídricos até se tornar ineficiente para acompanhar o crescimento econômico e populacional da metrópole paulista da década de 1960. A partir de 1969, com a reversão da vazão dos rios Jaguari e Jacareí, o sistema Cantareira atingiu a capacidade de 33 metros cúbicos por segundo em uma área de aproximadamente 28 mil hectares que abrange 12 municípios, sendo 4 deles em Minas Gerais.

As águas produzidas pelo sistema Cantareira são em sua maioria provenientes da bacia hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, responsáveis por 31 metros cúbicos por segundo e o restante, apenas 2 metros cúbicos por segundo, são transpostas da bacia hidrográfica do Alto Tietê, a partir do rio Juquery, na região metropolitana de São Paulo. A situação de demanda maior que a disponibilidade foi agravada com o crescimento urbano, econômico e populacional da região e a consequente degradação que os recursos naturais sofreram de modo intenso neste processo (PASCHOALOTTI; NETO, 2013). Principalmente em períodos de eventos climáticos de forte estiagem e elevadas temperaturas, como os registrados no verão de 2013-2014, resultando em crise hídrica combinando fatores climáticos e condições naturais com a falta de eficiência da gestão dos recursos naturais.

No ano de 2000 o Estado de São Paulo possuía cerca de 13% de sua cobertura florestal nativa, posteriormente estes remanescentes de Mata Atlântica

foram estimados entre 11% a 16%, indicando uma estabilização do desmatamento (RIBEIRO et al., 2009). Outros estudos, por exemplo, Molin (2014) e Kronka et al. (2005), também indicaram uma estabilização da conversão de áreas florestais nativas para outros usos do solo, seguida por um possível ganho de área florestal a partir de 2010 (SÃO PAULO, 2013).

O levantamento do uso do solo, para o ano de 2010, da bacia hidrográfica identificou a seguinte distribuição de classes (MOLIN, 2014): 33,63% de pastagem; 27,14% de áreas agrícolas, com predominância da cultura da cana-de-açúcar; 21,75% de áreas com florestas nativas; 7,32% de área urbana; 4,23% com florestas plantadas (*Eucalyptus* e *Pinus*); 4,15% de área ocupada com culturas perenes, caracterizada por produção de frutas; e 1,66% de corpos d'água. Na área de estudo o uso do solo é predominantemente de pastagens, que, por sua vez, apresentam-se em muitos casos com baixa produtividade ou degradadas. Sendo, portanto, áreas potenciais para restauração florestal (BRANCALION et al., 2013).

Estudos realizados indicam que é possível que haja desenvolvimento rural e reflorestamento em larga escala através do aumento da produtividade das pastagens, investindo em técnicas de aumento de produção é possível manter a produtividade local em uma área menor para liberar parte das áreas para os projetos de recuperação, deve-se observar a economia local poupando regiões com alto potencial para agricultura e pecuária evitando deslocar a produção de gado, como resultado da escassez de terras e, conseqüentemente gerar novos desmatamentos em outras regiões (LATAWIEC et al., 2015).

Dividida em cinco sub-bacias (Piracicaba, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia) a bacia hidrográfica do rio Piracicaba está inserida na região do interior brasileiro com a maior ocupação do território e desenvolvimento econômico (SILVA et al., 2007), com destaque para as atividades químicas, têxteis, metalúrgicas e eletroeletrônicas em cidades com alta densidade populacional. Na área rural, destacam-se as culturas de cana-de-açúcar, de laranja, de pinus e de eucalipto. Os conflitos dos diferentes usos da água para o abastecimento público, industrial, irrigação, geração de energia e recreação são cada vez mais intensos, principalmente a partir da década de 1970 e 1980 com processo de metropolização do espaço (LENCIONI, 2011). Vários fatores como o crescimento populacional, aumento do consumo, ineficiência da gestão ou mesmo mudança climática

completam o quadro da grave crise hídrica que atinge a região (TAMBOSI et al., 2015).

O lado social do conflito sobre o uso da água é visto como crítico para a compreensão das implicações dos diferentes tipos de demandas que podem ocorrer quando um grande número de pessoas tem que compartilhar uma quantidade limitada de água disponível. Os agentes de decisão precisam ser informados das complexidades dos dados, e principalmente da ausência destes, para calcular a disponibilidade de água e da natureza geográfica da variação espacial e temporal dos recursos hídricos e das métricas de vulnerabilidade (PERVEEN; JAMES, 2011).

A expansão de outros usos do solo, como agricultura e áreas urbanas, leva a uma competição pela ocupação de áreas, ocorre a diminuição das áreas potenciais para restauração, sendo improvável que as florestas consigam avançar por áreas com aptidão agrícola (BAUHUS et al., 2010).

O papel da floresta no ciclo hidrológico tem sido alvo de estudos e debates nas últimas décadas (HIBBERT, 1967; BOSCH; HEWLETT, 1982; ANDRÉASSIAN, 2004; BRUIJNZEEL, 2004) e, apesar de não totalmente resolvido, já conta com evidências experimentais acumuladas de que a cobertura florestal interfere diretamente nos processos físicos relacionados à dinâmica da água em uma bacia hidrográfica. Essas interferências alteram de modo real a produção de água, com variações no deflúvio, com alteração na dinâmica da vazão ao longo do tempo.

A influência da cobertura florestal no processo hidrológico se inicia na interceptação da água da chuva, quando uma parcela da precipitação é retida temporariamente pelo dossel e redistribuída entre evaporação para a atmosfera e precipitação efetiva, que alcança o piso da floresta por gotejamento e escoamento pelo tronco (HELVEY; PATRIC, 1966). Existe uma relação entre a capacidade de retenção do dossel e a biomassa da parte aérea (BALBINOT et al., 2008), sendo que maiores extensões da copa e quantidade de folhas aumentam a interceptação (MAITRE; SCOTT; COLVIN, 1999). Em geral, a cobertura florestal promove maior interceptação em relação a outras coberturas (JOHNSON, 1998; SCOTT, 2005), além de aumentar a evapotranspiração decorrente do processo de fotossíntese (SMAKHTIN, 2001; CABRAL et al., 2010) e do maior volume de solo explorado através do sistema radicular, geralmente profundo. Segundo Zhang et al. (2001), durante a estação chuvosa as plantas extraem mais água das camadas superficiais, onde a densidade de raízes é maior. Porém, conforme a umidade do solo diminui

durante a estação seca, mais água é extraída das camadas profundas para manter os estômatos abertos. Dessa forma, as árvores são capazes de manter uma taxa de evapotranspiração relativamente constante ao longo do tempo, mesmo quando a umidade do solo nas camadas superficiais é limitada. Sob tais condições, plantas com raízes mais superficiais tendem a fechar os estômatos e reduzir as taxas de evapotranspiração.

Como resultado das maiores taxas de interceptação e evapotranspiração, o consumo de água tende a ser maior em florestas se comparado às vegetações herbáceas. Hibbert (1967), analisando 40 microbacias, concluiu que a retirada da cobertura florestal aumenta a vazão anual, enquanto o aumento da mesma a reduz. Bosch e Hewlett, (1982) confirmaram o aumento da vazão anual em microbacias de região temperada, sendo esse aumento proporcional à área desmatada e mais acentuado em regiões com maior precipitação.

Utilizando-se dados obtidos em mais de 250 microbacias experimentais localizadas em diferentes partes do mundo, Zhang et al. (2001), desenvolveram um modelo para estimar a evapotranspiração média anual na escala de microbacias hidrográficas de acordo com o tipo de vegetação (florestas vegetação mista ou pastagens). Esse modelo permitiu observar que a evapotranspiração anual é geralmente maior em microbacias hidrográficas com vegetação florestal comparativamente às microbacias com vegetação de menor porte. Essa diferença é maior em regiões com altos índices de precipitação e diminui em regiões que apresentam valores anuais de precipitação abaixo de 500 mm (Figura 1).

A água que chega efetivamente ao solo pode escoar superficialmente até o leito do rio ou infiltrar. O escoamento superficial contribui para o deflúvio que ocorre durante e imediatamente após um evento de chuva. A velocidade com que o escoamento direto chega ao rio é um fator determinante para a ocorrência de picos de vazão, além de influenciar na degradação do solo através dos processos erosivos.

Figura 1 - Relação entre evapotranspiração e precipitação anuais para diferentes tipos de vegetação. Adaptado de Zhang et al. (2001)

O solo coberto por floresta possui condições adequadas para infiltração (PRITCHETT, 1979) devido à maior condutividade hidráulica e capacidade de retenção promovida pela camada de serapilheira, matéria orgânica e porosidade do solo. Em condições de cobertura florestal nativa não perturbada, a taxa de infiltração é normalmente mantida em seu máximo. Nestas condições, raramente ocorre a formação de escoamento superficial (PIERCE, 1965).

Dessa forma, a partir da precipitação efetiva, há uma tendência de aumento do processo de infiltração e redução no processo de escoamento superficial, promovendo a recarga das águas subterrâneas e a liberação mais lenta para os rios, o que proporciona maior regularidade e distribuição temporal da vazão (NEARY et al., 2009), contribuindo dessa forma para a regulação do regime hidrológico.

Simulações de mudanças no uso do solo mostraram que existe uma tendência a não modificação das áreas agrícolas encontradas atualmente na área de estudo, principalmente devido ao consolidado setor de cana-de-açúcar, altamente desenvolvido. Por outro lado, em regiões com predominância de usos como florestas plantadas e pastagem, a tendência encontrada é o aumento das áreas com florestas nativas, podendo ser consideradas áreas com maior potencial para restauração (MOLIN, 2014).

Estudos acerca do aumento das áreas potenciais para restauração florestal apontam que existe um consenso de que o aumento dessas áreas não deve ocorrer

nos locais com presença de agricultura, uma vez que isto ocasionará o deslocamento desse uso para outros lugares e provável desmatamento de vegetação nativa (MEYFROIDT et al., 2010; LATAWIEC et al., 2015). Portanto a implementação da restauração deve procurar áreas marginais a agricultura, nas quais a competição pelo uso do solo não limite a conversão de áreas degradadas em florestas (BRANCALION et al., 2013).

Os pactos elaborados para restauração florestal preveem o aumento das áreas com florestas nativas devido a alterações da legislação, pagamento por serviços ambientais, aumento das pressões por certificações, entre outros; alcançando o total de 15 milhões de hectares restaurados na Mata Atlântica até 2050 (BRANCALION et al., 2013).

A conversão de áreas com pastagens em vegetação arbórea tem ocorrido em extensas áreas do hemisfério sul e, provavelmente, vai continuar aumentando devido aos incentivos advindos de políticas públicas e de mercado para reduzir as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) (FARLEY et al., 2005; JACKSON et al., 2005). Da mesma forma, no Brasil, inúmeros projetos envolvendo restauração florestal têm sido financiados pelo poder público e iniciativa privada, a exemplo do projeto “Produtores de Água” em Minas Gerais, e dos Programas “Mina D’água” em São Paulo, e “Produtores de Água” no Espírito Santo (BRASIL, 2011), convertendo geralmente áreas ocupadas por pastagem em áreas com cobertura florestal nativa.

De maneira constante, a percepção pública de que as florestas são em todas as circunstâncias, solução única para vários dos problemas é questionada pela comunidade científica. Apesar das evidências, muitos aspectos do ciclo hidrológico parecem ainda não compreendidos pela população. A observação de corpos d’água em áreas com cobertura florestal tem levado a crença, por empirismo, de que a floresta possui a capacidade de produzir água, sempre de boa qualidade. As relações entre os tipos de florestas e solos e os processos concorrentes podem mover os resultados em ambas as direções, positivas e negativas (CALDER, 2007).

Para não frustrar a expectativa de dezenas de projetos de restauração, é necessário considerar a escala temporal e compreender que a floresta modifica os processos hidrológicos ao longo de seu crescimento, exigindo período significativo de tempo para que ocorra o adensamento do dossel, a cobertura do solo por serapilheira, o crescimento das raízes e o aumento da porosidade, principalmente

em solos com longo histórico de degradação (NEARY et al., 2009; SALEMI et al., 2012).

Em extensa revisão sobre a relação floresta-água, Neary et al. (2009) ressalta que os solos florestais, comparativamente aos solos agrícolas ou urbanos, são essenciais para a hidrologia devido às características físicas que promovem maior infiltração, e que solos intensamente cultivados, quando recobertos por florestas, se modificam muito lentamente. A resiliência e a capacidade de auto regeneração do solo, assim como a extensão da degradação definirão se a restauração florestal será promissora em conseguir o retorno das condições naturais ou se os resultados serão nulos (LIMA, 2015).

Nos primeiros anos, a maior evapotranspiração promovida pelas maiores taxas de crescimento das árvores leva a um declínio substancial no deflúvio anual (BRUIJNZEEL, 2004; FARLEY et al., 2005). Conforme a floresta atinge a maturidade, o deflúvio tende a aumentar novamente (KUCZERA, 1987; FERRAZ; LIMA; RODRIGUES, 2013), mas o tempo necessário para que a maturidade seja atingida é variável e geralmente ocorre na escala de décadas.

Dessa forma, entende-se que os serviços advindos da restauração florestal não ocorrerão imediatamente após a implementação dos projetos, e que os benefícios de regulação da dinâmica hidrológica terão o ônus do maior consumo de água, ao menos na fase de crescimento da floresta (LIMA et al., 2012).

A alocação de áreas para restauração florestal depende dos objetivos descritos no próprio projeto de restauração (BRANCALION et al., 2013). Por exemplo, no Pacto de Restauração da Mata Atlântica foram realizados estudos para a identificação de áreas potenciais para servir como guia para restauração (CALMON et al., 2011) entre os objetivos usualmente encontrados nos projetos de restauração, pode-se citar a regulação e produção hídrica das bacias hidrográficas (BRANCALION et al., 2013).

No entanto, as definições de áreas potenciais dos planos de restauração não consideram as variáveis hidrológicas no processo de escolha da localização, desconsideraram, portanto, os diferentes efeitos que as florestas restauradas poderão ter nos processos hidrológicos (MOLIN, 2014).

Diante disso, se torna necessário conhecer as variáveis que podem ser utilizadas para estabelecer áreas com vulnerabilidade hídrica, ou seja, conciliar a disponibilidade de água a jusante e a regulação ao longo do tempo. Dentro deste

contexto, as variáveis do Balanço hídrico climático HC (evapotranspiração, déficit e excedente) podem ser utilizadas na caracterização das áreas aptas à restauração com o objetivo hidrológico em vista. De fato, estudos já foram realizados utilizando informações como inclinação do relevo, aspecto da vertente, altitude, radiação solar, precipitação e uso e cobertura do solo em modelos para a definição de áreas potenciais de regeneração natural de florestas, por exemplo Príncipe et al. (2014), que estudou o efeito da regeneração em áreas agrícolas abandonadas por longo período (60 anos).

No entanto, as variações na topografia do terreno influenciam os componentes do balanço hídrico (BARTHOLOMEUS et al., 2011; ANNING et al., 2014). Utilizando ferramentas do sistema de informações geográficas (SIG), como o modelo digital de elevação do terreno, é possível determinar essa influência distribuída na paisagem (DYER, 2009). O BHCD, por sua vez, permite conhecer as taxas de entrada e saída de água de um modo espacializado na bacia hidrográfica, com identificações de relevo como a declividade e orientação da vertente por meio de sistemas de informação geográfica (DYER, 2009).

A abordagem do BHC é utilizada para diferentes fins, como na distribuição de nichos ecológicos das espécies (PIEDALLU et al., 2013), localização de áreas críticas para incêndio (KANE et al., 2015); assim como suas variáveis que podem ser utilizadas, por exemplo, na identificação da demanda de umidade e déficit hídrico em uma floresta (DYER, 2009), taxas de produtividade e de decomposição e modelagem de padrões de umidade potencial. Esta última é realizada independentemente da vegetação estabelecida no local, e identifica a magnitude e a sazonalidade da umidade do solo em diferentes condições na área de estudo e dos cenários de mudança climática (DYER, 2013).

O balanço hídrico climático (BHC) tradicional é calculado de forma pontual com dados coletados de estações meteorológicas e posteriormente são aplicadas técnicas de interpolação espacial somente para os elementos de saída do BHC para representar sua distribuição em grandes áreas como municípios ou em polígonos planos, denominado de Método dos Polígonos de Thiessen que extrapola as condições controladas da estação pluviométrica de maneira homogênea sem considerar as características do relevo como inclinação e orientação, apresentando bons resultados apenas para paisagens levemente onduladas e com número suficiente de postos de medição.

Assim, primeiramente se faz o cálculo e depois a interpolação, abordagem denominada de método de cálculo-interpolação, de uso muito criticado para a interpolação espacial de estimativas distribuídas geograficamente. A estimativa espacial dos elementos do BHCD deve ser feita a partir da espacialização das variáveis de entrada e posteriormente o cálculo dos elementos, o que se faz inicialmente pela interpolação e depois por cálculos, sendo essa abordagem denominada de método de interpolação-cálculo (CECÍLIO et al., 2012).

A evapotranspiração é um dos principais componentes do cálculo do BHC, e dependente da disponibilidade energética e da temperatura, sendo estas influenciadas diretamente pela topografia (CECÍLIO et al., 2012). A evapotranspiração pode ser dividida em potencial ou real, sendo ambas estimadas nos cálculos do BHC. A evapotranspiração potencial (ETP) representa a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água. A evapotranspiração real (ETR) é quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($ETR \leq ETP$) (DYER, 2013).

Conceitualmente é simples calcular a evapotranspiração, mas na prática há mais de 50 métodos, adaptados para regiões geográficas distintas, variando em complexidade e requisitos (DYER, 2009; LU et al., 2005). Estes métodos demandam uma grande variedade de dados como temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, que nem sempre estão disponíveis, sendo necessário desenvolver equações ajustadas com o intuito de aperfeiçoar seu uso (CARVALHO et al., 2011). Na ausência de fatores de correção de qualidade em escala regional, é preferível utilizar um método alternativo, o qual demande um número menor de variáveis de entrada (AMATYA et al., 1995). A principal vantagem de poder escolher o método a ser utilizado é utilizar os dados disponíveis para os objetivos propostos, por exemplo, possibilitar a estimativa dos padrões de umidade na paisagem independentemente da vegetação existente (AMATYA et al., 1995).

Os solos apresentam várias características que alteram sensivelmente a qualidade do cálculo do BHC tradicional como textura, estrutura, densidade, porosidade, variações como a profundidade do sistema radicular da cultura de interesse alteram significativamente a qualidade da informação que influenciam

diretamente a capacidade de armazenamento de água do solo (CAD). Diante da escassez de dados reconhecidamente confiáveis uma alternativa é considerar valores ponderados que variem em função do tipo de solo (CECÍLIO et al., 2012).

A dinâmica dos diferentes fluxos de água na bacia hidrográfica permite classificar os componentes hidrológicos em água azul, a qual identifica o escoamento superficial e subterrâneo, e a água verde que caracteriza o escoamento subsuperficial e a evapotranspiração (Figura 2), sendo fluxos hídricos complementares dentro do balanço hídrico (ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2006). Em escala global, 65% da precipitação total acaba gerando a água verde, e os outros 35% a água azul. A água verde retorna para a atmosfera na forma de vapor e a água azul é escoada da bacia hidrográfica (FALKENMARK; ROCKSTRÖM, 2010).

Figura 2 – Ilustração da distribuição da água azul e da água verde na bacia hidrográfica (LIMA, 2015)

Diante do exposto, espera-se que exista uma variabilidade climática espacial na escala da bacia hidrográfica que resulte em diferentes disponibilidades hídricas. O modelo distribuído permite identificar essa variabilidade em uma escala mais detalhada, ou seja, na escala das microbacias hidrográficas. Os valores do BHCD diferem do BHC tradicional, o qual apresenta somente as variações de máximas e mínimas, sem, contudo, evidenciar a dinâmica da água na paisagem. O BHCD

permite ainda gerar informações que posteriormente podem ser utilizadas para o agrupamento das variáveis entre os seus componentes, e então obter grupos com maior ou menor disponibilidade hídrica.

Por meio das variáveis do BHCD é possível inferir a respeito do efeito da conversão de uso do solo de pastagem para florestas em relação à disponibilidade hídrica do local, em diferentes escalas espaciais, mensalmente (DYER, 2009).

A análise dos vários componentes hidrológicos que determinam a escassez e criticidade da disponibilidade hídrica abrange vários enfoques e pode ser mais construtivo realizar estudos que examinem simultaneamente o efeito de processos em diferentes escalas espaciais ao mesmo tempo e interpretar qual a importância relativa de cada aspecto estratégico através dessas informações, auxiliando assim a resolução de conflitos e o desenvolvimento de políticas públicas com enfoque nos recursos hídricos.

O objetivo geral do trabalho foi espacializar a correlação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Piracicaba considerando os aspectos de ocupação e uso, naturais e suas interações através de dados públicos de livre acesso, servindo de subsídio para ações de manejo e conservação da natureza em uma paisagem com elevado grau de transformação, através das relações naturais de clima, relevo e solo diante do aumento da demanda por áreas a serem restauradas. Entre os objetivos específicos pode-se citar:

- Aplicar um modelo de BHCD no espaço e no tempo em uma bacia hidrográfica com longo histórico de ocupação para diferentes escalas de planejamento visando ações de restauração florestal;
- Comparar o BHCD com o BHC tradicional existente e de uso corrente na região;
- Realizar agrupamento hidrológico para identificar possíveis características naturais e influências através das relações entre as variáveis de entrada e as de respostas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Piracicaba (Figura 3) localizada entre os paralelos 22°00' e 23°00' de latitude sul e os meridianos 46°00' e 48°30' de longitude oeste. A área da bacia hidrográfica é de, aproximadamente, 12.500 km² com 11.400 km² no estado de São Paulo e 1.100 km² no Estado de Minas Gerais (COBRAPE, 2010).

Figura 3 – Hidrografia e localização da área de estudo e a divisão das sub-bacias que a compõe, no contexto da divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba está inserida na borda lisa da bacia sedimentar do rio Paraná e possui estruturas geológicas de grande diversidade, principalmente de rochas metamórficas e graníticas, sedimentares mesozoicas e paleozoicas, rochas efusivas e corpos intrusivos básicos e coberturas sedimentares cenozoicas, que podem ser divididas em duas grandes zonas em função das características geomorfológicas, desde as cabeceiras situadas a leste com cotas de altitude variando de pouco mais de 2.000 metros em relevo montanhoso, com declividade média a alta, drenagem de alta densidade até os 600 metros. Na região das rochas sedimentares há outra zona distinta que forma a depressão periférica onde o relevo é do tipo colinoso, predominando as baixas declividades, cotas variando desde os 600 metros até pouco mais de 400 metros e drenagem de média

a baixa densidade. O limite oeste da bacia é constituído por relevo característico de transição com as cuestas ou escarpas festonadas de alta declividade acima de 30%, produto da erosão regressiva que atua sobre a sequência de basaltos e sedimentos sotopostos, formando anfiteatros separados por espigões com vertentes de perfis retilíneos (AB´SABER et al., 1990).

2.2 Balanço Hídrico Climático Distribuído (BHCD)

Para o cálculo do BHCD foi utilizada a ferramenta “Water Balance Tool – versão 2.0” (WBt), desenvolvida e aperfeiçoada para capturar com precisão padrões de umidade do solo em diferentes gradientes de relevo (DYER, 2009). As variáveis de entrada para iniciar o balanço são: o MDE; o CAD; os dados mensais de temperatura, precipitação e radiação solar. Os dados, por serem espacializados, precisam apresentar a mesma resolução espacial, limites de extensão e sistema de coordenadas geográficas (DYER, 2013).

A ferramenta utilizada para estimar a evapotranspiração potencial (ETP), a evapotranspiração real (ETR), e através da variação do armazenamento de água no solo (ΔARM), estimar o déficit hídrico (DEF) e o excedente hídrico (EXC), considera a complexidade da paisagem através do modelo de elevação do terreno (MDE), da variação da radiação solar global e da capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) em ambiente SIG (DYER, 2009)

A abordagem utilizada pelo WBt quantifica as relações entre as variáveis de demanda de umidade (evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, excedente e déficit) no espaço e no tempo, baseada em dados publicados disponíveis (temperatura mensal, precipitação mensal, radiação solar global mensal, mapas digitais de elevação e dados de capacidade de armazenamento de água) e permite a aplicação dessa metodologia áreas geográficas tanto de pequena área (microbacia) quanto de áreas maiores (bacia hidrográfica).

2.3 Métodos

A abordagem utilizada no cálculo do BHCD pelo WBt foi a de Thornthwaite & Mather (1955), o qual fornece informações sobre a disponibilidade hídrica local ou regional (DYER, 2013).

A primeira etapa do BHCD utiliza as variáveis de temperatura mensal (°C) e radiação global mensal (Wh/m²) para o cálculo da evapotranspiração potencial, pelo método de Turc (1961), através da eq. 1.

$$ETP = 0,0013 \times \left[\frac{T}{T + 15} \right] \times (R + 50) \quad (1)$$

onde,

ETP = Evapotranspiração potencial mensal (mm)

T = Temperatura mensal (°C)

R = Radiação Global mensal (Wh/m²)

Os dados mensais de ETP gerados em milímetros permitem calcular o saldo entre essa variável e a precipitação e, a partir destes dados, determinar qual o primeiro mês que apresenta valores negativos para P-ETP, considerando-o como o início do ano hídrico, o que geralmente ocorre imediatamente após o período chuvoso quando a capacidade de armazenamento de água no solo é máxima (DYER, 2013).

Após a estimativa da ETP e a definição do início do ano hídrico (primeiro mês com P-PET < 0) é possível calcular a variação do armazenamento de água no solo (ΔARM). Quando a precipitação é insuficiente para atender a demanda de água, as plantas utilizam a água armazenada disponível no solo. Essa variação é calculada em intervalo de tempo diário e, posteriormente sumariado, em escala mensal. O valor final é igual ao último dia do mês, assim após calcular para cada mês do ano hídrico o ΔARM é estimada a evapotranspiração real (ETR), o excedente hídrico (EXC) e o déficit hídrico (DEF) em escalas mensal e anual (DYER, 2013).

2.4 Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) foi elaborado a partir das imagens de alta resolução obtidas na missão “Shuttle Radar Topography Mission - SRTM 1 Arc-Second Global” cortesia do United State Geological Survey – USGS, projeto de cooperação internacional com resolução espacial de 30m (Figura 4). A altitude média da bacia hidrográfica é de 760m com altitudes mínimas e máximas de 445m e 2023m, respectivamente.

Figura 4 – Modelo digital de elevação (MDE) a partir dos dados do SRTM da bacia hidrográfica do rio Piracicaba

2.5 Solos

O mapa de solos foi obtido a partir do mapa pedológico do Estado de São Paulo do Instituto Agrônomo de Campinas na escala 1:500.000 (OLIVEIRA, et al. 1999). A partir das classes de textura obtidas na legenda estendida do mapa foi realizada a reclassificação em três grandes classes de textura: Arenosa, Média e Argilosa (Figura 5). Para cada classe de textura classificada foram definidos parâmetros referentes a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) (Tabela 1). Os valores de CAD foram obtidos a partir de Doorenbos e Kassam (1994).

Tabela 1 – Classes de textura do solo reclassificadas a partir das classes de tipo de solo obtidas por meio do mapa pedológico do IAC (1999). Assim como a área (km² e %) e a capacidade de água disponível no solo (CAD) para cada uma das classes dentro da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba

Classes de textura	Área		CAD (mm.m ⁻¹)
	Km ²	%	
Argilosa	9.555	78,0	200
Média	2.008	16,4	140
Arenosa	685	5,6	60

Figura 5 – Espacialização das classes de textura do solo definidas para a bacia hidrográfica a partir da legenda estendida e descrição dos diferentes tipos de solo encontrados no local.

2.6 Variáveis atmosféricas

Para a obtenção dos valores espacializados de temperatura e precipitação média anual para o Brasil, Alvares et al. (2013) utilizaram 2400 estações meteorológicas que tivessem mais de 10 anos de medições no período de 1950 até 1990. Mais de 50% das estações apresentavam 30 anos de dados; destas 75% foram usadas para a construção do modelo, e as outras 25% foram usadas para a validação do modelo resultado da integração e combinação da temperatura estimada e observada de acordo com as modelos mensais de regressão linear múltipla desenvolvidos por Pedro Júnior et al. (1991) a partir das variáveis independentes de latitude, longitude, altitude e suas combinações, eq. 2.

$$Y_{ts} = a_t + b_t X_s + c_t x2_s \quad (2)$$

onde,

Y = Temperatura média mensal máxima ou mínima (°C)

X = Altitude do local (m)

x2 = Latitude em minutos (valores positivos)

a, b e c = Coeficientes estatísticos do modelo

Os mapas são resultado da integração e combinação de valores de temperatura estimada e observada corrigidos com base em valores coletados em estações meteorológicas. Informações mais detalhadas sobre modelos estimadores e as técnicas podem ser encontradas em Alvares et al. (2013).

A precipitação média anual varia de 1200 mm a 1600 mm com inverno seco (abril a setembro) e verão chuvoso (outubro a março), apresentando significativa variação espacial e temporal (Figura 6).

Figura 6 – Dados espacializados de precipitação média anual (P) em milímetros (mm), sobre relevo, para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

A temperatura média anual varia de 12°C a 21°C (Figura 7) sendo o clima caracterizado por três faixas de ocorrências de acordo com a classificação internacional de Köppen do subtipo Cfb (temperado húmido com verão temperado)

nas altitudes baixas da bacia, do subtipo Cfa (temperado úmido com verão quente) nas altitudes médias e do subtipo Cwa (temperado úmido com inverno seco e verão quente) nas maiores altitudes (ALVARES et al., 2013).

Figura 7 – Dados espacializados de temperatura média anual (T) em graus Celsius (°C), sobre relevo, para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Para a estimativa da radiação solar global para o Brasil, Alvares (2011) realizou os procedimentos de acordo com a método de Pereira et al. (2002) através das variáveis de latitude, altitude, declividade e orientação da vertente em passo mensal, calculando somente para o 15 dia de cada mês, considerando com a média mensal.

Primeiramente calcula-se o dia Juliano (15), de acordo com a eq. 3.

$$\text{Dia Juliano} = \text{número inteiro} [(30,42 \times \text{mês})] - 15,23 \quad (3)$$

onde,

Dia Juliano = Número de dia no ano (Janeiro 1 = 1; Junho 1 = 181);

número inteiro = Número natural (1,2,3,...)

mês = Número do mês (1 a 12)

Então é calculado o ângulo de declinação solar, de acordo com a época do ano, conforme a eq. 4.

$$\sigma_{ts} = 23,45 \times \sin[0,9863 \times (0,284 + \text{Dia Juliano})] \quad (4)$$

onde,

σ = Declinação solar (radiano). No hemisfério sul a declinação solar é positiva para a primavera e verão e negativa no outono e inverno e zero nos equinócios.

O fotoperíodo é o intervalo entre o nascer e o pôr do sol, varia de acordo com a latitude e a época do ano, é calculado nas eq. 5, 6 e 7.

$$\text{Nascer do sol (hn)}_{ts} = 12 - \frac{\cos^{-1} (-\tan(\sigma_{ts}) \times \tan(\varphi_s))}{15} \quad (5)$$

onde,

hn = Hora do nascer do sol (horas)

φ = Latitude do local (grau)

$$\text{Pôr do sol (hp)}_{ts} = 12 + \frac{\cos^{-1} (-\tan(\sigma_{ts}) \times \tan(\varphi_s))}{15} \quad (6)$$

onde,

hp = Hora do pôr do sol (horas)

$$N(h)_{ts} = \text{Pôr do sol (hp)}_{ts} - \text{Nascer do sol (hn)}_{ts} \quad (7)$$

onde,

N (h) = Duração do dia (horas)

O ângulo horário ao nascer do sol é calculado conforme a eq. 8 sendo o valor de 90° nos equinócios, para $N(h) = 12$ horas.

$$hn_{ts} = \cos^{-1} (-\tan(\sigma_{ts}) \times \tan(\varphi_s)) \quad (8)$$

onde,

hn = Ângulo horário na hora do nascer do sol (grau)

A correção da irradiância solar em função da distância entre a Terra e o Sol é calculada para obter qual intensidade da radiação solar extraterrestre no topo da atmosfera para determinado dia do ano, menor no afélio e maior no periélio, conforme a eq. 9.

$$\left(\frac{d}{D}\right)_{ts}^2 = 1 + 0,0033 \times \left[\left(\frac{360}{365}\right) \times \text{Dia Juliano}\right] \quad (9)$$

onde,

$\left(\frac{d}{D}\right)_{ts}^2$ = Fator de correção para a distância média Terra-Sol

A radiação solar no topo da atmosfera é função apenas da latitude e da época do ano, conforme a eq. 10

$$Qo_{ts} = 37,586 \times \left(\frac{d}{D}\right)_{ts}^2 \times [hn_{ts} \times \sin(\varphi_s) + \sin(\varphi_s) + \cos(\varphi_s) + \cos(\varphi_s) \times \sin(hn_{ts})] \quad (10)$$

onde,

Qo = radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)

A eq. 11 foi utilizada para corrigir a radiação solar extraterrestre de acordo com as variáveis topográficas de declividade e orientação das vertentes, que afetam a incidência dos raios solares como latitude e época do ano de acordo com o modelo digital de elevação do terreno. A eq. (12) é a radiação solar extraterrestre corrigida pelo efeito do relevo.

$$\cos(i)_{ts} = \cos(S_s) \times \cos(Zs_{ts}) + \sin(S_s) \times \sin(Zs_{ts}) \times \cos(\psi_{ts} - \psi_s) \quad (11)$$

onde,

$\cos(i)$ = Cosseno do ângulo de correção do relevo

s = Declividade da vertente (grau)

Z_s = Ângulo zenital (grau)

Ψ = Azimute solar (grau)

Ψ_s = Orientação da vertente (aspecto em grau)

$$Q_{oc} = Q_{0_{ts}} \times \cos(i)_{ts} \quad (12)$$

onde,

Q_{oc} = Radiação solar extraterrestre corrigida ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)

Para o cálculo da radiação solar global aplicou-se a eq. 13.

$$Q_{g_{ts}} = \left[(0,29 \times \cos(\varphi_s)) + \left(0,52 \times \frac{n_t}{N(h)_{ts}} \right) \right] \times Q_{0_{ts}} \quad (13)$$

onde,

Q_g = Radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$)

n = Insolação (horas de brilho solar)

$N(h)$ = Duração do dia (horas)

O valor de Q_g (estimado na eq. 13) é corrigido pelo valor de Q_g observado nas estações meteorológicas.

Figura 8 – Dados espacializados de radiação média anual (R) em Watt hora por metro quadrado (Wh/m²), sobre relevo, para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

A radiação solar média anual normal da bacia hidrográfica é de 105.580 Wh/m² variando de 66.239 Wh/m² até 128.882 Wh/m² influenciada principalmente pela orientação do terreno (Figura 8).

O resumo das variáveis de entrada para o WBt são sumarizados na tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis de entrada para a ferramenta WBt para a área de estudo

Dados exigidos	Sigla	Características
Modelo digital de elevação do terreno	MDE	SRTM – 1 Arc-Second Global(30m)
Capacidade de armazenamento de água no solo	CAD	Mapa pedológico de São Paulo (1:500.000)
Precipitação	PREC	Mapa de precipitação média mensal (100m)
Temperatura	TEMP	Mapa de temperatura média mensal (100m)
Radiação solar	RAD	Mapa de radiação média mensal (100m)

2.7 Análise de agrupamento

Através das variáveis respostas foi realizada uma análise de agrupamento (cluster), para reduzir a dimensão do conjunto de dados espacialmente, de maneira natural e de acordo com as características comuns encontradas no conjunto de dados utilizados neste trabalho para a classificação de padrões.

As áreas com características semelhantes foram agrupadas de acordo com a precipitação, evapotranspiração potencial e real, déficit e excedente hídricos anuais da bacia hidrográfica de estudo consideradas como críticas para a disponibilidade hídrica em escala decrescente de prioridade (Tabela 3) e descritos na sequência.

Tabela 3 – Variáveis climáticas utilizadas na análise de agrupamento (cluster), selecionadas de acordo com suas características e importância no BHCD

Variáveis anuais	Sigla	Características
Precipitação	P	Quantidade de água que entra na bacia hidrográfica.
Evapotranspiração potencial	ETP	Calculada pelo método de Turc (1961). Relaciona o potencial máximo de saída de água na bacia de acordo com a radiação, temperatura e considerando as variações do relevo e orientação das vertentes.
Evapotranspiração real	ETR	Calculada por meio da ETP e da quantidade de água disponível no solo, considerando as variações do relevo e orientação das vertentes.
Déficit	DEF	Quantidade de água que falta na bacia. Diferença entre a quantidade de água que entra na bacia (P) menos a que sai (ETR).
Excedente	EXC	Quantidade de água que sobra na bacia. Diferença entre a quantidade de água que entra na bacia (P) menos a que sai (ETR).

Os procedimentos operacionais utilizados na análise dos grupos e identificação das áreas foram:

- i. Mapas das variáveis climáticas anuais resultantes do BHCD da precipitação, e posterior normalização dos mapas resultantes para distribuição de valores mínimos e máximos entre zero e um;
- ii. Cálculo e análise da matriz de correlação e covariância entre as variáveis climáticas, por meio dos mapas climáticos normalizados, para verificar a estrutura de dependência entre as variáveis e a viabilidade de aplicação de técnicas de análise multivariada;
- iii. Extração dos valores de cada mapa para uma amostra de 10.000 pontos gerados aleatoriamente;
- iv. Determinação do número ótimo de grupos de maneira interativa e visual, observando-se em um gráfico o ponto de mínima inflexão entre a soma de quadrados e diferentes soluções de agrupamento (“regra do cotovelo”);
- v. Análise de agrupamento hierárquico para os pontos amostrais, calculando-se as distâncias dos grupos pelo método de médias;
- vi. Cálculo da matriz cofenética e de sua correlação com a matriz de distâncias originais, e posterior aplicação do Teste de Mantel com 1.000 permutações entre as matrizes para verificar a significância da correlação;
- vii. Aplicação dos parâmetros de agrupamento de maneira distribuída para os cinco mapas climáticos, resultando em um mapa com as classes de agrupamento;
- viii. Reordenamento das classes em função dos valores médios das variáveis climáticas dentro de cada grupo.

2.8 Uso do solo

O mapa de uso do solo foi elaborado a partir do mapeamento de uso e cobertura da terra do Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (CBH-PCJ), material desenvolvido a partir de imagens SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), ortorretificadas e mosaicadas com cenas variando entre 2007 e 2009. Com alto nível de detalhamento das atividades. Para a classificação do uso do solo foram utilizadas principalmente técnicas de interpretação visual de recortes de imagem, trabalho de campo, informações do mapeamento dos projetos

CANASAT e CAFESAT, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e dados sobre cultivos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A partir do mapa do CBH-PCJ, neste trabalho, o sistema de classificação foi readequado para 8 classes conforme exemplificadas na Figura 9 e recortado para a área de estudo. O mapa disponibilizado pelo CBH-PCJ, no entanto não classifica o uso do solo no estado de Minas Gerais, tendo as classes definidas apenas para a parte da bacia hidrográfica dentro do estado de São Paulo.

Figura 9 – Uso do solo na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, apenas para a porção localizada no Estado de São Paulo, obtido por meio de imagens (2007 a 2009) disponibilizado pelo CBH-PCJ

3 RESULTADOS

3.1 Balanço hídrico climático distribuído (BHCD)

A evapotranspiração potencial anual na bacia hidrográfica representa a integração das médias mensais calculada pelo método de Turc (1961) com variáveis normalizadas mensais de temperatura e precipitação. Os mapas das médias mensais de ETP encontram-se no ANEXO A. Os valores de ETP variaram de 437,6 mm nas regiões com maiores taxas até 976,3 mm. É possível ainda perceber uma diferenciação no eixo leste-oeste da área de estudo, com as menores taxas de ETP localizadas na porção leste, e as maiores na parte oeste.

Figura 10 – Dados espacializados de evapotranspiração potencial média anual (ETP) em milímetros (mm), sobre relevo, calculado pelo BHCD para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Figura 11 – Dados espacializados de evapotranspiração real média anual (ETR) em milímetros (mm), sobre relevo, calculado pelo BHCD para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Assim como caracterizado para a ETP, a evapotranspiração real média anual é a integração dos valores médios mensais (os mapas da ETR média mensal encontram-se no ANEXO B). Os valores de ETR variaram de 437,5 mm a 924,1 mm, apresentando a mesma dinâmica descrita para ETP, ou seja, variação ao longo do eixo leste-oeste da área de estudo, sendo que as menores taxas se concentram nas regiões mais declivosas, notadamente a parte leste.

Figura 12 – Dados espacializados de déficit hídrico médio anual (DEF) em milímetros (mm), sobre relevo, calculado pelo BHCD para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

A variável de déficit hídrico representa a integração dos déficits mensais médios anuais (dados referentes as médias mensais encontram-se no ANEXO C). A Figura 12 é caracterizada por uma nítida diferenciação entre as regiões com menores e maiores déficits, com variação de 0 mm a 100,2 mm. A porção leste da área de estudo, que já apresentava menores taxas de ETP e ETR apresentou os menores valores de déficit, sendo o eixo Campinas-Piracicaba e principalmente a bacia hidrográfica do Corumbataí, os locais com maiores déficits hídricos anuais.

Figura 13 – Dados espacializados de excedente hídrico médio anual (EXC) em milímetros (mm), sobre relevo, calculado pelo BHCD para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Diferentemente do déficit médio anual, mas complementando este dado, o BHCD resultou em um excedente médio anual variando de 1,1 mm nas regiões mais montanhosas até 1087,6 mm nos locais da bacia hidrográfica com menores disponibilidades hídricas (parte central e oeste).

Os mapas das variáveis distribuídas mostraram uma variabilidade espacial na escala de bacia hidrográfica, com as menores concentrações de ETP, ETR e DEF localizadas na parte leste da bacia, principalmente, nas áreas mais elevadas, conforme o MDE apresentado na Figura 4. Em relação ao excedente hídrico a relação foi a inversa, com os maiores valores de excedente localizados na porção oeste da área de estudo.

A variação no tempo pode ser visualizada nos dados mensais das variáveis supracitadas. No entanto, pode-se representar esta variação temporal por meio das variáveis mensais como, por exemplo, a Figura 14, que sintetiza o BHCD por meio das médias mensais das variáveis utilizadas.

Figura 14 – Climograma gerado através do BHCD, com médias mensais das variáveis climáticas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Ainda na Figura 14 pode-se observar que as variáveis climáticas se distribuem ao longo do tempo, com período seco e chuvoso diferenciando-se ao longo do ano. O período seco corresponde aos meses de maio a setembro, em decorrência da diminuição na precipitação e maior demanda por água do que disponibilidade, consequentemente, há o aumento do déficit hídrico e diminuição do excedente de água. A evapotranspiração real, assim como a evapotranspiração potencial, são menores nos meses com déficit, pois este período corresponde aos menores índices de radiação solar na área de estudo. Os meses chuvosos, por outro lado, correspondem as maiores taxas de ETP e ETR, com precipitações maiores do que a demanda e maior excedente de água no solo.

3.2 Comparação entre o BHC e o BHCD

De modo a verificar a adequação do modelo para a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba foi realizada uma comparação entre o BHCD realizado através do WBt com os resultados apresentados no trabalho elaborado por Sentelhas et al. (1999).

Por meio do BHC baseado em Thornthwaite & Mather (1955), e publicado por Sentelhas et al. (1999), foram obtidas as variáveis de evapotranspiração potencial e real para 33 dos 61 municípios presentes na área de estudo. Para o cálculo da evapotranspiração potencial seguiu o método proposto por Thornthwaite (1948), com os dados de entrada obtidos por meio de estações meteorológicas e, portanto, pontuais. As variáveis derivadas desta metodologia (ETP e ETR) foram comparadas com aquelas obtidas na modelagem realizada no presente estudo, aqui denominadas de variáveis modeladas (ETP modelada e ETR modelada).

A comparação entre os dois conjuntos de dados foi realizada de modo a evidenciar como as metodologias utilizadas podem divergir, não apenas devido às diferenças de métodos utilizados para o cálculo da ETP, mas também em razão da característica pontual e espacializada dos dados de entrada.

Na Figura 15 encontram-se os valores de evapotranspiração potencial calculados de acordo com o método de Thornthwaite e o método de Turc. A ETP obtida pelo método de Turc foi identificada como ETP modelada, uma vez que é o método utilizado pelo modelo WBt. Os valores de ETP foram obtidos para todos os municípios inseridos na bacia hidrográfica de estudo e que apresentassem balanço hídrico calculado por Sentelhas et al. (1999).

Figura 15 – Comparação entre a evapotranspiração potencial calculada por Sentelhas et al. (1999) (ETP Thornthwaite) e pelo método de Turc (ETP modelada). A ETP modelada corresponde à média anual para cada um dos municípios obtida por meio de dados de entrada distribuídos na bacia hidrográfica

Como observado na Figura 15, a ETP modelada subestimou os valores em relação à mesma variável obtida por Sentelhas et al. (1999) em todos os municípios analisados. Os valores obtidos entre os dois métodos foi apresentou em média diferença de 20%, principalmente devido as particularidades do método para o cálculo da evapotranspiração potencial e a distribuição espacial dos dados de entrada do BHCD. A utilização da variável de radiação solar através do método de Turc (1961), apresenta relação direta com a ETP e devido a espacialização do modelo e as diferenças de orientação da face e inclinação do terreno.

Por meio do MDE é possível estimar que na bacia hidrográfica 76,5% da área está localizada em declividades inferiores a 10° de inclinação, e apenas 23,5% em declividades superiores. Em relação as faces da área de estudo, 37,3% estão voltadas para o norte e 35,2% para o sul, ocorrendo, portanto, um equilíbrio entre estes dois fatores. Entre as declividades superiores a 10° de inclinação 29,7% estão voltadas para o norte, o restante, 70,1%, dividem-se em sul e leste-oeste.

Considerando que a inclinação e a orientação da vertente influenciam na quantidade de radiação solar que chegará a superfície, é esperado que a ETP

modelada neste estudo e aquela calculada por Sentelhas et al. (1999) sejam diferentes, uma vez que esta última não inclui correções para as irregularidades da superfície. Os menores valores encontrados para a ETP modelada podem ser atribuídos a uma menor quantidade de radiação devido as correções da superfície, com a maioria da área com orientações para sul, leste e oeste e inclinações menores do que 10°.

Se utilizarmos o posto meteorológico presente no município de Piracicaba (posto da ESALQ), a radiação medida no posto difere em 28% daquela utilizada na espacialização do balanço hídrico.

A espacialização dos dados permite ainda a obtenção de valores mínimos e máximos na área de estudo, e não mais apenas os dados médios para as variáveis do balanço hídrico. Esta dinâmica pode ser visualizada na Figura 16, na qual estão representados os valores máximos, médios e mínimos da ETP nos municípios dentro da área de estudo.

Figura 16 – Variação dos valores máximos, médios e mínimos da ETP modelada corresponde à média anual para cada um dos municípios calculada por meio de dados de entrada distribuídos na área de estudo

3.3 Análise de agrupamento das variáveis

A análise de agrupamento das variáveis geradas identificou na área de estudo oito grupos referentes às variáveis analisadas (Figura 17).

Os grupos apresentaram maior concentração na parte oeste da área de estudo, no entanto, sem tendências específicas que possam ser notadas visualmente. A parte leste da área de estudo apresentou uma maior heterogeneidade dos grupos, sem grandes agrupamentos perceptíveis.

Figura 17 – Grupos formados na análise de cluster de acordo com as variáveis ETP, ETR, EXC, DEF e Precipitação anual para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Os resultados obtidos na correlação das variáveis climáticas distribuídas na área de estudo encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise de correlação entre as variáveis utilizadas na separação de grupos na bacia. ETR: evapotranspiração real anual; DEF: déficit hídrico anual; ETP: evapotranspiração potencial anual; P: precipitação anual; EXC: excedente anual

Variáveis anuais	ETR	DEF	ETP	P	EXC
ETR		0.2	0.9	-0.3	-0.7
DEF	0.2		0.6	-0.8	-0.7
ETP	0.9	0.6		-0.6	-0.9
P	-0.3	-0.8	-0.6		0.9
EXC	-0.7	-0.7	-0.9	0.9	

Pode-se notar que existem correlações negativas entre as variáveis (Tabela 4). As variáveis ETR, DEF e ETP se correlacionam positivamente entre si e negativamente com as variáveis Precipitação e Excedente.

A Tabela 5 descreve as médias das variáveis geradas para cada grupo formado.

Tabela 5 – Grupos formados pela análise de cluster para as variáveis de Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), Déficit hídrico (DEF), Excedente hídrico (EXC) e Precipitação anual

Grupos	ETP	ETR	DEF	EXC	Precipitação anual
1	767,3	754,7	12,6	658,2	1.419,8
2	839,2	796,9	42,0	529,4	1.353,9
3	723,6	719,6	3,9	729,8	1.450,0
4	677,3	675,2	2,1	791,6	1.466,7
5	627,0	626,1	0,9	852,0	1.477,5
6	873,8	814,5	59,1	490,1	1.341,1
7	557,8	557,6	0,2	926,8	1.483,8
8	807,2	772,2	34,9	569,8	1.366,0

O cálculo da matriz cofenética e de sua correlação com a matriz de distâncias originais resultou em valores de $r = 0,80$ com uma probabilidade de 0,0001. O Teste de Mantel com 1000 permutações entre as matrizes resultou em $r = 0,80$ a uma probabilidade de $p = 0,001$.

De modo a obter um reagrupamento que fornecesse informações acerca das características hidrológicas da região, as médias das variáveis obtidas para cada grupo foram reclassificadas de acordo com a importância dentro dos grupos, a partir da área ocupada e pelo tipo predominante de uso, de modo a formar quatro grupos distintos na bacia (Tabela 6).

Os grupos 2, 8, 6 e 1 são os que apresentaram as maiores médias de ETP, ETR e DEF, sendo o 2 e 8 os grupos com maiores médias destas variáveis, e os grupos 6 e 1 com valores intermediários. Quando espacializados na área de estudo são os grupos localizados predominantemente na região oeste, com algumas manchas na parte leste. Na Figura 18 e Tabela 5 é possível visualizar a formação de dois grandes subgrupos com médias de ETP, ETR e DEF maiores nos grupos 1 e 2, e médias de EXC e Precipitação maiores nos grupos 3 e 4.

Nos grupos 3, 4, 5 e 7 ocorreu a concentração das maiores médias das variáveis de excedente hídrico e precipitação anual, com distribuição predominante destes grupos a este, e alguns pontos na divisa leste (Figura 19). Novamente nestes grupos ocorreu maiores valores para as variáveis citadas nos grupos 3 e 4, e valores intermediários para os grupos 5 e 7.

Tabela 6 – Médias das variáveis reagrupadas em quatro grupos de acordo com as médias iniciais das variáveis (Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), Déficit hídrico (DEF), Excedente hídrico (EXC) e Precipitação anual)

Grupos	ETP	ETR	DEF	EXC	Precipitação
1	856,5	805,8	50,5	509,7	1.347,5
2	787,3	763,4	23,8	614,0	1.392,9
3	592,4	591,8	0,6	889,4	1.480,7
4	700,5	697,4	3,0	760,7	1.458,4

Figura 18 – Localização dos grupos reordenados na bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Quanto a área que cada grupo ocupa na área de estudo ocorre uma maior concentração nos grupos 1 e 2, ocupando os dois mais de 80% da bacia, e, conseqüentemente, uma pequena porção da área de estudo é ocupada pelos grupos 3 e 4 (Tabela 7).

Tabela 7 - Distribuição dos grupos na área de estudo quanto a área e porcentagem de ocupação de cada um

Grupos	Área	
	Km ²	%
1	5.615,7	46,1
2	4.301,7	35,3
3	542,9	4,5
4	1.717,7	14,1
Total	12.177,96	100

3.4 Caracterização dos agrupamentos

Os quatro grupos formados após o reordenamento foram caracterizados quanto ao uso do solo, mais especificamente quanto a quantidade de pastagem, principal uso na área de estudo, encontrada em cada grupo (Tabela 8).

Tabela 8 – Caracterização dos grupos após o reordenamento quanto a área de pastagem encontrada em cada classe

Grupos	Área de pastagem	
	Km ²	%
1	1.295,4	46,7
2	970,2	35,0
3	70,3	2,5
4	438,7	15,8
Total	2.774,7	100

Os grupos 1 e 2 possuem as maiores áreas de pastagem da área de estudo, com predominância destas áreas no grupo 1. A baixa quantidade de pastagem encontrada nos grupos 3 e 4 deve-se, principalmente, a falta de informação oficial do uso do solo na região mineira. Uma vez que os grupos 3 e 4 distribuem-se primordialmente na parte leste da bacia hidrográfica não foi possível quantificar o uso do solo destes grupos.

Ainda de acordo com a média utilizada na divisão dos grupos (Tabela 5), foi realizada a caracterização dos valores médios de cada variável dentro dos grupos, formando as seguintes classes de valores: altos; médios-altos; médios-baixos; e baixos. Essas classes são correspondentes as médias obtidas na análise de agrupamento e estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 9 – Caracterização dos grupos quanto aos valores das médias em cada uma das variáveis obtidas na análise de agrupamentos. Classificação em classes de valores: altos; médios-altos; médios-baixos; e baixos. (Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), Déficit hídrico (DEF), Excedente hídrico (EXC) e Precipitação anual (Prec))

Grupos	Características	
1	ETP, ETR e DEF altos	Prec e EXC baixos
2	ETP, ETR e DEF médios-altos	Prec e EXC médios-baixos
3	ETP, ETR e DEF médios-baixos	Prec e EXC médios-altos
4	ETP, ETR e DEF baixos	Prec e EXC altos

De acordo com os dados obtidos na Tabela 9 é possível identificar as características dos grupos frente as variáveis de ETP, ETR, DEF, EXC e Precipitação. A dinâmica destas variáveis formou dois grupos extremos e dois intermediários na bacia hidrográfica. Os grupos foram divididos quanto a influência dos conjuntos ETP-ETR-DEF e EXC-Prec. Esta distribuição também se reflete na localização destes dois conjuntos, como citado anteriormente (Figura 18), com a concentração dos grupos com maior influência das variáveis ETP-ETR-DEF na parte leste, e dos grupos do conjunto EXC-Prec na parte oeste, região também caracterizada por uma maior declividade.

4 DISCUSSÃO

A área de estudo apresenta uma heterogeneidade natural que pode ser claramente observada no gradiente topográfico existente, refletindo na distribuição da precipitação, temperatura e influenciando fortemente os resultados obtidos no cálculo da evapotranspiração. Na bacia hidrográfica do rio Piracicaba, áreas com cerca de 100 km de distância apresentam características distintas em termos hidrológicos, e consequentemente precisam ter o uso da terra planejado devido as variações observadas.

Aplicando-se o conceito de balanço de água verde e azul, a área de estudo atualmente encontra-se em situação crítica de disponibilidade hídrica, especialmente devido à alta demanda hídrica ocasionada pelo desenvolvimento econômico da região e outorga do Sistema Cantareira (PASCHOALOTTI; NETO, 2013), o que pode ser considerado uso de água azul. Neste caso, torna-se mais importante o manejo da água verde, buscando garantir o suprimento de água para os diversos usos, através da melhoria na gestão da evapotranspiração a fim de aumentar o saldo de água azul para os usuários a jusante (CALDER, 2007; DIJK, VAN; KEENAN, 2007).

Assim, a heterogeneidade observada nos processos de precipitação e evapotranspiração precisam ser considerados para direcionar práticas de manejo agrícola, conservação de solos, restauração florestal e mesmo o uso da água azul (ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2006). Tomando-se alguns exemplos na bacia hidrográfica do rio Piracicaba (APÊNDICE 1), nota-se que a região localizada no Estado de Minas Gerais, tendo o município de Extrema como referência, apresenta maior precipitação e excedente hídrico. Esta região é atualmente ocupada por pastagens degradadas, apresentando baixo consumo de água verde (ZHANG et al., 2001), e a restauração pode ser benéfica para regulação hídrica, porém com possíveis efeitos de redução da disponibilidade hídrica nos anos iniciais do desenvolvimento florestal, que geralmente apresentam maior consumo de água (LIMA et al., 2012; FERRAZ et al., 2013), porém sem afetar significativamente a vazão dos riachos.

Na sub-bacia Camanducaia o déficit hídrico médio anual se concentra na região oeste da sub-bacia, com o município de Monte Alegre do Sul apresentando déficits mínimos em todo seu território. No entanto, na Figura 19, ao visualizar

apenas o município supracitado o déficit hídrico se distribui em menores e maiores intensidades, com regiões apresentando déficits de até 21,7 mm.

Figura 19 – Variáveis climáticas espacializadas (ETP, ETR, Excedente e Déficit), sobre relevo, obtidas pelo BHCD para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba e apresentadas em duas escalas: (a) na sub-bacia Camanducaia (escala grosseira); e (b) no município Monte Alegre do Sul (escala fina)

Para o município de Jaguariúna na porção central da bacia, a situação é um pouco diferente. A sazonalidade é mais intensificada, com redução da precipitação anual, aumento do déficit hídrico e redução do excedente hídrico. Nestas condições, ações de restauração florestal devem observar as características locais de relevo, solos e exposição solar, já que o aumento do consumo de água verde aliada as condições de baixa capacidade de armazenamento dos solos, poderá reduzir a vazão significativamente (FARLEY et al., 2005; CALDER, 2007). Nestas áreas, os plantios de restauração precisam de maior planejamento local.

Em regiões localizadas na parte alta da bacia hidrográfica do rio Corumbataí, a redução de chuvas, maior ETP e déficit, representam condições que requerem maior cuidado com ações de restauração florestal.

Devido às características de solo e clima, a região apresenta uma transição da Floresta Estacional Semidecídua para Cerrado (RODRIGUES, 1999), sendo que o uso da água por formações de maior porte deverá respeitar a disponibilidade natural da região. Nestes locais, as variações locais poderão determinar a presença de riachos intermitentes que estariam mais susceptíveis aos efeitos de redução de vazão (FARLEY et al., 2005).

Os valores obtidos por meio do método de Turc demonstrou estar condizente com os valores obtidos na região por outros métodos (e.g. SENTELHAS et al., 1999). Conforme já comentado anteriormente, foram observadas diferenças entre os valores obtidos em relação aos cálculos pelo método de Thornthwaite (LU et al., 2005).

A variação apresentada entre os métodos pode ser explicada pelas diferenças dos valores pontuais calculados para a localização das estações meteorológicas e valores médios obtidos para o município, principalmente considerando que existe grande variabilidade local. Por outro lado, a incorporação da radiação solar e do ajuste de temperatura em função dos gradientes topográficos devem ser responsáveis pelas grandes variações observadas (DYER, 2009).

Desta forma, gradientes obtidos pela interpolação espacial de dados de postos meteorológicos criam superfícies contínuas entre os pontos de coleta e que não são encontradas localmente (CECÍLIO et al., 2012). Assim, estes modelos que resultam de interpolação espacial, têm sua principal aplicação no planejamento da disponibilidade hídrica regional, enquanto que os mapas produzidos neste trabalho se destinam mais ao planejamento local.

A variabilidade local observada por toda a área de estudo parece estar associada fortemente ao efeito do relevo no processo de evapotranspiração (FISHER et al., 2005; DYER, 2009). Considerando-se que a elevação e a exposição à radiação solar foram incorporadas ao modelo de evapotranspiração espacializado, grande parte da variabilidade local pode estar associada a estas influências topográficas (BARTHOLOMEUS et al., 2011; ANNING et al., 2014).

A organização da área de estudo em classes (ou grupos) com características semelhantes permite compreender a sensibilidade natural das áreas e possíveis efeitos de redução de vazão, também realizado por Farley et al. (2005) e Zomer et al. (2008). Os grupos formados neste trabalho apresentam características distintas de disponibilidade e consumo potencial, fazendo com que um gradiente de situações possa ser identificado.

Na Tabela 10, reorganizando os valores médios dos grupos pela precipitação, e adicionando o cálculo de ETP/P, pode-se observar que os grupos 2, 6 e 8 apresentam relação ETP/P acima de 0,59, acentuando o déficit hídrico, podendo ser classificados como de média-alta sensibilidade em termos de consumo de água. Farley et al. (2005) aponta que para valores de ETP/P acima de 0,70, é esperada uma redução de 50% na vazão dos riachos.

Tabela 10 – Valores médios de indicadores para os 8 grupos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Piracicaba. Precipitação (PPT), evapotranspiração potencial (ETP), excedente (EXC) e déficit (DEF)

GRUPO	PPT	ETP	ETP/P	EXC	DEF	Sensibilidade
6	1.341,10	873,8	0,65	490,1	59,1	MEDIA-ALTA
2	1.353,90	839,2	0,62	529,4	42,0	MEDIA-ALTA
8	1.366,00	807,2	0,59	569,8	34,9	MÉDIA
1	1.419,80	767,3	0,54	658,2	12,6	MÉDIA
3	1.450,00	723,6	0,50	729,8	3,9	MÉDIA
4	1.466,70	677,3	0,46	791,6	2,1	BAIXA
5	1.477,50	627,0	0,42	852,0	0,9	M. BAIXA
7	1.483,80	557,8	0,38	926,8	0,2	M. BAIXA

Os oito grupos formados inicialmente, demonstram a existência de dois grandes blocos (a leste e oeste da área de estudo), mas com grande variabilidade interna. Os dois grandes blocos também são observados na reorganização em quatro grupos, 1 e 2 à leste e, 3 e 4 a oeste.

A distinção interna dos blocos visualmente pode ser atribuída ao efeito do relevo sobre a evapotranspiração (DYER, 2009), a ser discutido posteriormente.

Utilizando os valores de ETP/P e organizando-os em forma de gradiente, a Figura 20 mostra a distribuição dos grupos em relação a este indicador. Nota-se claramente um gradiente de sensibilidade de leste para oeste, mas ainda a grande presença de variabilidade local.

Pode-se notar que na parte leste da bacia hidrográfica, áreas com baixa sensibilidade ($ETP/P = 0,37$) se encontram ao lado de áreas com alta sensibilidade ($ETP/P = 0,65$).

Figura 20 – Distribuição dos grupos na bacia hidrográfica do rio Piracicaba em relação ao indicado ETP/P

Em conformidade com o objetivo do trabalho, o cálculo do BHCD apresenta-se como ferramenta para o planejamento da restauração florestal. Entende-se que restauração florestal compreende diferentes métodos, desde o simples isolamento da área até a implantação e manutenção da floresta (MARCONATO et al., 2015). Desta forma, a variabilidade observada poderá ser útil também na escolha do método, do tipo de floresta e da melhor estratégia de localização das áreas em função dos serviços ecossistêmicos priorizados (FERRAZ et al., 2014).

No entanto, as principais dificuldades encontradas na aplicação do método, referem-se à necessidade de adaptação da ferramenta desenvolvida para as condições e disponibilidade de dados no Brasil, carência de informações

especialmente distribuídas e de resolução espacial compatível com a escala de modelagem, além do fato do método de Turc necessitar de informações de radiação solar não disponíveis para todas as regiões do país em uma escala com boa resolução espacial.

Na Figura 20 (ETP/P) é nítida a influência do relevo, destacando divisores de água e vertentes opostas com diferentes taxas. Sobre este efeito dois pontos devem ser considerados:

- A incorporação do efeito do relevo no cálculo da radiação e ETP parece ser fundamental para o planejamento da disponibilidade hídrica natural, principalmente considerando-se a conversão de pastagens para coberturas florestais;
- Os resultados mostram grandes implicações práticas envolvendo o planejamento da ocupação, observando limitações de macro escala, mas entendendo as condições encontradas na escala local.

Com relação à intensidade de plantio (número de indivíduos por hectare), as florestas em estágio inicial de desenvolvimento, sejam elas exóticas (Eucalipto, por exemplo) ou nativas (visando restauração florestal), demandam mais água que outros usos, como pastagens, para seu crescimento (CALDER, 2007).

Deste modo, em regiões mais críticas em disponibilidade hídrica, os plantios não devem ser realizados em grandes áreas ao mesmo tempo sob o risco de riachos apresentarem redução drástica de vazão (FARLEY et al., 2005). Nestas áreas, a restauração florestal deverá ser realizada de modo gradativo, concentrando-se em áreas ripárias visando a conservação das características naturais de disponibilidade hídrica.

Conforme proposto por Lima et al., (2012), a localização da floresta na paisagem é fundamental para auxiliar os serviços ecossistêmicos relacionados à conservação da água. Os plantios de topo de morro, propiciam melhor infiltração e recarga dos aquíferos, sendo recomendados principalmente para regiões com excedente hídrico e alta sazonalidade (ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2006).

Da mesma forma, nas áreas de encosta, a proteção do solo propiciada pelas florestas garante maior conservação dos solos e redução dos processos erosivos (LIMA, et al., 2012). Esta estratégia é importante em locais com chuvas concentradas e de alta intensidade.

De modo geral, as florestas ripárias, por ocuparem pequena proporção na paisagem e pela importância que apresentam na conservação da água e do ambiente ripário (SALEMI et al., 2012), não apresentam qualquer restrição para os grupos hidrológicos estudados.

Os resultados obtidos de variação regional (gradiente topográfico) e variação local, permitiram hierarquizar as decisões sobre restauração florestal sob a perspectiva da disponibilidade hídrica, tomando-se primeiramente a informação regional (escala macro); e em seguida, na escala meso, variações locais atribuídas principalmente à influência do relevo podem ser mais restritivas.

5 CONCLUSÕES

O modelo BHCD foi calculado para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba e mostrou a existência de dois gradientes hidrológicos (macro e meso), ambos controlados pelos aspectos naturais de relevo, solos e clima. No gradiente regional, foi observada uma variação na disponibilidade hídrica e sazonalidade, enquanto que na escala meso, observou-se a variabilidade na evapotranspiração, influenciada pelo efeito do relevo sobre a radiação incidente.

A comparação entre o BHC tradicional pontualmente baseado em estações meteorológicas e que pode ser espacializado por meio de técnicas de interpolação, mostrou que o modelo testado (BHCD) representa melhor a variabilidade local, principalmente devido a influência significativa do relevo, justificando a abordagem de cálculo-interpolação.

Os grupos hidrológicos obtidos podem orientar e subsidiar o planejamento da restauração florestal e/ou do reflorestamento sob o ponto de vista de uso da água, regulação hídrica e, também do potencial de serviços hidrológicos a serem obtidos.

Os gradientes hidrológicos encontrados se combinam e podem ser utilizados no planejamento da restauração florestal, observando os aspectos de disponibilidade hídrica, evapotranspiração potencial e sazonalidade.

Por meio dos dados apresentados é possível concluir que a obtenção de dados espacializados e sistematizados é importante no planejamento da restauração florestal visando a conservação ou produção de água, sendo o BHCD uma ferramenta que engloba as características hidrológicas tanto regionais quanto locais.

Ao considerar os principais aspectos naturais, sociais e suas interações e utilizando abordagens clássicas como o balanço hídrico e análise em diferentes escalas, apoiadas em ferramentas modernas e sistemas computacionais, é possível subsidiar ações de manejo e conservação dos recursos naturais de acordo com critérios de disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

- AB´SABER, A. N.; GOLDEMBERG, J.; RODES, L.; ZULAUF, W. Identificação de áreas para o reflorestamento no espaço total do Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, n. 9, p. 63-119, 1990.
- ALVARES, C. A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do estado de São Paulo**. 2011. 279p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L. DE; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 291, n. 1-2, p. 1–27, 2004.
- ANNING, A. K.; DYER, J. M.; MCCARTHY, B. C. Tree growth response to fuel reduction treatments along a topographic moisture gradient in mixed-oak forests of Ohio, U.S.A. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 421, n. January, p. 413-421, 2014.
- BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K. DE; CRISTINA, V. S.; PEDROSO, K. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, Guarapuava, v.4 n.1, p. 131–149, 2008.
- BARTHOLOMEUS, R. P.; WITTE, J. P. M.; RUNHAAR, J. Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. **Ecohydrology**, Hoboken, v. 5, n. 6, p. 808–818, 2011.
- BAUHUS, J.; MEER, P. van der; KANNINEN, M. (Ed). **Ecosystem goods and services from plantation forests**. Routledge: Earthscan, 2010. 245 p.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 55, p.3-23, 1982.
- BRANCALION, P. H. S.; VIANI, R. A. G.; CALMON, M.; CARRASCOSA, H.; RODRIGUES, R. R. How to Organize a Large-Scale Ecological Restoration Program ? The Framework Developed by the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. **Journal of Sustainable Forestry**, London, v. 32, p. 37-41, 2013.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – IBAMA. **Pagamentos por Serviços Ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011. 272 p.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 185–228, 2004.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H. C.; et al. The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 388, n. 3-4, p. 208–216, 2010.
- CALDER, I. R. Forests and water-Ensuring forest benefits outweigh water costs. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 110–120, 2007.

CALMON, M.; BRANCALION, P. H. S.; PAESE, A.; et al. Emerging Threats and Opportunities for Large-Scale Ecological Restoration in the Atlantic Forest of Brazil. **Restoration Ecology**, Amsterdam, v. 19, n. 2, p. 154–158, 2011.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, K. R. DA; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, p. 478–488, 2012.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ- CBH-PCJ. Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. **Plano das bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 – 2020**; relatório síntese. São Paulo: Cobrape: Neoband Soluções Gráficas, 2011. 128p.

DE OLIVEIRA, J.B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: IAC; Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999, 108 p.

DIJK, A. I. J. M. VAN; KEENAN, R. J. Planted forests and water in perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 251, n. 1-2, p. 1–9, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de H.R. Ghey; A.A. de Sousa; F.A.V. Damasceno; J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.

DYER, J. M. Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 24, n. 3, p. 391–403, 2009.

DYER, J. User 's **Guide for Water Balance Toolbox for ArcGIS Before You Start** : Important Information. Disponível em < http://www.ohio.edu/people/dyer/WB/water_balance_v2_user_manual.pdf >p. 1–37, 2013. Acesso em: 28 set. 2013.

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. Building Water Resilience in the Face of Global Change: From a Blue-Only to a Green-Blue Water Approach to Land-Water Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 136, n. 6, p. 606–610, 2010.

FARLEY, K. A.; JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. **Global Change Biology**, Guildford, v. 11, n. 10, p. 1565–1576, 2005.

FERRAZ, S. F. B.; FERRAZ, K. M. P. M. B.; CASSIANO, C. C.; et al. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 29, n. 2, p. 187–200, 2014.

FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. D. P.; RODRIGUES, C. B. Managing forest plantation landscapes for water conservation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 58–66, 2013.

FISHER, J. B.; DEBIASE, T. A.; QI, Y.; XU, M.; GOLDSTEIN, A. H. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. **Environmental Modelling and Software**, Oxford, v. 20, n. 6, p. 783–796, 2005.

HELVEY, J. D.; PATRIC, J. H. Design criteria for interception studies. **Hydrological Sciences Bulletin. International Association of Hydrological Sciences**, v. 67, p. 131–137, 1966.

HIBBERT, A. Forest Treatment Effects on Water Yield. **International Symposium For Hydrology**, Asheville, p. 527–543, 1967.

IRRIGART. Engenharia & Consultoria em Recursos Hídricos e Meio Ambiente Ltda. **Relatório da Situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Juaí - 2002/2003**. Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.comitepcj.org.br>>. Acesso em: 05 maio 2013.

JACKSON, R. B.; JOBBÁGY, E. G.; AVISSAR, R.; et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. **Science**, New York, v. 310, n. 5756, p. 1944–1947, 2005.

JOHNSON, R. The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 109, n. 1-3, p. 1–7, 1998.

KANE, V. R.; LUTZ, J. A.; ALINA CANSLER, C.; et al. Water balance and topography predict fire and forest structure patterns. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 338, p. 1–13, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112714006203>>. Acesso em: 28 set. 2015.

KRONKA, F. J. N.; NALON, M. A.; MATSUKUMA, C. K.; KANASHIRO, M. M.; YWANE, M. S. S.; PAVÃO, M.; DURIGAN, G.; LIMA, L. M. P. R.; GUILLAUMON, J. R.; BAITELLO, J. B.; BORGIO, S. C.; MANETTI, L. A.; BARRADAS, A. M. F.; FUKUDA, J. C.; SHIDA, C. N.; MONTEIRO, C. H. B.; PONTINHA, A. A. S.; ANDRADE, G. G.; BARBOSA, O.; SOARES A. P.; COUTO, H. T. Z. do; JOLY, C. A. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Imprensa Oficial, 2005. 200 p.

KUCZERA, G. Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 94, n. 3-4, p. 215–236, 1987. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6C-487FBY6-12P/2/80e7248c3007e0c82d8b8a52af61894e>>. Acesso em: 02 jul. 2014.

LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B.; BRANCALION, P. H.; RODRIGUES, R. R.; GARDNER, T. Creating space for large-scale restoration in tropical agricultural landscapes. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 13, n. 4, p. 211–218, 2015. Disponível em: <<http://www.esajournals.org/doi/10.1890/140052>>. Acesso em: 27 ago. 2015.

LENCIONI, S. A metamorfose de São Paulo: o anúncio de um novo mundo de aglomerações difusas. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, Curitiba, n. 120, p. 133–148, 2011.

LIMA, W. P. **A silvicultura e a água: ciência, dogmas, desafios**, Cadernos do Diálogo, Rio de Janeiro, v. 1, p. 64, 2010.

LIMA, W. D. P.; FERRAZ, S. F. D. B.; RODRIGUES, C. B.; VOIGTLAENDER, M. Assessing the Hydrological Effects of Forest Plantations in Brazil. **River Conservation and Management**, Chichester: John Wiley, p.57–66, 2012.

LIMA, W. P.; LAPROVITERA, R.; FERRAZ, S. F. B.; RODRIGUES, C. B.; SILVA, M. M. Forest Plantations and Water Consumption: A Strategy for Hydrosolidarity. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1–8, 2012.

- LU, J.; SUN, G.; MCNULTY, S. G.; AMATYA, D. M. A comparison of six potencial evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 6, p. 621–633, 2005.
- MAITRE, D. C.; SCOTT, D. F.; COLVIN, C. A review of information on interactions between vegetation and groundwater. **Water South Africa**, Pretória, v. 25, n. 2, p. 137–152, 1999.
- MARCONATO, G. M.; MAIMONI-RODELLA, R. C. S.; ATTANASIO, C. M. Evaluation of Four Methods for Restoring a Degraded Swamp Forest. **Open Journal of Forestry**, v. 5, p. 500–509, 2015.
- MEYFROIDT, P.; RUDEL, T. K.; LAMBIN, E. F. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 107, n. 49, p. 20917–20922, 2010.
- MOLIN, P.G. **Dynamic modeling of native vegetation in the Piracicaba River basin and its effects on ecosystem services Piracicaba**. 2014. 147 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- NEARY, D. G.; ICE, G. G.; JACKSON, C. R. Linkages between forest soils and water quality and quantity. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, n. 10, p. 2269–2281, 2009.
- PASCHOALOTTI, E. L., NETO, W. M. Sistema Cantareira – O desafio para atender regiões hidrográficas diferentes com uma disponibilidade hídrica limitada. **Águas do Brasil**. Birigui, v. 3, n. 6, p. 7-11, 2013.
- PEDRO JR., M.J.; MELLO, M.H.A.; ORTOLANI, A; ALFONSI, R.R.; SENTELHAS, P.C. **Estimativa das temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1991. 11 p. (Boletim Técnico, 142)
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PERVEEN, S.; JAMES, L. A. Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross-scale comparisons of water resources vulnerability. **Applied Geography**, Oxford, v. 31, n. 1, p. 321–328, 2011.
- PIEDALLU, C.; GÉGOUT, J. C.; PEREZ, V.; LEBOURGEOIS, F. Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. **Global Ecology and Biogeography**, Hoboken, v. 22, n. 4, p. 470–482, 2013.
- PIERCE, R.S. Evidence of overland flow on forest watershed. **Forest Hydrology**, Oxford, n. 1, p 247-254, 1965.
- PRÍNCIPE, A.; NUNES, A.; PINHO, P.; et al. Modeling the long-term natural regeneration potential of woodlands in semi-arid regions to guide restoration efforts. **European Journal of Forest Research**, New York, p. 757-767, 2014.
- PRITCHETT, W.L. **Properties and Management of Forest Soils**. New York: John Wiley, 1979. 500p.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, Essex, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

ROCKSTRÖM, J. ; FALKENMARK, M. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Herndon, v. 132, p. 129–133, 2006.

RODRIGUES, R. R. A vegetação de Piracicaba e municípios do entorno. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 189, p.1–18, 1999.

SALEMI, L. F.; GROppo, J. D.; VISAN, R.; et al. Riparian vegetation and water yield: A synthesis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 454-455, p. 195–202, 2012.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente: Instituto Florestal. **Sistema de informações florestais do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.iflorestal.sp.gov.br/sifesp/>>. Acesso em: 03 jun. 2015.

SCOTT, D. F. On the hydrology of industrial timber plantations. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 20, p. 4203–4206, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.6104>>. Acesso em: 16 ago. 2013.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balancos Hídricos Climatológicos do Brasil**: 500 balanços hídricos de localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ, 1999. 1 CD-ROM. Disponível em: < <http://www.leb.esalq.usp.br/nurma.html>>. Acesso em: 05 maio 2014.

SILVA, A. M. DA; NALON, M. A.; KRONKA, F. J. D. N.; et al. Historical land-cover/use in different slope and riparian buffer zones in watersheds of the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 4, p. 325–335, 2007.

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: A review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 240, n. 3-4, p. 147–186, 2001.

TAMBOSI, L. R.; VIDAL, M. M.; FERRAZ, S. F. D. B.; METZGER, J. P. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 29, n. 84, p. 151–162, 2015.

THORNTHWAITE, C. W.;. An approach toward a rational classification of climate. **The Geographical Review**, New York, v. 38, p. 55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W; Mather, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v.8, n.1, p. 59–117, 1955.

TURC, L.; Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. **Annales agronomiques**, Paris, v. 12, n. 1, p. 13-49, 1961.

Shuttle Radar Topography Mission. **1 Arc Second scene, Filled Finished 2.0, Global Land Cover Facility**. Maryland: University of Maryland /College Park. Disponível em <<http://glcf.umd.edu/data/srtm/>>. Acesso em: 05 maio 2015.

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water Resources Research**, Washington, v. 37, n. 3, p. 701-708, 2001.

ZOMER, R. J.; TRABUCCO, A.; BOSSIO, D. A.; VERCHOT, L. V. Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 126, n. 1-2, p. 67–80, 2008.

ANEXOS

ANEXO A - Mapas mensais de evapotranspiração potencial para a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba

ANEXO B - Mapas mensais de evapotranspiração real para a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba

ANEXO C - Mapas mensais de déficit hídrico para a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba

ANEXO D - Mapas mensais de excedente hídrico para a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – Divisão política da bacia hidrográfica do rio Piracicaba

Divisão política da bacia hidrográfica do rio Piracicaba

1-Dois Córregos	23-Limeira	45-Paulínia
2-Anhembi	24-Americana	47-Jaguariúna
3-Torrinha	25-Monte Mor	48-Monte Alegre do Sul
4-Santa Maria da Serra	26-Amparo	49-Pedreira
5-Águas de São Pedro	27-Campinas	50-Santo Antônio de Posse
6-Piracicaba	28-Hortolândia	51-Serra Negra
7-São Pedro	29-Sumaré	52-Atibaia
8-Itirapina	30-Itatiba	53-Bragança Paulista
9-Analândia	31-Jundiaí	54-Mairiporã
10-Charqueada	32-Vinhedo	55-Toledo
11-Ipeúna	33-Louveira	56-Bom Jesus dos Perdões
12-Saltinho	34-Morungaba	57-Pinhalzinho
13-Corumbataí	35-Valinhos	58-Socorro
14-Rio Claro	36-Campo Limpo Paulista	59-Nazaré Paulista
15-Mombuca	37-Jarinu	60-Pedra Bela
16-Rio das Pedras	38-Tuiuti	61-Piracaia
17-Capivari	39-Artur Nogueira	62-Vargem
18-Iracemápolis	40-Cosmópolis	63-Camanducaia
19-Santa Gertrudes	41-Nova Odessa	64-Extrema
20-Santa Bárbara d'Oeste	42-Engenheiro Coelho	65-Joanópolis
22-Cordeirópolis	43-Holambra	67-Itapeva