

Natalia Andricioli Periotto

**EXERGIA E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE DUAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO,
BRASIL.**

Orientador:
Prof. Dr. José Galizia Tundisi
Programa de Pós-Graduação
em Ecologia e Recursos
Naturais, Universidade
Federal de São Carlos

JULHO DE 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS
NATURAIS

**EXERGIA E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE DUAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO,
BRASIL.**

Natalia Andricioli Periotto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, da Universidade Federal de São Carlos, como um dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Ciências, área de concentração em Ecologia e Recursos Naturais.

JULHO DE 2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P445e Periotto, Natalia Andricioli
Exergia e serviços ecossistêmicos de duas
bacias hidrográficas do estado de São Paulo, Brasil
/ Natalia Andricioli Periotto. -- São Carlos :
UFSCar, 2016.
79 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2016.

1. Ecossistemas. 2. Bacias hidrográficas. 3.
Exergia. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais

Folha de Aprovação

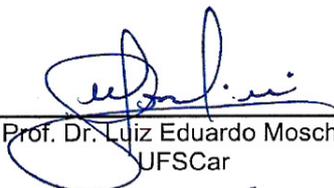
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado da candidata Natalia Andricioli Periotto, realizada em 27/07/2016:



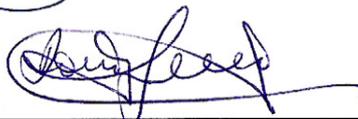
Prof. Dr. José Galizia Tundisi
UFSCar



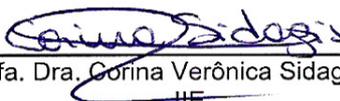
Profa. Dra. Odete Rocha
UFSCar



Prof. Dr. Luiz Eduardo Moschini
UFSCar



Prof. Dr. Donato Seiji Abe
IIE



Profa. Dra. Corina Verônica Sidagis Galli
IIE

Dedico esta tese a todos que, por meio de suas pesquisas, contribuem para transformar a Terra em um planeta com mais equilíbrio em todas as áreas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Galizia Tundisi, que me proporcionou mais esta rica oportunidade de crescimento. Gratidão, mestre, pelo aprendizado acadêmico e pelo exemplo de ser humano que és, e sobretudo pela compreensão nas horas difíceis.

À Fapesp (processo número 2012/12991-9), pela bolsa de estudos, sem a qual não seria possível a minha dedicação a este trabalho.

Ao meu amado marido, Gustavo Rincon Mazão, pelo apoio imensurável em todas as fases da minha pesquisa e pela ajuda com as geotecnologias.

Aos meus amigos Mayra C. Prado de Moraes, Dayana Almeida, Camila Francisco Gonçalves, Rômulo Theodoro Costa e Eduarda Romanini, pela amizade, conselhos, apoio e ajuda nas metodologias de geoprocessamento.

Ao MsC. Igor Ogashawara e ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Moschini, pela grande ajuda nas metodologias de geoprocessamento.

Às minhas velhas amigas do peito Simone Sundermann Cesar, Daniela Yumi Yamamoto-Tew, Francine Ferraz Günther e Bruna Benatti Serrano, pelo apoio incondicional em todas as fases deste trabalho.

Aos meus pais, Maria Antonia Andricioli e Antonio Roque Periotto, que me proporcionaram condições para chegar até esta etapa.

A todos os amigos que vibraram positivamente por mim.

À Deus, energia intangível pela ciência materialista, mas que alimenta a esperança de dias melhores neste planeta.

“Ecologia não é uma atitude política conduzida por “cidadãos corretos”, mas uma mostra de amor-próprio e pelos semelhantes, pela terra que nos nutre, pela irmandade entre os homens e pela vida em todas as suas expressões. ”

Dr. Alberto Gonzalez

“What is the meaning of democracy, freedom, human dignity, standard of living, self-realization, fulfilment? Is it a matter of goods, or of people? Of course it is a matter of people. But people can be themselves only in small comprehensible groups. Therefore, we must learn to think in terms of an articulated structure that can cope with a multiplicity of small-scale units. If economic thinking cannot grasp this, it is useless. If it cannot get beyond its vast abstractions, the national income, the rate of growth, capital/output ratio, input-output analysis, labor mobility, capital accumulation; if it cannot get beyond all this and make contact with the human realities of poverty, frustration, alienation, despair, breakdown, crime, escapism, stress, congestion, ugliness and spiritual death, then let us scrap economics and start afresh. Are there not indeed enough 'signs of the times' to indicate that a new start is needed?”

Ernst Friedrich Schumacher

Sumário

Resumo geral.....	1
Introdução geral.....	2
Eco-exergia.....	2
Classificação dos serviços do ecossistema.....	7
Referências Bibliográficas.....	16

Capítulo I: Caracterização dos serviços ecossistêmicos, drivers e valores econômicos em duas bacias hidrográficas do estado de São Paulo, Brasil.....19

Resumo.....	20
Abstract.....	20
1. Introdução.....	21
2. Materiais e Métodos.....	22
2.1. Área de estudo.....	22
2.2. Uso e ocupação da terra.....	24
2.3. Identificação dos serviços do ecossistema e forçantes.....	25
2.4. Estimativa dos valores econômicos dos serviços do ecossistema da vegetação nativa e áreas alagadas.....	26
3. Resultados e Discussão.....	26
3.1. Uso e ocupação da terra.....	26
3.2. Identificação dos serviços do ecossistema e forçantes.....	32
3.3. Estimativa do valor econômico dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	36
4. Conclusões.....	39
5. Referências bibliográficas.....	41

Capítulo II: Exergia e serviços do ecossistema em bacias hidrográficas.....45

Resumo.....	46
Abstract.....	46

1. Introdução.....	47
2. Materiais e Métodos.....	50
2.1. Área de estudo.....	50
2.2. Eco-exergia.....	51
2.2.1. Cálculo da biomassa aérea vegetal das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	51
2.2.2. Cálculo de eco-exergia das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	54
2.2.3. Estimativa do valor econômico dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	54
3. Resultados e Discussão.....	54
3.1. Biomassa aérea vegetal das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	54
3.2. Eco-exergia das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	58
3.3. Estimativa do valor econômico dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.....	71
4. Conclusões.....	72
5. Referências bibliográficas.....	73
Considerações finais.....	76
Referências bibliográficas.....	79

Resumo

A avaliação dos serviços dos ecossistemas vem sendo amplamente realizada para o entendimento e conscientização dos benefícios dos componentes naturais para o bem-estar humano e sua importância na automanutenção destes ecossistemas. Metodologias tradicionais e inovadoras (de eco-exergia) foram aplicadas nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (estado de São Paulo, Brasil), em dois anos distintos (2004 e 2014). Foram identificados os usos e coberturas da terra das duas bacias e suas capacidades em prover diferentes serviços ecossistêmicos, e por meio destes usos e coberturas avaliou-se as forças diretas e indiretas de mudanças nos serviços. A maior porcentagem de uso e cobertura da terra foi de áreas terrestres cultivadas ou manejadas, e as demandas de serviços pelas populações das duas bacias hidrográficas, seguidas das atividades econômicas nestas áreas, configuraram-se as principais forças de mudanças nos serviços ecossistêmicos. A eco-exergia das áreas de vegetação nativa (Jacaré-Guaçu: 5.617,12 GJ.ha.ano⁻¹; Jacaré-Pepira: 6.002,02 GJ.ha.ano⁻¹) e áreas alagadas (Jacaré-Guaçu: 3.346,45 GJ.ha.ano⁻¹; Jacaré-Pepira: 3.431,33 GJ.ha.ano⁻¹) das duas bacias foram estimadas e estes valores foram coerentes com os valores de referência. No entanto, mostra-se evidente que mudanças na biomassa vegetal destas áreas afetam diretamente a diversidade destes organismos e de outros que dependem destes e conseqüentemente alteram a capacidade de trabalho e os serviços ecossistêmicos. Concluiu-se que as mudanças de eco-exergia entre os anos de 2004 e 2014, nas áreas de vegetação nativa e áreas alagadas, sugerem mudanças na oferta de serviços ecossistêmicos relacionados à qualidade e disponibilidade de água, entre outros serviços, nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Foram também estimados valores econômicos dos serviços e estes mostraram os valores econômicos potenciais das áreas alagadas e dos remanescentes de vegetação nativa, bem como a magnitude de ganhos e perdas se estes ecossistemas forem protegidos, recuperados ou degradados. Os resultados deste trabalho evidenciam que o gerenciamento das bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira deve considerar as inter-relações entre os aspectos ambientais e sociais. Destaca-se a importância da recuperação da vegetação nativa das duas bacias, principalmente nas áreas ripárias, o que garante a disponibilidade hídrica. É de igual importância a gestão alternativa das áreas de entorno das áreas alagadas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, visto que as práticas agrícolas atuais deste entorno impactam diretamente os serviços ecossistêmicos oferecidos. Sob a ótica do conceito de eco-exergia, a proteção e recuperação das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas deve ser feita considerando-se não somente a quantidade de organismos

vegetais, mas também a sua diversidade, de modo a garantir uma ampla gama de serviços ecossistêmicos.

Introdução geral

Serviços do ecossistema é um termo amplamente utilizado na referência aos benefícios dos ecossistemas para o bem-estar humano e para as próprias comunidades biológicas. A identificação e tradução de sua importância por meio de valores econômicos vêm sendo amplamente realizadas para a conscientização da necessidade de se conservar e recuperar áreas nativas e de se equilibrar a exploração antrópica sobre os recursos naturais.

Para isto, foram desenvolvidas metodologias específicas para a avaliação de cada tipo de serviço ecossistêmico. Por exemplo, para a avaliação do valor de recreação de uma represa, pode-se estimar o custo de viagem de determinado local até esta represa, ou o preço hedônico das habitações em torno desta represa. Para a estimativa do valor da ciclagem biogeoquímica de uma área alagada, pode-se calcular o custo de reposição desta por uma estrutura artificial. Para a estimativa do valor de qualquer serviço, pode-se aplicar também a valoração contingente, que considera as preferências de indivíduos em pagar ou receber pela conservação de um determinado serviço. Estas metodologias vêm gerando resultados importantes para o desenvolvimento deste campo de estudo, porém apresentam limitações pois podem apresentar resultados tendenciosos resultantes de pontos de vista individuais ou da consideração de poucos serviços prestados.

Eco-Exergia

A exergia dos ecossistemas ou eco-exergia é uma abordagem inovadora para o estudo dos serviços do ecossistema, pois possibilita avaliar os ecossistemas por meio de parâmetros biofísicos e, portanto, próximos à realidade (Jørgensen, 1992, 2010; Jørgensen *et al.*, 2005; Tundisi *et al.*, 2012).

Eco-exergia é “a quantidade de trabalho (energia livre de entropia) que um sistema pode realizar quando está em equilíbrio termodinâmico com seu ambiente” (Jørgensen & Svirezhev, 2004). Considera-se a energia livre de entropia, pois em um sistema em equilíbrio termodinâmico, entropia refere-se à parcela de energia que não pode mais ser transformada em trabalho.

A avaliação de eco-exergia considera como ambiente (de referência) o mesmo ecossistema, com mesma temperatura e pressão, mas em equilíbrio termodinâmico e químico, e trabalhos magnético e elétrico insignificantes, ou seja, “uma sopa inorgânica sem vida, estrutura biológica, informação (genes), gradientes ou moléculas orgânicas” (Jørgensen, 2010) (**Figura 1**). Assim, considera-se que somente a energia de trabalho química contribui para a capacidade de trabalho do ecossistema em estudo. Portanto, a eco-exergia de um ecossistema expressa a distância do equilíbrio químico e pode ser um bom indicador da medida do desenvolvimento de um ecossistema e da sua saúde (Jørgensen & Nielsen, 2007).

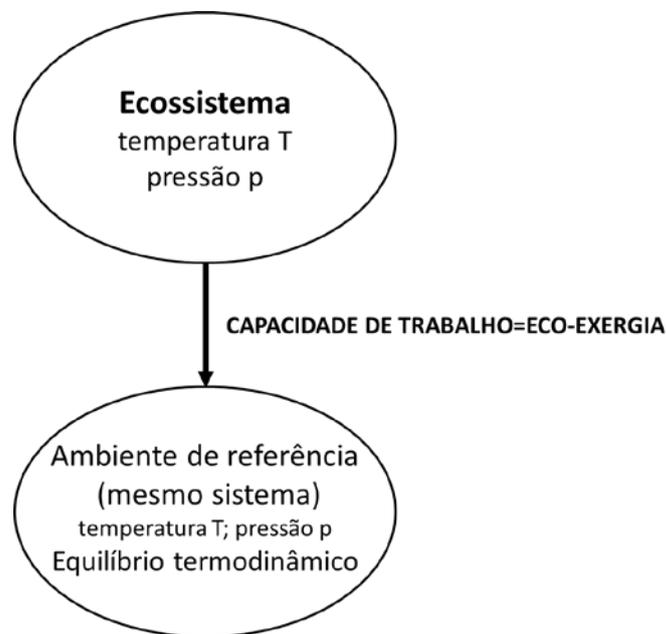


Figura 1. O cálculo da eco-exergia de um ecossistema é feito em comparação ao mesmo ecossistema, porém em equilíbrio termodinâmico (modificado de Jørgensen 2007, 2010).

A eco-exergia também pode ser explicada como a medida do potencial de transformação da energia contida nos genes (informação) das espécies de um ecossistema para a construção de biomassa e estruturas que participam dos processos e funções dos ecossistemas, e resultam em serviços (Jørgensen, 1992, 2010; Jørgensen *et al.*, 2005). Como o fluxo de serviços depende das condições biofísicas de um ecossistema, a medida de eco-exergia deste ecossistema pode ser um indicador da sua integridade ecológica (saúde), e suas variações podem indicar aumento ou decréscimo dos serviços ofertados ao bem-estar humano (Jørgensen, 2007; Burkhard *et al.*, 2012; Tundisi *et al.*, 2012).

Segundo Jørgensen (2006; 2007; 2015), o cálculo da eco-exergia de um ecossistema (Ex) (kJ/m^2) é realizado por meio da seguinte fórmula (**Equação 1**):

$$Ex = \sum_{i=1}^n \beta_i \times C_i \times f \quad (\text{Equação 1})$$

onde β_i é o fator de ponderação (ou de informação) do “i”ésimo componente do ecossistema; C_i é a concentração (g/m^2) do “i”ésimo componente do ecossistema; e f corresponde à energia de trabalho por unidade de biomassa [$18,7 \text{ kJ/g}$ = conteúdo médio de energia livre (eco-exergia) do detrito].

O fator de ponderação β é calculado com base no número de unidades transcricionais do DNA, ou seja, segmentos que são transcritos em RNA e têm função oposta ao DNA não-codificante. Este fator reflete a complexidade dos organismos, ou seja, quanto maior o valor de β , mais complexo é o organismo (Jørgensen *et al.*, 2005; Jørgensen, 2007) (**Tabela 1**).

Existem somente duas limitações neste método, descritas até o momento (Jørgensen, 2007). A primeira se refere à impossibilidade de calcular a eco-exergia total de um ecossistema, pois seria necessário medir as concentrações de todos os seus componentes. Entretanto, é tangível o cálculo da exergia de componentes dominantes que estão relacionados a uma problemática central (Jørgensen & Nielsen, 2007). A segunda limitação se refere aos resultados apresentarem valores relativos, pois os cálculos são feitos em relação a um sistema de referência definido. Apesar destas limitações, o cálculo de eco-

exergia é uma boa ferramenta para a avaliação de ecossistemas, pois reflete condições biofísicas próxima da realidade, e deste modo, inclui todos os potenciais serviços ecossistêmicos que determinado organismo ou ecossistema pode gerar.

A eco-exergia também estabelece um novo método para a valoração dos serviços do ecossistema (Jørgensen, 2010), por meio da multiplicação de cada GJ (gigajoule) do valor de eco-exergia por 10 Euros ou por 14 Dólares Americanos.

Tabela 1. Valores do fator de ponderação/informação β para o cálculo de eco-exergia.

	Organismos primitivos Plantas	Animais	
Detrito	1,00		
Viróides	1,0004		
Vírus		1,01	
Célula mínima		5,0	
Bactérias	8,5		
Archaea	13,8		
Protistas (algas)	20		
Leveduras		17,8	
		33	Mesozoa, Placozoa
		39	Protozoa, Amoebe
		43	Phasmida (bicho pau)
Fungos	61		
		76	Nemertina
		91	Cnidaria (corais, anêmonas, medusas)
Rhodophyta	92		
Porifera (esponjas)	98		
		97	Gastrotricha
		108	Brachiopoda
		120	Platyhelminthes (vermes chatos)
		133	Nematoda (lombrigas)
		133	Annelida (sanguessugas)
		143	Gnathosomulida
Semente de mostarda	143		
		165	Kinorhynca
Plantas vasculares sem sementes	158		
		163	Rotifera
		164	Entoprocta
Musgo	174		
		167	Insecta (besouros, moscas, abelhas, vespas, formigas)
		191	Coleoidea
		221	Lepidoptera (borboletas)
		232	Crustacea
		246	Chordata
Arroz	275		
		310	Mollusca (Bivalvia, Gastropoda)
Gymnospermas (incluindo Pinus)	314		
		322	Mosquitos
Angiospermas	393		
		499	Peixes
		688	Amphibia
		833	Reptilia
		980	Aves
		2127	Mamíferos
		2138	Macacos
		2145	Macacos antropóides
		2173	<i>Homo sapiens</i>

Fonte: Jørgensen (2010).

Classificação dos serviços do ecossistema

Em adição ao cálculo da eco-exergia dos ecossistemas, é importante identificar e listar os potenciais serviços gerados a fim de se chamar a atenção dos gestores e comunidades para o papel que estes componentes desempenham, direta ou indiretamente, no bem-estar humano ou na autorregulação do próprio ecossistema, e assim promover a conservação e recuperação de áreas com importantes recursos nativos.

De acordo com os tipos de bens e funções ecossistêmicas, os serviços podem ser classificados em diferentes categorias. Existem várias tipologias de classificação e sua padronização é amplamente discutida na comunidade científica (Costanza *et al.*, 1997; De Groot *et al.*, 2002; World Resources Institute, 2008; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Boyd & Banzhai, 2007; Wallace, 2007; Fisher & Turner, 2008; Fisher *et al.*, 2009; Bush *et al.*, 2012; Crossman *et al.*, 2013).

A Agência Ambiental Européia, em conjunto com diversos pesquisadores, vem desenvolvendo a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (*Common International Classification of Ecosystem Services - CICES*) (EEA, 2011) (Haines-Young & Potschin, 2013a, 2013b), que unifica as tipologias existentes e permite um melhor entendimento e comparação entre estudos sobre diferentes ecossistemas do planeta.

Para a CICES, *serviços finais do ecossistema* são as contribuições diretas dos ecossistemas para o bem-estar humano e estão conectados às estruturas, processos e funções que os geram. *Bens* e *benefícios* são os produtos que as pessoas criam ou derivam dos serviços finais do ecossistema. *Bem-estar humano* é o que se origina a partir do acesso aos materiais básicos para uma boa vida, necessários para manter a liberdade de escolha e ação, saúde, boas relações sociais e segurança”, e é dependente dos bens e benefícios (Haines-Young & Potschin, 2013a, 2013b).

A CICES considera três categorias principais de serviços do ecossistema: provisão, regulação e manutenção, e cultural. As funções de suporte, consideradas em tipologias propostas por outros autores, são consideradas

como sendo parte das estruturas, processos e funções dos ecossistemas, consumidas ou utilizadas indiretamente e que ao mesmo tempo facilitam as saídas de produtos ou serviços finais.

Esta classificação está organizada em uma estrutura hierárquica de cinco níveis: seção, divisão, grupo, classe e tipo de classe (**Figura 2**). O nível *seção* aborda as três principais categorias de serviços ecossistêmicos. *Divisão* divide as categorias nos principais tipos de produtos. O nível *grupo* separa a *divisão* em produto biológico, físico e cultural.

A **Tabela 2** mostra como esta classificação unifica as outras existentes, detalhando os serviços prestados e, portanto, possibilita uma comparação mais organizada entre avaliações dos serviços de diferentes ecossistemas. Por exemplo, tem-se o serviço de *provisão ou suprimento de água doce*, em várias tipologias, porém a CICES detalha este suprimento de água nas divisões (a) (provisão) nutrição - água potável superficial e água potável subterrânea, e (b) (provisão) materiais - água não potável superficial e água não potável subterrânea. O mesmo acontece com os serviços de *provisão de combustível e regulação de desastres naturais*, e outros serviços.

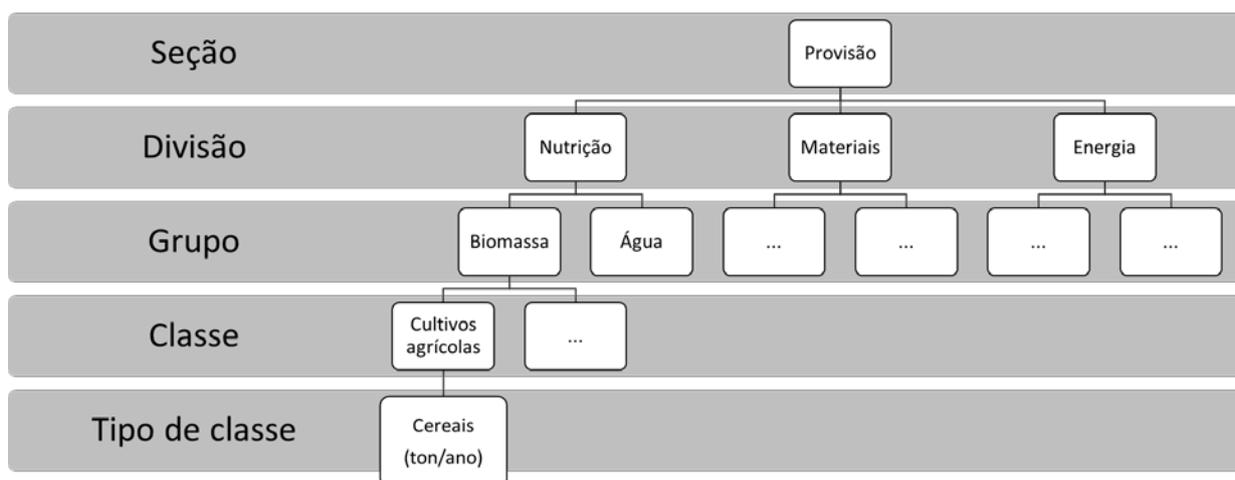


Figura 2. Exemplo da divisão hierárquica da classificação CICES (modificado de CICES, 2016).

Tabela 2. Comparação entre tipologias de classificação dos serviços do ecossistema.

MEA (2005)	Costanza <i>et al.</i> (1997)	World Resources Institute (2008)	TEEB (2010)	De Groot <i>et al.</i> (2010)	CICES (Haines-Young & Potschin, 2013a, 2013b)
Alimento [provisão]	Produção de alimentos	Alimentos (cultivos agrícolas, pecuária, pesca, aquicultura, alimentos selvagens)	Alimento [provisão]	Alimento [provisão]	Biomassa (cultivos agrícolas; criação de animais e seus produtos; plantas selvagens, algas e seus produtos; animais selvagens e seus produtos; plantas e algas provenientes de aquicultura <i>in situ</i> ; animais provenientes de aquicultura <i>in situ</i>) [provisão – nutrição]
Fibras, madeira [provisão]	Materiais brutos	Fibras (madeira; outras fibras) [provisão]	Materiais brutos [provisão]	Fibras, combustíveis e outros materiais brutos [provisão]	Biomassa (fibras e outros materiais de plantas, algas e animais, para uso direto ou processamento) [provisão – materiais]
Combustível [provisão]	Materiais brutos	Combustível de biomassa [provisão]	Materiais brutos [provisão]	Fibras, combustíveis e outros materiais brutos [provisão]	Fontes de energia baseadas em biomassa (recursos animais e vegetais) [provisão – energia] Energia mecânica (baseada em animais) [provisão – energia] Fontes de energia abiótica renovável [provisão abiótica – energia] Fontes de energia abiótica não-renovável [provisão abiótica – energia]
Recursos genéticos [provisão]	Recursos genéticos	Recursos genéticos [provisão]	Manutenção de diversidade genética [suporte]	Material genéticos [provisão]	Biomassa (material genético de toda a biota) [provisão – materiais]
Bioquímicos, medicamentos naturais e farmacêuticos [provisão]	Recursos genéticos	Bioquímicos, medicamentos naturais e farmacêuticos [provisão]	Recursos medicinais [provisão]	Produtos bioquímicos e recursos medicinais [provisão]	Biomassa (fibras e outros materiais de plantas, algas e animais, para uso direto ou processamento; material genético de toda a biota) [provisão – materiais]

(Continuação da Tabela 2)

MEA (2005)	Costanza <i>et al.</i> (1997)	World Resources Institute (2008)	TEEB (2010)	De Groot <i>et.al</i> (2010)	CICES (2013)
Recursos ornamentais [provisão]	-	-	-	Espécies ou recursos ornamentais [provisão]	Biomassa (fibras e outros materiais de plantas, algas e animais, para uso direto ou processamento) [provisão – materiais]
Água doce [provisão]	Suprimento de água	Água doce [provisão]	Água doce [provisão]	Água [provisão]	Água superficial potável [provisão – nutrição] Água subterrânea potável [provisão – nutrição] Água superficial não-potável [provisão – materiais] Água subterrânea não-potável [provisão – materiais]
Regulação da qualidade do ar [regulação]	Regulação de gases	Regulação da qualidade do ar [regulação]	Clima e qualidade do ar locais [regulação]	Regulação da qualidade do ar [regulação]	Mediação pelos ecossistemas (diluição pelos ecossistemas atmosféricos, de água doce e marinhos) [regulação e manutenção – mediação de resíduos, substâncias tóxicas e outras perturbações]
Regulação do clima [regulação]	Regulação do clima	Regulação do clima (global; regional e local) [regulação]	Sequestro e estoque de carbono [regulação]	Regulação do clima [regulação]	Composição da atmosfera e regulação do clima (regulação do clima global por meio da redução da concentração de gases de efeito estufa; regulação do microclima e do clima regional) [regulação e manutenção – manutenção das condições físicas, químicas e biológicas]
Regulação da água [regulação]	Regulação da água	Regulação da água [regulação]	Água doce [provisão]	Regulação da água [regulação]	Fluxos líquidos (ciclo hidrológico e manutenção do fluxo de água) [regulação e manutenção – mediação de fluxos]

(Continuação da Tabela 2)

MEA (2005)	Costanza <i>et al.</i> (1997)	World Resources Institute (2008)	TEEB (2010)	De Groot <i>et.al</i> (2010)	CICES (2013)
Regulação da erosão [regulação]	Controle da erosão e retenção do sedimento	Regulação da erosão [regulação]	Prevenção da erosão e manutenção da fertilidade do solo [regulação]	Proteção contra erosão [regulação]	Fluxos de massa (estabilização de massas e controle das taxas de erosão; amortecimento e atenuação de fluxos de massa) [regulação e manutenção – mediação de fluxos] Formação e composição do solo (processos de desgaste) [regulação e manutenção – manutenção das condições físicas, químicas e biológicas]
Purificação da água e tratamento de resíduos [regulação]	Tratamento de resíduos	Purificação da água e tratamento de resíduos [regulação]	Tratamento de resíduos [regulação]	Tratamento de resíduos [regulação]	Mediação pela biota (bio-remediação por meio de microrganismos, algas, plantas e animais) [regulação e manutenção – mediação de resíduos, substâncias tóxicas e outras perturbações] Formação e composição do solo (decomposição e processos de fixação) [regulação e manutenção – manutenção das condições físicas, químicas e biológicas]
Regulação de doenças [regulação]	Controle biológico	Regulação de doenças [regulação]	Controle biológico [regulação]	Regulação biológica [regulação]	Controle de pragas e doenças (controle de doenças) [regulação e manutenção – manutenção das condições físicas, químicas e biológicas]
Regulação de pragas [regulação]	Controle biológico	Regulação de pragas [regulação]	Controle biológico [regulação]	Regulação biológica [regulação]	Controle de pragas e doenças (controle de pragas) [regulação e manutenção – manutenção das condições físicas, químicas e biológicas]
Polinização [regulação]	Polinização	Polinização [regulação]	Polinização [regulação]	Polinização [regulação]	Manutenção do ciclo de vida, habitat e proteção do patrimônio genético (polinização e dispersão de sementes) [regulação e manutenção – manutenção das condições físicas, químicas e biológicas]

(Continuação da Tabela 2)

MEA (2005)	Costanza <i>et al.</i> (1997)	World Resources Institute (2008)	TEEB (2010)	De Groot <i>et.al</i> (2010)	CICES (2013)
Regulação de desastres naturais [regulação]	Regulação de distúrbios	Regulação de desastres naturais [regulação]	Moderação de eventos extremos [regulação]	Mitigação de desastres naturais [regulação]	Fluxos de massa (estabilização de massas e controle das taxas de erosão) [regulação e manutenção – mediação de fluxos] Fluxos líquidos (proteção contra enchentes) [regulação e manutenção – mediação de fluxos] Fluxos de gás ou ar (proteção contra tempestades) [regulação e manutenção – mediação de fluxos]
Diversidade cultural [cultural]	-	-	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	-	-
Valores espirituais e religiosos [cultural]	Cultural	Valores éticos [cultural]	Experiência espiritual e senso de lugar [cultural]	Inspiração espiritual e religiosa (cultural)	Espiritual e/ou simbólico (simbólico; sagrado e/ou religioso) [cultural – interações espirituais, simbólicas, entre outras, com a biota, ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]
Sistemas de conhecimento [cultural]	Cultural	Valores éticos [cultural]	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	Educação e ciência (cultural)	Interações intelectuais e representativas (científicas; educacionais) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]
Valores educacionais [cultural]	Cultural	Valores éticos [cultural]	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	Educação e ciência (cultural)	Interações intelectuais e representativas (científicas; educacionais) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]

(Continuação da Tabela 2)

MEA (2005)	Costanza et al. (1997)	World Resources Institute (2008)	TEEB (2010)	De Groot et.al (2010)	CICES (2013)
Inspiração [cultural]	Cultural	Valores éticos [cultural]	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	Inspiração para cultura, arte e design (cultural)	Interações intelectuais e representativas (estética) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]
Valores estéticos [cultural]	Cultural	Valores éticos [cultural]	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	Estética (cultural)	Interações intelectuais e representativas (estética) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]
Relações sociais [cultural]	-	-	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	-	-
Senso de lugar [cultural]	-	Valor de existência [cultural]	Experiência espiritual e senso de lugar [cultural]	Herança e identidade cultural (cultural)	Outros produtos culturais (existência) [cultural – interações espirituais, simbólicas, entre outras, com a biota, ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]
Valores de herança cultural [cultural]	-	Valor de existência [cultural]	Valorização estética e inspiração para cultura, arte e design [cultural]	Herança e identidade cultural (cultural)	Outros produtos culturais (legado) [cultural – interações espirituais, simbólicas, entre outras, com a biota, ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas] Interações intelectuais e representativas (científicas; educacionais) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]

(Continuação da Tabela 2)

MEA (2005)	Costanza <i>et al.</i> (1997)	World Resources Institute (2008)	TEEB (2010)	De Groot <i>et.al</i> (2010)	CICES (2013)
Recreação e ecoturismo [cultural]	Cultural	Recreação e ecoturismo [cultural]	Recreação e saúde mental e física [cultural]	Recreacional (cultural)	<p>Interações físicas e experimentais (uso experimental de plantas, animais e paisagens em diferentes contextos ambientais; uso físico de paisagens em diferentes contextos ambientais) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]</p> <hr/> <p>Interações intelectuais representativas (entretenimento) [cultural – interações físicas e intelectuais com a biota, os ecossistemas e paisagens terrestres ou marinhas]</p>

O estudo dos serviços ecossistêmicos deve considerar também o contexto onde estes ecossistemas estão inseridos, incluindo seus beneficiários (escala espacial) e os usos (demandas) que fazem destes serviços, pois a sustentabilidade dos ecossistemas nativos e antrópicos dependem do equilíbrio desta interação. As bacias hidrográficas, por serem compostas por inúmeros componentes nativos e manejados com potencial de prover diversos serviços ecossistêmicos e proporcionar o bem-estar humano, são bons observatórios de como ocorrem estas interações entre os elementos naturais e sociais (beneficiários).

As bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira (sub-bacias da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré), localizadas no estado de São Paulo, Brasil, são bons objetos de estudo, pois apresentam claramente estas interações entre ações antrópicas e ecossistemas nativos. Existe vasta bibliografia científica sobre estas áreas, incluindo relatórios de situação publicados anualmente pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré (CBH-TJ, 2016), porém não existem estudos que avaliem os serviços ecossistêmicos destas bacias. As sub-bacias do Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira foram escolhidas para o presente estudo, pois apresentam importantes áreas alagadas, áreas com vegetação nativa de Cerrado, bem como áreas protegidas pelas Unidades de Conservação, em contraste com áreas de extenso manejo antrópico.

Deste modo, este estudo teve como foco a utilização do cálculo de eco-exergia para a avaliação dos serviços ecossistêmicos das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira (estado de São Paulo, Brasil), nos anos de 2004 e 2014, por meio de (1) classificação do uso e cobertura da terra das duas bacias para a avaliação das capacidades dos usos e coberturas presentes em prover serviços do ecossistema, e identificação das principais forçantes (*drivers*) de mudanças sobre estes serviços (Capítulo I); (2) quantificação das áreas totais dos principais produtores de água (vegetação nativa e áreas alagadas) das duas bacias, utilizando-se a classificação do uso e cobertura da terra (Capítulo I); (3) cálculo da biomassa aérea vegetal das áreas produtoras de água, por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Capítulo II); (4)

utilização dos valores de biomassa para o cálculo de eco-exergia (Capítulo II); e (5) valoração econômica dos serviços dos ecossistemas de vegetação nativa e áreas alagadas por meio de metodologias tradicionais e de eco-exergia (Capítulos I e II).

Referências bibliográficas

BOYD, J.; BANZHAI, S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, vol. 63, n. 2-3, pp. 616-626. 2007.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; NEDKOV, S.; MÜLLER, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, vol. 21, p. 17-19. 2012.

BUSCH, M., LA NOTTE, A., LAPORTE, V., AND ERHARD, M. Potentials of quantitative and qualitative approaches to assessing ecosystem services. *Ecological Indicators*, vol. 21, pp. 89-103. 2012.

CBH-TJ. Comitê de bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhtj/>>

CICES. Common International Classification of Ecosystem Services. Disponível em: <<http://cices.eu/>>.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEIL, R.; PARUELO, S.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. Vol., 387, pp.253-260.1997.

CROSSMAN, N. D.; BURKHARD, B.; NEDKOV, S.; WILLEMEN, L.; PETZ, K.; PALOMO, I.; DRAKOU, E.G.; MARTÍN-LOPEZ, B.; MCPHEARSON, T.; BOYANOVA, K.; ALKEMADE, R.; EGOH, B.; DUNBAR, M.B.; MAES, J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 4, 4-14. 2013.

DE GROOT, R.S.; WILSON, M.A.; BOUMANS, M.J., A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, vol. 41, pp.393–408. 2002.

DE GROOT, R.S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision-making. *Ecological Complexity*, vol. 7, pp. 260-272. 2010.

- FISHER, B.; TURNER, R.K. Ecosystem services: classification for evaluation. *Biological Conservation*, vol. 141, n. 5, pp1167-1169. 2008.
- FISHER, B.; TURNER, R.K.; MORLING, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, vo. 68, n.3, pp. 643-653. 2009.
- HAINES-YOUNG, R. AND POTSCHIN, M. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012*. EEA Framework Contract No EEA/IEA/09/003. Download at www.cices.eu and a full spread sheet showing the classification. 2013a.
- HAINES-YOUNG R. AND POTSCHIN M. *Classifying ecosystem services using Bayesian Networks*. CEM Working Paper No13. 2013b.
- JORGENSEN, S.E. *Integration of ecosystem theories: a pattern*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 383 p. 1992.
- JORGENSEN, S.E. Application of holistic thermodynamic indicators. *Ecological Indicators*, vol. 6, pp.24-29. 2006.
- JORGENSEN, S.E. Description of aquatic ecosystem's development by exergy and exergy destruction. *Ecological Modelling*, vol. 204, pp.22-28. 2007.
- JORGENSEN, S.E. Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*, vol. 7, p. 311-313. 2010.
- JORGENSEN, S.E. New method to calculate the work energy of information and organisms. *Ecological Modelling*, vol. 295, pp.18-20. 2015.
- JORGENSEN, S.E.; SVIREZHEV, Y.M. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Elsevier. 366 p. 2004.
- JORGENSEN, S.E.; LADEGAARD, N.; DEBELJAK, M.; MARQUES, J.C. Calculations of exergy for organisms. *Ecological Modelling*, vol. 185, p. 165-175. 2005.
- JORGENSEN, S.E.; NIELSEN, S.N. Application of exergy as a thermodynamic indicator in ecology. *Energy*, vol. 32, n.5, pp. 673-685. 2007.
- MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and human well-being: general synthesis*. 155 p. 2005.
- TEEB. *Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*. 51 p. 2010.
- TUNDISI, J.G.; MASTUMURA-TUNDISI, T.; PERIOTTO, N.A. Exergy and ecological services in reservoirs. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 72, n.4, p.979. 2012.

WALLACE, K.J. Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation*, vol. 139, n.3-4, p.235-246. 2007.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. *Ecosystem services: a guide for decision-makers*. 96 p. 2008.

CAPÍTULO I

**CARACTERIZAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS,
IDENTIFICAÇÃO DAS FORÇANTES E VALORES ECONÔMICOS
DE DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DE SÃO
PAULO, BRASIL.**

Resumo

A avaliação dos serviços do ecossistema é uma ferramenta utilizada na conscientização sobre os benefícios das funções e serviços dos ecossistemas para o bem-estar humano, bem como a importância da sua conservação. No Brasil, existem poucos estudos que avaliam serviços ecossistêmicos no contexto das bacias hidrográficas. O objetivo deste trabalho é preencher esta lacuna por meio da avaliação dos serviços ecossistêmicos das bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (estado de São Paulo, Brasil) em uma escala temporal de 10 anos. A capacidade da cobertura e uso da terra em prover serviços ecossistêmicos e as forças foram avaliadas como resultado do mapeamento destas áreas. Valores econômicos foram estimados com base em dados de literatura científica. Os resultados mostraram que as áreas terrestres cultivadas e manejadas se destacam em relação aos outros usos e por isto, os serviços de regulação e manutenção são diminuídos nestas áreas. Áreas alagadas e de vegetação nativa, com áreas menores, têm papel fundamental no suprimento dos serviços de regulação e manutenção e, portanto, devem ser recuperadas e protegidas. Demografia e atividades econômicas na bacia foram identificadas como as principais forças que atuam sobre os serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas. Os valores econômicos estimados mostram, independente dos valores de base adotados, a magnitude dos impactos antrópicos que modificam estes ecossistemas, e dos ganhos referentes à recuperação e conservação dos mesmos.

Abstract

The evaluation of ecosystem services is a tool to raise awareness about the benefits of ecosystem functions and services for human well-being and ecosystem's self-maintenance. In Brazil, few studies and reports assess ecosystem services in a watershed context. The aim of this paper is to fill this gap by assessing ecosystem services of Jacaré-Guaçu and Jacaré-Pepira Watersheds (São Paulo State, Brazil) in a temporal scale of 10 years. Land cover and uses' capacity to provide ecosystem services, and drivers of change were assessed as a result of mapping these areas. Economic values were estimated based on scientific literature information. Results showed that cultivated and managed terrestrial areas stand out over other areas and then, regulation and maintenance services are reduced in these areas. Wetlands and native vegetation, with smaller areas, are important for the supply of regulation and maintenance services and therefore must be recovered and protected. Demography and economic activities were identified as the main driving forces that change ecosystem services delivered by native vegetation and wetlands. Economic values found, independently of base values, indicate the magnitude of anthropic impacts that change these ecosystems and the gains resultant from their recovering and conservation.

1. Introdução

A avaliação dos serviços do ecossistema e das forças que alteram seu suprimento para a sociedade, assim como estimativas dos seus valores econômicos, são ferramentas utilizadas para a conscientização dos benefícios das funções do ecossistema para bem-estar humano. A importância de identificar e valorar os serviços do ecossistema vem sendo amplamente discutida na literatura. Costanza (1997; 2014) e De Groot *et al.* (2012) compilaram informações por meio de revisão de literatura para identificar e estimar o valor global dos serviços do ecossistema. A Avaliação Ecosistêmica do Milênio (2005) destacou a influência das forças nos fluxos dos serviços ecossistêmicos.

Outras publicações influentes propuseram diferentes tipologias e modelos de avaliação dos serviços do ecossistema (De Groot *et al.*, 2002; Freeman *et al.*, 2003; Stern, 2007; Wallace, 2007; Costanza *et al.*, 2016). Haines-Young & Potschin (2013 a,b), propuseram a Classificação Internacional Comum dos Serviços do Ecossistema (CICES), que unifica as tipologias existentes e melhora a qualidade das comparações entre estudos em diferentes partes do mundo.

No Brasil, pesquisas vêm sendo realizadas com foco principal na identificação local e regional dos efeitos da intensificação das atividades agrícolas nos serviços providos pela biodiversidade (Borner *et al.*, 2007; Foley *et al.*, 2007; Galetti *et al.*, 2010; Balvanera, 2012;). Porém há poucos estudos que avaliam os serviços ecossistêmicos no contexto de bacias hidrográficas (Seidl & Moraes, 2000; Agostinho *et al.*, 2010; Periotto & Tundisi, 2013; Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2016). Além disto, embora a situação ambiental, social e econômica das bacias hidrográficas seja reportada anualmente nos relatórios de situação pelos comitês de bacia, são escassas as publicações sobre os serviços do ecossistema nestas unidades de gerenciamento. Este trabalho tem por finalidade preencher esta lacuna na literatura por meio da avaliação dos serviços do ecossistema nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (estado de São Paulo, Brasil) em uma escala temporal de 10 anos.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

As bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira localizam-se na porção central do estado de São Paulo (Brasil). Ambas compõem duas das seis sub-bacias e abrangem os três principais rios da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13) (**Figura 3**):

(a) Rio Jacaré-Guaçu, que corre através da bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu; nasce na junção entre os Ribeirões do Feijão e do Lobo, à jusante do reservatório Carlos Botelho (Lobo/Broa) (município de Itirapina).

(b) Rio Jacaré-Pepira, que corre através da bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira; nasce na Serra do Itaqueri, entre os municípios de Brotas e São Pedro.

(c) Rio Tietê, que corre através das bacias do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Faz parte da hidrovía Tietê-Paraná, importante meio de transporte e distribuição de boa parte da produção agrícola nacional.

Ambas bacias abrangem 22 municípios. A bacia do Jacaré-Guaçu engloba Analândia, Araraquara, Gavião Peixoto, Ibaté, Matão, Nova Europa, São Carlos e Tabatinga. A bacia do Jacaré-Pepira abrange Bariri, Bocaina, Dois Córregos, Itajú Jaú, Torrinha e São Pedro. Alguns municípios localizam-se em ambas bacias como Ibitinga, Boa Esperança do Sul, Trabijú, Dourado, Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina. Dentre os municípios citados, Ibitinga, Tabatinga, Matão, Araraquara, Ibaté, São Carlos, Analândia, Itirapina, São Pedro, Torrinha, Dois Córregos, Jaú, Bocaina, Bariri e Itajú, não estão totalmente inseridos nos limites das bacias.

Existem três usinas de geração de hidroeletricidade (UHE): UHE Ibitinga, UHE Bariri e UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa). A UHE Ibitinga pertence à AES Tietê S/A (produtor independente), e tem capacidade de geração de 131,490 MW (ANEEL, 2013). Localiza-se na porção média do Rio Tietê, entre os municípios de Ibitinga e Jacanga, à jusante da UHE Bariri.

A UHE Bariri é também propriedade da AES Tietê S/A, com capacidade de geração de 136,8 MW (ANEEL, 2013). Localiza-se à montante da UHE Ibitinga e à jusante da UHE Barra Bonita.

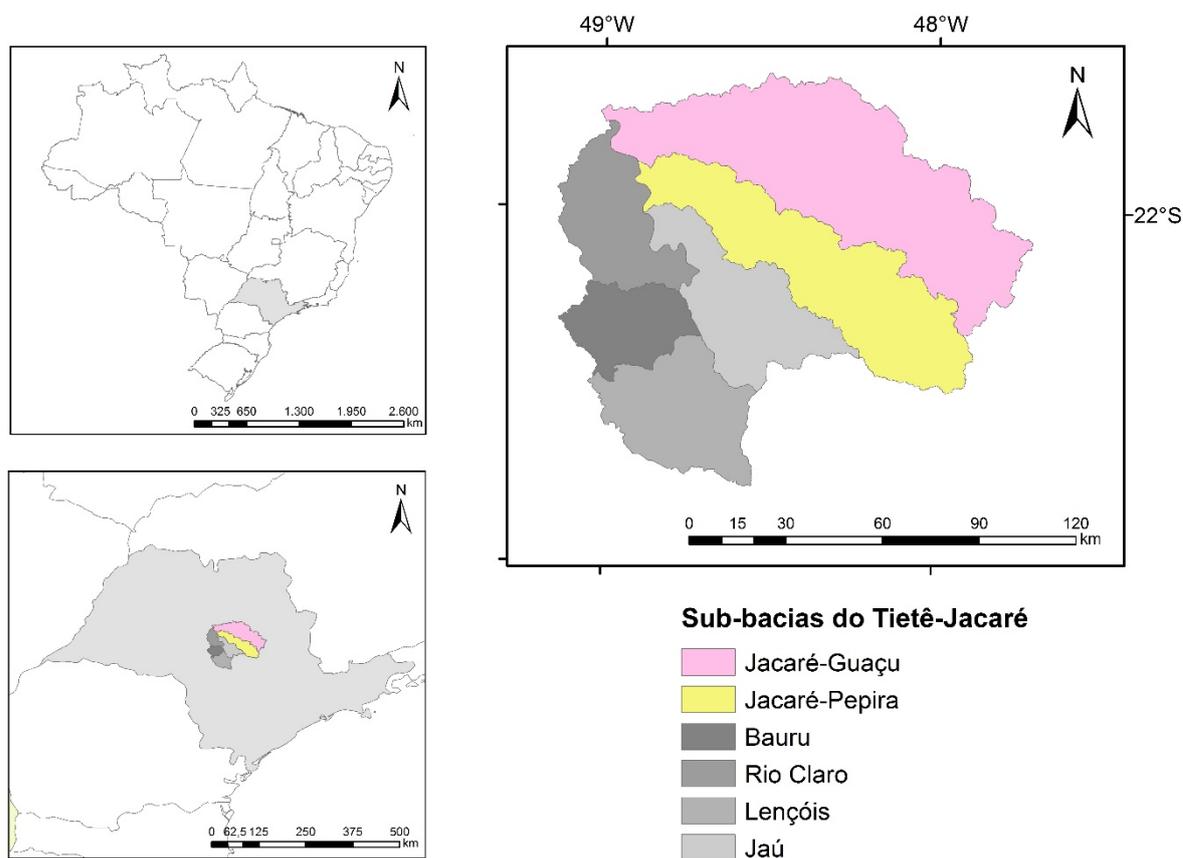


Figura 3. Localização das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, no estado de São Paulo, Brasil.

A UHE Carlos Botelho (Lobo/ Broa) localiza-se na bacia do Jacaré-Guaçu. É um produtor de energia de pequena escala, propriedade da Aratu Geração S/A, com capacidade de geração de 2 MW (Matos, 2012).

Existem também Unidades de Conservação nestas duas bacias (**Tabela 3**). Destaca-se a APA Ibitinga, que protege duas áreas alagadas extensas das bacias do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira; e a APA Corumbataí/Botucatu-Tejupá, que protege o Ribeirão do Lobo e as áreas alagadas do Rio Itaqueri.

Tabela 3. Unidades de Conservação (UC) presentes nas bacias hidrográficas (BH) do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. A segunda coluna corresponde à área total da UC, incluindo seus limites em bacias adjacentes.

Unidades de Conservação	Área total (ha)	Municípios das duas BH inseridos nas UC.
APA Estadual - Corumbataí/Botucatu /Tejupá (Perímetro Corumbataí)	272.692	Brotas, Dois Córregos, Itirapina, São Carlos, Torrinha
APA Estadual de Ibitinga	64.900	Ibitinga
APA Estadual Piracicaba/Juquerí-Mirim (Área I)	107.000	Itirapina
Estação Ecológica de Itirapina	2.300	Brotas, Itirapina
Estação Experimental de Itirapina	3.212	Brotas, Itirapina
Estação Ecológica da Mata do Jacaré	75.26	Brotas
Reserva Ecológica Amadeu Botelho (Reserva Particular do Patrimônio Natural)	190	Jaú

Devido à estas características, as duas bacias são importantes áreas de estudo, com pesquisas sendo desenvolvidas há vários anos, como é o caso das represas da UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa) e da UHE Ibitinga. Além disto, estas represas em conjunto com as áreas verdes do município de Brotas, são atrativos turísticos que movimentam as economias locais e regionais.

2.2. Uso e ocupação da terra

Para a avaliação dos serviços ecossistêmicos e forçantes ao longo de 2004 e 2014, foram identificados as coberturas e usos da terra nas porções dos 22 municípios inseridas nos limites das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Para isto, foram utilizadas imagens ortorretificadas geradas pelo *United States Geological Service* (USGS) (**Tabela 4**). As composições de banda espectral utilizadas foram 3B-4G-5R para as imagens do sensor TM, satélite Landsat 5, e 4B-5G-6R para as imagens do sensor OLI, satélite Landsat 8.

Tabela 4. Data de aquisição das imagens ortorretificadas.

Órbita/ponto	Landsat 5	Landsat 8
220/75	30/08/2004	11/09/2014
220/76	30/08/2004	11/09/2014
221/75	21/08/2004	01/08/2014

A classificação do uso e cobertura da terra foi feita pelo modo manual de vetorização com o uso das imagens da USGS, no software ArcGis (Esri, 2014). Foi utilizado o Datum SIRGAS 2000 e o sistema de projeção UTM zona 22 S. Os usos e coberturas da terra identificados foram agrupados em 5 categorias (adaptado de Di Gregorio & Jansen, 2005), descritas na **Tabela 5**.

Tabela 5. Categorias de classificação do uso e cobertura da terra, identificadas nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

Categorias	Uso e cobertura da terra
Vegetação nativa	Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado
Áreas alagadas	Áreas de várzea
Áreas terrestres cultivadas e manejadas	Pastagem, culturas anuais, culturas permanentes, solo exposto, silvicultura e mineração
Superfície artificial	Indústria, malha urbana, infraestrutura rural e malha viária
Corpos de água	Rios, reservatórios e outros corpos de água

2.3. Identificação dos serviços do ecossistema e forçantes

A identificação dos usos e coberturas da terra das duas bacias possibilitou a organização de uma matriz de capacidades dos usos e coberturas da terra em prover serviços ecossistêmicos, baseada em Burkhard *et al.* (2009) e na tipologia de classificação *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES) (Haines-Young & Potschin, 2013). Valores qualitativos de capacidade foram atribuídos de acordo com: (0) capacidade irrelevante, (1) baixa relevância, (2) capacidade relevante, (3) capacidade altamente relevante. Estes valores qualitativos preliminares foram atribuídos com base em conhecimento científico

sobre o funcionamento dos processos ecológicos em cada cobertura e uso da terra. A partir desta matriz, avaliou-se as principais forçantes de mudanças nos serviços ecossistêmicos.

2.4. Estimativa dos valores econômicos dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

Devido à contribuição das áreas alagadas e vegetação nativa na provisão de quantidade e qualidade de água para a população das bacias do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, seus valores econômicos foram estimados por método tradicional baseado em transferência de valores.

Os valores das áreas de vegetação nativa foram calculados de acordo com os valores de “florestas” informados em Costanza *et al.* (2014) e os valores das áreas alagadas basearam-se em Seidl & Moraes (2000), Carvalho (2007) e Costanza *et al.* (2014) (**Tabela 6**). Todos os valores de base foram equalizados pelo fator de conversão do Índice de Preços do Consumidor, dos Estados Unidos, igual a 1,38 (referente ao ano de 2007), como utilizado por Costanza *et al.* (2014).

Tabela 6. Valores de referência (US\$.ha.ano⁻¹), para as estimativas dos valores econômicos dos serviços do ecossistema.

	Carvalho, A.R., 2007	Seidl & Moraes, 2000	Costanza <i>et al.</i> , (2014)	
			Costanza <i>et al.</i> , 1997	de Groot <i>et al.</i> , 2012
Vegetação natural	-	-	1.338,00	3.800,00
Áreas alagadas	1.600,00	5.839,72	20.404,00	140.174,00

3. Resultados e Discussão

3.1. Uso e ocupação da terra

Os usos e coberturas identificados para os anos de 2004 e 2014 estão apresentados nas **Figuras 4 a 7**.

Pode ser observado em 2004 e 2014 uma predominância de áreas terrestres cultivadas e manejadas sobre as outras categorias de coberturas e usos, em ambas bacias. As **Tabelas 7 e 8** mostram as mudanças aproximadas, em hectares e porcentagem, nas áreas de uso e cobertura da terra ao longo destes 10 anos. Embora as áreas de vegetação nativa ocupem aproximadamente 20% da área de cada bacia hidrográfica (sendo o segundo maior uso e cobertura), nota-se nos mapas das **Figuras 4 a 7**, que estas áreas estão fragmentadas, e por isto podem apresentar perdas de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos.

Tabela 7. Mudanças aproximadas nas áreas de uso e cobertura da terra (ha e %), na bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu, entre os anos de 2004 e 2014. Os valores negativos representam perdas em área.

Jacaré-Guaçu	2004 (ha)	2014 (ha)	2014-2004 (ha)	2014-2004 (%)
Vegetação nativa	77.584,85	79.312,66	1.727,81	2,23
Área alagada	7.948,46	9.031,08	1.082,62	13,62
Corpo de água	4.024,93	3.828,45	-196,48	-4,88
Área terrestre cultivada e manejada	305.460,28	299.466,86	-5.993,42	-1,96
Superfície artificial	21.530,68	24.887,81	3.357,14	15,59

Tabela 8. Mudanças aproximadas nas áreas de uso e cobertura da terra (ha e %), na bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira, entre os anos de 2004 e 2014. Os valores negativos representam perdas em área.

Jacaré-Pepira	2004 (ha)	2014 (ha)	2014-2004 (ha)	2014-2004 (%)
Vegetação nativa	56.151,75	57.068,29	916,55	1,63
Área alagada	3.845,84	3.480,29	-365,55	-9,51
Corpo de água	2.506,47	2.493,09	-13,38	-0,53
Área terrestre cultivada e manejada	200.060,31	198.852,34	-1.207,97	-0,60
Superfície artificial	3.719,31	4.388,88	669,57	18,00

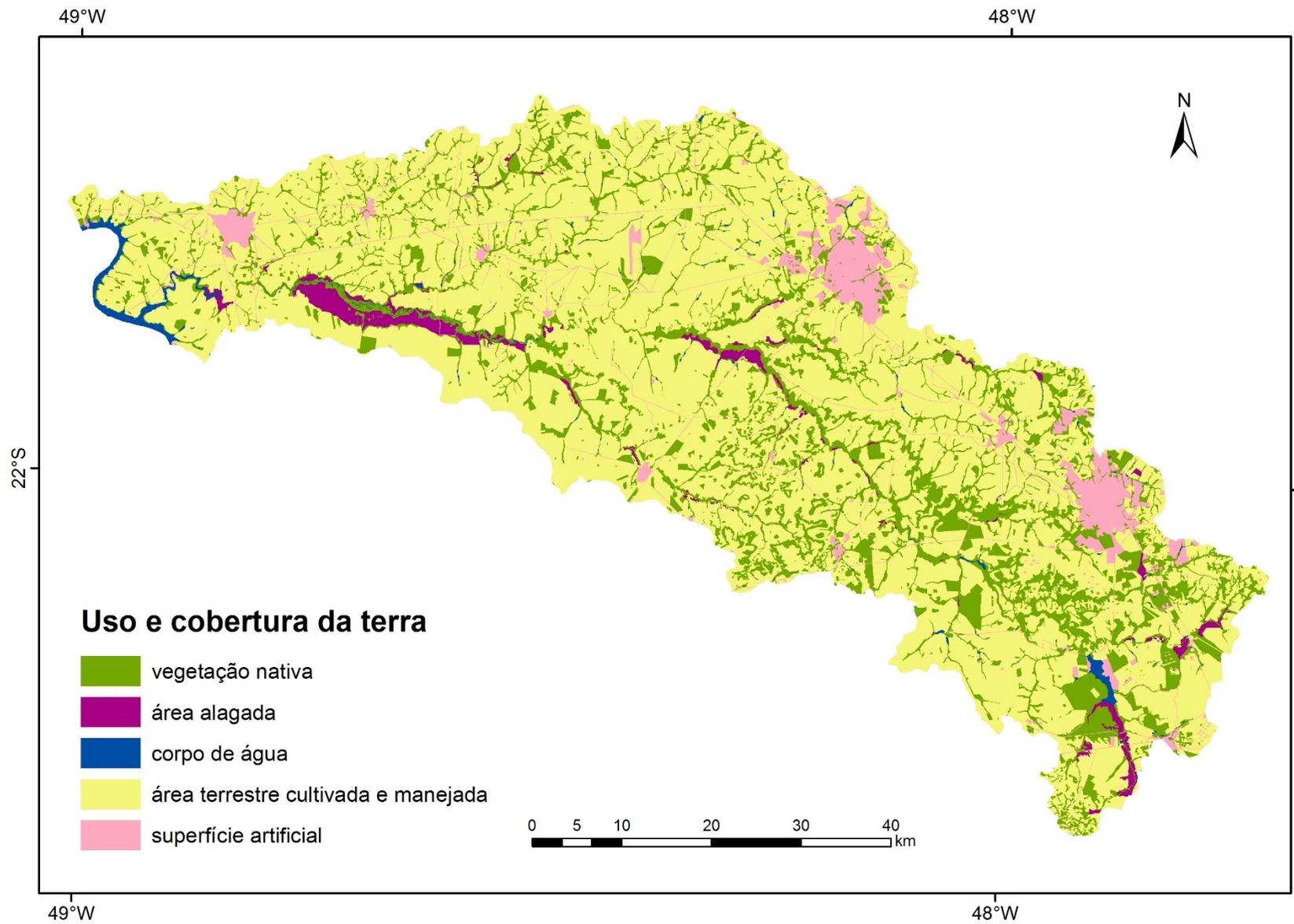


Figura 4. Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu, referente ao ano de 2004.

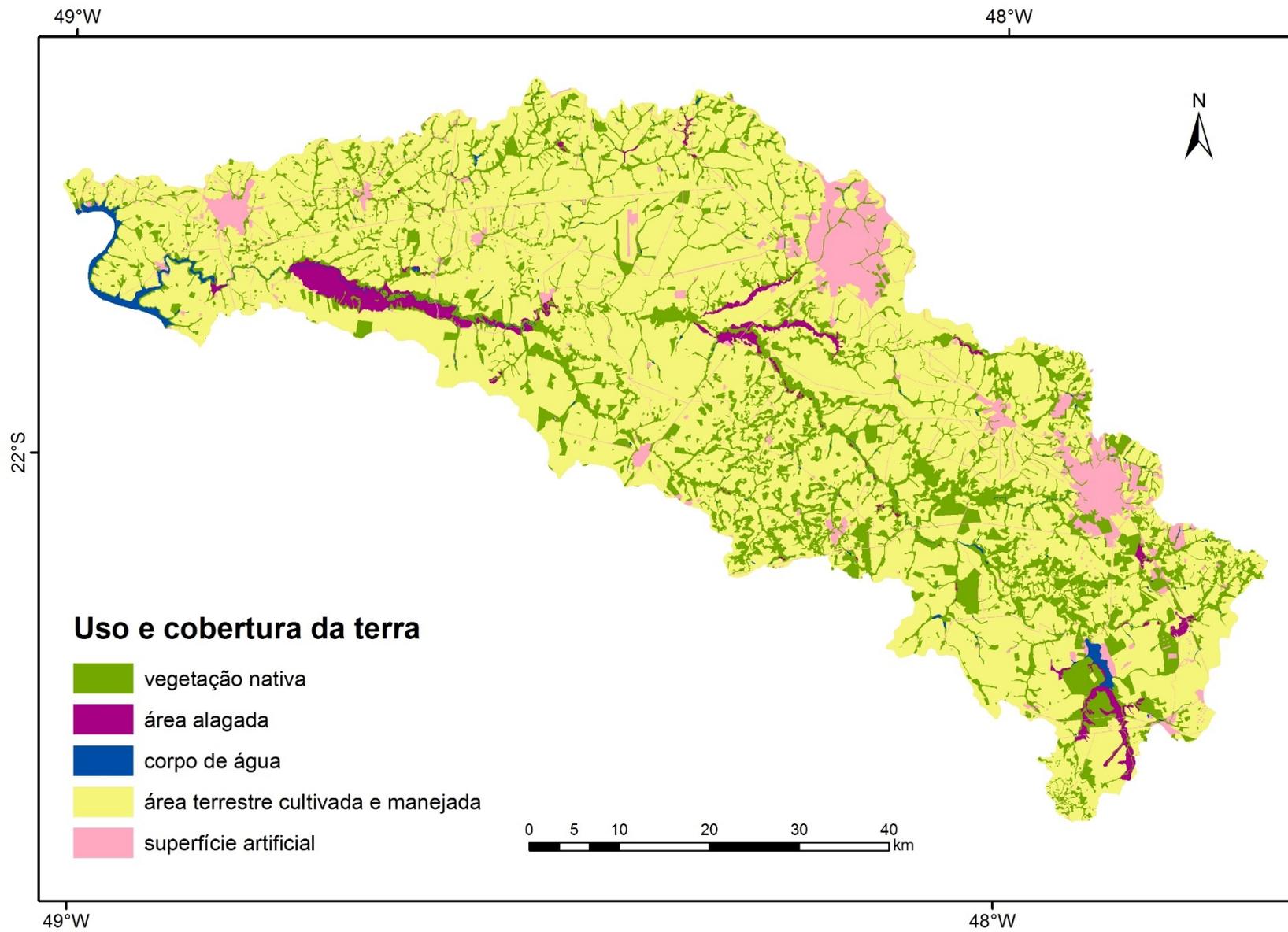


Figura 5. Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu, referente ao ano de 2014.

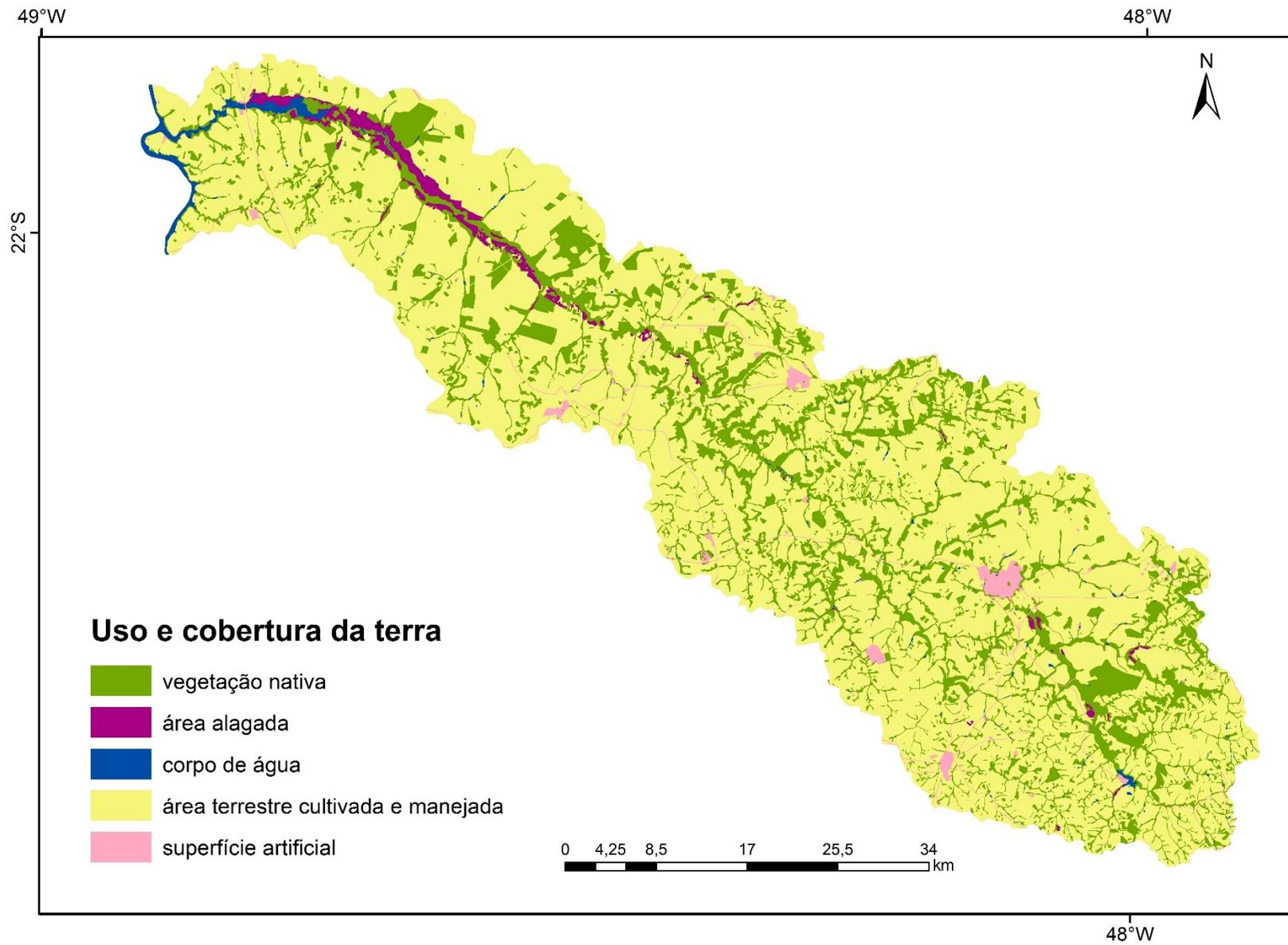


Figura 6. Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira, referente ao ano de 2004.

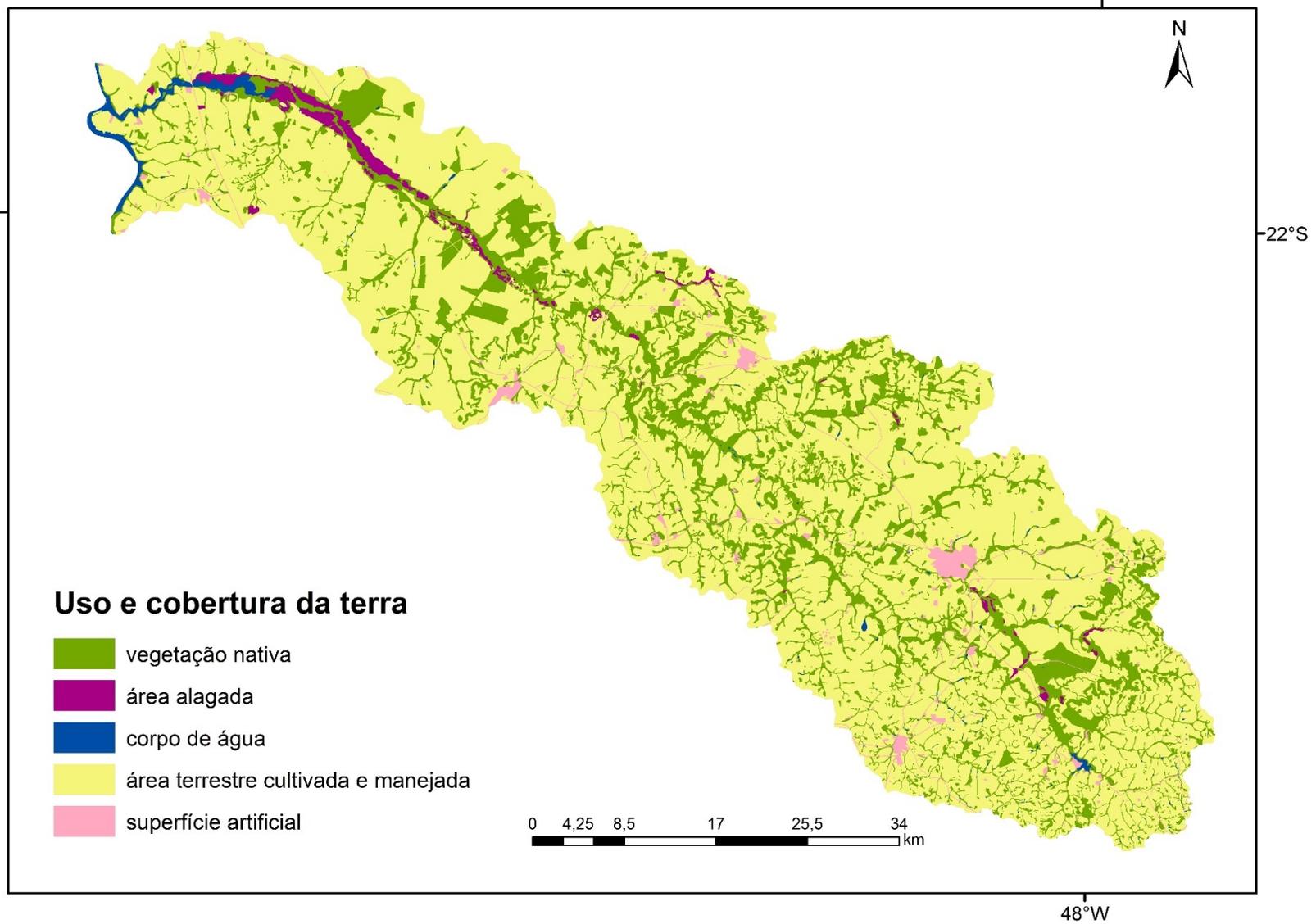


Figura 7. Uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira, referente ao ano de 2014.

Houve aumentos nas áreas de vegetação nativa (2,23%) e áreas alagadas (13,62%), assim como em superfícies artificiais (15,59%) na bacia do Jacaré-Guaçu. Na bacia do Jacaré-Pepira, houve aumentos também em vegetação nativa (1,63%) e nas áreas de superfícies artificiais (18,00%). A diminuição observada nas áreas alagadas da bacia do Jacaré-Pepira pode ter ocorrido devido à diminuição de precipitação média anual de 2014 (1.117,7 mm;) em relação à 2004 (1.615,6 mm), segundo dados da estação meteorológica de São Carlos (São Paulo) (INMET, 2016).

3.2. Identificação dos serviços do ecossistema e forçantes

A identificação do uso e cobertura da terra possibilitou a avaliação dos serviços do ecossistema. A identificação dos serviços é uma abordagem eficiente para listar a contribuição dos ecossistemas para a sociedade. Como ambas bacias apresentaram uso e cobertura da terra similares nos dois anos, uma única matriz de capacidade de provisão foi organizada (**Tabela 9**). Foram identificados 30 serviços do ecossistema e os valores qualitativos atribuídos às capacidades foram baseados em conhecimento científico sobre as funções dos ecossistemas estudados.

Vegetação nativa, áreas alagadas e corpos de água foram as coberturas da terra com as maiores capacidades de prover diferentes tipos de serviços do ecossistema. As áreas terrestres cultivadas e manejadas tiveram a maior pontuação nos serviços de provisão, enquanto que as superfícies artificiais mostraram as menores pontuações entre todos os usos e coberturas da terra.

Os serviços de *regulação e manutenção*, embora de uso indireto, foram o grupo de serviços com a maior pontuação, principalmente nas áreas de vegetação nativa, áreas alagadas e corpos de água. No entanto, alguns usos e coberturas da terra não pontuaram neste grupo, como as áreas de superfícies artificiais. Por outro lado, todos os usos e coberturas pontuaram no grupo dos *serviços culturais*, o que indica a importância dos benefícios não materiais de todas estas áreas.

Os resultados qualitativos desta matriz são preliminares e devem ser aprofundados, quantitativamente, para auxiliar no planejamento, tomada de decisão e gerenciamento dos usos da terra nestas bacias hidrográficas. Porém, oferecem uma visão da dependência de alguns componentes das superfícies artificiais sobre os ecossistemas nativos e sobre os manejados.

Neste contexto, além da escala temporal, deve-se também considerar a escala espacial, bem como as relações entre os serviços do ecossistema de áreas adjacentes (Bennett, 2009). Uma região urbana requer áreas além de suas fronteiras para suprir seus habitantes com bens e serviços do ecossistema (Rees, 1992) e, portanto, aumentos na superfície artificial das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira – que inclui as áreas urbanas – e no número populacional podem indicar possíveis aumentos nas pressões humanas sobre os bens e serviços de ecossistemas adjacentes, por exemplo, sob a forma de maiores demandas de água potável e maiores despejos de efluentes.

Para suprir demandas mais elevadas, os ecossistemas que proveem água e tratamento de resíduos, como a vegetação nativa e áreas alagadas, respectivamente, devem ser conservados ou até mesmo restaurados. Pode ser observado nas **Figuras 4 a 7** que as matas ripárias nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira estão em tamanhos inadequados para garantir qualidade e quantidade de água para a população dos municípios e alguns registros em literatura evidenciam esta inadequação. Rodrigues-Filho *et al.* (2015) registraram que a largura da vegetação ripária na bacia hidrográfica do Ribeirão do Lobo (inserida dentro da bacia do Jacaré-Guaçu) encontra-se em tamanho reduzido, e perdas adicionais podem comprometer o fluxo de serviços ecossistêmicos e prejudicar a qualidade dos corpos de água, que já foram classificados como mesotróficos por Lamparelli (2004). Matheus & Tundisi (1988) descobriram que a densidade da vegetação ripária influencia diretamente os parâmetros químicos de corpos de água das bacias hidrográficas do Ribeirão do Lobo e do Rio Itaqueri (inseridas dentro da bacia do Jacaré-Guaçu) e, portanto, fica evidente os serviços ecossistêmicos prestados pela vegetação ripária e a urgência em se proteger e recuperar estas áreas nas duas bacias.

Tabela 9. Matriz da capacidade do uso e cobertura da terra em prover serviços do ecossistema, nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. (0=capacidade irrelevante; 1=capacidade pouco relevante; 2=capacidade relevante; 3=capacidade altamente relevante).

Uso e cobertura da terra		Serviços de Provisão										Serviços de Regulação e Manutenção										Serviços Culturais						TOTAL								
		Produtos agrícolas	Criação de animais e sub-produtos	Animais selvagens e sub-produtos	Animais de aquicultura in-situ	Água superficial	Fibras e outros materiais de algas, plantas e animais para uso direto ou processamento	Material genético de toda a biota	Fonte de energia abiótica renovável	Materiais abióticos	Filtragem, sequestro, armazenagem, acúmulo pelos ecossistemas	Diluição pelos ecossistemas de água doce	Estabilização de massas e controle das taxas de erosão	Estabilização e atenuação de fluxos de massa	Mediação de cheiros, ruídos ou impactos visuais	Manutenção do ciclo hidrológico e do fluxo de água	Prevenção de inundações	Polinização e dispersão de sementes	Manutenção de habitats de berçários e suas populações	Controle de pestes	Formação e composição do solo	Processos de decomposição e fixação (ciclagem biogeoquímica)	Manutenção ou tamponamento das condições químicas das águas doces	Regulação do clima global pela redução das concentrações de gases de efeito estufa	Regulação do clima local e regional	Interação física - recreação	Científico e educacional		Estética	Existência	Transporte - Hidrovia					
Vegetação nativa	Vegetação natural	9	0	0	3	0	0	3	3	0	0	39	3	0	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	12	3	3	3	3	0	60
Área alagada	Área alagada	11	0	0	3	0	2	3	3	0	0	43	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	12	3	3	3	3	0	66
Área tererstre cultivada e manejada	Pastagem	4	0	3	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	3	1	0	0	12	
	Culturas anuais	7	3	0	0	0	0	3	1	0	0	10	2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	4	0	3	1	0	0	21	
	Culturas temporárias	7	3	0	0	0	0	3	1	0	0	10	2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	4	0	3	1	0	0	21	
	Solo exposto	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	7
	Silvicultura	5	0	0	1	0	0	3	1	0	0	12	2	0	1	0	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	4	0	3	1	0	0	21	
	Mineração	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	6	
Superfície artificial	Indústria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	
	Malha urbana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	3	0	0	0	6		
	Infraestrutura rural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3		
	Malha viária	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3		
Corpo de água	Rios, reservatórios e outros corpos de água	18	0	0	3	3	3	3	3	3	0	30	3	3	0	2	0	3	3	3	3	0	0	3	3	1	3	15	3	3	3	3	3	63		
TOTAL		65	6	3	10	3	5	18	14	3	3	150	19	6	10	5	9	12	12	13	12	6	6	9	9	10	12	77	13	36	13	9	6			

Ademais, despejos não-pontuais de grandes cargas de nutrientes ao longo das bacias, originados de práticas agrícolas, por exemplo, podem sobrecarregar a capacidade das áreas alagadas de reciclar nutrientes (ciclos biogeoquímicos) e de tamponar a condição química da água. Proteger ou recuperar as áreas de vegetação nativa e as áreas alagadas mantem e fortalece os fluxos de serviços do ecossistema ligados ao ciclo hidrológico (Bullock & Acreman, 2003; Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2010). Isto inclui a disponibilidade de água para serviços abióticos como a geração de hidroeletricidade em ambas bacias hidrográficas.

As áreas terrestres cultivadas ou manejadas nas bacias do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira contém em sua maior parte sistemas de plantio convencionais planejados para maximizar a produção de serviços de provisão e são caracterizados principalmente por culturas anuais (cana-de-açúcar) e culturas perenes (laranja), como observado em viagens de campo e nas imagens de satélite. Nota-se na **Tabela 9** que esta otimização, na forma de monocultura, pode causar declínios nos serviços de regulação e manutenção, cruciais para a automanutenção destes cultivos. Como resultado, entradas de insumos agrícolas como fertilizantes, corretores de solo e pesticidas são necessários para manter a produtividade. Técnicas alternativas de plantio, como a fertilização verde (Ambrosano *et al.*, 2011) por meio de rotação de culturas com legumes, podem aumentar a produção de cana-de-açúcar (serviço de provisão) e recuperar alguns serviços de regulação e manutenção nestas áreas, pois é comprovado que o cultivo de legumes entre as safras de cana-de-açúcar enriquece o solo e substitui o solo exposto. Tal prática deve também proteger os serviços dos ecossistemas das áreas alagadas e dos corpos de água por meio da prevenção do escoamento de nutrientes e sedimentos em direção a estes sistemas. O fortalecimento e a proteção dos serviços ecossistêmicos em ambas áreas nativas e manejadas levam a uma situação de “ganho-ganho”, com benefícios ecológicos, econômicos e sociais (De Groot *et al.*, 2010).

Em vista disto, as principais forçantes diretas e indiretas de mudanças nos serviços das duas bacias estão resumidas na **Figura 8**. Aumentos na demografia dos municípios da bacia levam a mudanças nas demandas de serviços do ecossistema e, portanto, na intensificação das atividades econômicas. Como

resultado, o uso intensivo do solo, com técnicas de plantio convencionais, por exemplo, pode causar intenso desmatamento e escoamento de nutrientes e sedimentos em direção aos corpos de água e áreas alagadas. O desmatamento pode também levar a perdas na biodiversidade necessária para manter os serviços nas duas bacias.

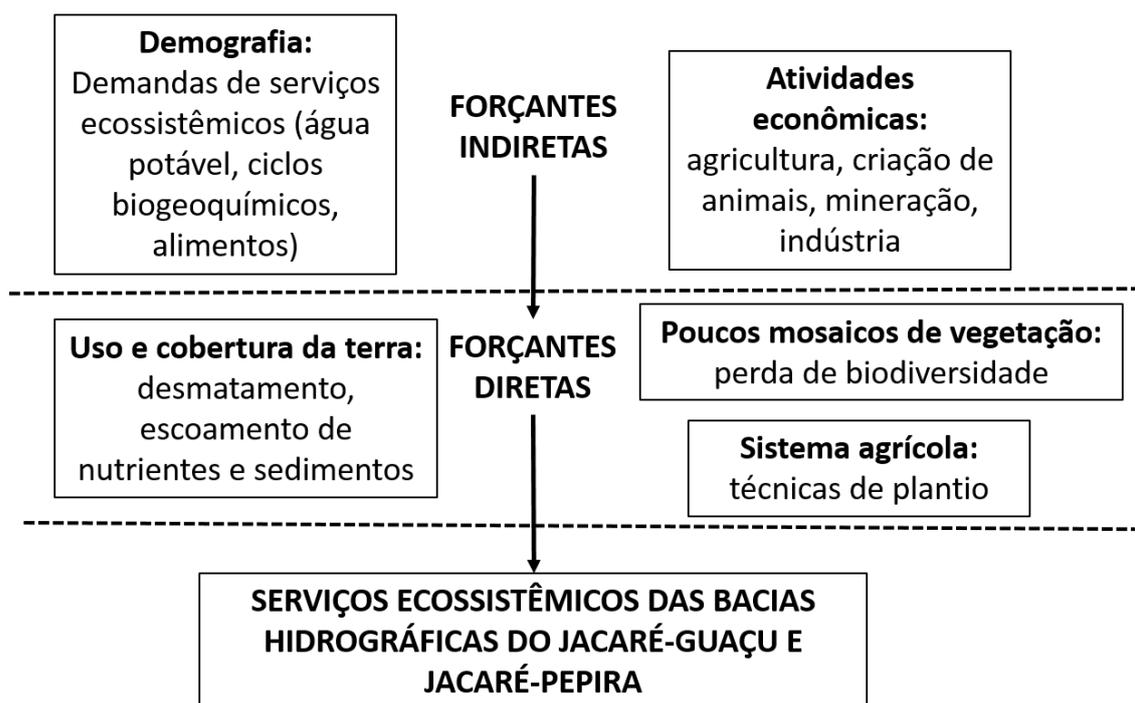


Figura 8. Influência das principais forçantes na provisão dos múltiplos serviços do ecossistema, nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

3.3. Estimativa do valor econômico dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

Além de identificar os serviços e suas forçantes, estimar seus valores econômicos também é uma maneira eficiente para averiguar a magnitude dos benefícios dos ecossistemas no bem-estar humano e para capturar estes valores nos processos de tomada de decisão. Os valores econômicos também refletem a magnitude das perdas nos serviços, como resultado da atuação das forçantes que podem impactar negativamente os ecossistemas.

Os valores econômicos dos serviços das áreas alagadas e vegetação nativa das duas bacias, baseados em metodologia tradicional de transferência de valores, são mostrados nas **Tabelas 10 e 11**. A primeira coluna mostra valores baseados em Carvalho (2007), que abrange duas metodologias que refletem escolhas individuais (disposição a pagar) e rendimentos (custo de viagem). A segunda coluna, com valores baseados em Seidl & Moraes (2000), refere-se a uma reestimativa local dos valores de Costanza *et al.* (1997) em uma área alagada do Brasil. A terceira e quarta colunas indicam os valores encontrados em Costanza *et al.* (2014), que atualizam as estimativas globais de Costanza *et al.* (1997) e de De Groot *et al.* (2012).

Tabela 10. Valores econômicos (U\$/ano) estimados para as áreas alagadas e vegetação nativa da bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu, obtidos a partir da transferência de valores econômicos encontrados em literatura, sobre as áreas deste estudo. Os valores estão em dólares corrigidos de acordo com a inflação de 2007.

		(C) Costanza et al., (2014)			
		(A) Carvalho, A.R. (2007)	(B) Seidl, A.F. & Moraes, A.S. (2000)	(C.1) Costanza et al. (1997)	(C.2) de Groot et al. (2012)
Áreas alagadas	2004 (U\$/ano)	17.550.198,13	64.055.151,89	162.180.363,52	1.114.167.333,64
	2014 (U\$/ano)	19.940.614,68	72.779.753,97	184.270.064,26	1.265.921.975,45
Vegetação nativa	2004 (U\$/ano)			103.808.532,61	294.822.439,41
	2014 (U\$/ano)			106.120.336,99	301.388.102,06

Tabela 11. Valores econômicos (U\$/ano) estimados para as áreas alagadas e vegetação nativa da bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira, obtidos a partir da transferência de valores econômicos encontrados em literatura, sobre as áreas deste estudo. Os valores estão em dólares corrigidos de acordo com a inflação de 2007.

		(C) Costanza et al., (2014)			
		(A)Carvalho, A.R. (2007)	(B)Seidl, A.F. & Moraes, A.S. (2000)	(C.1) Costanza et al. (1997)	(C.2) de Groot et al. (2012)
Áreas alagadas	2004 (U\$/ano)	8.491.622,83	30.992.937,28	78.470.594,26	539.087.290,74
	2014 (U\$/ano)	7.684.488,48	28.047.038,15	71.011.912,53	487.846.688,26
Vegetação nativa	2004 (U\$/ano)			75.131.039,21	213.376.643,49
	2014 (U\$/ano)			76.357.376,57	216.859.514,92

Os aumentos nos valores dos serviços das áreas alagadas e vegetação nativa, de 2004 para 2014, são observados como resultado: (1) dos aumentos nas suas áreas totais, com exceção das áreas alagadas da bacia do Jacaré-Pepira, de acordo com os resultados de cobertura da terra; (2) dos valores de base utilizados nas estimativas de transferência de valor, considerando as limitações das diferentes metodologias que consideram poucos serviços do ecossistema e percepção individual de valor (**Tabelas 10 e 11, A**), ou um número maior de serviços aplicados localmente (**Tabelas 10 e 11, B**) e globalmente (**Tabelas 10 e 11 C**); e (3) dos valores de base resultantes de valores atualizados por estudos mais aprofundados sobre os serviços dos ecossistemas (**Tabelas 10 e 11, C.1 e C.2**).

A redução nos valores econômicos das áreas alagadas da bacia do Jacaré-Pepira pode ser resultado de uma menor precipitação no ano de 2014 em relação a 2004, o que deve ter reduzido a extensão das áreas alagadas. A queda nestes valores indica perdas no fluxo de serviços para a sociedade neste ano.

Os valores encontrados demonstram claramente a importância das áreas alagadas e dos remanescentes de vegetação nativa, independente dos valores de base utilizados. É evidente que estes valores podem aumentar se estas áreas forem conservadas ou recuperadas e se houver a criação de mais áreas de proteção.

4. CONCLUSÕES

O principal uso e cobertura da terra das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira em 2004 e 2014 se caracteriza por *áreas terrestres cultivadas e manejadas*, as quais são planejadas para otimizar o abastecimento da sociedade com serviços de provisão, mas com poucos serviços de regulação e manutenção, essenciais para o bem-estar humano.

Os serviços de *regulação e manutenção* são encontrados principalmente nas áreas de vegetação nativa, áreas alagadas e corpos de água, mas podem ser afetados por forçantes como demografia e atividades econômicas nas bacias. Práticas alternativas de usos da terra podem aumentar o fluxo de

serviços de regulação e manutenção em áreas terrestres cultivadas e manejadas, bem como proteger serviços originados nas áreas naturais adjacentes.

Os valores econômicos estimados demonstram os valores econômicos potenciais das áreas alagadas e dos remanescentes de vegetação nativa, independente dos valores de base utilizados nas estimativas. Também mostram a magnitude de ganhos e perdas se estes ecossistemas forem protegidos, recuperados ou degradados.

Os resultados deste trabalho evidenciam que o gerenciamento das bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira deve considerar as inter-relações entre os aspectos ambientais e sociais. Se por um lado, existe grande demanda antrópica sobre os serviços ecossistêmicos de provisão, por outro, existe a urgência de se restaurar e proteger os elementos nativos que geram serviços de uso indireto, como os de regulação e manutenção, que garantem a continuidade destas provisões. Assim, destaca-se a importância da recuperação e conservação da vegetação nativa das duas bacias, principalmente nas áreas ripárias, o que garante a disponibilidade hídrica contida nos serviços de provisão. É de igual importância a gestão alternativa das áreas de entorno das áreas alagadas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, visto que as práticas agrícolas atuais do entorno impactam diretamente os serviços ecossistêmicos oferecidos.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo no. 2012/12991-9. À Camila Francisco Gonçalves, Rômulo Theodoro Costa e Gustavo Rincón Mazão pela ajuda com a classificação do uso e cobertura da terra.

5. Referências bibliográficas

AGOSTINHO, F.; AMBRÓSIO, L.A.; ORTEGA, E. Assessment of a large watershed in Brazil using Emergy Evaluation and Geographical Information System. *Ecological Modelling*, vol. 221, pp. 1209-1220. 2010.

AMBROSANO, E.J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.V.; SCHAMMAS, E.A.; DIAS, F.L.F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P.C.O.; MURAOKA, T.; SACHS, R.C.C.; AZCÍN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia*, vol. 70, n.4, pp. 810-818. 2011.

ANEEL. *Capacidade de geração do Brasil*. Usinas do tipo UHE em operação.

Disponível em

:><http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=1&fase=3>>. Acesso em 05/april/2013. 2013.

BALVANERA, P.; URIARTE, M.; ALMEIDA-LEÑERO, L.; ALTERSON, A.; DECLERCK, F.; GARDNER, T.; HALL, J.; LARA, A.; LATERRA, P.; PEÑA-CLAROS, M.; MATOS, D.M.S.; VOGL, A.L.; ROMERO-DUQUE, L.P.; ARREOLA, L.F.; CARO-BORRERO, A.P.; GALLEGO, F.; JAIN, M.; LITTLE, C.; XAVIER, R.O.; PARUELO, J.M.; PEINADO, J.E.; POORTER, L.; ASCARRUNS, N.; CORREA, F.; CUNHA-SANTINO, M.; HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, A.P.; VALLEJOS, M. Ecosystem services research in Latin America: the state of the art. *Ecosystem Services*, vol.2, pp. 56-70. 2012.

BENNETT, E.M.; PETERSON, G.D.; GORDON, L.J. Understanding the relationship among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, vol. 12, pp. 1394-1404. 2009.

BORNER, J.; MENDOZA, A.; VOSTI, S.A. Ecosystem services, agriculture, and rural poverty in the Eastern Brazilian Amazon: interrelationships and policy prescriptions. *Ecological Economics*, vol., 64, n.2, pp. 356-373. 2007.

BULLOCK, A.; ACREMAN, M. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 73, n.3, pp. 358-389. 2003.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; MÜLLER, F.; WINDHORST, W. Landscape's capacity to provide ecosystem services – a concept for land-cover assessments. *Landscape Online*, vol. 15, pp. 1-22. 2009.

CARVALHO, A.R. An ecological economics approach to estimate the value of a fragmented wetland in Brazil (Mato Grosso do Sul state). *Brazilian Journal of Biology*, vol. 67, n.4, pp. 663-671. 2007.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEIL, R.; PARUELO, S.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. Vol., 387, pp.253-260. 1997.

COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; VAN DER PLOEG, S.; ANDERSON, S.J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. Vol., 26, pp. 152-158. 2014.

COSTANZA, R.; HOWARTH, R.B.; KUBISZEWSKI, I.; LIU, S.; MA, C.; PLUMECOCQ, G.; STERN, D.I. Influential publications in ecological economics revisited. *Ecological Economics*, vol. 123, pp. 68-76. 2016.

DE GROOT, R.S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, vol. 7., n.3, pp. 260-272. 2010.

DE GROOT, R.; BRANDER, L.; VAN DER PLOEG, S.; COSTANZA, R.; BERNARD, F.; BRAAT, L.; CHRISTIE, M.; CROSSMAN, N.; GHERMANDI, A.; HEIN, L.; HUSSAIN, S.; KUMAR, P.; MCVITTIE, A.; PORTELA, R.; RODRIGUEZ, L.V.; TEN BRINK, P.; VAN BEUKERING, P. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*. Vol.1, pp-50-61. 2012.

DI GREGORIO, A.; JANSEN, L.J.M. *Land cover classification system. Classification concepts and user manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 2005.

FREEMAN, A. M.; HERRIGES, J. A., KLING, C. L. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. 478 pp. 2003.

ESRI. ArcGis (versão 10.2). <<http://www.esri.com>>.2014.

FOLEY, J.A.; ASNER, G.P.; COSTA, M.H. COE, M.T.; DEFRIES, R.; GIBBS, H.K.; HOWARD, E.K.; OLSON, S.; PATZ, J.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, n.1, pp. 25-32. 2007.

GALETTI, M.; PARDINI, R.; DUARTE, BARBANTI, J. M.; DA SILVA, V. M. F.; ROSSI, A.; PERES, C.A. Mudanças no Código Florestal e seu impacto na ecologia e diversidade dos mamíferos no Brasil. *Biota Neotropica*, vol. 10, n.4, pp. 47-52. 2010.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012*. EEA Framework Contract no. EEA/IEA/09/003. 2013.

IBGE, 2015. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo populacional. Available at: <http://www.ibge.gov.br>. Access in 12/Out/2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Dados históricos. Available at: < <http://www.inmet.gov.br>>. Access: 15/March/2016.

LAMPARELLI, M. C. *Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. São Paulo. Thesis (Doctor degree). Instituto de Biociências – USP. 238p. 2004.

MATHEUS, C.E.; TUNDISI, J.G. *Estudo físico químico e ecológico dos rios da bacia hidrográfica do Ribeirão e represa do Lobo*. In *Limnologia e Ecologia de Represas*. (J.G. Tundisi, ed.). ACIESP; FAPESP; CNPq; UNEP; UNCRD, v.1, tomo 1, p.419-472. Série Monografias em Limnologia. 1988.

MATOS, A.S. *Melhoras qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH"*. 137 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. 2012.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, DC. 155 p. 2005.

MMA. Shapefile of Conservation Units of Brazil. Available at <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Access in 02/03/2016. 2016.

NATIONAL AERONAUTIC AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Landsat images. Available at: www.earthexplorer.usgs.gov. Access in 02/March/2015. 2015.

PERIOTTO, N.A.; TUNDISI, J.G. Ecosystem Services of UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa): a new approach for management and planning of dams multiple-uses. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 73, n. 3, pp. 471-482. 2013.

REES, W.E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. In: *Sustainable cities: meeting needs, reducing resource use and recycling, re-use and reclamation*. IIED, 1992, 238 p.1992.

RODRIGUES-FILHO, J.L.; DEGANI, R.M.; SOARES, F.S.; PERIOTTO, N.A.; BLANCO, F.P.; ABE, D.S.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; TUNDISI, J.E.; TUNDISI, J.G. Alterations in land uses based on amendments to the Brazilian Forest Law and their influences on water quality of a watershed. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 75, n.1, pp. 125-134. 2015.

SEIDL, A.F.; MORAES, A.S. Global valuation of ecosystem services: application to the Pantanal da Nhecolândia, Brazil. *Ecological Economics*, vol. 33. Pp. 1-6. 2000.

STERN, N.H. *The Economics of Climate Change: The Stern review*. Cambridge University Press, Cambridge. 692 p. 2007.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos. *Biota Neotropica*, vol. 10, n.4, pp. 67-76. 2010.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Integrating ecohydrology, water management, and watershed economy: case studies from Brazil. *Ecohydrology and Hydrobiology*, vol.16, pp. 83-91. 2016.

WALLACE, K.J. 2007. Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation*, vol.139, n.3-4, pp. 235-246.

CAPÍTULO II

ECO-EXERGIA E SERVIÇOS DO ECOSSISTEMA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Resumo

A eco-exergia é uma abordagem inovadora para a avaliação dos serviços do ecossistema, pois engloba todas as possíveis funções e processos destes ecossistemas em uma única estimativa. No presente estudo, foram feitas estimativas dos valores de eco-exergia das áreas alagadas e de vegetação nativa das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. Os valores obtidos (média de 3.389 GJ.ha.ano⁻¹, áreas alagadas; média de 5.810 GJ.ha.ano⁻¹, áreas de vegetação nativa) são coerentes com os valores de referência de Jørgensen [Jørgensen, S.E. 2010. Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*, vol. 7, p. 311-313]. Sob a visão da eco-exergia, o gerenciamento das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas das duas bacias deve ser feito considerando-se não somente a quantidade de organismos vegetais conservada ou recuperada, mas também a diversidade das espécies vegetais. Deste modo, garante-se os fluxos dos múltiplos serviços ecossistêmicos para a população destas bacias e a automanutenção destes ecossistemas.

Abstract

Eco-exergy is an innovative approach to evaluate ecosystem services, since it encompasses all possible ecosystem functions and processes in a single estimate. In this study, eco-exergy values of wetlands and native vegetation areas of Jacaré-Guaçu and Jacaré-Pepira Watersheds were estimated. The obtained values (average of 3,389 GJ.ha.ano⁻¹, wetlands; average of 5,810 GJ.ha.ano⁻¹, native vegetation) are consistent with reference values showed by Jørgensen [Jørgensen, S.E. 2010. Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*, vol. 7, p. 311-313]. From a perspective of the eco-exergy concept, management practices of native vegetation and wetlands in both watersheds should consider not only quantity of vegetation conserved or restored, but also biodiversity of vegetation species. Consequently, multiple ecosystems services would be guaranteed for human well-being and for self-regulation of these ecosystems.

1. Introdução

A eco-exergia compreende uma abordagem inovadora que possibilita avaliar a integridade dos ecossistemas e, portanto, a condição biofísica dos mesmos em proporcionarem os serviços ecossistêmicos. Eco-exergia é “a quantidade de trabalho (referente à energia livre de entropia) que um organismo ou ecossistema podem realizar quando considerados em equilíbrio termodinâmico com o seu ambiente (Jørgensen & Svirezhev, 2004)”, ou ainda, é a energia livre para o desenvolvimento de processos em um ecossistema (Jørgensen, 2015). Considera-se a energia livre de entropia, pois em um sistema em equilíbrio termodinâmico, entropia refere-se à parcela de energia que não pode mais ser transformada em trabalho.

Assim, a eco-exergia considera como ambiente de referência o mesmo ecossistema, com mesmas temperatura e pressão, em equilíbrio termodinâmico e químico, e trabalhos magnético e elétrico insignificantes, ou seja, “uma sopa inorgânica sem vida, estrutura biológica, informação (genes), gradientes ou moléculas orgânicas” (Jørgensen, 2007, 2010).

Considera-se que somente a energia de trabalho química contribui para a capacidade de trabalho deste ecossistema. A eco-exergia de um ecossistema expressa a distância do equilíbrio químico e pode ser um bom indicador da medida do desenvolvimento de um ecossistema (Jørgensen & Nielsen, 2007).

Segundo Jørgensen (2007; 2015), o cálculo da eco-exergia de um ecossistema (Ex) (KJ/m^2) é realizado por meio da seguinte fórmula:

$$Ex = \sum_{i=1}^n \beta_i \times C_i \times f \quad \text{(Equação 1)}$$

onde β_i é o fator de ponderação/informação do “i”ésimo componente do ecossistema; C_i é a concentração (g/m^2) do “i”ésimo componente do ecossistema; e f corresponde à energia de trabalho por unidade de biomassa ($18,7 KJ/g =$ conteúdo médio de energia livre de trabalho (eco-exergia) contida em 1 grama de detrito).

O fator de ponderação β é calculado com base no número de unidades transcricionais do DNA, ou seja, segmentos que são transcritos em RNA e têm função oposta ao DNA não-codificante. Este fator reflete a complexidade dos organismos, ou seja, quanto maior o valor de β , mais complexo é o organismo (Jørgensen *et al.*, 2005; Jørgensen, 2007) (**Tabela 1**).

Em outras palavras, a eco-exergia é a medida do potencial de transformação da energia (da informação) contida nos genes das espécies de um ecossistema na construção de biomassa e estruturas que participam dos processos e funções dos ecossistemas, e resultam em serviços (Jørgensen, 1992, 2010; Jørgensen *et al.*, 2005). Como o fluxo de serviços depende das condições biofísicas de um ecossistema, a medida de eco-exergia deste ecossistema pode ser um indicador da sua integridade ecológica, e suas variações podem indicar aumento ou decréscimo dos serviços ofertados ao bem-estar humano (Burkhard *et al.*, 2012; Tundisi *et al.*, 2012).

Não é possível calcular a eco-exergia total de um ecossistema, pois seria necessário medir as concentrações de todos os componentes que contribuem com a eco-exergia deste ecossistema, mas é tangível o cálculo da eco-exergia de componentes dominantes que estão relacionados a uma problemática central (Jørgensen & Nielsen, 2007), como no caso da avaliação de serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas.

Tabela 1. Valores do fator de ponderação/informação (β).

	Organismos primitivos Plantas	Animais	
Detrito	1,00		
Viróides	1,0004		
Vírus		1,01	
Célula mínima		5,0	
Bactérias	8,5		
Archaea	13,8		
Protistas (algas)	20		
Leveduras		17,8	
		33	Mesozoa, Placozoa
		39	Protozoa, Amoebe
		43	Phasmida (bicho pau)
Fungos	61		
		76	Nemertina
		91	Cnidaria (corais, anêmonas, medusas)
Rhodophyta	92		
Porifera (esponjas)	98	97	Gastrotricha
		108	Brachiopoda
		120	Platyhelminthes (vermes chatos)
		133	Nematoda (lombrigas)
		133	Annelida (sanguessugas)
		143	Gnathostomulida
Semente de mostarda	143		
		165	Kinorhynca
Plantas vasculares sem sementes	158		
		163	Rotifera
		164	Entoprocta
Musgo	174		
		167	Insecta (besouros, moscas, abelhas, vespas, formigas)
		191	Coleoidea
		221	Lepidoptera (borboletas)
		232	Crustacea
		246	Chordata
Arroz	275		
		310	Mollusca (Bivalvia, Gastropoda)
Gymnospermas (incluindo Pinus)	314		
		322	Mosquitos
Angiospermas	393		
		499	Peixes
		688	Amphibia
		833	Reptilia
		980	Aves
		2127	Mamíferos
		2138	Macacos
		2145	Macacos antropóides
		2173	<i>Homo sapiens</i>

Fonte: Jorgensen (2007, 2010).

Este trabalho tem como objetivo a utilização da eco-exergia para avaliar os serviços ecossistêmicos das bacias hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (estado de São Paulo, Brasil), como subsídio para a construção de um *background* sobre o uso desta metodologia em bacias hidrográficas de regiões Neotropicais.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

As bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira localizam-se na porção central do estado de São Paulo (Brasil). Em conjunto com outras 4 bacias, compõem a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13, denominada bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré (**Figura 1**).

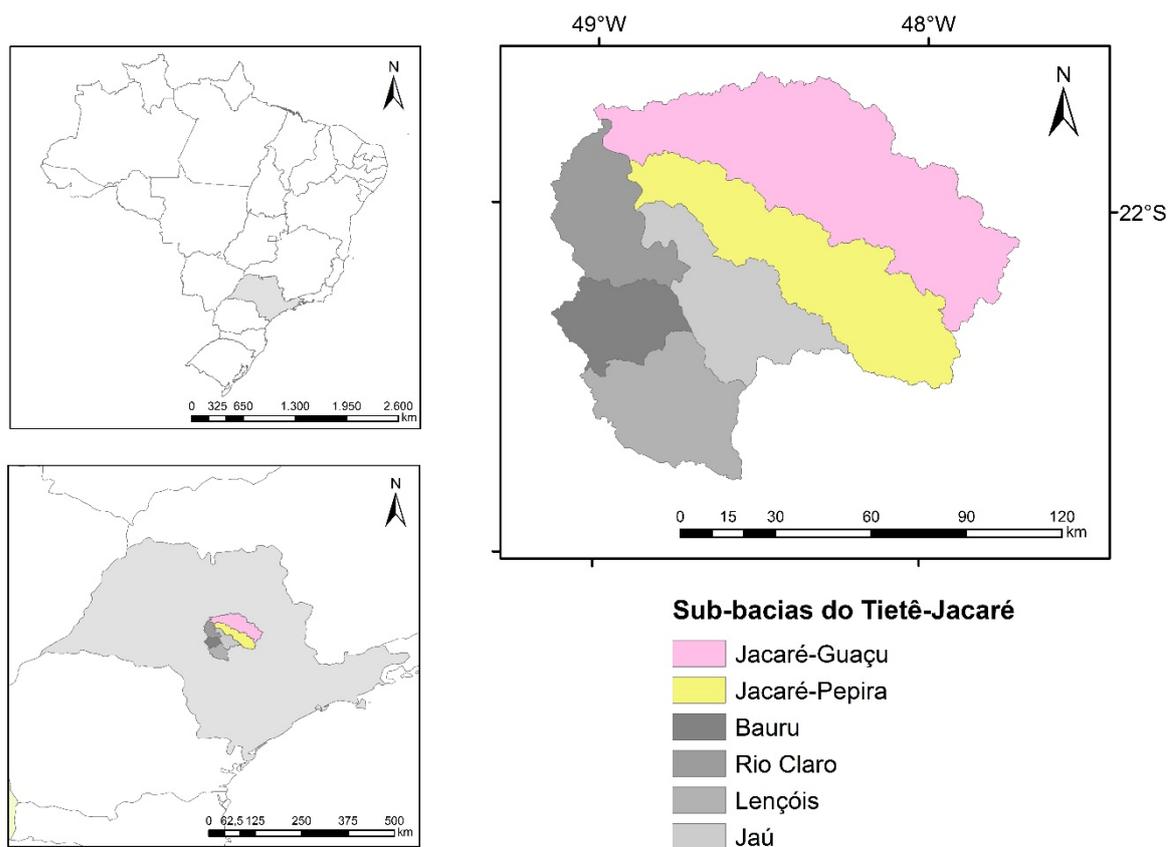


Figura 1. Localização das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira (estado de São Paulo, Brasil).

Estas duas bacias possuem importantes e extensas áreas alagadas, que em conjunto com os remanescentes de vegetação nativa, formam um importante sistema de provisão de qualidade e quantidade de recursos hídricos para as populações dos municípios destas bacias, influenciando também a oferta destes recursos em bacias adjacentes.

A cobertura da terra é composta por escassa vegetação ripária e mosaicos de Cerrado (Savana brasileira) e Floresta Estacional Semidecidual. As atividades econômicas agrícolas predominantes são culturas temporárias de cana-de-açúcar, culturas permanentes de laranja e silvicultura.

2.2. Eco-exergia

2.2.1. Cálculo da biomassa aérea vegetal das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

A estimativa da biomassa das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas das bacias do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira foi realizada por meio da geração de um modelo de regressão linear entre valores de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e valores de biomassa de Cerrado da região Centro-Oeste do Brasil informados por Santos (1988) (**Tabela 2**), que foi posteriormente aplicado ao NDVI das áreas deste estudo. Os valores de biomassa de Cerrado foram extrapolados para todas as áreas de vegetação nativa e áreas alagadas das bacias.

Foram coletados novos valores de reflectância dos 19 pontos amostrais utilizados em Santos (1988), por meio do software ArcGis (Esri, 2014), pois os produtos de reflectância de superfície disponibilizados atualmente pela USGS possuem melhor correção atmosférica. Para isto, foram utilizados os produtos de reflectância de superfície das imagens dos satélites Landsat 5 (*Climate Data Record Surface Reflectance*; USGS, 2016a) e 8 (*Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Code*; USGS, 2016b) gerados pelo *United States Geological Service* (USGS) (**Tabela 3**) referentes à área de estudo de Santos (1988) (órbita/ponto 221/071). O NDVI foi calculado de acordo com as equações descritas em Rouse *et al.* (1973) que relacionam as bandas espectrais do infravermelho e vermelho (**Equação 2**):

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad \text{(Equação 2)}$$

onde: ρ_{IVP} é o fator de reflectância bidirecional no infravermelho próximo e ρ_V é o fator de reflectância bidirecional no vermelho.

A partir dos novos valores de NDVI dos pontos amostrais de Santos (1988) e da biomassa destes pontos, foi gerado um modelo de regressão linear que foi aplicado nas imagens de NDVI das 3 cenas referentes às áreas das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, obtendo-se assim, um *shapefile* dos valores de biomassa destas áreas.

Foram extraídos *shapefiles* referentes às delimitações das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas das duas bacias, dos anos de 2004 e 2014. Utilizando estes *shapefiles* como máscaras, extraiu-se a biomassa das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas.

Tabela 2. Biomassa (g/m²) de Cerrado apresentada por Santos (1988), coletada nos meses de junho e agosto de 1988.

Pontos amostrais	Biomassa Junho/1986	Biomassa Agosto/1986
1	517,106	352,186
2	490,634	323,832
3	541,404	407,019
4	547,036	335,121
5	589,777	412,675
6	584,597	400,585
7	530,422	368,166
8	537,584	374,783
9	781,229	447,585
10	769,883	470,451
11	706,048	573,498
12	635,142	456,325
13	622,116	492,228
14	666,565	573,567
15	711,759	564,446
16	876,672	425,228
17	797,118	489,803
18	723,207	493,476
19	520,750	483,097

Tabela 3. Data de aquisição dos produtos de reflectância de superfície referentes às bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

Órbita/ponto	Landsat 5	Landsat 8
220/75	14/08/2004	11/09/2014
220/76	14/08/2004	11/09/2014
221/75	05/08/2004	01/08/2014

2.2.2. Cálculo de eco-exergia das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

A eco-exergia das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas, das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, foi calculada a partir da **Equação 1**. Os fatores de informação (β) utilizados foram 250 para áreas alagadas (Jørgensen, 2010) e 393 (angiospermas) para vegetação nativa (**Tabela 1**).

2.2.3. Estimativa do valor econômico dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

Os valores econômicos dos serviços do ecossistema das áreas alagadas e de vegetação nativa foram estimados por método de custo energético proposto por Jørgensen (2010), onde 1 giga joule (GJ) equivale a 10 Euros ou a 14 Dólares.

3. Resultados e Discussão

3.1. Biomassa aérea vegetal das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

As **Tabelas 4 e 5** mostram os novos valores de reflectância coletados e de NDVI calculados (de acordo com a **Equação 2**) para os 19 pontos amostrais de Santos (1988), em dois meses diferentes.

A partir destes novos valores de NDVI e dos valores de biomassa de Santos (1988) (**Tabela 2**) foi gerada uma primeira regressão linear que resultou em uma equação (**Equação 3**) que explica a relação entre estas duas variáveis (**Figura 2**). Para esta equação gerada, o nível de significância e o coeficiente de determinação obtidos foram extremamente baixos ($p=0,3499$; $r^2= 0,0243$):

$$y = 242,6462 * x + 425,3746 \quad \text{(Equação 3)}$$

onde: y= valores de biomassa e x= valores de NDVI

Portanto, fez-se uma prospecção da condição das imagens nas intersecções entre os pontos amostrais de Santos (1988) e os produtos de reflectância. Foram encontradas nuvens no produto de reflectância de 17 de junho de 1986, nos pontos 9 a 13. Por este motivo, as informações referentes à reflectância e biomassa destes pontos foram retiradas e foi gerada uma segunda regressão linear que resultou na **Equação 4**, com alto nível de significância ($p=0,0014$) e maior coeficiente de determinação ($r^2= 0,2843$) (**Figura 3**):

$$y = 1054,6 * x - 2,1996 \quad \text{(Equação 4)}$$

onde: y= valores de biomassa e x= valores de NDVI

Tabela 4. Novos valores de reflectância coletados para os pontos amostrais de Santos (1988), referentes à data de 17 de junho de 1986. TM3 são os valores de reflectância referentes à banda do vermelho e TM4 são os valores de reflectância referentes à banda do infravermelho.

Ponto amostral	TM3	TM4	NDVI
1	551	1827	0,53658537
2	805	2089	0,44367657
3	635	1931	0,50506625
4	592	2509	0,61818768
5	551	1827	0,53658537
6	635	1774	0,47281029
7	593	1774	0,49894381
8	551	1722	0,51517818
9	679	2195	0,52748782
10	297	775	0,44589552
11	6590	8064	0,10058687
12	511	1407	0,46715328
13	976	2561	0,44811988
14	467	1879	0,60187553
15	425	1827	0,62255773
16	552	1722	0,51451187
17	552	1775	0,52556940
18	466	1774	0,58392857
19	510	1722	0,54301075

Tabela 5. Novos valores de reflectância coletados para os pontos amostrais de Santos (1988), referentes à data de 04 de agosto de 1986. TM3 são os valores de reflectância referentes à banda do vermelho e TM4 são os valores de reflectância referentes à banda do infravermelho.

Ponto amostral	TM3	TM4	NDVI
1	627	1552	0,42450665
2	744	1797	0,41440378
3	665	1699	0,43739425
4	586	2188	0,57750541
5	626	1552	0,42516070
6	665	1552	0,40009021
7	626	1601	0,43780871
8	586	1552	0,45182413
9	588	1601	0,46276839
10	627	1552	0,42450665
11	706	1503	0,36079674
12	588	1552	0,45046729
13	588	1650	0,47453083
14	549	1700	0,51178301
15	470	1700	0,56682028
16	588	1601	0,46276839
17	549	1552	0,47739172
18	508	1552	0,50679612
19	549	1552	0,47739172

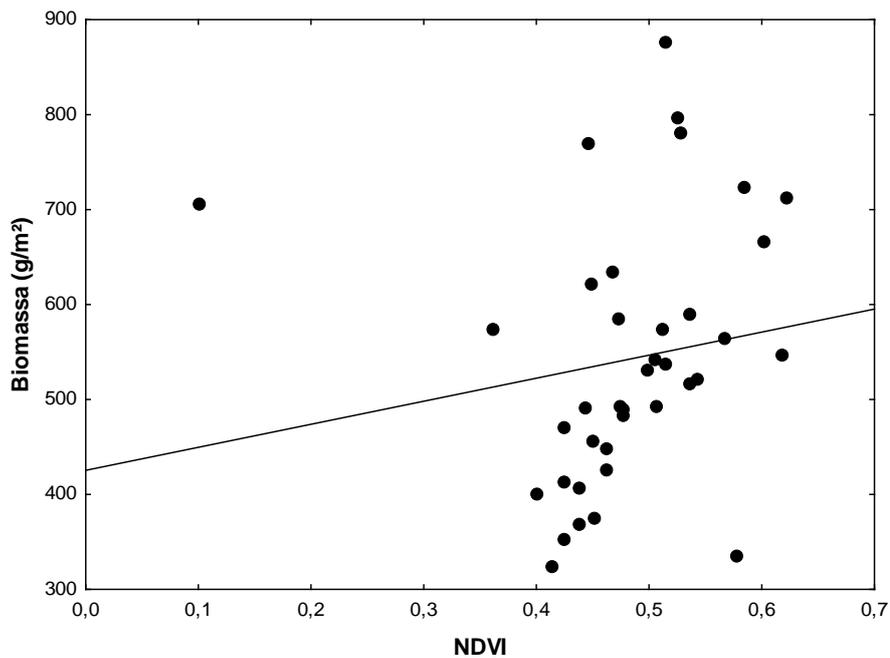


Figura 2. Gráfico da relação entre biomassa e NDVI, considerando todos os pontos de Santos (1988) ($y = 242,6462 \cdot x + 425,3746$; $p=0,3499$; $r^2= 0,0243$).

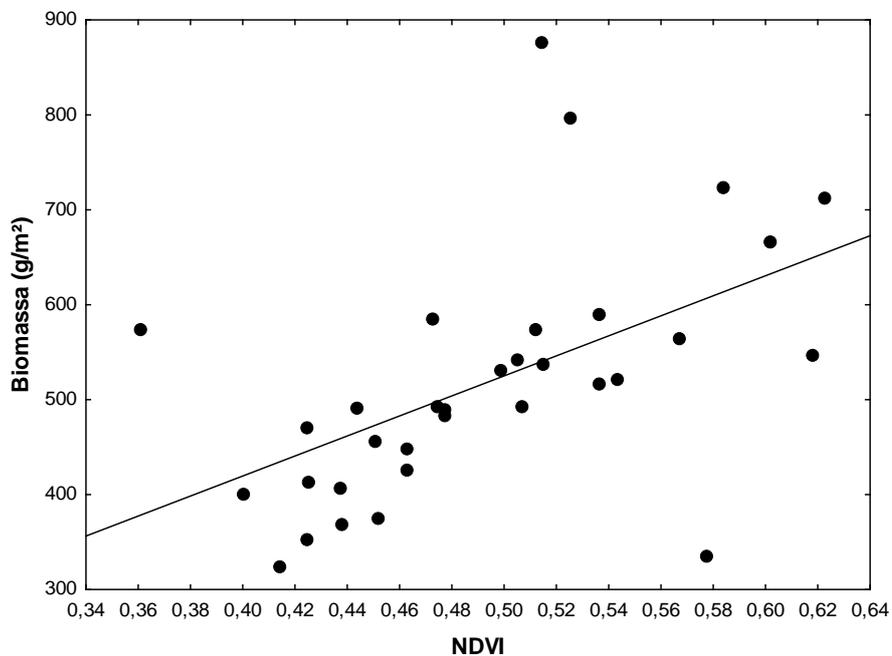


Figura 3. Gráfico da relação entre biomassa e NDVI, retirando os pontos 9 a 13 referentes ao produto de reflectância de 17 de agosto de 1986, de Santos (1988) ($y=1054,6 \cdot x - 2,1996$; $p=0,0014$; $r^2= 0,2843$).

A partir das imagens dos produtos de reflectância da **Tabela 3**, das áreas das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, foram geradas imagens de NDVI para estas áreas (nos anos de 2004 e 2014). A **Equação 4** foi aplicada, utilizando-se as imagens de NDVI, por meio da *raster calculator* (*software* ArcGis; Esri, 2014), e foram obtidas imagens com dados de biomassa em quilogramas por hectare. Estas imagens foram recortadas nos limites das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas das duas bacias, nos anos de 2004 e 2014, e foi feita a estatística dos valores de biomassa de cada área para a obtenção da biomassa média, utilizada posteriormente no cálculo de eco-exergia. A biomassa total destas áreas recortadas e a diferença dos valores de 2004 e 2014 estão apresentadas nas **Tabelas 6 e 7**. Observa-se aumentos de biomassa das áreas alagadas e vegetação nativa nas duas bacias.

Tabela 6. Biomassa total das áreas alagadas e vegetação nativa da bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu, em 2004 e 2014, e diferença entre os dois anos.

	Biomassa 2004 (kg.ha⁻¹)	Biomassa 2014 (kg.ha⁻¹)	Diferença (kg.ha⁻¹)
Área alagada	40.540.082,00	62.058.159,00	21.518.077,00
Vegetação nativa	496.265.554,00	540.484.382,00	44.218.828,00

Tabela 7. Biomassa total das áreas alagadas e vegetação natural da bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira, em 2004 e 2014, e diferença entre os dois anos.

	Biomassa 2004 (kg.ha⁻¹)	Biomassa 2014 (kg.ha⁻¹)	Diferença (kg.ha⁻¹)
Área alagada	20.133.020,00	23.543.589,00	3.410.569,00
Vegetação nativa	368.140.250,00	426.202.258,00	58.062.008,00

3.2. Eco-exergia das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

Para o cálculo de eco-exergia, foram considerados os valores médios de biomassa das áreas de estudo. As **Tabelas 8 e 9** mostram os valores calculados de eco-exergia, para as duas bacias, nos anos de 2004 e 2014. Em geral, como

consequência do aumento de biomassa, houve aumentos nos valores de eco-exergia nas duas bacias.

Observa-se uma redução do valor médio de eco-exergia da vegetação nativa, da bacia do Jacaré-Guaçu, apesar do aumento na biomassa total. Isto significa que em 2014, foram identificados alguns valores maiores de biomassa do que em 2004, em determinadas regiões da bacia, porém, a maior parte dos valores de biomassa diminuiu em relação à 2004.

Tabela 8. Biomassa média e eco-exergia das áreas alagadas (AA) e vegetação nativa (VN), da bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu, referente aos anos de 2004 e 2014.

	AA 2004	AA 2014	VN 2004	VN 2014
Biomassa média (Kg. ha⁻¹)	559,01	634,02	649,83	629,44
Biomassa média (g.m⁻²)	55,90	63,40	64,98	62,94
β	250	250	393	393
Exergia (KJ/m²)	261.337,93	296.404,35	473.612,75	462.581,75
Exergia (GJ/m²)	0,26	0,30	0,47	0,46
Exergia (GJ/ha)	261,34	296,40	473,61	462,58
Exergia (GJ/ha.ano⁻¹)	3.136,06	3.556,85	5.683,35	5.550,98
Valor (Dólares/ha)	3.658,73	4.149,66	6.630,58	6.476,14
Valor (Dólares/ ha.ano⁻¹)	43.904,77	49.795,93	79.566,94	77.713,73
Valor (Euros/ha)	2.613,38	2.964,04	4.736,13	4.625,82
Valor (Euros/ ha.ano⁻¹)	31.360,55	35.568,52	56.833,53	55.509,81

Tabela 9. Biomassa média e eco-exergia das áreas alagadas (AA) e vegetação nativa (VN), da bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira, referente aos anos de 2004 e 2014.

	AA 2004	AA 2014	VN 2004	VN 2014
Biomassa média (Kg. ha⁻¹)	590,93	632,36	671,96	689,21
Biomassa média (g.m⁻²)	59,09	63,24	67,20	68,92
β	250	250	393	393
Exergia (KJ/m²)	276.259,78	295.628,30	493.830,12	506.507,32
Exergia (GJ/m²)	0,28	0,30	0,49	0,51
Exergia (GJ/ha)	276,26	295,63	493,83	506,51
Exergia (GJ/ha.ano⁻¹)	3.315,12	3.547,54	5.925,96	6.078,09
Valor (Dólares/ha)	3.867,64	4.138,80	6.913,62	7.091,10
Valor (Dólares/ ha.ano⁻¹)	46.411,64	49.665,55	82.963,46	85.093,23
Valor (Euros/ha)	2.762,60	2.956,28	4.938,30	5.065,07
Valor (Euros/ ha.ano⁻¹)	33.151,17	35.475,40	59.259,61	60.780,88

A **Tabela 10** compara os valores de eco-exergia estimados neste estudo com os valores apresentados por Jørgensen (2010). Os valores médios de eco-exergia das áreas alagadas das bacias do Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira consideraram a média anual de biomassa aérea vegetal dos anos de 2004 e 2014, enquanto que o valor global estimado por Jørgensen (2010) se baseia na biomassa média anual de vários organismos que podem ser encontrados em áreas alagadas. Isto indica que os resultados apresentados neste estudo podem ter seus valores aumentados em futuros estudos que considerem biomassa e biodiversidade das várias espécies de fauna e flora existentes nestas bacias.

Os valores para vegetação nativa, representada por Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual, ainda não possuem valores de referência em literatura, mas também são coerentes com a média de valores apresentador por Jørgensen (2010) na **Tabela 10**. Assim como as áreas alagadas, o valor de eco-exergia das áreas nativas deve aumentar em futuros estudos que incluam as espécies de fauna destas áreas.

Tabela 10. Comparação dos valores médios de eco-exergia deste estudo, referentes à biomassa aérea vegetal, com os valores de média global de Jørgensen (2010) que consideram todas as possíveis espécies e respectivas biomassas existentes em uma área alagada. JG: bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu. JP: bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira.

	Eco-exergia média (GJ/ha. ano ⁻¹)		Eco-exergia (GJ/ha. ano ⁻¹ ; Jørgensen, 2010)
	Jacaré-Guaçu	Jacaré-Pepira	
Tundra	-	-	7.280
Áreas alagadas	3.346,45	3.431,33	45.000
Vegetação nativa	5.617,12	6.002,02	-
Cultivos agrícolas			420.000
Pastagem			18.000
Floresta decídua	-	-	1.000.000
Floresta temperada	-	-	1.500.000
Floresta tropical	-	-	3.000.000

O aumento nos valores de eco-exergia em 2014, em relação à 2004, reflete o aumento da capacidade de trabalho dos componentes informacionais (genes) dos ecossistemas das áreas alagadas e vegetação nativa, utilizada no crescimento e desenvolvimento na forma de biomassa, rede de interações e geração de mais informação (Jørgensen, 2015). Acredita-se que quando há um aumento nos valores de eco-exergia, há também um aumento na diversidade de serviços do ecossistema providos (Tundisi *et al.*, 2012). A redução no valor de eco-exergia da vegetação nativa da bacia do Jacaré-Guaçu, no ano de 2014, reflete a perda de biomassa e diversidade de vegetação em grande parte destas áreas. Como consequência, há perdas no fluxo de serviços ecossistêmicos.

Em ecossistemas aquáticos da República da Coreia, Li *et al.* (2013) combinaram métricas frequentemente avaliadas na utilização de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores (diversidade de espécies) com a avaliação da eco-exergia destes organismos. Os resultados mostraram que os locais de amostragem com os maiores valores de eco-exergia foram também os locais com os maiores valores dos índices de diversidade. Registraram também um decréscimo simultâneo dos valores de eco-exergia e de riqueza de espécies nas transições de uso e cobertura da terra entre floresta, agricultura e área urbana.

Nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, observa-se nas **Figuras 4 a 9** que as regiões de maiores perdas de biomassa da vegetação nativa e áreas alagadas coincidem em sua maioria com as regiões de mudança no uso e cobertura da terra, principalmente em áreas agrícolas e urbanas, indicando que há uma possível relação entre estas perdas (considerando que a perda de biomassa inclui perda de diversidade) e as mudanças no uso e cobertura da terra, e como resultado, alterações na provisão de serviços do ecossistema nestas áreas. As **Tabelas 11 a 14** detalham estas mudanças de biomassa em quilogramas por hectare.

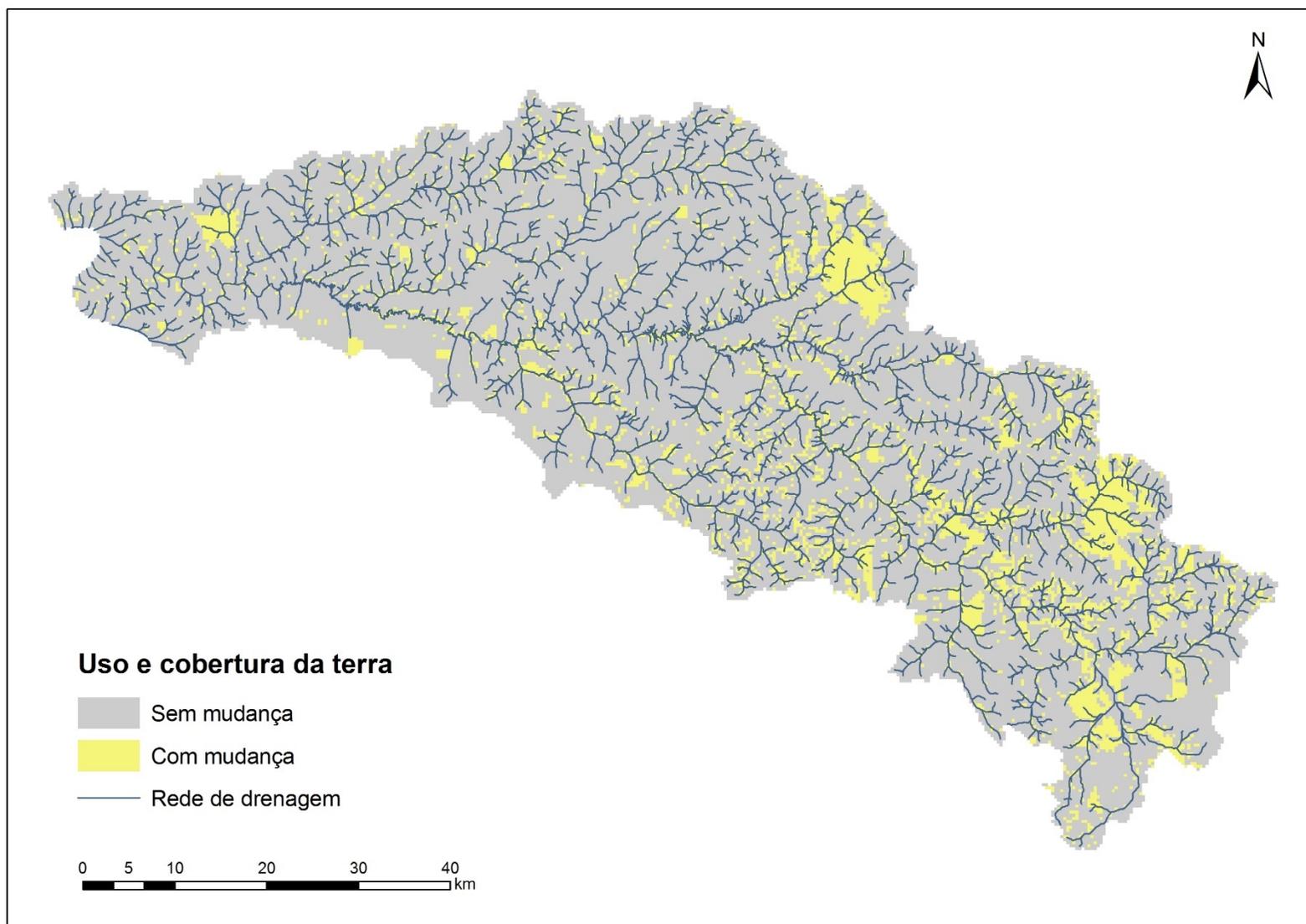


Figura 4. Áreas com mudanças no uso e cobertura da terra entre 2004 e 2014, na sub-bacia hidrográfica do Rio Jacaré-Guaçu.

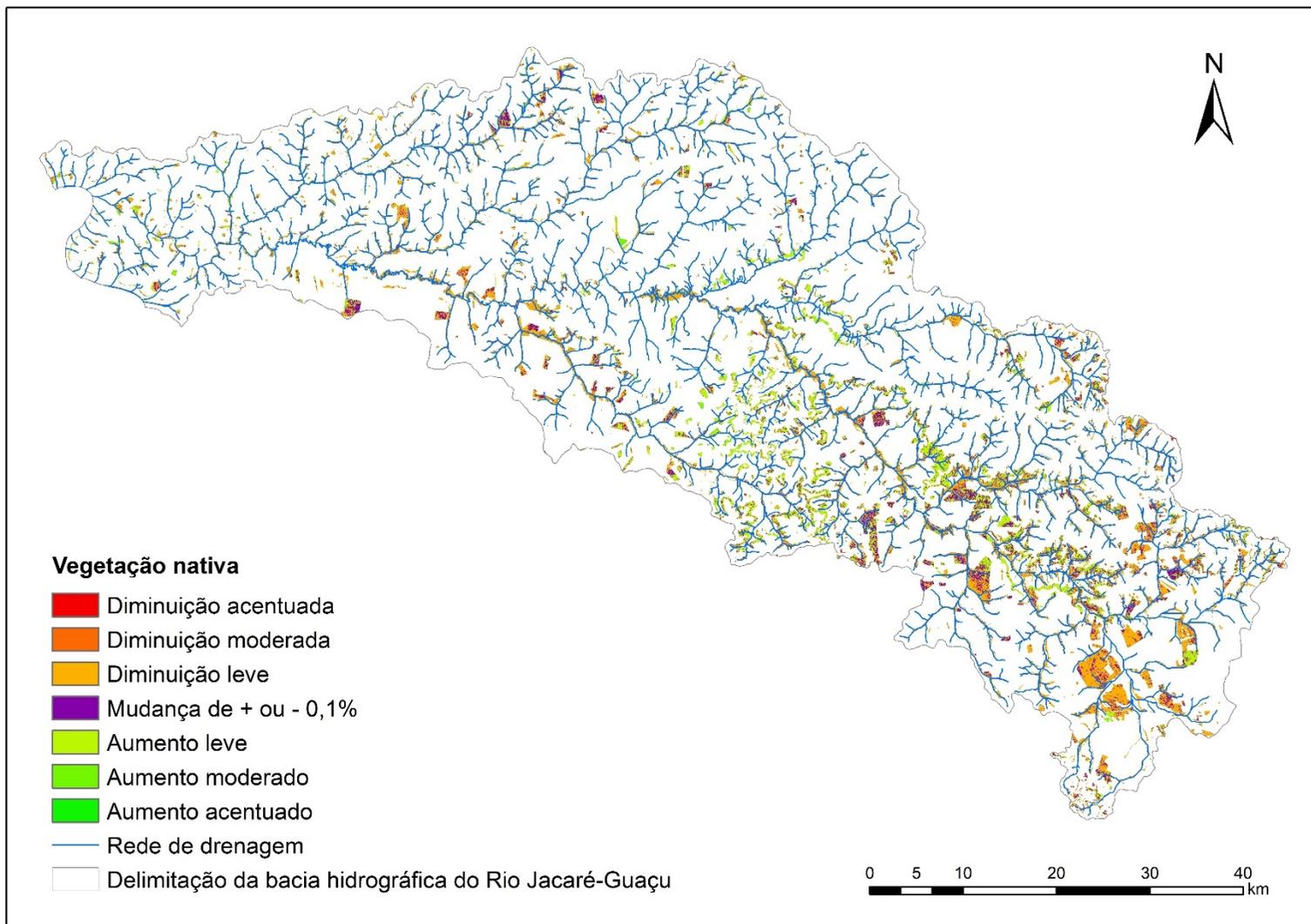


Figura 5. Mudanças na biomassa da vegetação nativa da bacia hidrográfica do Rio Jacaré-Guaçu, entre os anos de 2004 e 2014.

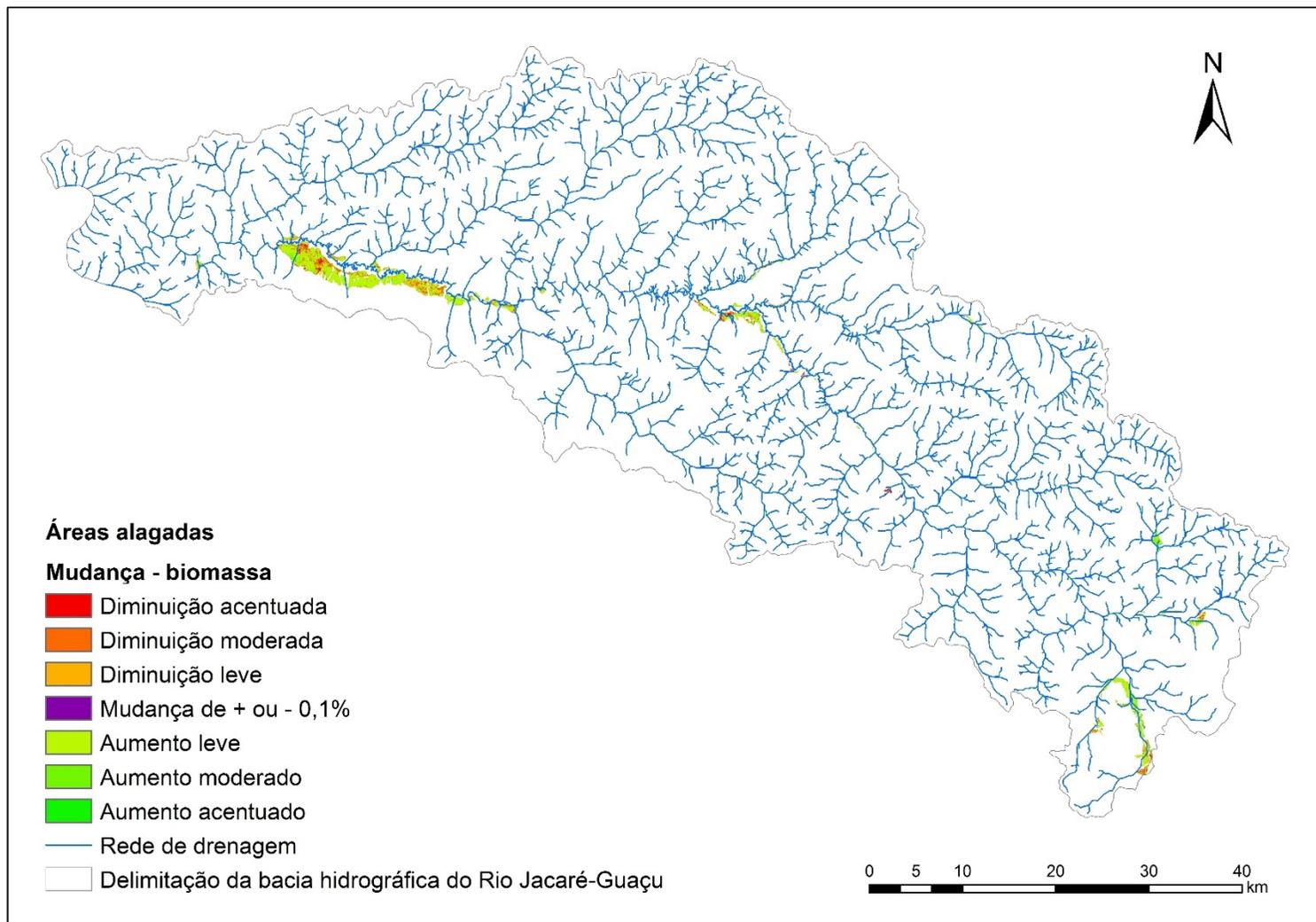


Figura 6. Mudanças na biomassa das áreas alagadas da bacia hidrográfica do Rio Jacaré-Guaçu, entre os anos de 2004 e 2014

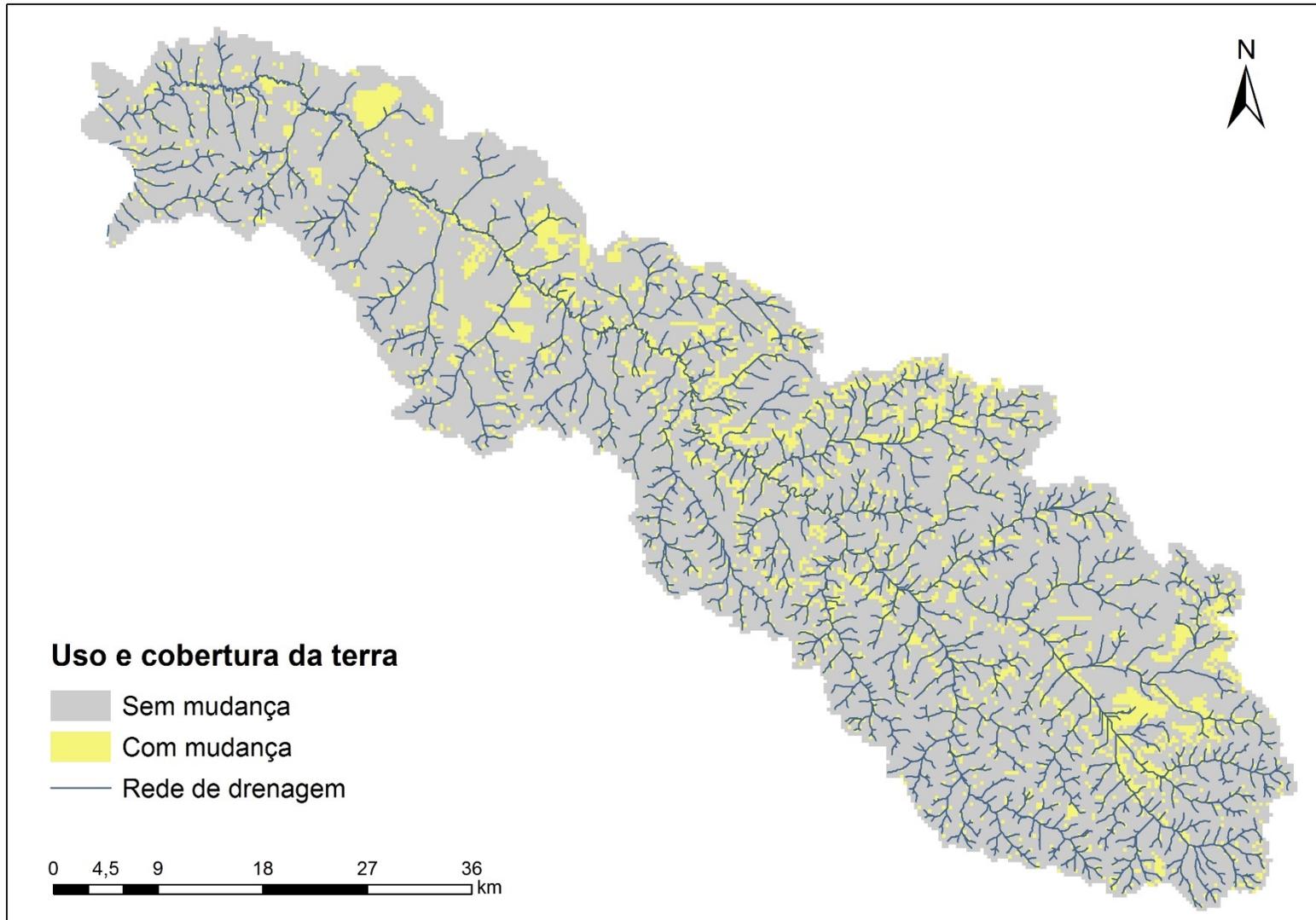


Figura 7. Áreas com mudanças no uso e cobertura da terra entre 2004 e 2014, na sub-bacia hidrográfica do Rio Jacaré-Pepira.

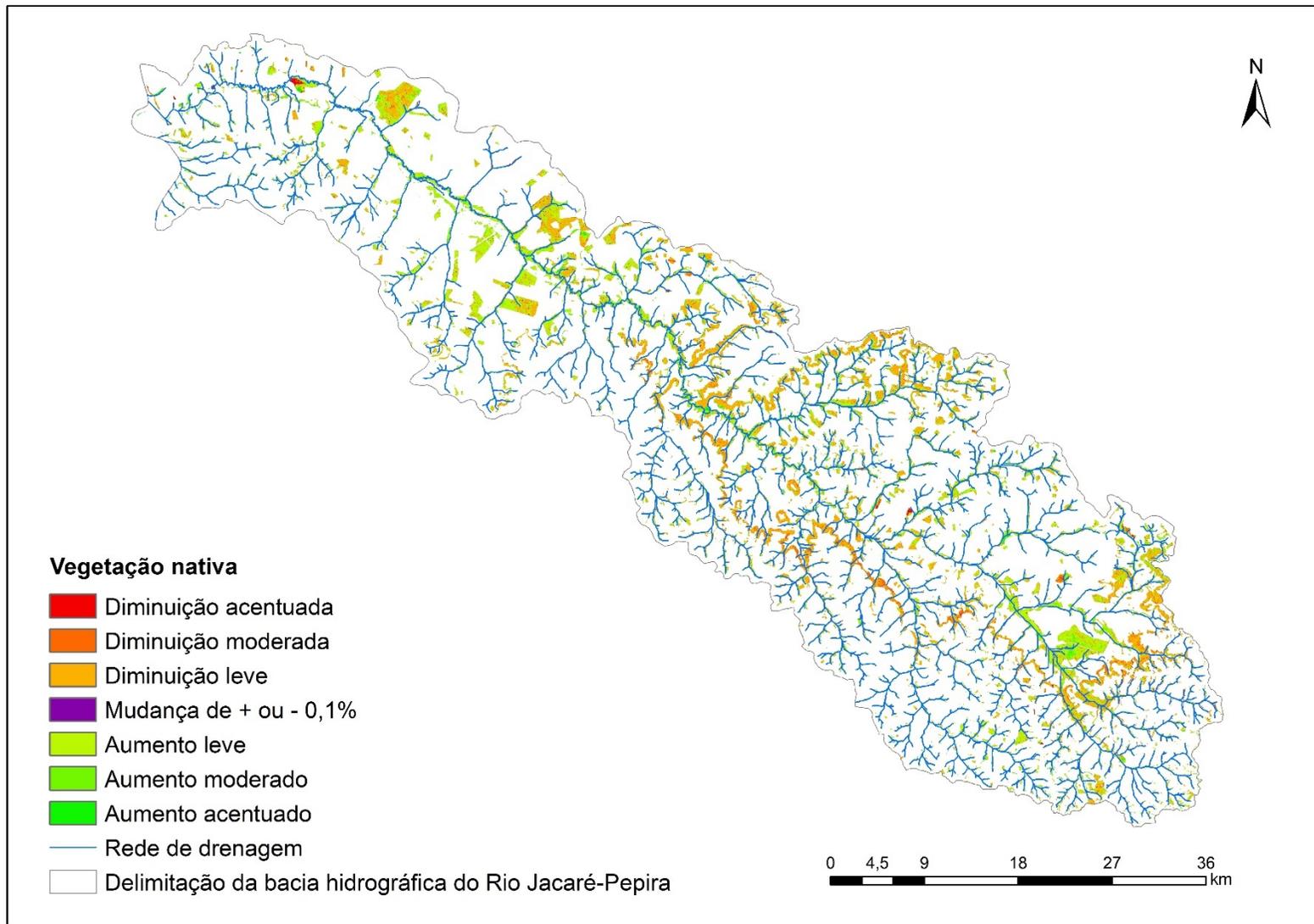


Figura 8. Mudanças na biomassa da vegetação nativa da bacia hidrográfica do Rio Jacaré-Pepira, entre os anos de 2004 e 2014.

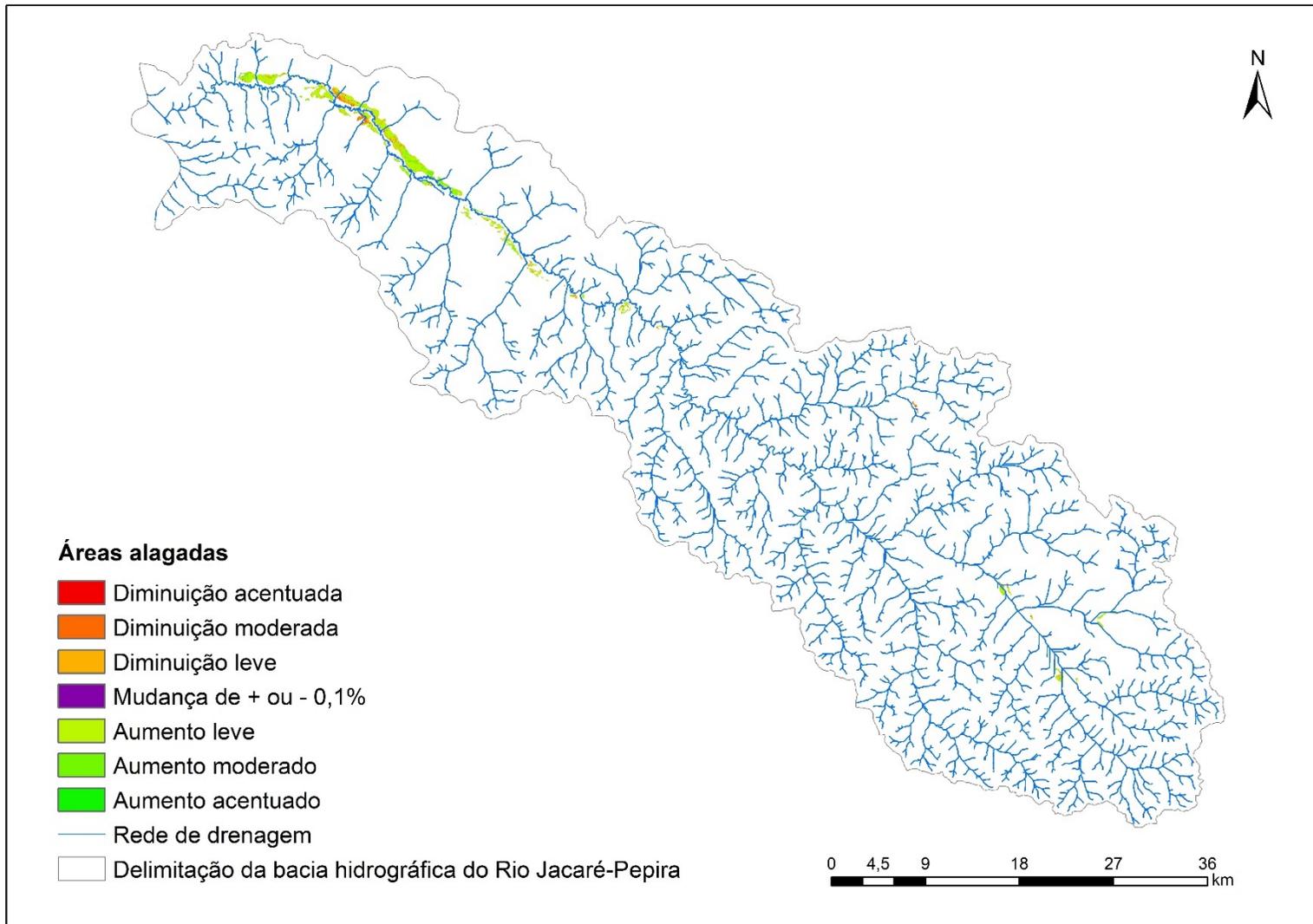


Figura 9. Mudanças na biomassa das áreas alagadas da bacia hidrográfica do Rio Jacaré-Pepira, entre os anos de 2004 e 2014

Tabela 11. Intervalos de diminuição e aumento de biomassa (kg.ha⁻¹) de vegetação nativa, entre os anos de 2004 e 2014, na bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu (referente à Figura 5).

Diminuição acentuada	Diminuição de 1.219,47 a 691,61
Diminuição moderada	Diminuição de 691,61 a 427,68
Diminuição leve	Diminuição de 427,68 a 1,21
Mudança de ± 0,1%	Diminuição até 1,21 ou aumento até 66,08
Aumento leve	Aumento entre 66,08 e 364,10
Aumento moderado	Aumento entre 364,10 e 1.947,68
Aumento acentuado	Aumento entre 1.947,68 e 66.082,72

Tabela 12. Intervalos de diminuição e aumento de biomassa (kg.ha⁻¹) das áreas alagadas, entre os anos de 2004 e 2014, na bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu (referente à Figura 6).

Diminuição acentuada	Diminuição de 544,65 a 114,49
Diminuição moderada	Diminuição de 114,49 a 16,98
Diminuição leve	Diminuição de 16,98 a 0,54
Mudança de ± 0,1%	Diminuição até 0,54 ou aumento até 0,91
Aumento leve	Aumento de 0,91 a 183,75
Aumento moderado	Aumento de 183,75 a 332,87
Aumento acentuado	Aumento de 332,87 a 917,88

Tabela 13. Intervalos de diminuição e aumento de biomassa (kg.ha⁻¹) de vegetação nativa, entre os anos de 2004 e 2014, na bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira (referente à Figura 8).

Diminuição acentuada	Diminuição de 1.640,26 a 384,95
Diminuição moderada	Diminuição de 384,95 a 185,50
Diminuição leve	Diminuição de 185,50 a 1,64
Mudança de ± 0,1%	Diminuição até 1,64 ou aumento até 1,35
Aumento leve	Aumento de 1,35 a 131,25
Aumento moderado	Aumento de 131,25 a 283,77
Aumento acentuado	Aumento de 283,77 a 1.351,37

Tabela 14. Intervalos de diminuição e aumento de biomassa ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) das áreas alagadas, entre os anos de 2004 e 2014, na bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira (referente à **Figura 9**).

Diminuição acentuada	Diminuição de 1.313,89 a 410,21
Diminuição moderada	Diminuição de 410,21 a 71,32
Diminuição leve	Diminuição de 71,32 a 1,31
Mudança de $\pm 0,1\%$	Diminuição até 1,31 ou aumento até 0,74
Aumento leve	Aumento de 0,74 a 138,45
Aumento moderado	Aumento de 138,45 a 332,10
Aumento acentuado	Aumento de 332,10 a 743,60

Os resultados de Li *et al.* (2013) corroboram a hipótese de Tundisi *et al.* (2012), de que quanto maior o valor de eco-exergia, maior a diversidade de serviços ecossistêmicos ofertados. Um valor alto de eco-exergia de um ecossistema pode ser reflexo de uma variedade de valores de informação (β) e de biomassa pertencentes à diversidade de organismos existente neste ecossistema. Esta diversidade, em conjunto com a energia de capacidade de trabalho destes organismos, produz múltiplos serviços que são resultado do crescimento e desenvolvimento destes ecossistemas, na forma de biomassa, inter-relações entre as espécies e diversidade genética (energia da informação) (Jørgensen, 2015). A **Figura 10** mostra como a eco-exergia se insere na avaliação da diversidade da oferta de serviços do ecossistema de uma bacia hidrográfica.

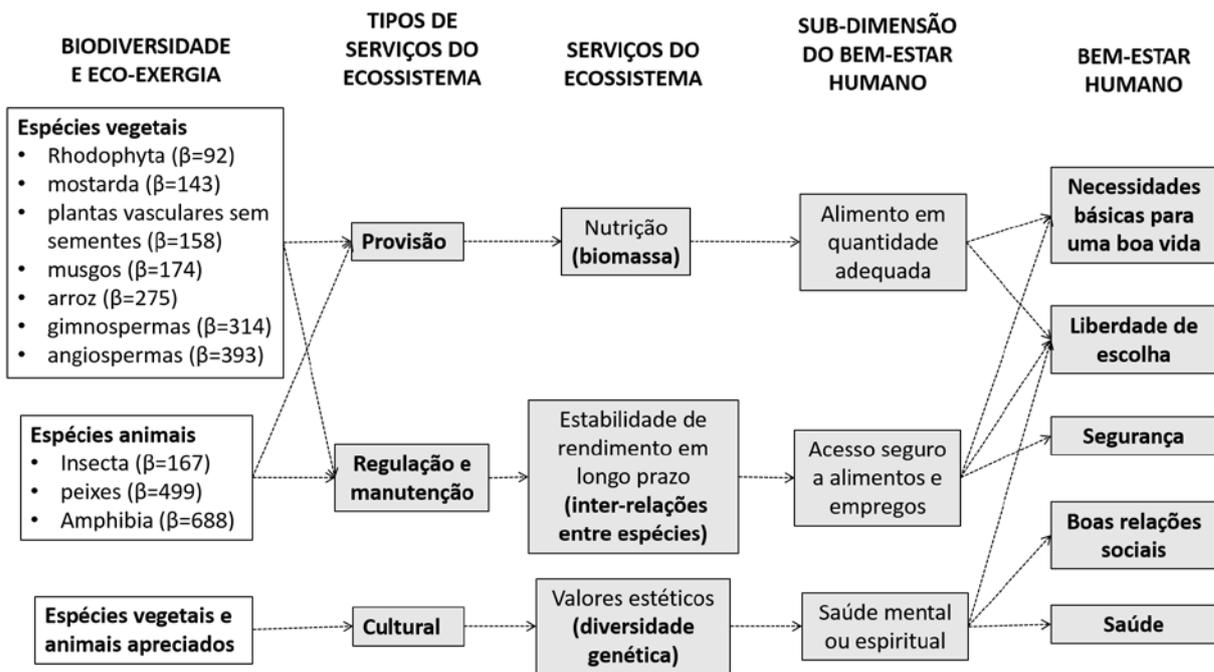


Figura 10. Relações entre valores de exergia, biodiversidade e oferta de serviços dos ecossistemas em uma bacia hidrográfica (modificada de Balvanera *et. al.*, 2015).

Neste contexto, observa-se a necessidade de gerenciamento ambiental das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira com foco na conservação, proteção e restauração de fragmentos de vegetação nativa (incluindo áreas ripárias) e áreas alagadas, bem como a recuperação da biodiversidade até mesmo em atividades agrícolas por meio da aplicação de técnicas alternativas de plantio. Isto garante uma maior provisão de serviços ecossistêmicos, o que pode refletir tanto no aumento de produtividade agrícola, quanto no aumento de outros benefícios sociais e ecológicos (situação de “ganho-ganho”; De Groot *et al.*, 2010).

A relação entre biodiversidade e serviços do ecossistema vem sendo bastante discutida (Benayas, 2009; Yapp *et al.*, 2010; Midgley, 2012; Balvanera *et al.*, 2014, 2015; Harrison *et al.*, 2014; Eastwood, 2016), e estudos adicionais devem incluir o conceito de eco-exergia nestas discussões.

3.3. Estimativa do valor econômico dos serviços do ecossistema das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas

A partir dos valores de eco-exergia é também possível estimar os valores econômicos dos serviços de um ecossistema. Estes valores são mostrados na **Tabela 15** e comparados com os valores obtidos por Jørgensen (2010) e Costanza *et al.* (2014).

Tabela 15. Comparação dos valores econômicos (\$/ha/ano) dos serviços do ecossistema obtidos neste trabalho com os valores de Jørgensen (2010) e de Costanza *et al.* (2014). JG: bacia hidrográfica do Jacaré-Guaçu. JP: bacia hidrográfica do Jacaré-Pepira.

	JG e JP	Jørgensen (2010)	Costanza <i>et al.</i> (2014)
Vegetação nativa	JG: 78.640 JP: 84.028	-	-
Cultivos agrícolas		5.880.000	92
Pastagens		252.000	232
Florestas decíduas	-	14.000.000	-
Florestas temperadas	-	21.000.000	3.137
Florestas tropicais	-	42.000.000	5.382
Áreas alagadas	JG: 46.850 JP: 48.038	630.000	140.174

Como comentado por Jørgensen (2010), os valores econômicos baseados nos custos energéticos de geração dos serviços ecossistêmicos (eco-exergia) tendem a ser mais elevados do que os estimados por metodologias tradicionais (por exemplo, Costanza *et al.*, 2014), pois abrangem todos os possíveis serviços do ecossistema do organismo/ecossistema em estudo e resultam de medidas biofísicas e não de, por exemplo, julgamentos individuais sobre os valores de poucos serviços. Os resultados mostraram valores referentes aos valores econômicos dos serviços ecossistêmicos da biomassa vegetal das áreas de vegetação nativa e das áreas alagadas, das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira. Estes valores tendem a aumentar com a futura adição da eco-exergia da fauna presente nestas áreas,

seguindo o raciocínio de que quanto maior for a diversidade de um ecossistema, maiores os valores de eco-exergia, maior a quantidade de serviços ecossistêmicos ofertados e maiores os seus valores econômicos.

É evidente que estes valores também devem aumentar se estas áreas forem conservadas ou recuperadas, e se houver a criação de mais áreas de proteção. Deve-se considerar, especificamente, a proteção das áreas do entorno das áreas alagadas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, que se encontram altamente impactadas por atividades antrópicas. É necessário um zoneamento agroecológico nestas regiões, considerando a proteção e recuperação da vegetação ripária e a aplicação de práticas agrícolas alternativas, de modo a proteger os importantes serviços ecossistêmicos que estas áreas alagadas oferecem às populações humanas das duas bacias hidrográficas. É importante destacar que a proteção destas áreas alagadas também garante qualidade e disponibilidade de água para os processos e interações ecológicas ao longo das bacias, e como consequência atua na regulação de todos os serviços ecossistêmicos, incluindo a produção de alimentos, que depende do ciclo hidrológico.

4. Conclusões

A avaliação de eco-exergia das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas nas duas bacias mostrou que em consequência do aumento de biomassa entre os anos de 2004 e 2014, houve também aumento nos valores de eco-exergia, com exceção das áreas de vegetação nativa da bacia do Jacaré-Guaçu. Estas mudanças de biomassa e de eco-exergia sugerem mudanças na diversidade de organismos vegetais e dos seus serviços ecossistêmicos relacionados à qualidade e disponibilidade de água, entre outros serviços, nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

Sob a visão do conceito de eco-exergia, a proteção das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas das duas bacias deve ser feita considerando-se não somente a quantidade de organismos vegetais recuperada, mas também a diversidade destes organismos, de modo a garantir diferentes capacidades de trabalho que mantenham biomassa e rede de interações adequadas para a

oferta dos múltiplos serviços ecossistêmicos requeridos pelas populações destas bacias hidrográficas.

Os valores encontrados de eco-exergia, das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas, são preliminares, porém coerentes com os valores de referência de Jørgensen (2010) e devem contribuir na construção de um *background* de conhecimento sobre a aplicação desta abordagem inovadora (eco-exergia) no estudo dos serviços do ecossistema, em bacias hidrográficas da região Neotropical.

Recomenda-se mais estudos que avaliem a relação entre eco-exergia e diversidade dos serviços ecossistêmicos nestas áreas de estudo, em espécies específicas destas áreas, para o estabelecimento de padrões que permitam um diagnóstico rápido sobre a saúde e serviços ecossistêmicos dos ecossistemas das duas bacias. Para o caso das áreas de vegetação nativa e áreas alagadas, são também necessárias medições locais de biomassa para uma melhor correlação com valores de NDVI e o desenvolvimento de um modelo de regressão exponencial específico para as bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste estudo; processo no. 2012/12991-9. Agradecemos também o Prof. Sven Erick Jørgensen por todo o conhecimento gerado nesta área de pesquisa.

5. Referências bibliográficas

BALVANERA, P.; SIDDIQUE, I.; DEE, L.; PAQUETTE, A.; ISBELL, F.; GONZALEZ, A.; BYRNES, J.; O'CONNOR, M.I.; HUNGATE, B.; GRIFFIN, J.N. Linking Biodiversity and Ecosystem Services: Current Uncertainties and the Necessary Next Steps. *BioScience*. 2014

BALVANERA, P.; QUIJAS, S.; MARTÍN-LOPEZ, B.; BARRIOS, E.; DEE, L.; DURANCE, I.; WHITE, P.; BLANCHARD, R.; DE GROOT, R. The links between biodiversity and ecosystem services. pp.45-59.2015.

BENAYAS, J.M.R.; NEWTON, A.C.; DIAZ, A.; BULLOCK, J.M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, vol. 325, pp. 1121-1124. 2009.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; NEDKOV, S.; MÜLLER, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, vol. 21, p. 17-19. 2012.

COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; VAN DER PLOEG, S.; ANDERSON, S.J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. Vol., 26, pp. 152-158. 2014.

DE GROOT, R.S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, vol. 7., n.3, pp. 260-272. 2010.

EASTWOOD, A.; BROOKER, R.; IRVINE, R.J.; ARTZ, R.R.E.; NORTON, L.R.; BULLOCK, J.M.; ROSS, L.; FIELDING, D.; RAMSAY, S.; ROBERTS, J.; ANDERSON, W.; DUGAN, D.; COOKSLEY, S.; PAKEMAN, R.J. Does nature conservation enhance ecosystem services delivery? *Ecosystem Services*, vol. 17, pp. 152-162. 2016.

HARRISON, P.A.; BERRY, P.M.; SIMPSON, G.; HASLETT, J.R.; BLICHARSKAM, M.; BUCUR, M.; DUNFORD, R.; EGOH, B.; GARCIA-LLORENTE, M.; GEAMANA, N.; GEERTSEMA, W.; LOMMELEN, E.; MEIRESONNE, L.; TURKELBOOM, F. Linkages between biodiversity attributes and ecosystem services: a systematic review. *Ecosystem Services*, vol. 9, pp. 191-203. 2014.

JORGENSEN, S.E. *Integration of ecosystem theories: a pattern*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 383 p. 1992.

JORGENSEN, S.E. Description of aquatic ecosystem's development by exergy and exergy destruction. *Ecological Modelling*, vol. 204, pp.22-28. 2007.

JORGENSEN, S.E. Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*, vol. 7, p. 311-313. 2010.

JORGENSEN, S.E. New method to calculate the work energy of information and organisms. *Ecological Modelling*, vol. 295, pp.18-20. 2015.

JORGENSEN, S.E.; SVIREZHEV, Y.M. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Elsevier. 366 p. 2004.

JORGENSEN, S.E.; LADEGAARD, N.; DEBELJAK, M.; MARQUES, J.C. Calculations of exergy for organisms. *Ecological Modelling*, vol. 185, p. 165-175. 2005.

JORGENSEN, S.E.; NIELSEN, S.N. Application of exergy as a thermodynamic indicator in ecology. *Energy*, vol. 32, n.5, pp. 673-685. 2007.

LI, F.; BAE, M.J.; KWON, Y.S.; CHUNG, N.; HWANG, S.J.; PARK, S.J.; PARK, H.K.; KONG, D.S.; PARK, Y.S. Ecological exergy as an indicator of land-use impacts on functional guilds in river ecosystems. *Ecological Modelling*, vol. 252, pp. 53-62. 2013.

MIDGLEY, G.F. Biodiversity and ecosystem function. *Science*, vol. 335, pp. 174-175. 2012.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. In Proceedings of the Third ERTS Symposium NASA SP-351, Washington, DC, USA, 10–14 December 1973; Volume 1, pp. 309–317. 1973.

TUNDISI, J.G.; MASTUMURA-TUNDISI, T.; PERIOTTO, N.A. Exergy and ecological services in reservoirs. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 72, n.4, p.979. 2012.

USGS. 2016a. Produtos de reflectância de superfície. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/documents/provisional_lasrc_product_guide.pdf. Acesso em 12/04/2016.

USGS. 2016b. Produtos de reflectância de superfície. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/documents/cdr_sr_product_guide.pdf. Acesso em 12/04/2016.

YAPP, G.; WALKER, J.; THACKWAY, R. Linking vegetation type and condition to ecosystem goods and services. *Ecological Complexity*, vol. 7, pp 292-301. 2010.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As avaliações dos serviços ecossistêmicos das bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e do Jacaré-Pepira deste estudo, utilizando metodologias tradicionais (Capítulo I), e cálculos de eco-exergia (Capítulo II), mostraram uma visão geral da situação destas bacias.

O Capítulo I focou na classificação dos usos e coberturas da terra para identificar as capacidades das bacias em prover diferentes serviços ecossistêmicos. Foi registrado que a maior porcentagem dos usos e coberturas se refere às *áreas terrestres cultivadas e manejadas*, as quais são planejadas para otimizar a oferta de *serviços de provisão*, porém, nos sistemas de monoculturas, os *serviços de regulação e manutenção* são muito reduzidos.

Os *serviços de regulação e manutenção*, essenciais para a automanutenção dos ecossistemas, tiveram as maiores pontuações nas áreas de *vegetação nativa, áreas alagadas e corpos de água*. Com o aumento da biodiversidade nas *áreas terrestres cultivadas e manejadas*, por meio da introdução de técnicas agrícolas alternativas, é possível elevar a disponibilidade e qualidade dos *serviços de regulação e manutenção* nestas áreas. Como consequência, haveria aumento na produtividade agrícola e proteção dos ecossistemas nativos adjacentes, dos quais o bem-estar humano também depende. Esta situação é descrita como “ganho-ganho” por De Groot *et al.* (2010), na qual harmoniza-se os ganhos econômicos, sociais e ambientais.

O Capítulo II abordou os serviços do ecossistema das duas bacias por meio do conceito de eco-exergia. Foram feitas estimativas de eco-exergia para as áreas de vegetação nativa e áreas alagadas. Os resultados mostraram coerência com os valores de referência apresentados por Jørgensen (2010). Discutiu-se também a relação entre eco-exergia, biodiversidade e diversidade de serviços ecossistêmicos, e reafirmou-se as recomendações do primeiro capítulo sobre a importância de se recuperar e conservar biodiversidade nas duas bacias, sobretudo nas práticas agrícolas, para a garantia da provisão de serviços essenciais para o bem-estar humano, como o suprimento de água potável e a ciclagem de nutrientes.

Em ambos capítulos foram feitas estimativas dos valores econômicos dos serviços ecossistêmicos das áreas alagadas e vegetação nativa. No primeiro

capítulo as estimativas basearam-se no método de transferência de valor, utilizando-se de dados de literatura que consideram poucos serviços ecossistêmicos em áreas similares às deste estudo ou que se baseiam em estimativas globais.

O segundo capítulo estima os valores econômicos por meio do custo energético (eco-exergia) envolvido no suprimento dos serviços do ecossistema. Como este método considera a energia de trabalho contida nos organismos para o seu desenvolvimento e relacionamento com outras espécies e seu meio, abrange todos os potenciais serviços gerados de uso direto ou indireto e tende a apresentar valores mais elevados que as estimativas convencionais. Portanto, futuros estudos que avaliem a diversidade específica de determinados organismos e sua biomassa nestas bacias, devem agregar valores de eco-exergia e valores econômicos para a presente estimativa, que considerou somente a biomassa aérea vegetal.

Os valores econômicos estimados demonstram os valores econômicos potenciais das áreas alagadas e dos remanescentes de vegetação nativa, independente dos valores de base utilizados. Também mostram a magnitude de ganhos e perdas se estes ecossistemas forem protegidos, recuperados ou degradados.

Os resultados obtidos neste estudo, embora preliminares, representam uma contribuição inicial para a construção de um *background* sobre a aplicação do conceito de eco-exergia e serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas na região Neotropical. Também contribuem no preenchimento de lacunas sobre o estudo dos serviços ecossistêmicos nas bacias hidrográficas do Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira.

Recomenda-se mais estudos que avaliem a relação entre diversidade e eco-exergia em grupos específicos de fauna e flora destas áreas de estudo, para o estabelecimento de parâmetros que permitam futuras avaliações da saúde dos ecossistemas destas áreas e dos serviços ecossistêmicos ofertados, pelos gestores destas áreas.

Como complemento para futuras avaliações de eco-exergia destas bacias, recomenda-se também o desenvolvimento de modelos de regressão que

correlacionem valores de NDVI com a biomassa das espécies de Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual encontradas especificamente nestas áreas.

Referências bibliográficas

DE GROOT, R.S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.; HEIN, L.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, vol. 7., n.3, pp. 260-272. 2010.

JORGENSEN, S.E. Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*, vol. 7, p. 311-313. 2010.