

Crerios para a priorização de microbacias hidrográficas: subsídios o implantação de esquemas de pagamentos por serviços ambientais hídricos

Criteria for priority catchments: support to implementation of payment for environmental services in watersheds

Priscila Ikematsu^a, Ana Cândida Melo Cavani Monteiro^a, Aline Ribeiro Machado^b, Alessandra Gonçalves Siqueira^c, Deborah Terrell^a, Luiz Gustavo Faccini^a, Mariana Hortelani Carnesecca Longo^b, Nadia Franqueiro Correa^a, Priscilla Moreira Argentin^a e Tatiana Luiz dos Santos Tavares^a

a Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

b Seção Sustentabilidade de Recursos Florestais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

c Seção de Geotecnia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: priscilai@ipt.br

Palavras-chave:

pagamento por serviços ambientais, PSA, rea prioritária, recursos hídricos; Joanópolis.

Keywords:

payment for environmental services; priority area; water resource; PES; Joanópolis.

Resumo

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) é um instrumento economico estratégico e promissor para o fomento o proteção e o restauração de ecossistemas e seus serviços, como a garantia da disponibilidade qualiquantitativa da gua. A voluntariedade na transação entre as partes é uma das premissas dos acordos, o que pode resultar em investimentos em áreas com baixa relevância na provisão dos serviços ambientais hídricos. Nesse contexto, o trabalho objetivou identificar áreas prioritárias para os investimentos em PSA-hídrico no município de Joanópolis - SP, na escala da microbacia hidrográfica, por meio da seleção de crerios biofísicos e geoambientais. As variáveis foram selecionadas a partir da consulta a trabalhos de referência, das características da área de estudo, da viabilidade de representação espacial dos dados e de reuniões técnicas com equipe multidisciplinar. O método desenvolvido reuniu os crerios em dois grupos: um para representar o potencial hídrico natural de cada microbacia hidrográfica, onde investimentos em ações de proteção e conservação ambiental devem ser aplicados; e outro indicando o grau de degradação das mesmas, onde devem ser promovidas ações de recuperação florestal. Pressupõe-se que melhores benefícios em termos hídricos podem ser alcançados se os recursos em ações de proteção/conservação ou recuperação/restauração forem aplicados em áreas com alta prioridade de acordo com a metodologia proposta.

Os resultados auxiliam no suporte à tomada de decisão na definição das áreas estratégicas para os investimentos em PSA, contribuindo com a gestão dos recursos hídricos, planejamento ambiental e conhecimento científico.

Abstract

Payment for Environmental Services (PES) is a strategic economic tool to promote the protection and recovery of ecosystems and their services, such as ensuring the availability of water. PES schemes must be initiated with the voluntary participation of the providers which may result in investments in lands that are at low risk of degradation or have little influence over hydrological changes. In this context, this paper aims at identifying priority areas for the investments on PES in watersheds, in the catchment scale, based on selection of biophysical and geoenvironmental criteria. The study area was the municipality of Joanópolis, São Paulo State, which lies within the Cantareira System, one of the main water supply systems of the Metropolitan Region of São Paulo City. Different variables were selected based on the literature review, on the characteristics of the studied area, on the possibility of mapping in the work scale and on technical meetings with a multidisciplinary team. The method consisted of gathering the criteria into two groups: one representing the natural potential of each catchment, where investments in environmental protection and conservation actions should be applied; and another group indicating the degradation status of each catchment, where forest recovery activities should be promoted. It is expected that better hydrological benefits may be achieved if investments in conservation or recovery actions are applied in high priority areas defined by the methodology. The results can be used to support a decision making for investments in PES strategic areas, contributing to the management of water resources, the environmental planning and the scientific knowledge.

1 Introdução

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) inclui entre seus limites, de forma aproximada, uma bacia hidrográfica com balanço hídrico preocupante (a Bacia do Alto Tietê), resultado da oferta natural restrita por ser uma região de cabeceiras e pela elevada demanda devido à grande população e às atividades econômicas que abriga. Além disso, por ser o maior aglomerado urbano do país, as reservas de água hoje existentes estão submetidas a intensos impactos advindos da expansão urbana, afetando a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos utilizados para o abastecimento público (IKEMATSU, 2014; JACOBI; CIBIM; LEAO, 2015; TAGNIN, 2015). Como a demanda atual é maior do que a oferta natural dos sistemas existentes, há a necessidade de importar água da Bacia do Rio Piracicaba, a qual é utilizada para a operação de um importante sistema produtor de água da RMSP – o Sistema Cantareira.

Entre o final de 2013 e 2014, uma redução significativa no volume de precipitação ocorreu nas áreas de contribuição do Sistema Cantareira, afetando diretamente o volume de água armazenado nos reservatórios que o compõem (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2015). As opções para o enfrentamento dessa situação, na época, foram emergenciais, como a redução de vazão da água disponibilizada e a transferência de água tratada de outros Sistemas Produtores por meio de obras pontuais (SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS, 2015), mas existem estratégias inovadoras que devem ser exploradas para prevenir e minimizar os efeitos de eventos climáticos críticos, que tendem a ser cada vez mais recorrentes.

Entre os instrumentos existentes para a gestão ambiental e de recursos hídricos nas áreas de mananciais, destaca-se o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que é considerado um mecanismo promissor e estratégico para o fomento à proteção e à restauração de ecossistemas e dos seus serviços (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2015), como a garantia da disponibilidade qualitativa e quantitativa da água. O PSA é baseado nos princípios do usuário-pagador e provedor-recebedor (**Figura 1**), ou seja, aqueles que se beneficiam dos serviços ambientais prestados (como os usuários de água) devem pagar por eles. Por outro lado, aqueles que contribuem para a geração dos serviços ecossistêmicos (como os proprietários de terra a montante) devem ser compensados por proporcioná-los (WUNDER, 2005; PAGIOLA; PLATAIS, 2007; GUEDES; SEEHUSEN, 2011; PAGIOLA; VON GLEHN; TAFFARELLO, 2012). A voluntariedade na transação entre as partes e a correta definição do serviço ambiental objeto do pagamento são algumas das premissas dos acordos de PSA (WUNDER, 2005).

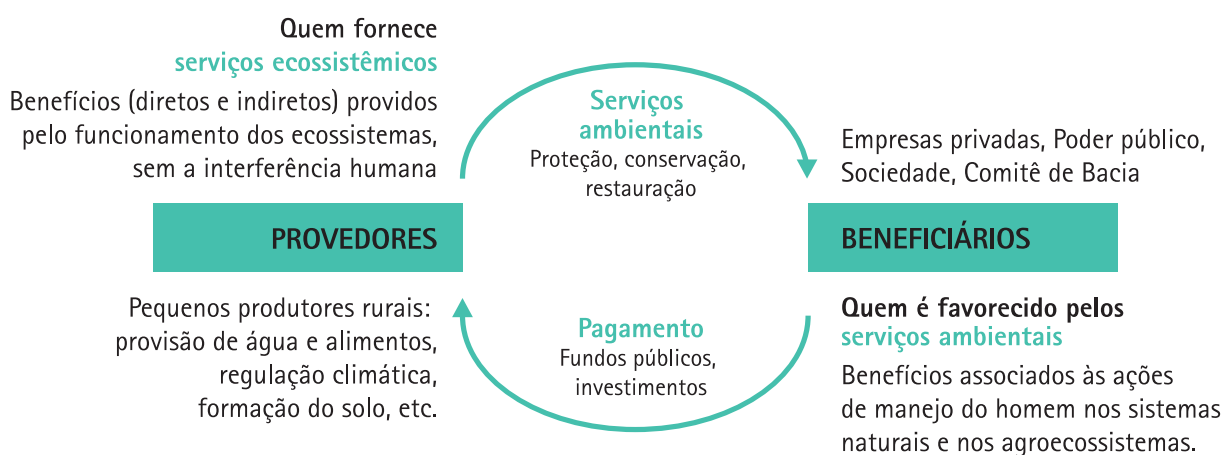


Figura 1 – Esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

Fonte: elaborado pelos autores.

De maneira geral, os acordos de PSA podem ser divididos em quatro grandes fases, conforme apresentado na **Figura 2**. As experiências de PSA-hídrico no Brasil encontram-se em diferentes fases de execução (POCIDONIO; TURETTA, 2012; GJORUP et al., 2016) e ainda existem dificuldades de ordem técnica, econômica, institucional e legal (VEIGA NETO; GAVALDÃO, 2011) para a sua implementação. Entre os desafios técnicos, destacam-se a identificação de áreas prioritárias (PAGIOLA et al., 2004; ROBERTSON; WUNDER, 2005; MELO, 2007; SANTOS; VIVIAN, 2012; LIMA et al., 2013; PRADO, 2014; GJORUP et al., 2016) e os processos de monitoramento por meio de indicadores ambientais (BERNARDES; SOUZA JUNIOR, 2010; VEIGA NETO; GAVALDÃO, 2011; ELOY; COUDEL; TONI, 2013; LIMA et al., 2013), que são ausentes ou deficientes, tanto em relação à água, quanto em relação às práticas de conservação e restauração florestal executadas.

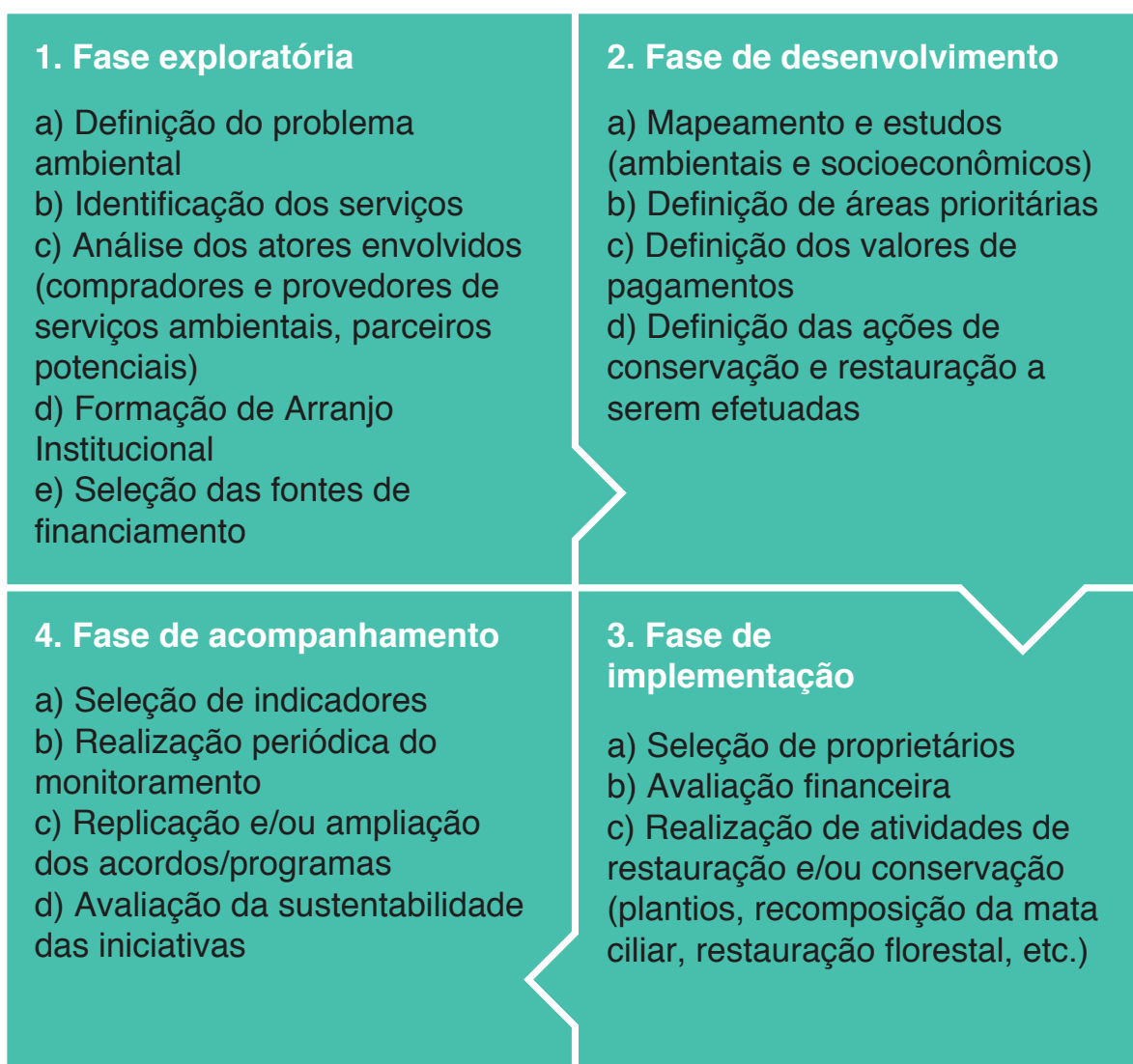


Figura 2 – Fases de elaboração de acordos de PSA.

Fonte: adaptado de Guedes e Seehusen (2011); Terceira Via (2011); Veiga Neto e Gavalvão (2011).

Em relação à identificação de áreas prioritárias nas fases iniciais dos acordos, Gjorup et al. (2016) mencionam que a seleção de áreas para PSA é realizada por meio do emprego direto de critérios previamente determinados para a bacia hidrográfica, município ou outros tipos de áreas de interesse definidos, a priori, pelo programa. Os autores destacam, ainda, que a análise espacial e a análise integrada do conjunto dos critérios de priorização ainda são práticas pouco empregadas. Além disso, o caráter voluntário dos acordos pode resultar em investimentos em áreas com baixa relevância na provisão dos serviços ambientais hídricos.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou desenvolver uma abordagem de priorização de microbacias hidrográficas, a partir de critérios biofísicos e geoambientais, como subsídio ao desenvolvimento dos acordos de PSA-hídrico, tendo como estudo de caso o município de Joanópolis, estado de São Paulo, Brasil, um dos doze municípios inseridos no Sistema Cantareira (Figura 3).

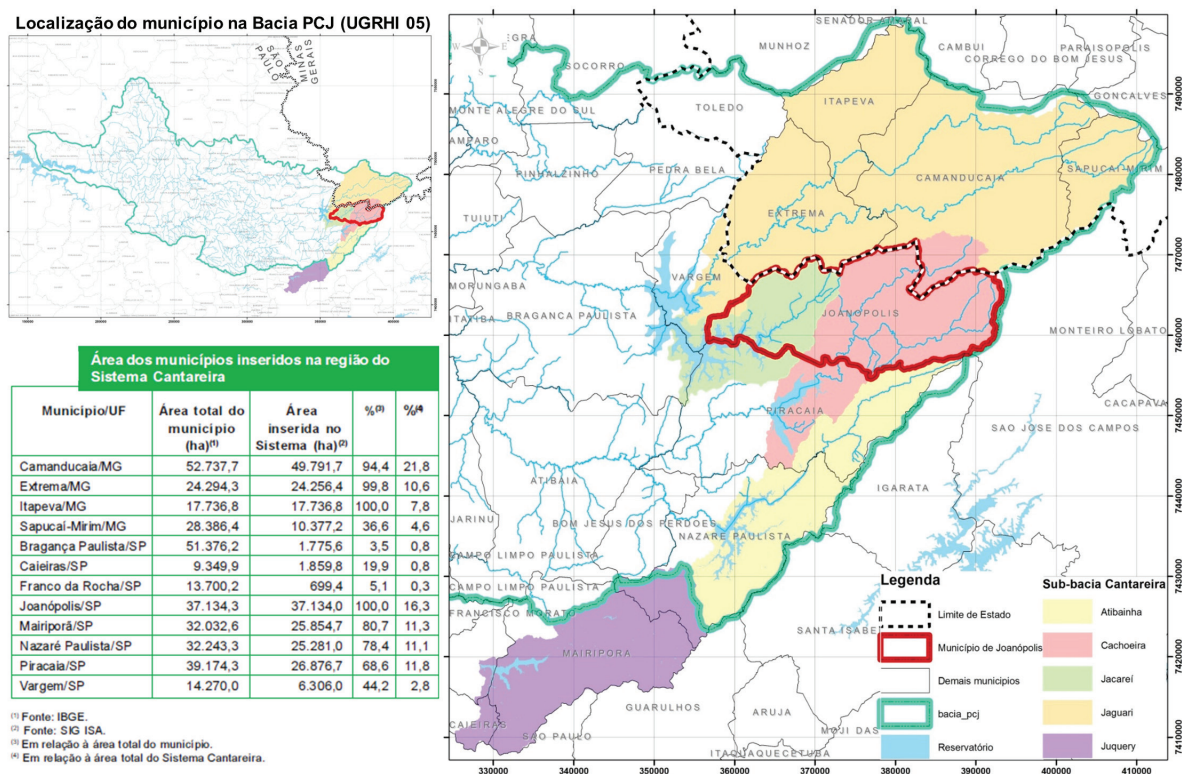


Figura 3 – Localização do município de Joanópolis na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 05 e no Sistema Cantareira.

Fonte: Whately e Cunha (2007).

2 Procedimentos Metodológicos

O trabalho foi focado na avaliação dos serviços ambientais hídricos na área de estudo, ou seja, aqueles relacionados aos processos hidrológicos para o suprimento de água para usos diversos, em quantidade e qualidade adequadas, dada a importância desse serviço no contexto de Joanópolis e do Sistema Cantareira. Além disso, considerou-se um possível investimento na escala municipal, pois as iniciativas de PSA para proteção de recursos hídricos têm sido, em maior parte, lideradas por prefeituras municipais e pelas empresas municipais de água (VEIGA NETO; GAVALDÃO, 2011).

A abordagem em serviços ambientais hídricos indica a necessidade de adotar a bacia hidrográfica como unidade de análise, tendo sido selecionada a escala da microbacia hidrográfica para o desenvolvimento do método. Três softwares foram empregados para a delimitação das microbacias. O TerraView Hidro 4.1.0 (RENNÓ et al., 2008) foi utilizado para a extração da rede de drenagem, a partir da base cartográfica vetORIZADA, na escala 1:10 000 (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO, 1979). O Hydroflow 0.9 (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO, 2007) foi utilizado para classificar as drenagens segundo Strahler (1952), fornecendo informações para definir microbacias de ordem 4, 5 e 6 no município de Joanópolis. Por fim, o ArcGis 10.3.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2018) foi empregado para a elaboração do modelo digital de elevação e para o refinamento dos resultados, suavização de entorno de unidades cartografadas e eliminação de microbacias muito pequenas.

A seleção dos critérios de priorização partiu da premissa de que a microbacia hidrográfica possui um potencial natural para o provisionamento de serviços ambientais hídricos, o qual é afetado quando a bacia é submetida a pressões antrópicas, sendo essas transições bruscas ou não. Deste modo, dois conjuntos de ações podem ser aplicados por meio dos acordos de PSA em bacias hidrográficas: práticas de conservação/preservação, como a proteção de remanescentes florestais; e práticas de recuperação/restauração de áreas degradadas, como aquelas voltadas ao restabelecimento da cobertura vegetal com fins de proteção hídrica (SEEHUSEN; PREM, 2011).

Assim, a metodologia foi desenvolvida de forma a analisar essas duas condições nas microbacias hidrográficas: o seu potencial natural para o fornecimento de serviços ambientais hídricos, a partir dos critérios sintetizados no **Quadro 1**; e o respectivo grau de degradação pela ação antrópica, por meio da análise integrada dos critérios resumidamente descritos no **Quadro 2**. A escolha dos temas foi feita a partir da consulta a trabalhos de referência, das características da área de estudo, da viabilidade de representação espacial dos dados geoambientais e de reuniões técnicas com equipe multidisciplinar.

Quadro 1 – Critérios selecionados para a análise do potencial natural e síntese do método (continua).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Potencial de circulação das águas subterrâneas	Extração dos lineamentos na área de estudo, por meio de fotointerpretação em mosaicos georreferenciados, definição das classes dos lineamentos, a partir da extensão total de cada lineamento e a sua orientação em azimute e classificação de acordo com a favorabilidade à condução de água; cálculo da densidade de lineamentos; e elaboração do mapa de condicionamento estrutural à circulação das águas subterrâneas, a partir da análise integrada da densidade de lineamentos com a classe dos lineamentos, conforme metodologia descrita por Carvalho et al. (2014). Classificação das microbacias conforme a predominância da classe de condicionamento identificada (Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa).	Quanto maior o potencial de recarga e circulação, maior a quantidade de água em circulação na área e, assim, maior deve ser a prioridade da microbacia para PSA de conservação.
Densidade de Nascentes	Vetorização das curvas de nível e rede de drenagem das cartas topográficas (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO, 1979), na escala 1:10 000 para geração do modelo digital de elevação e extração automática dos cursos d'água e nascentes. Validação do método a partir da verificação do canal e das quebras no relevo nas cartas topográficas 1:10 000 e 1:25 000; da consulta às ortofotos digitais (EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO, 2011), para a diferenciação dos canais fluviais, pluviais e artificiais, bem como a identificação de áreas com vegetação típica e clareiras na paisagem; e consulta às informações do Cadastro Ambiental Rural (CAR), para consulta de dados de verdade terrestre. Cálculo da densidade de drenagem em cada microbacia e classificação qualitativa em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme valores obtidos.	Quanto maior o número de nascentes por unidade de área, maior o número de pontos de formação de um determinado curso d'água, maior contribuição ao curso d'água principal e maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.
Padrão morfométrico da microbacia	Cálculo da Densidade de drenagem (Dd = razão entre o comprimento total de todos os canais e a área de drenagem total); do Índice de circularidade (Ic = razão entre a área de drenagem e o seu perímetro ao quadrado); e do Índice de Sinuosidade do Canal Principal (Is = razão entre o comprimento do rio principal e a distância vetorial entre os pontos extremos do talvegue). Classificação final feita com base na soma ponderada dos valores atribuídos a cada sub-bacia [Prioridade = $(Dd*1) + (Ic*1) + (Is*2)$]. Classificação qualitativa em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme valores obtidos.	Quanto mais alongada for a microbacia (menor Índice de circularidade) e quanto maior a sua densidade de drenagem e índice de sinuosidade, melhores são as condições à produção hídrica e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.

Quadro 1 – Critérios selecionados para a análise do potencial natural e síntese do método (continuação).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Suscetibilidade à erosão	Análise integrada das classes de solos (OLIVEIRA et al., 1999) e das classes de declividade na área de estudo (0 a 6 %: áreas planas ou com relevo suavemente ondulado; 6 % a 20 %: áreas com relevo ondulado; 20 % a 30 %: áreas com relevo ondulado ou fortemente ondulado; 30 % a 50 %: áreas com relevo fortemente ondulado a montanhoso; e maior que 50 %: áreas de relevo montanhoso e escarpado). A matriz de correlação adotada foi construída a partir de metodologia apresentada por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2011). A classificação de cada microbacia foi determinada conforme a predominância da classe de suscetibilidade (Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa).	Quanto maior a suscetibilidade à erosão, maior a quantidade de sedimentos que podem atingir os mananciais, cursos d'água e reservatórios; e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.
Regime de chuvas	Elaboração do mapa de isoietas, por meio dos dados de chuva obtidos no banco de dados hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016a) no município de Joanópolis e municípios vizinhos. Para cada posto pluviométrico, foram calculados os dados mensais de chuva de uma série histórica de 30 anos e as falhas de preenchimento foram corrigidas pelo método da ponderação regional. As isolinhas foram determinadas a partir da média do total anual de cada estação e a classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto maior o índice pluviométrico da bacia, maior a entrada de água no sistema, maior a tendência ao carreamento de sedimentos em áreas sem práticas conservacionistas, e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de conservação.

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 2 – Critérios selecionados para a análise do grau de degradação e síntese do método (continua).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Potencial à geração de sedimentos	A potencialidade à produção de sedimentos foi determinada por meio do cruzamento das classes de suscetibilidade à erosão (pedologia versus declividade) e de uso e ocupação do solo (COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL, 2013) no município de Joanópolis. As classes de uso do solo foram agrupadas conforme o seu potencial de fornecimento de sedimentos. A matriz de correlação adotada foi construída a partir de metodologia apresentada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (2011). A classificação de cada microbacia foi determinada conforme a predominância da classe de potencial à geração de sedimentos (Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa).	Quanto maior o potencial à produção de sedimentos, maior influência na qualidade da água; menor a capacidade de armazenamento de água no reservatório e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.
Área impermeabilizada	A influência da área impermeabilizada no ciclo hidrológico foi analisada a partir de informações do mapa de uso e ocupação da terra elaborado pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (2013). Foram consideradas áreas impermeabilizadas as seguintes classes de uso e ocupação do solo: Área Edificada (em diferentes estágios de ocupação: consolidado, em consolidação e rarefeito); Loteamentos e grandes equipamentos (indústrias, Estação de Tratamento de Água e Esgoto, área institucional). A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto mais impermeabilizada, maior a alteração na condição e no volume do escoamento superficial e subterrâneo, devido à diminuição da área de alimentação do aquífero e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.
Densidade de vegetação arbórea ripária	A densidade de vegetação arbórea presente na área ripária foi obtida por meio da proporção das áreas que possuem cobertura vegetal com predomínio de porte arbóreo em uma zona (buffer) de 100 m ao redor de corpos hídricos. A cobertura vegetal foi obtida por meio de consulta ao mapeamento elaborado pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (2013). Foram consideradas as seguintes classes para a ocorrência de vegetação arbórea: mata; capoeira; Floresta Ombrófila Densa; Floresta Estacional Semidecidual; Cerradão (Savana florestada); e reflorestamento. A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto menor a quantidade de vegetação arbórea ripária, maior a ausência de vegetação composta por árvores que atuam como barreira linear entre as superfícies terrestres e aquáticas e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.

Quadro 2 – Critérios selecionados para a análise do grau de degradação e síntese do método (continuação).

Critério	Síntese do método de cálculo	Priorização
Ocorrência de Vegetação Florestal	A área com vegetação arbórea em todo o município de Joanópolis foi obtida do mapa de uso e ocupação do solo elaborado pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental (2013). A vegetação arbórea são as classes de uso e ocupação do solo que possuem cobertura vegetal com predomínio de porte arbóreo: mata; capoeira; Floresta Ombrófila Densa; Floresta Estacional Semidecidual; Cerradão (Savana florestada), Reflorestamento. A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto menor a área com vegetação florestal, maior é a alteração nos processos de infiltração, transpiração e evapotranspiração, as quais são fortemente relacionadas à produção de água e, assim, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação.
Demanda de água	A demanda de água foi calculada a partir do cadastro de outorgas do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016b). A priorização foi feita com base na quantidade de pontos e respectiva vazão outorgada em cada microbacia hidrográfica, a fim de obter uma visão espacial e setorial dos direitos de uso da água assegurados na microbacia. A classificação qualitativa foi dividida em Muito alta, Alta, Média, Baixa ou Muito Baixa, conforme os valores obtidos em intervalos.	Quanto maior a vazão outorgada, maior deve ser a prioridade para PSA de recuperação, pois maior é a estimativa de demanda de água para atendimento aos diversos setores usuários dos recursos hídricos na bacia.

Fonte: elaborado pelos autores.

Algoritmos disponíveis nos softwares ArcGis 10.3.1, SPRING e TerraView (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2018; CÂMARA et al., 1996; RENNÓ et al., 2008) foram utilizados para o cálculo das variáveis e espacialização dos resultados em cada um dos dois grupos (Potencial Natural e Grau de Degradação). Posteriormente, uma análise individual dos resultados de cada critério foi realizada e as microbacias hidrográficas foram classificadas em cinco intervalos qualitativos de prioridade para PSA-hídrico, cujos limiares foram definidos a partir da análise estatística dos resultados. Atribuiu-se um valor numérico para cada classe (1 – Muito baixo; 2 – Baixo; 3 – Médio; 4 – Alto; e 5 – Muito Alto) a fim de viabilizar a análise integrada (*overlay*) das informações.

A classificação da prioridade final foi obtida a partir da sobreposição dos mapas temáticos de cada critério, permitindo a visualização espacial das informações sistematizadas. Em ambos os casos, foi feita a soma dos valores atribuídos a cada classe de prioridade e, em seguida, a verificação dos resultados para determinar os limiares de três classes qualitativas (Alta, Média e Baixa), indicando a prioridade para PSA-hídrico, em cada um dos dois grupos.

Deve-se ressaltar que a seleção dos critérios representativos dos dois conjuntos de informações é útil para subsidiar a fase exploratória dos acordos de PSA na escala regional de trabalho (1:25 000 ou menor) e não contemplam aqueles aplicados à elegibilidade, que é uma etapa específica. A metodologia pode ser replicada ou adaptada conforme particularidades da região a ser estudada, mas pode e deve ser refinada a partir da ampliação da discussão com outros atores-chave no processo, os quais possuem conhecimento mais arraigado sobre o contexto social, econômico e político da região.

Uma síntese da proposta para a priorização das microbacias hidrográficas está apresentada na **Figura 4**.

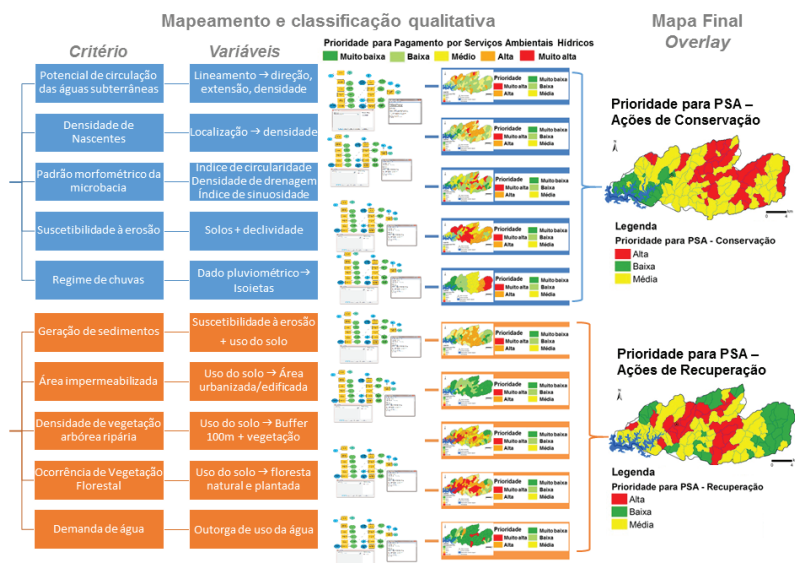
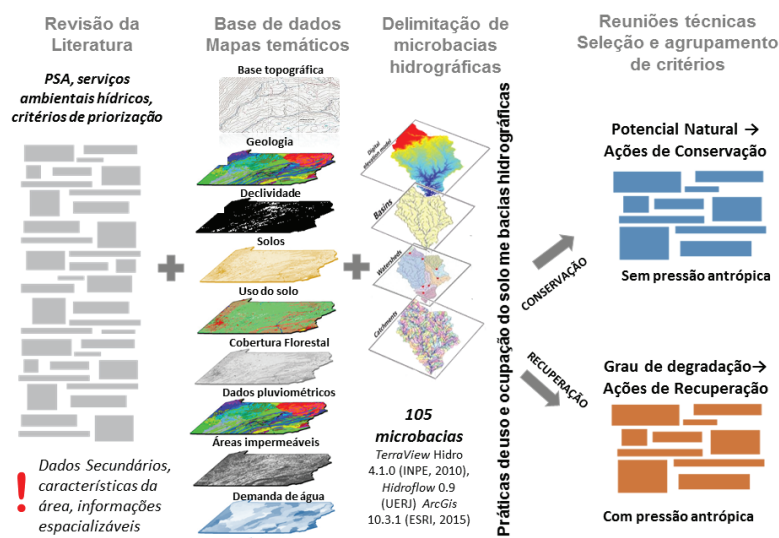


Figura 4 – Síntese do método desenvolvido no âmbito do projeto.

Fonte: elaborado pelos autores.

3 Resultados e Discussão

O método proposto é uma ferramenta que contribui para tomada de decisão estratégica de priorização de áreas para programas de PSA, levando em consideração dois aspectos distintos: o potencial natural das microbacias hidrográficas para conservação e o grau de degradação das microbacias para a recuperação, conforme detalhado a seguir.

3.1 Potencial natural das microbacias hidrográficas: PSA de conservação

O potencial natural das microbacias hidrográficas foi resultado da análise integrada de cinco critérios: potencial de circulação das águas subterrâneas; densidade de nascentes; padrão morfométrico da microbacia; suscetibilidade à erosão e regime de chuvas.

O primeiro critério, "Potencial de circulação das águas subterrâneas", foi avaliado cartograficamente por meio do mapa de condicionamento estrutural à circulação das águas subterrâneas, o qual foi resultado da análise da densidade de lineamentos e da classe dos lineamentos (direção x extensão), conforme metodologia apresentada por Carvalho et al. (2014). As áreas de muito alta e alta prioridade ocorrem em regiões com elevada densidade de lineamentos, onde o maciço rochoso pode se apresentar mais fraturado e com maior favorabilidade à circulação da água, reunindo características estruturais que condicionam maior fluxo d'água subterrânea. A conservação dessas áreas é fundamental, pois são regiões indicativas de maior probabilidade de circulação de água na bacia hidrográfica. A **Figura 5** ilustra os procedimentos adotados para a determinação desse critério.

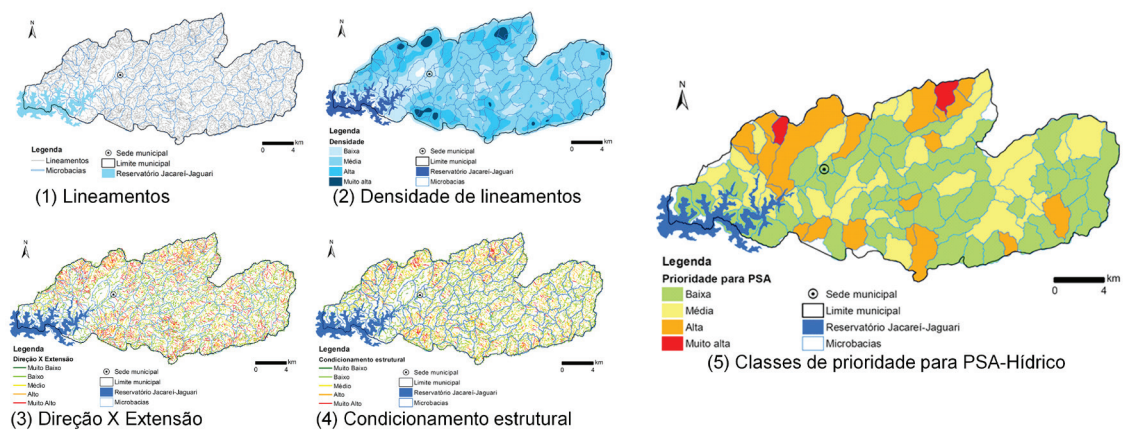


Figura 5 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Potencial de circulação das águas subterrâneas".

Fonte: elaborado pelos autores.

A importância das nascentes no potencial natural e na manutenção da qualidade e regulação da disponibilidade dos recursos hídricos foi o segundo critério, avaliado por meio da "Densidade de nascentes" em cada microbacia (N° de nascentes por km^2). As áreas de muito alta e alta prioridade ocorrem nas regiões que apresentaram maior número de pontos de formação de um determinado curso d'água. A conservação dessas áreas é fundamental para assegurar a continuidade temporal dos processos de infiltração, percolação, armazenamento e exfiltração das águas pluviais, de acordo com o ritmo natural do sistema (CALHEIROS et al., 2004; CARMO; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2014). O método desenvolvido para o mapeamento semiautomático e validação dessas feições deve ser destacado, pois permitiu a verificação de características do terreno favoráveis à sua ocorrência, as quebras no relevo, a diferenciação dos canais fluviais, pluviais e artificiais, bem como a identificação de áreas com vegetação típica e clareiras na paisagem. A utilização dos dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) também agregou informações importantes para a validação do mapeamento. A **Figura 6** ilustra alguns procedimentos adotados, bem como o mapa final classificado.

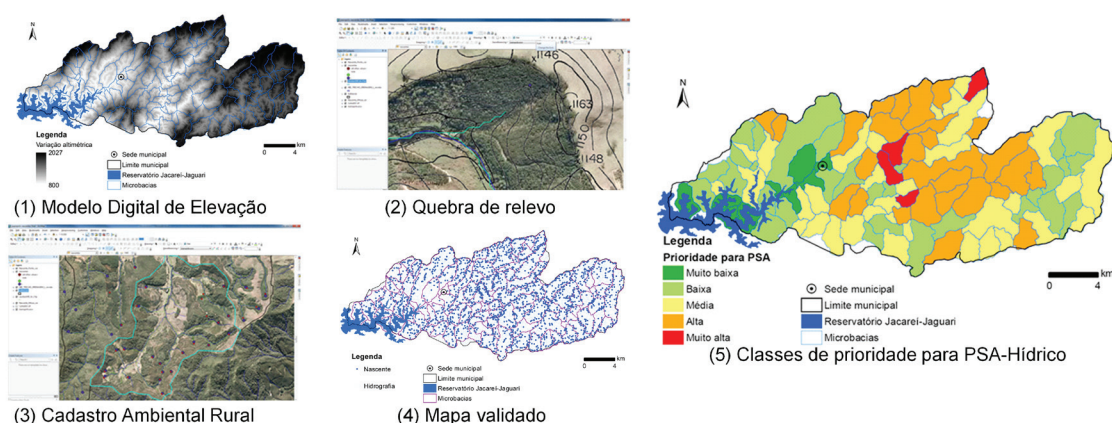


Figura 6 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Densidade de nascentes".
Fonte: elaborado pelos autores.

O terceiro critério foi obtido por meio da caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, que é uma ferramenta importante para subsidiar o planejamento territorial visando à preservação ambiental e à manutenção da produção de água em quantidade e qualidade (NARDINI et al., 2013). A classificação final das microbacias hidrográficas por meio da análise conjunta dos parâmetros Densidade de drenagem (*Dd*); Índice de circularidade (*Ic*) e Índice de Sinuosidade do Canal Principal (*Is*) indicou a ocorrência de áreas de alta e muito alta prioridade espalhadas no município de Joanópolis, associadas às características físicas que facilitam o transporte hídrico superficial e diminuem o carreamento de sedimentos (maior *Dd* e *Is*; e menor *Ic*). A análise combinada desses dados morfométricos forneceu subsídios para mapear áreas com maior potencial de armazenamento de água no solo, associada à regulação hídrica da microbacia. A **Figura 7** ilustra os mapas intermediários e o mapa final para o cálculo desse critério.

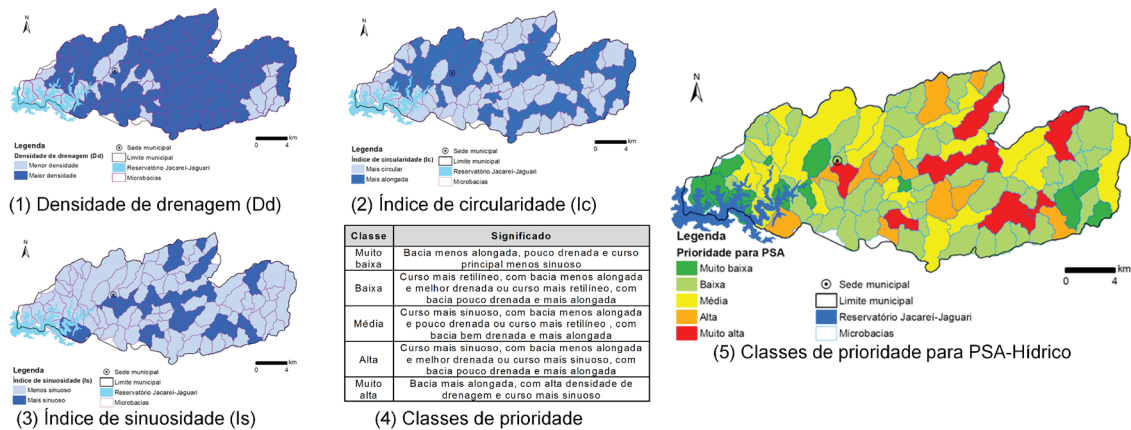


Figura 7 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Padrão morfométrico das microbacias hidrográficas”.

Fonte: elaborado pelos autores.

A análise da suscetibilidade à erosão e sua influência na qualidade e na regularização da oferta de água foi feita a partir do cruzamento dos diferentes tipos de solo e classes de declividade, conforme metodologia apresentada por Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2011). A classificação final das microbacias hidrográficas indicou que a prioridade alta e muito alta está associada às regiões de relevo mais acidentado, onde predominam argissolos e cambissolos. A proteção dessas áreas é fundamental, pois são regiões que funcionam como fonte de sedimentos que podem ser transportados pelas águas da chuva e têm como destino final os leitos de córregos e rios, causando o assoreamento dos cursos d'água, o qual, por sua vez, contribui com a alteração dos processos de inundação, entre outras consequências. A **Figura 8** apresenta os produtos intermediários e o mapa final para esse critério.

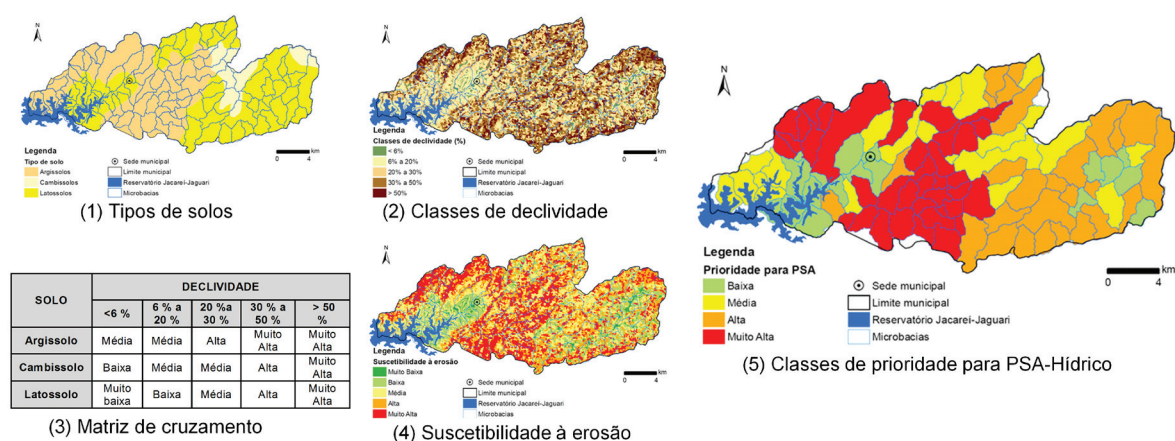


Figura 8 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Suscetibilidade à erosão".

Fonte: elaborado pelos autores.

O entendimento da distribuição do regime de chuvas em uma bacia hidrográfica foi feito por meio da análise das isoietas (isolinhas com mesmo valor de altura pluviométrica) elaboradas a partir dos dados disponibilizados no banco de dados do Departamento de Águas e Energia elétrica (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016a). A classificação das microbacias por esse critério indicou que as áreas de alta e muito alta prioridade estão associadas às regiões com maiores índices pluviométricos, pois a chuva é tanto um fator desencadeante do carreamento de sedimentos, quanto responsável pela magnitude de entrada de água no sistema e o seu potencial de circulação na sub-bacia (MELO, 2007). A **Figura 9** apresenta o mapa de isoietas e o mapa final para esse critério.

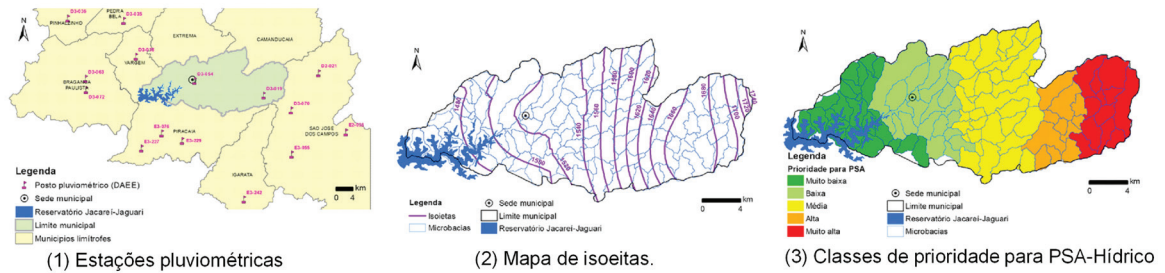


Figura 9 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Regime de chuvas”.

Fonte: elaborado pelos autores.

A **Figura 10** mostra o resultado da análise integrada do conjunto de parâmetros que representa o potencial natural das microbacias hidrográficas no município de Joanópolis. Os resultados mostraram que predominam áreas de alta e média prioridade para PSA voltados à conservação, ou seja, à manutenção das condições ambientais, de acordo com os critérios avaliados. Nas áreas de alta prioridade, estima-se que a aplicação de procedimentos relacionados aos serviços ambientais de proteção/conservação pode resultar em maior retorno no fornecimento de serviços ecossistêmicos associados à água. Entre as ações a serem aplicadas podem ser citadas: a conservação de florestas nativas existentes e dos remanescentes de vegetação (preservados ou em regeneração/restauração); ações de conservação do solo; elaboração de planos de manejo nas microbacias hidrográficas para identificação de corredores de biodiversidade; e elaboração de planos de manejo florestal para a exploração sustentável com geração de renda advinda de florestas nativas.

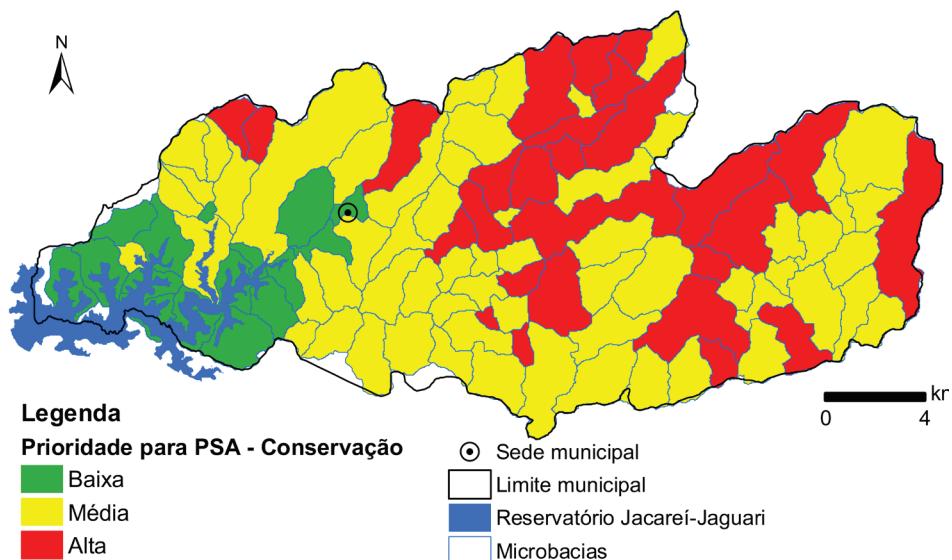


Figura 10 – Prioridade para PSA de conservação: microbacias hidrográficas classificadas conforme integração dos resultados obtidos para a definição do seu potencial natural.

Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 Grau de degradação microbacias hidrográficas: PSA de recuperação

O grau de degradação das microbacias hidrográficas foi analisado a partir da análise integrada de cinco critérios: potencial para a geração de sedimentos, área impermeabilizada, densidade de vegetação arbórea ripária, ocorrência de vegetação florestal e demanda de água.

O primeiro critério foi calculado a partir da análise do potencial de aporte de sedimentos aos mananciais e cursos d'água. Os resultados indicaram que as áreas de alta prioridade ocorrem em microbacias que possuem suscetibilidade à erosão e uso e ocupação do solo favoráveis aos processos de assoreamento de cursos d'água e de reservatórios de abastecimento. Nessas áreas, o processo de transporte dos sedimentos pode resultar, em longo prazo, em maior turbidez nos rios, que tendem a ficar mais rasos e com menor volume de água na época de estiagem. Em casos extremos, pode culminar no desaparecimento total de pequenos cursos d'água e nascentes (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2008). Assim, as microbacias hidrográficas que apresentarem as maiores extensões de áreas potenciais à produção de sedimentos representam locais onde o PSA de recuperação deve ser priorizado. A **Figura 11** ilustra os mapas intermediários elaborados para o cálculo desse critério e o mapa final classificado.

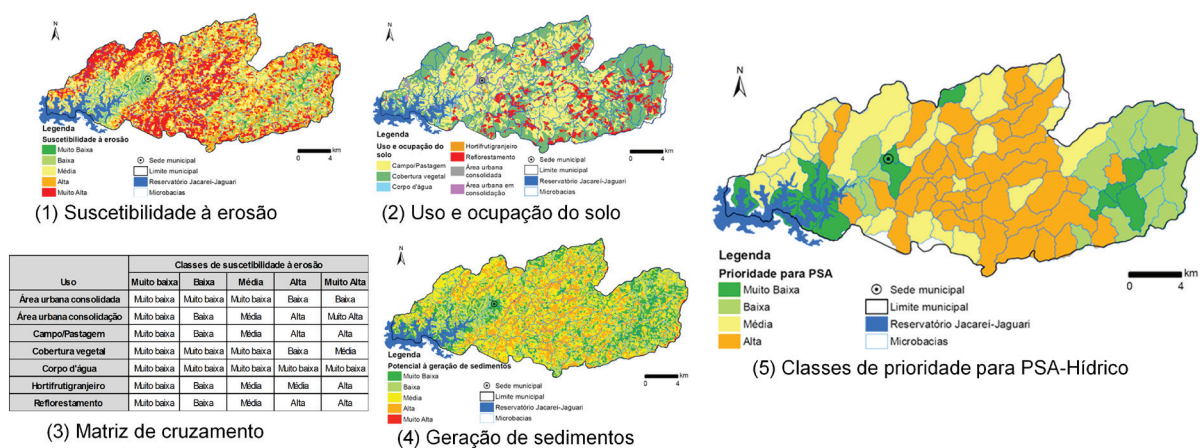


Figura 11 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Potencial para geração de sedimentos”.

Fonte: elaborado pelos autores.

A área impermeabilizada foi o segundo critério avaliado. O município de Joanópolis apresenta uma pequena área urbanizada e poucas áreas edificadas em seu território. Assim, as áreas de muito alta e alta prioridade para PSA de recuperação em relação a esse critério foram pouco significativas, mas indicam regiões com maior alteração na condição e no volume do escoamento superficial e subterrâneo da água na bacia hidrográfica devido à diminuição da área de alimentação do aquífero resultante da precipitação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo. Cabe ressaltar que, atualmente, o PSA é focado em áreas rurais, sendo um conceito ainda pouco explorado em área urbana (WOODRUFF; BENDOR, 2016). Assim, trata-se de um parâmetro que necessita de mais estudos quanto à aplicabilidade em acordos de PSA, principalmente em relação à questão hídrica. A **Figura 12** apresenta o mapa final para esse critério.

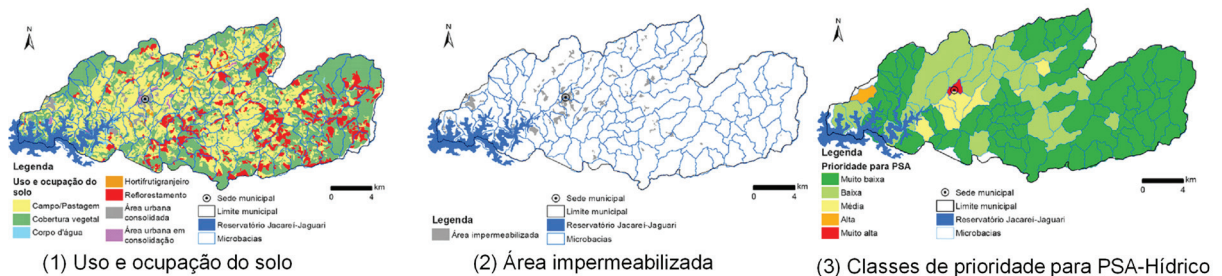


Figura 12 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Área impermeabilizada".
 Fonte: elaborado pelos autores.

A vegetação ripária composta por árvores atua como barreira linear entre as superfícies terrestres e aquáticas, estabilizando as margens dos cursos d'água, o que aumenta a retenção dos sedimentos resultantes da erosão hídrica em zonas adjacentes. Nesse sentido, as áreas de alta e muito alta prioridade para PSA de recuperação estão associadas às regiões com menor quantidade de vegetação arbórea ripária. Nessas áreas, a revegetação deve ser realizada de forma recuperar a função ambiental da zona ripária de proteção dos recursos hídricos, cuja atuação varia com a densidade das faixas de vegetação, com o estado de desenvolvimento das árvores e arbustos, com a época do ano (devido às épocas menos ativas das plantas) e, ainda, com a diversidade de plantas. A **Figura 13** apresenta o mapa final classificado para esse critério.

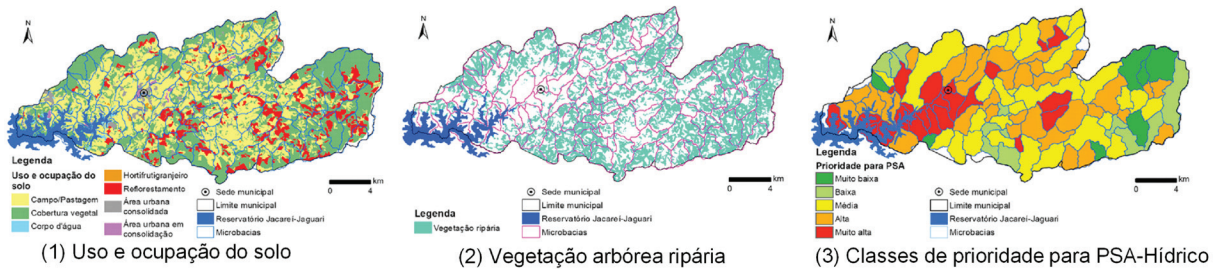


Figura 13 - Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Densidade de vegetação arbórea ripária".

Fonte: elaborado pelos autores.

As áreas com cobertura vegetal também foram analisadas, dada a sua importância no ciclo hidrológico. De maneira geral, os impactos do desmatamento na quantidade de água são complexos e dependem de uma série de fatores (clima, características locais, escala da bacia, entre outros). Um dos efeitos diretos do desmatamento é a redução da evapotranspiração, diminuição do fluxo de água em direção à atmosfera e maior contribuição para escoamento superficial (SILVA, 2013). Desse modo, as áreas de alta e muito alta prioridade para PSA de recuperação ocorrem nas microbacias com menor porcentagem de vegetação arbórea em relação à sua área total, onde é maior a alteração nos processos de infiltração, transpiração e evapotranspiração na bacia hidrográfica. A **Figura 14** apresenta o mapa final para esse critério.

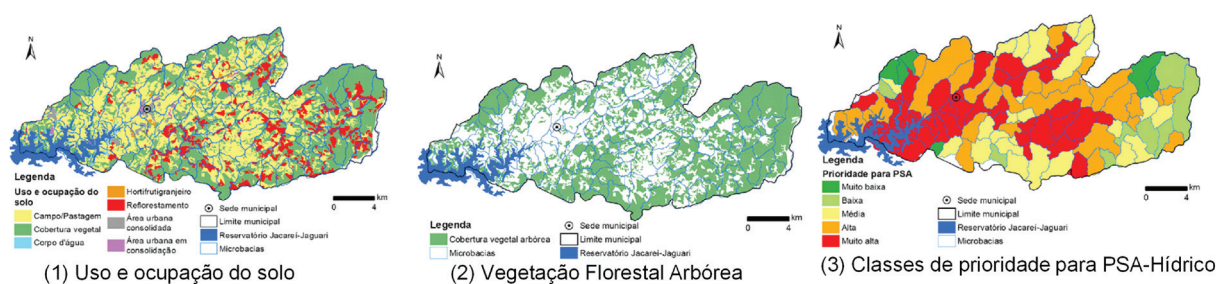


Figura 14 - Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério "Ocorrência de Vegetação Florestal".

Fonte: elaborado pelos autores.

Por fim, a "demanda de água" foi analisada por meio das vazões outorgadas no município de Joanópolis, disponibilizadas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2016b). As áreas de alta e muito alta prioridade para PSA de recuperação ocorreram nas microbacias com maiores valores de vazão outorgada, as quais estão concentradas em áreas agrícolas, dado o uso para irrigação. Nessas regiões, maior é a previsão de retirada de água do sistema para atender os diversos usos e usuários. A **Figura 15** apresenta os mapas com as vazões outorgadas e o mapa classificado para esse critério.

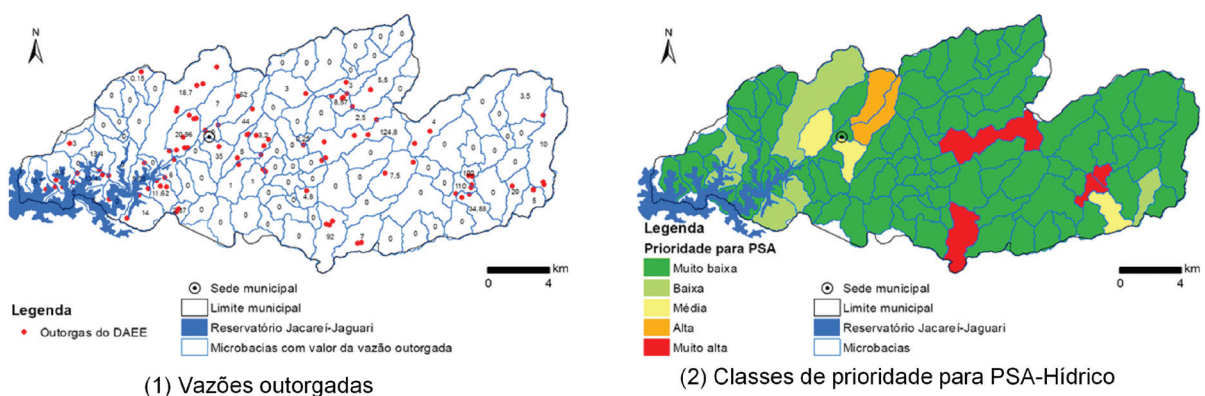


Figura 15 – Cálculo de variáveis e classes de prioridade para o critério “Demanda de água”.
 Fonte: elaborado pelos autores.

A **Figura 16** apresenta o resultado obtido a partir da análise integrada do conjunto de parâmetros selecionados para representar o grau de degradação das microbacias. Os resultados indicaram predominância de áreas com alta e muito alta prioridade de PSAs voltados à recuperação. As microbacias com baixa prioridade são áreas com remanescentes florestais em diferentes estágios de regeneração com pouca ou nenhuma ocupação antrópica. Nas áreas de alta prioridade, conforme critérios considerados, estima-se que a aplicação de serviços ambientais de recuperação pode resultar em maior retorno no fornecimento de serviços ecossistêmicos associados à água. Entre as ações nesse sentido podem ser citadas: a adoção de boas práticas ambientais, como as que resultem em redução da erosão; restauração das áreas de nascentes e matas ciliares com espécies nativas, incluindo as áreas de reserva legal e áreas de preservação permanente; e adequação agrícola, com conversão de pastagem degradada para sistema silvopastoril e agroflorestal.

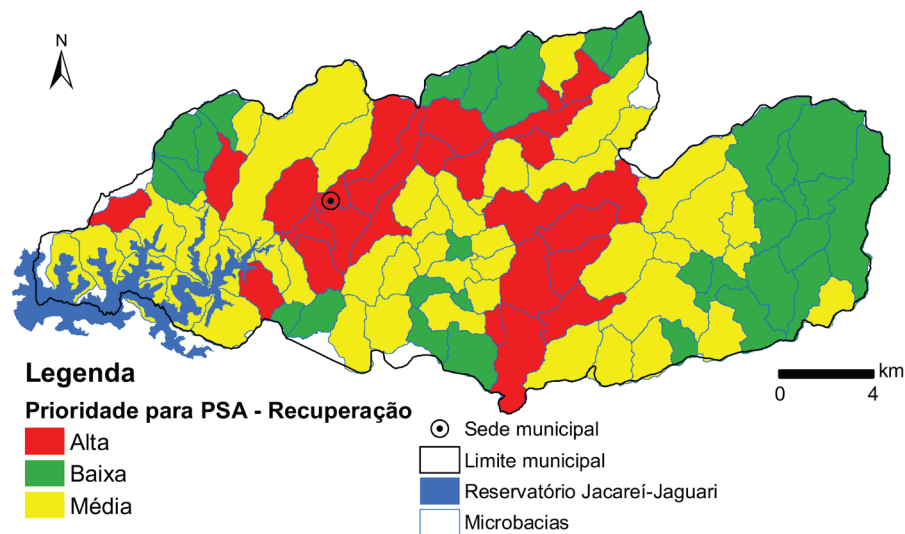


Figura 16 – Prioridade para PSA de recuperação: Microbacias hidrográficas classificadas conforme integração dos resultados obtidos a definição do seu grau de degradação.

Fonte: elaborado pelos autores.

4. Conclusões

O método desenvolvido inova ao estudar critérios em dois grupos: um para avaliar o potencial natural das microbacias e indicar áreas prioritárias para PSA de conservação; e outro para analisar o grau de degradação e apontar áreas prioritárias para PSA de recuperação. A metodologia apresentada é adaptativa, no sentido de poder ser replicada ou modificada conforme particularidades da região a ser estudada e ampliada se novos conhecimentos forem incluídos ao estudo, sendo uma ferramenta para a fase de desenvolvimento na elaboração de acordos de PSA.

Pressupõe-se que melhores benefícios em termos hídricos podem ser alcançados se os recursos em ações de proteção/conservação ou recuperação/restauração forem aplicados em áreas com alta prioridade de acordo com o método proposto, aumentando o efeito positivo da relação custo-benefício e reduzindo riscos de investimentos nos acordos de PSA-hídrico. Os resultados representam um instrumento para suporte à tomada de decisão na definição das áreas estratégicas para os investimentos em PSA, tanto voltados à conservação quanto à recuperação dos sistemas de provisão de água na região de interesse. A priorização de áreas e as recomendações geradas nesse estudo poderão ser úteis para o aperfeiçoamento das iniciativas de PSA nos Comitês de Bacia Hidrográfica e do próprio Governo do estado de São Paulo, por trazer informações efetivas para a gestão dos recursos hídricos e planejamento ambiental.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio ao IPT – FIPT pelo financiamento do Projeto de Capacitação N°500106A/(PTC 1031/15): "Critérios para a priorização de microbacias formadoras do Sistema Cantareira no município de Joanópolis, SP, com foco no Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)".

6. Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Ministério do Meio Ambiente. **Boas práticas e modernas tecnologias em irrigação**. Brasília: ANA, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Ministério do Meio Ambiente. **Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2014**. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2015.

BERNARDES, C.; SOUSA JUNIOR, W. C. Pagamento por serviços ambientais: experiências relacionadas à água. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, 5., 2010, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ANPPAS, 2010. Disponível em <<http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT9-522-502-20100831170114.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

CALHEIROS, R. O. et al. **Preservação e recuperação das nascentes**. Piracicaba: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ - CTRN, 2004. 40p.

CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CARMO, L. G.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Áreas de preservação permanente no entorno de nascentes: conflitos, lacunas e alternativas da legislação ambiental brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 275-293, maio/ago. 2014.

CARVALHO, A. M. et al. Aplicação de métodos de interpretação de imagens na caracterização de modelo de circulação das águas subterrâneas em aquíferos fraturados e avaliação de impactos hidrogeológicos da construção de túneis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABAS, 2014.

COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL. Instituto Geológico. Secretaria do Meio Ambiente. **Mapa de uso e cobertura da terra da UGRHI 5 (PCJ) na escala de 1:25.000.** São Paulo: CPLA/IG/SMA, 2013. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br/cpla/mapa-de-uso-e-ocupacao-da-terra-ugrhi-5-pcj/>. Acesso em: 12 fev. 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de dados hidrológicos:** postos pluviométricos. São Paulo: DAEE, 2016a. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>>. Acesso em: 13 set. 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Outorgas:** conceitos e banco de dados. São Paulo: DAEE, 2016b. Disponível em: <http://www.dae.sp.gov.br/index.php?option=com_content&id=68:outorga>. Acesso em: 20 out. 2016.

ELOY, L.; COUDEL, E.; TONI, F. Implementando pagamentos por serviços ambientais no Brasil: caminhos para uma reflexão crítica. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 4, n. 1, p. 21-42, jul./dez. 2013.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. **Ortofotos digitais, articuladas de acordo com as cartas 1: 5.000, obtidas a partir de voo fotogramétrico analógico na escala 1:30.000.** São Paulo: Emplasa, 2011.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop 10.3.1.** Redlands: ESRI, 2018. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>>. Acesso em: 1 abr. 2018.

GUEDES, F. B.; SEEHUSEN, S. E. (Org.). **Pagamentos por Serviços Ambientais na Mata Atlântica:** lições aprendidas e desafios. Brasília: MMA, 2011.

GJORUP, A. F. et al. Análise de procedimentos para seleção de áreas prioritárias em programas de pagamento por serviços ambientais hídricos. **Revista Ambiente Água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 225-238, 2016.

IKEMATSU, P. **Conflitos e desafios na gestão da Bacia Hidrográfica do Reservatório Guarapiranga.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Secretaria do Meio Ambiente do Rio de Janeiro. Mananciais e Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). **Boletim Águas & Território**, n. 8, jan. 2015.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DE SÃO PAULO. **Cartas Planialtimétricas – município de Joanópolis, Escala 1:10.000.** São Paulo: IGC, 1979.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Diretrizes e ações para prevenção e controle dos impactos decorrentes dos processos erosivos na Bacia do Alto Tietê UGRHI 06.** São Paulo: IPT, 2011. (Relatório Técnico, 122.617-205).

JACOBI, P. R.; CIBIM, J.; LEAO, R. S. Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 27-42, 2015.

LIMA, A. P. M. et al. Pagamento por Serviços Ambientais Hídricos no Brasil: experiências iniciais e os desafios do monitoramento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

MELO, A. L. **Serviços Ambientais Hidrológicos desempenhados por Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) da Mata Atlântica:** marco teórico para pagamentos por serviços ambientais na bacia hidrográfica do rio São João, RJ. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

NARDINI, R. C. et al. Análise morfométrica e simulação das áreas de preservação permanente de uma micobacia hidrográfica. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 687-699, 2013.

OLIVEIRA, J. B. de. et. al. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico de Campinas; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

PAGIOLA, S.; PLATAIS, G. **Payments for environmental services:** from theory to practice. Washington: World Bank, 2007.

PAGIOLA, S. et al. **Pago por servicios de conservación de la biodiversidad en paisajes agropecuarios.** Washington, DC: World Bank, 2004. (Environment Department Paper, n. 96).

PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C. TAFFARELLO, D. (Org.). **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil.** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2012. 336 p.

POCIDONIO, E. A. L.; TURETTA, A. P. D. **Programas de pagamento por serviços ambientais no Brasil.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. 25 p. (Embrapa Solos, Documentos, 150).

PRADO, R. B. Ferramentas de apoio aos PSA-Hídricos no Brasil em desenvolvimento pela Embrapa e parceiros. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, 2., 2014, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: RedeVale/ UniVale, 2014. (Mesa Redonda). Disponível em: <http://www.redevale.ita.br/iisrhps/documentos/IISRHPS_Mesa_Redonda_I_RachelPrado.pdf>. Acesso 15 jun. 2016.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008. ISSN 0034-4257, DOI: 10.1016/j.rse.2008.03.018

ROBERTSON, N.; WUNDER, S. **Fresh tracks in the forest: assessing incipient payments for environmental services initiatives in Bolivia**. Bogor, Indonesia: CIFOR, 2005.

SANTOS, R. F.; VIVAN, J. L. **Pagamento por serviços ecossistêmicos em perspectiva comparada: recomendações para tomada de decisão**. Brasília: Projeto apoio aos diálogos Setoriais União Europeia-Brasil. 2012. Disponível em: <http://sectorialogues.org/sites/default/files/mmaa_-_publicacao_-_4_conv.pdf>. Acesso em: 12 set. 2016.

SEEHUSEN, S. E.; PREM, I. Por que pagamentos por serviços ambientais?. In: BECKER, F. G.; SEEHUSEN, S. E. (Org.). **Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011. p. 15-54.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS. Comitê de Crise Hídrica. **Plano de Contingência para o Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo – PCAA**. São Paulo: SSRH/CCH, 2015. Disponível em: <[http://www.saneamento.sp.gov.br/Arquivos/Planos/Plano%20de%20Conting%C3%AAnica%20\(datado\).pdf](http://www.saneamento.sp.gov.br/Arquivos/Planos/Plano%20de%20Conting%C3%AAnica%20(datado).pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2016.

SILVA, J. M. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na bacia do Rio Piracicaba**. 2013. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TAGNIN, R. A. **A natureza e o espaço da água e sua presença na Macrometrópole Paulista**. 2015. 255 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TERCEIRA VIA. **Cooperação e desenvolvimento. estudo técnico de viabilidade de pagamento por serviços ambientais para proteção da água para o Sub- Sistema Cantareira**. Joanópolis: Terceira Via, 2011.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO. **Hydroflow Software**. Rio de Janeiro: UERJ, 2007. Disponível em: <<http://www.labgis.uerj.br/hydroflow/index.htm/>>. Acesso em: 1 abr. 2018.

VEIGA NETO, F. C.; GAVALDÃO, M. Iniciativas de PSA de conservação dos recursos hídricos na Mata Atlântica. In: BECKER, F. G.; SEEHUSEN, S. E. (Org.). **Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011. p. 123-182.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006: um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2007.

WUNDER, S. **Payments for environmental services: some nuts and bolts**. Jakarta, Indonésia: Center for International Forestry Research, 2005. (CIFOR Occasional Paper, n. 42).

WOODRUFF, S. C.; BENDOR, T. K. Ecosystem services in urban planning: Comparative paradigms and guidelines for high quality plans. **Landscape and Urban Planning**, v. 152, p. 90-100, Aug. 2016. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.04.003