

ANÁLISE ESPACIAL DO CUSTO DE REPOSIÇÃO DE NUTRIENTES DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

Darllan Collins da Cunha e Silva*

Jomil Costa Abreu Sales**

Vanessa Cezar Simonetti***

Roberto Wagner Lourenço****

RESUMO: Para obter o valor econômico de um recurso ambiental é necessário estimar o seu valor monetário em relação aos outros bens/serviços disponíveis na economia. No entanto, os métodos de valoração ambiental utilizados atualmente são relativamente novos e as variáveis envolvidas no processo podem não ser conhecidas ou serem parcialmente conhecidas. Um desses métodos é o do Custo de Reposição que busca calcular o valor da reparação a partir de um dano já provocado. Partindo desse pressuposto, o objetivo principal deste estudo foi aplicar o método custo de reposição na valoração econômica da perda de nutrientes por erosão do solo na bacia hidrográfica do Rio Una (SP), a partir do uso de geoprocessamento para avaliar espacialmente a área de estudo. Foram coletadas 35 amostras e quantificados os seguintes nutrientes do solo: Ca, Mg, P e o K. Suas concentrações foram espacializadas e estimada a perda anual e o custo para a reposição destes. Em mais de 89% da área de estudo o custo para reposição do K, P, Ca e Mg a partir dos três fertilizantes utilizados (cloreto de potássio, superfosfato simples e calcário dolomítico) foi de até 0,01 reais por m², sendo que o custo total para reposição foi de 352.846,43 reais. A espacialização dos custos para reposição permitiu inferir quais áreas merecem maior atenção do poder público quanto à fiscalização e proposição de medidas sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Fertilizantes; Geoespacialização; Geoestatística; Geoprocessamento; Solo.

* Doutor em Ciências Ambientais, docente do curso de Engenharia de Pesca da Unesp – Campus de Registro, Brasil. E-mail: darllan.collins@unesp.br

** Doutor em Ciências Ambientais, docente do curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Sorocaba – Uniso, Brasil

*** Mestre em Ciências Ambientais, doutoranda do Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais da Unesp – Campus de Sorocaba, Brasil

**** Doutor em Geociências e Meio Ambiente, docente do Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais da Unesp – Campus de Sorocaba, Brasil.

SPATIAL ANALYSIS OF REPOSITION COSTS OF SOIL NUTRIENTS IN A HYDROGRAPHIC BASIN

ABSTRACT: So that one may obtain the economic value of an environmental resource, its monetary value should be estimated in relation to other goods/services available in the economy. Environmental valorization methods currently used are relatively new and the variables in the process may not be known or partially known. One method is the Reposition Cost that calculates the value of reparation from a damage. Current paper applied the reposition cost method in the economic valorization of nutrient loss by soil erosion in the hydrographic basin of the river Una, Brazil, through geoprocessing to evaluate spatially the area under analysis. Thirty-five samples were collected and the soil's nutrients quantified, Ca, Mg, P and K. Concentrations were spatialized and annual loss estimated, with reposition costs. In more than 89% of the studied area, the reposition cost of K, P, Ca and Mg of the three fertilizers employed (potassium chloride, potassium chlorate, simple superphosphate and lime) reached about R\$ 0.01 per m². Total reposition cost was R\$ 352,846.43. The spatialization of reposition costs showed which areas required special attention of the government with regard to monitoring and proposition of sustainability.

KEY WORDS: Fertilizers; Geo-spacing; Geo-statistics; Geo-processing; Soil.

INTRODUÇÃO

Para a obtenção do valor econômico de um recurso ambiental é necessário estimar o seu valor monetário em relação aos outros bens e serviços disponíveis na economia. No entanto, pela necessidade de valorar os recursos ambientais e prover subsídios técnicos à sua exploração de forma sustentável, são utilizadas técnicas de valoração econômica ambiental (TELLES *et al.*, 2013; HANSJÜRGENS *et al.*, 2017; KLAUER *et al.*, 2017).

As decisões dos agentes econômicos, normalmente, se pautam apenas nos custos financeiros de produção. Entretanto, as atividades produtivas utilizam-se dos recursos naturais, de forma direta ou indireta, e, por isso, o uso desses recursos naturais apresenta um valor positivo dentro do sistema produtivo (HERBOHN, 2005; HANSJÜRGENS *et al.*, 2017).

Nogueira *et al.* (2000) realizaram um estudo sobre os métodos de valoração econômica que vêm sendo utilizados, estabelecendo uma importante reflexão acerca dessa temática. Esses autores citam que é necessário conceituar o valor econômico, desenvolvendo técnicas eficientes para estimá-lo, visando a eficiência alocativa dos recursos naturais. Portanto, não existe um único modelo ou método que seja universalmente aceito e aplicável, pois para todos os modelos desenvolvidos existem vantagens e desvantagens. Segundo Herbohn (2005), nem sempre há informações suficientes para estimar o valor monetário de todos os bens e serviços ambientais.

Todavia, os métodos de valoração possibilitam um produto de cunho científico que pode valorar economicamente os recursos naturais e servir de base para os gestores, gerando, principalmente, um banco de dados. Nesse sentido, diversos estudos buscaram atribuir valores aos recursos naturais levando em consideração diferentes abordagens (TELLES *et al.*, 2013; HUANG *et al.*, 2015; KLAUER *et al.*, 2017).

Dentre os métodos de valoração ambiental, destaca-se o método do Custo de Reposição que busca calcular de forma simplista o custo de reparação de um dano provocado a partir do custo de reposição ou restauração de um bem já danificado e entende esse custo como uma medida do seu benefício (RODRIGUES, 2005). Já Nogueira *et al.* (2000) afirmam que a abordagem do método do custo de reposição é interessante nas ocasiões em que a reparação do dano decorre de outro problema, como, por exemplo, a perda de fertilizantes do solo que força os produtores a repô-los, visando garantir a sustentabilidade da produtividade.

De acordo com Dechen *et al.* (2015), os estudos que tratam da temática acerca da valoração ambiental e quantificação dos custos associados à perda de solos são extremamente relevantes para os países em desenvolvimento, uma vez que essas informações podem contemplar diferentes unidades territoriais e aspectos socioeconômicos que influenciam diretamente no manejo antrópico do solo, oferecendo subsídios aos gestores públicos.

Ainda que simplista, o custo de reposição deve ser didaticamente acessível a todos os usuários, sem deixar dúvidas sobre os princípios utilizados no processo de avaliação e facilmente mensurável e, quando possível, ser componente de um banco de dados já existente (NOGUEIRA *et al.*, 2000; PULLEMAN *et al.*, 2012).

O uso de geoprocessamento para mapeamento do custo de reposição de nutrientes do solo bem como extração de informações sobre sua distribuição em bacias hidrográficas é fundamental, pois auxilia na interpretação do espaço geográfico e obtenção de informações espaciais para uma análise precisa, além de possibilitar a geração de um banco de dados (FAUSTINO *et al.*, 2014; GUIMARÃES *et al.*, 2016; SALES *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017a; SILVA *et al.*, 2017b).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo principal aplicar o método custo de reposição na valoração econômica da perda de nutrientes por erosão do solo na bacia hidrográfica do Rio Una, utilizando ferramentas de geoprocessamento para avaliar espacialmente o custo de reposição desses nutrientes como subsídio à avaliação da sustentabilidade das características do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Una (Figura 1) está totalmente inserida no município de Ibiúna (SP), o qual pertence à Região Metropolitana de Sorocaba (RMS) e possui uma população de 73.309 habitantes, dos quais 55,7% residem na zona rural (SEADE, 2017).

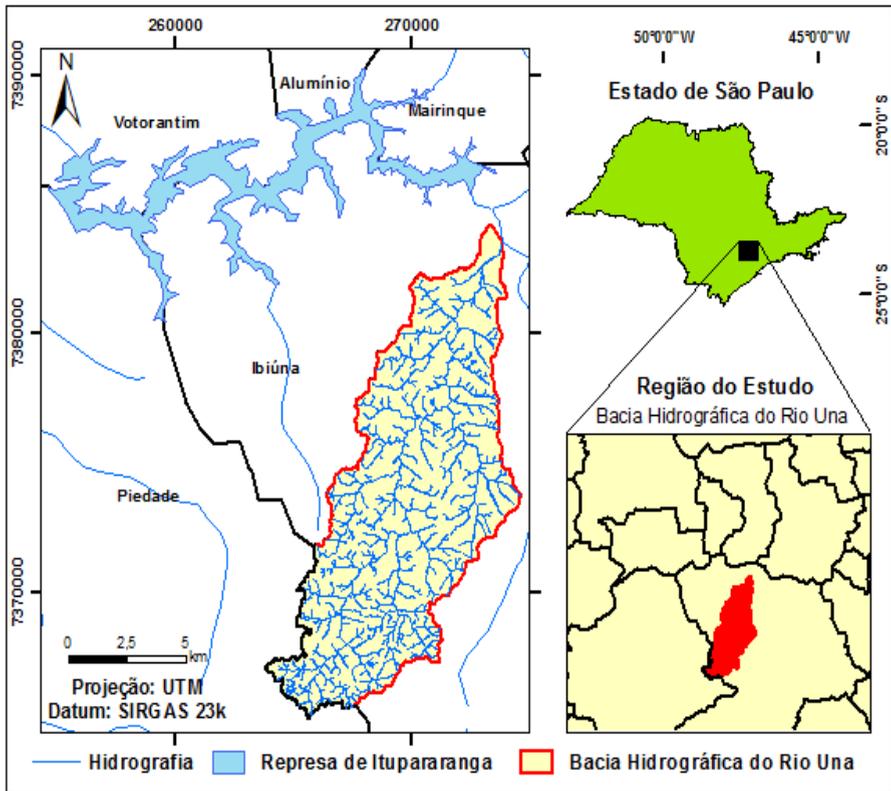


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Una

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2017).

O Rio Una juntamente com os Sorocabuçu e Sorocamirim desembocam no reservatório de Itupararanga, principal manancial de captação de água para o município de Sorocaba e região, além de irrigar centenas de propriedades agrícolas nos arredores e servir para a geração de energia elétrica (SILVA *et al.*, 2017a).

O clima predominante nesta bacia hidrográfica é do tipo Cwb, isto é, com verão chuvoso e inverno com estiagem, segundo a classificação de Köppen, enquanto que a vegetação original é do tipo ombrófila densa montana (LOURENÇO *et al.*, 2014).

2.2 COLETA DOS NUTRIENTES UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DO CUSTO DE REPOSIÇÃO DESTES NO SOLO

Os nutrientes selecionados para avaliar o custo de reposição no solo da bacia hidrográfica do Rio Una foram o Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Fósforo (P) e o Potássio (K), sendo estes elementos essenciais para o crescimento e manutenção do metabolismo das plantas (RAIJ *et al.*, 1996; RIBEIRO *et al.*, 1999).

A coleta de solo foi realizada nos dias 30 e 31 de outubro de 2017. Nesse processo foi utilizado um GPS de navegação da marca *Garmim* modelo *Etrex Vista* de 12 canais com antena interna e exatidão nominal de 15 m para localização e locomoção na área de estudo, bem como um trado de caneco, um enxadão e uma pá para a coleta de solo na profundidade de 0 a 20 cm, conforme recomendações técnicas contidas no Boletim Técnico 100 do Instituto Agrônômico de Campinas - IAC (RAIJ *et al.*, 1996). As análises foram realizadas nos laboratórios do IAC segundo os métodos de análise contidos no Boletim Técnico 106 desse instituto (CAMARGO *et al.*, 2009).

Os pontos de amostragens do solo foram distribuídos regularmente na área de estudo com pelo menos cinco pontos amostrais representando cada tipologia de uso do solo presente na bacia hidrográfica, sendo gerada, a partir dessa premissa, uma malha quadrada de aproximadamente 1600 m (SILVA *et al.*, 2017a).

Uma vez definida a malha quadrada, estes pontos amostrais foram distribuídos espacialmente, levando em consideração o espaçamento entre eles de forma a buscar uma distribuição uniforme em uma malha quadrada regular para facilitar a interpolação dos dados, além da proximidade com estradas para facilitar o acesso aos pontos de coleta do solo. A Figura 2 apresenta a distribuição destes pontos de amostragens do solo ao longo da bacia hidrográfica do Rio Una.

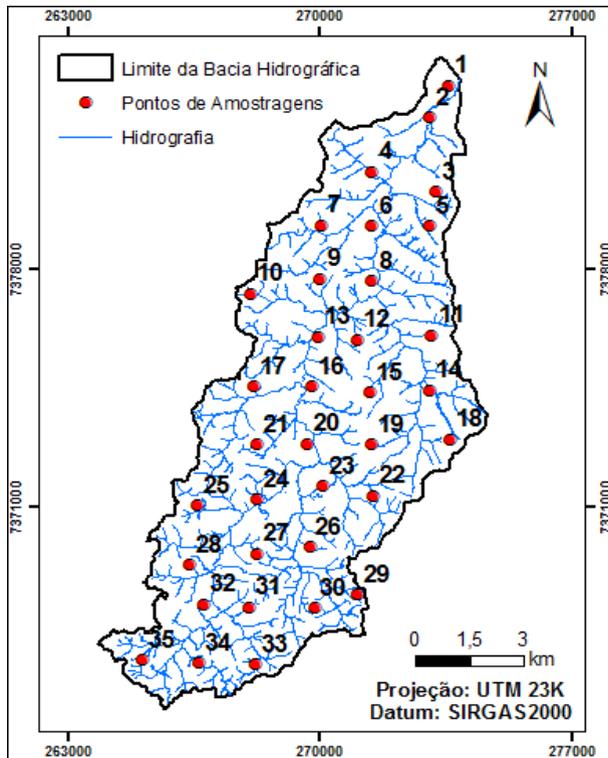


Figura 2. Localização dos pontos de amostragem na bacia hidrográfica do Rio Una

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA ESPACIAL DOS PONTOS AMOSTRADOS

O solo possui uma vasta heterogeneidade decorrente dos processos inerentes à sua formação natural, bem como os diferentes usos e manejo antrópico que são adotados, refletindo, assim, na variabilidade de seus atributos físicos e químicos (SIMONETTI *et al.*, 2018). Por essa razão, a geoestatística foi utilizada neste estudo de modo a avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo estudados, sendo a dependência espacial expressa através do semivariograma, estimado pela Equação (1):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (01)$$

Sendo:

$N(h)$ são os valores amostrados de um determinado atributo do solo estudado, $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados pela distância h (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Constatada a presença de dependência espacial entre os dados, foram realizadas inferências para estimar os valores dos atributos do solo estudados em locais não amostrados. Para isso, utilizou-se o método de interpolação da krigagem ordinária que utiliza um estimador linear não viciado com mínima variância e leva em consideração a estrutura de variabilidade encontrada para o atributo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013), sendo definido pela Equação (2):

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (02)$$

Sendo:

é o estimador para um ponto (x_0) da região;

λ_i ($i=1, n$) são os pesos usados na estimativa;

$Z(x_i)$ ($i=1, n$) é o conjunto de n dados disponíveis.

Os modelos teóricos usados para o ajuste foram: esférico, exponencial e gaussiano. Para validação e escolha do modelo mais adequado foi utilizada a média dos erros de predição padronizados (MS), *Root-Mean-Square* (RMS), *Average Standard Error* (ASE) e *Root-Mean-Square-Standardized* (RMSS).

Para predições não viesadas, MS deve ter valores próximos de zero e RMS e ASE tenham valores próximos e, ainda, para uma maior acurácia, RMS deve apresentar baixos valores, o que indica uma menor variabilidade entre os valores preditos e os respectivos valores verdadeiros. Para o valor de RMSS superior a 1, a variabilidade da predição está sendo subestimada, caso contrário, superestimada, assim o valor ideal é o mais próximo possível de 1 (PASINI *et al.*, 2014).

Para avaliar a dependência espacial do fenômeno utilizou-se o Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Cambardella *et al.* (1994) e expresso pela Equação (3) com a seguinte classificação para os seus valores: se $IDE \leq 25\%$ o fenômeno tem forte dependência espacial; entre 25% e 75% tem dependência espacial moderada; e $\geq 75\%$ tem fraca dependência espacial.

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C} \right) \times 100 \quad (03)$$

Sendo:

IDE é o índice de Dependência Espacial;

C_0 é o efeito pepita;

C é a contribuição.

2.4 ANÁLISE DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO

O mapa de perdas de solos da bacia hidrográfica do Rio Una foi obtido dos estudos realizados por Silva *et al.* (2017a). Com base no mapa de perdas de solo da bacia hidrográfica e da distribuição de nutrientes foi calculada a perda anual desses nutrientes do solo para a área de estudo.

Para isso, foi alterada a unidade de medida dos nutrientes de cmol/dm^3 e mg/dm^3 para kg/tonelada de solo. Posteriormente, foi multiplicado cada um dos planos de informação (PI) que contêm os valores da distribuição dos nutrientes pelo PI da perda de solo anual. A unidade dos PI dos nutrientes é de $\text{kg por hectare ao ano}$ e foi alterada para kg por m^2 ao ano devido à necessidade de saber quanto de perda de nutrientes há por pixel do PI. A perda anual total desses nutrientes do solo foi calculada por meio da soma dos valores das perdas individuais de cada pixel.

2.5 CÁLCULO DAS QUANTIDADES DE FERTILIZANTES NECESSÁRIOS PARA REPOSIÇÃO DAS PERDAS DE NUTRIENTES

Foi utilizado o método de custo de reposição para a valoração econômica da erosão do solo, pois este método permite avaliar economicamente o custo da degradação do solo em função dos custos de nutrientes que devem ser repostos por meio de adubação com fertilizantes comerciais. Para isso, foi considerada que a perda dos nutrientes é função direta da perda de solo e da quantidade de nutrientes presentes no horizonte A (PUGLIESI *et al.*, 2011).

A quantidade de fertilizante necessária para repor as perdas de nutrientes foi calculada dividindo-se a quantidade de nutrientes perdida pelo teor do nutriente no referido fertilizante expresso na Equação (4).

$$QN = \left(\frac{QP}{QF} \right) \quad (4)$$

Sendo:

QP = quantidade de nutriente perdida em kg/m² anualmente;

QF = teor de nutriente presente no fertilizante em porcentagem;

QN = quantidade de fertilizante necessária para reposição em kg/m² anualmente.

Os fertilizantes escolhidos para o cálculo do custo de reposição foram os mais comuns utilizados atualmente, sendo Superfosfato Simples (18% P₂O₅), Cloreto de potássio (60% K₂O) e Calcário Dolomítico (38% Ca e 12% Mg). O calcário dolomítico, além de ser fonte para os dois elementos químicos estudados, o que diminui a necessidade de um fertilizante para cada um desses nutrientes, é um elemento amplamente utilizado para correção da acidez do solo por apresentar um baixo custo e por estar disponível em grande quantidade no país (GALINDO *et al.*, 2017). Ainda, o calcário atua de modo a reduzir a saturação de alumínio (Al) no solo, elemento tóxico às plantas, aumentando a disponibilidade dos nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (LEAL; COUTINHO; FRANÇA, 2017).

Para determinar a quantidade de calcário utilizado para recompor o Ca e o

Mg no solo foi assumida a maior quantidade requerida deste fertilizante independentemente se algum desses nutrientes não requeresse a quantidade reposta, visto a dificuldade de se utilizar um mesmo fertilizante para recompor dois nutrientes do solo distintos. Para auxiliar nessa determinação da quantidade requerida de fertilizante, utilizou-se a função de álgebra de mapas, disponível no *software* ArcGIS 10.4.1, e após a verificação foi gerado um único mapa contendo as áreas que necessitam de reposição do Calcário Dolomítico.

As demais análises espaciais bem como as ferramentas geoestatísticas também foram realizadas por meio do *software* ArcGIS 10.4.1, sendo um Sistema de Informação Geográfica (SIG) amplamente utilizado em estudos ambientais (SALES *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017a; SIMONETTI *et al.*, 2018).

2.6 CÁLCULO DO CUSTO PARA REPOSIÇÃO DOS NUTRIENTES DO SOLO

Foram calculados os PI com o custo de reposição (em reais) do K, P, Ca e Mg por m² (pixel), através da Equação (5), utilizando como parâmetros a quantidade de fertilizante necessária para reposição em kg/m² anualmente e o custo dos fertilizantes comercializados atualmente. Desta forma, foi gerado um PI com os valores do custo para reposição de cada nutriente. Destaca-se que foi calculado o custo geral para a reposição de cada nutriente na área de estudo.

$$CR = QN \times PF \quad (05)$$

Sendo:

CR = custo, em reais, para reposição dos nutrientes estudados;

QN = quantidade de fertilizante necessária para reposição em kg/m² anualmente;

PF = preço do fertilizante comercializado.

Os preços dos fertilizantes, assim como do corretivo, foram obtidos junto ao Instituto de Economia Agrícola (IEA). Devido à variação no valor dos fertilizantes foi utilizada a média dos valores mensais do ano de 2018 para os meses de janeiro e fevereiro, e os valores obtidos foram empregados no cálculo do custo de reposição dos nutrientes.

3 RESULTADOS

Através dos parâmetros apresentados na Tabela 1 da análise geoestatística, efetuada por meio do ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, foi possível observar que os atributos do solo estudados apresentaram forte dependência espacial por meio do cálculo do IDE (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

Dentre os modelos teóricos utilizados, os da Tabela 1 foram os que apresentaram os valores de MS mais próximos de zero e mais semelhantes de RMS e ASE, o que diminui a incerteza associada às predições. Entretanto, o Ca apresentou valores altos de RMS indicando uma alta variabilidade entre os valores preditos e verdadeiros. Em relação aos valores de RMSS, todos os atributos do solo estudados apresentaram valores próximos do ideal que é igual a 1.

Tabela 1. Parâmetros da análise geoestatística dos atributos do solo

Atributo	Modelo	C ₀	C	a(m)	IDE(%)	MS	RMS	ASE	RMSS
Ca	Gaussiano	0,8	24,48	1600	3,2%	0,017	5,289	5,289	0,993
Mg	Exponencial	0,03	0,59	4200	4,8%	0,014	0,709	0,707	1,008
K	Gaussiano	0,07	0,48	2000	12,7%	0,019	0,784	0,778	1,031
P	Exponencial	10 ⁻⁵	0,0018	2000	0,6%	-0,031	0,044	0,043	1,024

A utilização de mapas é imprescindível na elucidação da distribuição espacial de aspectos do solo, tendo grande aplicabilidade na agricultura de precisão (CARNEIRO *et al.*, 2016). Os mapas de distribuição espacial também fornecem subsídios para o manejo eficiente do solo e gestão das áreas agrícolas (SILVA *et al.*, 2017b). Nesse sentido, a Figura 3 apresenta a distribuição espacial obtida da análise geoestatística dos atributos do solo (em kg/tonelada de solo ao ano).

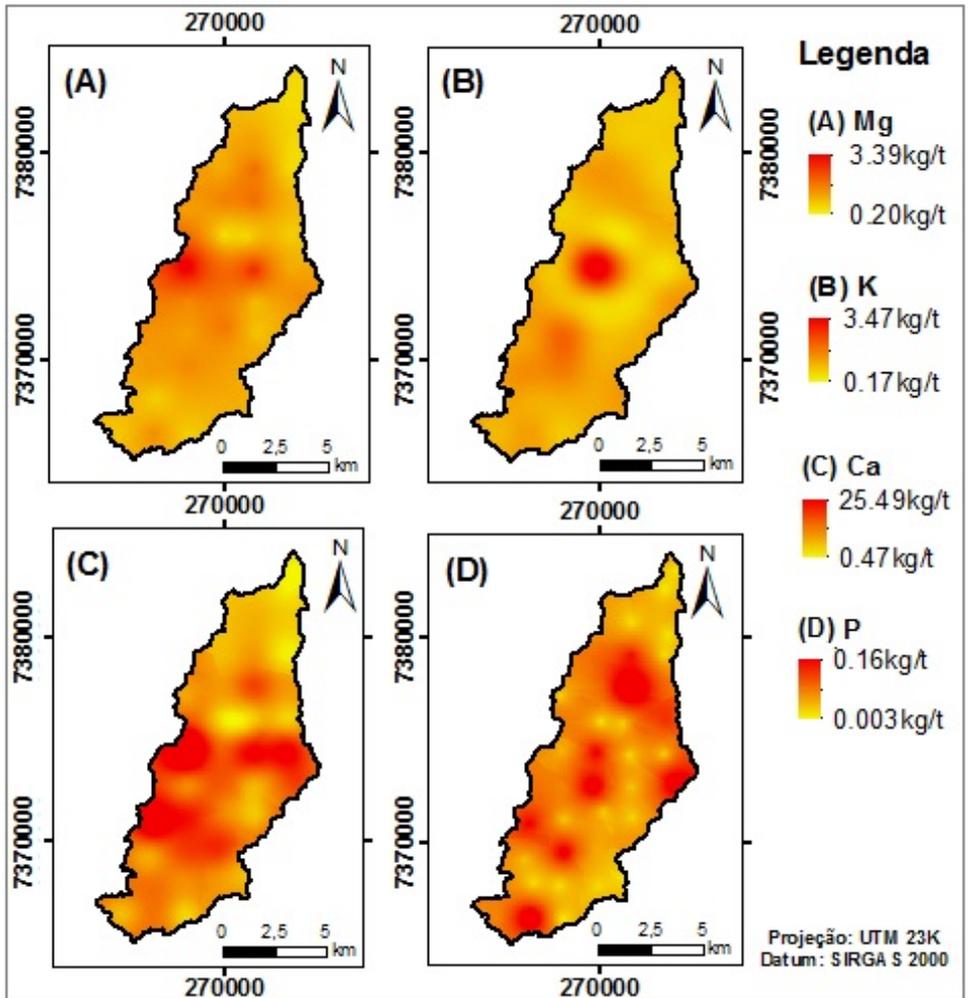


Figura 3. Distribuição dos nutrientes do solo na bacia hidrográfica

A partir da Figura 3 foi possível observar que todos os atributos do solo possuem intensidade mais acentuada na região central da área de estudo. Entretanto, o fósforo (P) apresentou uma alta concentração na região Sul, bem como ao longo de toda a bacia hidrográfica, o que possivelmente está associado à presença de atividades agrícolas desenvolvidas na área (SILVA *et al.*, 2017a), que podem utilizar fertilizantes que contenham esse nutriente em sua composição.

A perda de nutrientes do solo em bacias hidrográficas com elevada atividade agrícola pode acarretar prejuízos de grande ordem para os produtores rurais, setor público e sociedade, uma vez que o aporte de nutrientes nos recursos hídricos pode prejudicar a qualidade e disponibilidade da água (PANTANO *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017a). A distribuição das perdas anuais dos nutrientes por hectare na bacia hidrográfica do Rio Una é apresentada na Figura 4.

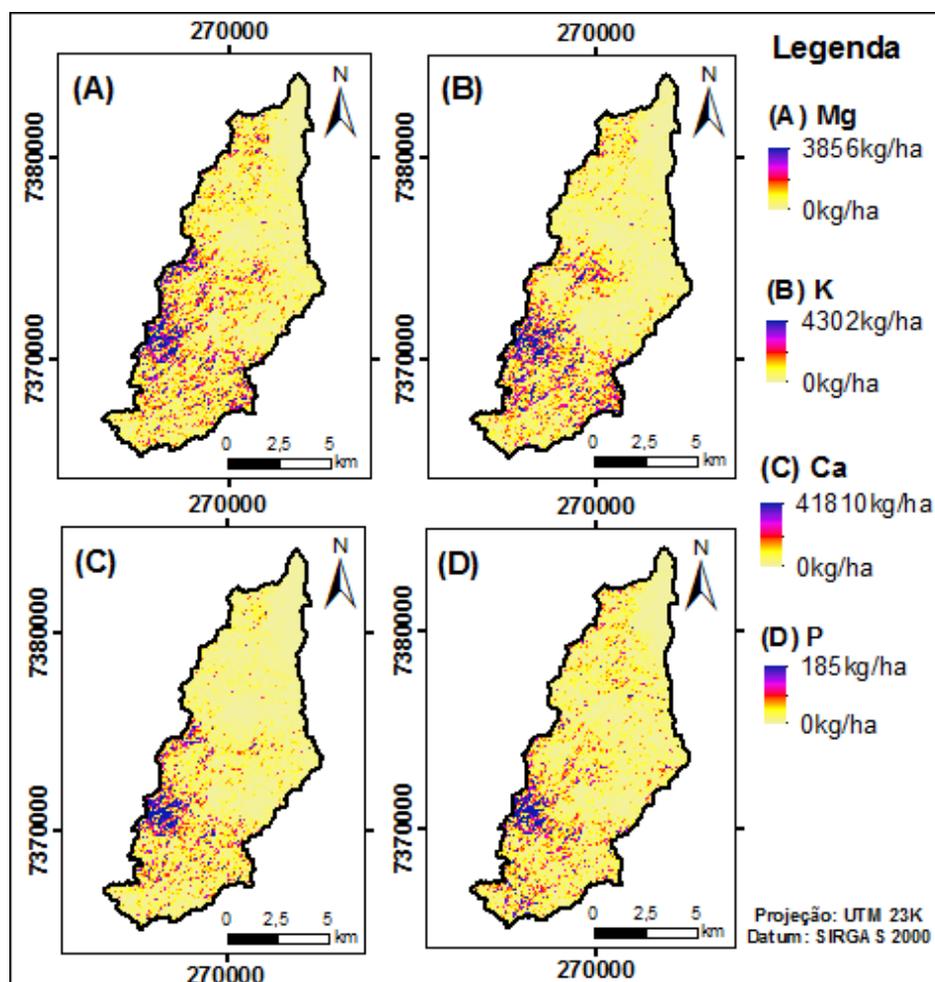


Figura 4. Distribuição das perdas anuais de nutrientes do solo em kg por hectare

Percebe-se que as maiores perdas se concentram na região Centro-Oeste. Analisando separadamente cada um dos nutrientes, verifica-se que a perda anual total para toda a extensão da bacia hidrográfica de K é de 62,639 kg, a de P é de 2,514 kg, a de Ca é de 552,210 kg, enquanto que o Mg é de 71,293 kg. O Ca é o nutriente presente no solo que possui a maior perda anual decorrente da erosão hídrica, seguido pelo Mg, K e P, respectivamente.

A perda de nutrientes ocorre de forma mais acentuada nas áreas agrícolas da bacia hidrográfica do Rio Una, onde o manejo do solo não segue práticas conservacionistas, conforme os estudos realizados por Silva *et al.* (2017a), que mapearam grandes extensões de culturas perenes e temporárias na área de estudo.

Com relação à Figura 4, foi verificado que 9,83 km² da bacia hidrográfica não apresentam perda de solo, devido às características do relevo ser plano e por apresentar ocupação urbana densa ou cobertura florestal (SILVA *et al.*, 2017a).

A Tabela 2 apresenta os valores mensais dos fertilizantes e corretivos comercializados, obtidos junto ao Instituto de Economia Agrícola (IEA) expressos em toneladas, bem como o valor médio de cada fertilizante, em quilos, que foi utilizado para o cálculo do custo de reposição de cada fertilizante por metro quadrado.

Tabela 2. Preço corrente médio mensal dos fertilizantes e corretivos em São Paulo

Mês	Calcário dolomítico	Cloreto de potássio	Superfosfato simples
Janeiro	92,80 reais/t	1.913,34 reais/t	1.348,10 reais/t
Fevereiro	92,80 reais/t	1.896,03 reais/t	1.337,55 reais/t
Valor médio	92,80 reais/t	1.904,69 reais/t	1342,83 reais/t
Valor médio	0,093 reais/kg	1,905 reais/kg	1,343 reais/kg

Fonte: IEA (2018).

A Figura 5 apresenta a distribuição dos valores em reais de fertilizantes e corretivos requeridos para repor os nutrientes perdidos anualmente por erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Una. Pode-se observar que a região Norte da bacia hidrográfica não necessita de reposição, isto se deve ao fato de ser uma região de planície e onde se encontra o exutório da bacia hidrográfica (SILVA *et al.*, 2017a) e, portanto, para onde os sedimentos erodidos da bacia ricos em nutrientes, como os estudados, são carregados.

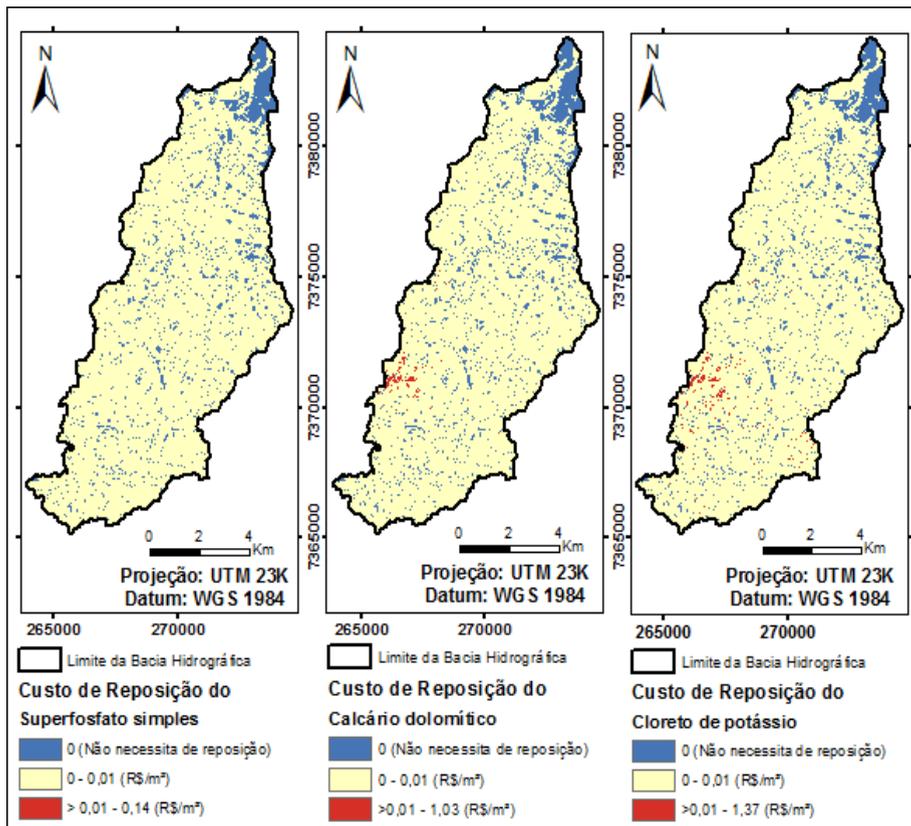


Figura 5. Distribuição dos valores monetários necessários para repor os nutrientes perdidos

Com relação à reposição do potássio (K) na bacia hidrográfica, verifica-se que 10,2% da área não necessitam de reposição, pois não há perda de solo, enquanto que 89,1% necessitam de aproximadamente 0,01 reais por metro quadrado para repor este nutriente perdido anualmente do solo, e apenas 0,7% da área necessita de mais 0,01 reais para repor o K. Entretanto, não houve nenhuma área que necessitasse de um valor superior a 1,37 reais por metro quadrado para reposição do K, sendo que este foi o nutriente que apresentou os maiores valores de investimento para sua reposição.

Para a reposição do cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foi utilizado o mesmo fertilizante (Tabela 2), respeitando-se a relação do teor presente no fertilizante e

necessidade da área, assim foi gerado um único mapa (Figura 5), que apresentou o valor em reais necessário para repor cada metro quadrado da bacia hidrográfica. Em 89,3% da área da bacia hidrográfica a reposição de Ca e Mg foi de até 0,01 reais, enquanto que 0,5% da área necessita de um investimento maior que 0,01 reais para repor esses nutrientes; entretanto, esse valor não ultrapassa 1,03 reais por metro quadrado.

O fósforo (P) é o nutriente que requer os menores investimentos para sua reposição, sendo que 89,79% da área necessitam de menos de 0,01 reais por metro quadrado para sua reposição, e apenas 0,01% da área necessita de um valor superior, contudo, o investimento seria inferior a 14 centavos de reais por metro quadrado.

A quantidade de fertilizantes e corretivos do solo em quilos por ano necessários para repor os nutrientes do solo perdidos anualmente de cloreto de potássio, superfosfato simples e calcário dolomítico é de, respectivamente, 104.466 kg, 13.967 kg e 1.453.877 kg. Diante disso, foi calculado o custo de reposição para cada um desses fertilizantes e corretivos do solo, sendo de 198.878,19 reais para o cloreto de potássio, 18.757,68 reais para o superfosfato simples e 135.210,56 reais para o calcário dolomítico.

Ao observar esses valores, verificou-se que o nutriente do solo que apresenta o maior custo para sua reposição é o potássio, devido principalmente ao custo do fertilizante cloreto de potássio, sendo este custo equivalente a aproximadamente 56,4% do total para reposição dos nutrientes na bacia hidrográfica.

O custo total de reposição é de 352.846,43 reais, partindo do pressuposto que a reparação do dano acontece devido à perda de fertilizantes do solo, que impele a sua reposição por parte dos produtores rurais que necessitam manter a produtividade nas suas respectivas áreas de cultivos.

Pugliesi *et al.* (2011) também utilizaram o método de Custo de Reposição no município de Campinas (SP) para estimar a perda de nutrientes por erosão proveniente do plantio de milho e verificaram que as menores perdas de solo por erosão foram provenientes do sistema de roçada sem mobilização, sendo inferiores a 122 kg/ha, bem como na parcela com manejo sob o sistema de plantio direto. No entanto, as maiores perdas de solo por erosão foram advindas do sistema convencional com arado de discos morro abaixo, com 4.677,89 kg/ha. Isto evidencia

que as boas práticas de manejo e conservação do solo diminuem o impacto sobre este recurso natural e, conseqüentemente, o custo para reposição de nutrientes.

Corroborando com essa afirmação, Zolin *et al.* (2011) analisaram quatorze diferentes cenários de uso e cobertura do solo, verificando os efeitos das práticas conservacionistas sobre a redução de perda de solo em uma bacia hidrográfica com o auxílio de geoprocessamento, e constataram que a expectativa de perda de solo na bacia analisada era de 30,63 Mg/ha/ano, enquanto que, após a adoção de práticas conservacionistas do solo, a expectativa de perda foi de 7,06 Mg/ha/ano. Concluíram que as maiores reduções de perda de solo foram oriundas do cenário de pastagem conservada, indicando assim que a conservação do solo pode ser realizada com a adoção de práticas de manejo conservacionista para a recuperação da pastagem, e não necessariamente dependem do aumento de áreas florestais, e sim da otimização das práticas adotadas.

Não foi considerado o custo da degradação dos corpos hídricos devido ao carreamento desses nutrientes para os corpos de água, porém sabe-se que o Ca e o Mg aumentam a dureza da água, o que confere um sabor desagradável e efeito laxativo; ainda reduzem a formação de espuma de sabão, resultando no aumento do seu consumo, além de provocarem incrustações nas tubulações e, ainda, podem conferir um efeito corrosivo a essa água (ROLOFF, 2006). Hernani *et al.* (2002) relataram em seus estudos que os custos relacionados à poluição difusa, como os relacionados aos sedimentos que aportam os mananciais de abastecimento de água, podem ser superiores a 1 bilhão de dólares ao ano.

Além disso, o P é um dos principais nutrientes que potencializa o efeito da eutrofização dos corpos hídricos, tornando a água imprópria para o consumo humano, e desestabilização da vida aquática presente neste recurso hídrico (PANTANO *et al.*, 2016). Ainda, nesse contexto, trazem prejuízos à população, uma vez que o excesso de nutrientes contribui para a proliferação de algas que podem liberar toxinas na coluna d'água, podendo ainda comprometer a fauna e flora que dependem desse recurso hídrico.

Diversos autores relacionaram os custos concernentes à perda dos solos na óptica da internalização (*on-site*), ou seja, onde os custos são repassados para os produtores em uma escala local, como os custos de reposição dos nutrientes

do solo, e os custos externalizados (*off-site*), onde são rompidas as fronteiras das unidades produtivas, podendo atingir diferentes escalas, como exemplo, os custos relacionados à degradação de corpos hídricos, onde haverá um aumento do custo do tratamento da água que, por sua vez, será repassado à população (DANTAS; MONTEIRO, 2011; DECHEN *et al.*, 2015; HUANG *et al.*, 2015).

Os valores calculados neste estudo tiveram por objetivo verificar a perda desses nutrientes por erosão hídrica no decorrer de um ano, não levando em consideração a tolerância à perda de solos dos diversos tipos de solos que se encontram na área de estudo ou quais práticas poderiam evitar a perda desses nutrientes. Também não foi verificado se as quantidades desses nutrientes no solo se encontram em taxas adequadas para as diversas culturas agrícolas presentes no local, pois este estudo buscou retratar o estado atual do solo e propor a sua sustentabilidade, ou seja, não houve um estudo prévio para analisar e indicar as áreas prioritárias para adição de nutrientes, tampouco para tornar essas áreas aptas para determinadas culturas agrícolas.

O valor perdido anualmente por erosão hídrica do solo tem um valor agregado muito superior ao inventariado neste estudo, pois foram analisados somente quatro nutrientes perdidos e, ainda, não foi levado em consideração o custo de aplicação dos fertilizantes para repô-los no solo que, segundo Pugliesi *et al.* (2011), corresponde a aproximadamente 80% do custo de reposição para um sistema de plantio direto, ou seja, isto resultaria em um aumento significativo do custo total de reposição de nutrientes do solo.

Mesmo não levando em consideração esses outros fatores neste estudo, deve-se ressaltar que foram gerados mapas com a distribuição de valores monetários de reposição de nutrientes perdidos que podem orientar os gestores públicos na elaboração de políticas públicas que visem reduzir a perda desses nutrientes, bem como servir de instrumento para a proposição de um zoneamento ambiental para a área de estudo, e ainda possibilitar que outras bacias hidrográficas repliquem essa metodologia.

4 CONCLUSÃO

Em 10,2% da área da bacia hidrográfica não houve perda de nutrientes, enquanto 89% da área de estudo apresentaram um custo para reposição do K, P, Ca e Mg, a partir dos três fertilizantes utilizados, de até 0,01 reais por m².

O custo total para reposição dos nutrientes na bacia hidrográfica foi de 352.846,43 reais, partindo do pressuposto que a reparação do dano acontece por causa da perda de fertilizantes do solo que obriga os produtores a repô-los, visando manter a produtividade na área.

A espacialização dos custos para reposição permitiu inferir quais áreas merecem maior atenção do poder público quanto à fiscalização e proposição de medidas sustentáveis.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada).

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVACK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KNOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CARNEIRO, J. S. S.; FARIA, A. J. G.; FIDELIS, R. R.; SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; SILVA, R. R. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no Cerrado. **Scientia Agraria**, v. 17, n. 3, p. 38-49, 2016.

DANTAS, K. P.; MONTEIRO, M. S. L. Valoração econômica dos efeitos internos da erosão: impactos da produção de soja no cerrado piauiense. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 4, p. 619-633, 2011.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; CLERICE DE MARIA, I. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.

FAUSTINO, A. B.; RAMOS, F. F.; SILVA, S. M. P. Dinâmica temporal do uso e cobertura do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (RN) com base em sensoriamento remoto e SIG: uma contribuição aos estudos ambientais. **Sociedade e Território**, v. 26, n. 2, p. 18-30, 2014.

GALINDO, F. S.; COSTA SILVA, J.; GERLACH, G. A. X.; FERREIRA, M. M. R.; SOUZA COLOMBO, A.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Matéria seca do feijoeiro e correção da acidez do solo em função de doses e fontes de corretivos. **Agrarian**, v. 10, n. 36, p. 141-151, 2017.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Spatial variability of the physical attributes of soil under pasture. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016.

HANSJÜRGENS, B.; SCHROETER-SCHLAACK, C.; BERGHÖFER, A.; LIENHOOP, N. Justifying social values of nature: economic reasoning beyond self-interested preferences. **Ecosystem Services**, v. 23, p. 9-17, 2017.

HERBOHN, K. A full cost environmental accounting experiment. **Accounting, Organizations and Society**, v. 30, n. 6, p. 519-536, 2005.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; DE MARIA, I. C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. N. A erosão e seu impacto. *In*: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 47-60, 2002.

HUANG, J.; TICHIT, M.; POULOT, M.; DARLY, S.; LI, S.; PETIT, C.; AUBRY, C. Comparative review of multifunctionality and ecosystem services in sustainable agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 149, p. 138-147, 2015.

IEA, Instituto de Economia Agrícola. **Preços Médios Mensais Pagos pela Agricultura**. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 2018. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/bancodedados.html>. Acesso em: 10 abr. 2018.

KLAUER, B.; BARTKOWSKI, B.; MANSTETTEN, R.; PETERSEN, T. Sustainability as Fair Bequest: An Evaluation Challenge. **Ecological Economics**, v. 141, p. 136-143, 2017.

LEAL, F. T.; COUTINHO, E. L. M.; FRANÇA, A. B. C. Decanted phosphate: effects on soil fertility and production of Marandu grass depending on soil acidity. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 12, n. 4, p. 516-525, 2017.

LOURENÇO, R. W.; SILVA, D. C. C.; SALES, J. C. A. Development of a methodology for evaluation of the remaining forest fragments as a management tool and environmental planning. **Ambiência**, v. 10, p. 685-698, 2014.

NOGUEIRA, J. M.; MEDEIROS, A. A.; ARRUDA, F. S. T. Valoração Econômica do Meio Ambiente: Ciência ou Empiricismo? **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 81-115, 2000.

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.

PASINI, M. P. B.; LÚCIO, D. A.; CARGNELUTTI FILHO, A. Modelos de semivariogramas para estimar a densidade populacional da moscadofigo ao longo do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 7, p. 493-505, 2014.

PUGLIESI, A. C. V.; MARINHO, M. D. A.; MARQUES, J. F.; LUCARELLI, J. R. F. Valoração econômica do efeito da erosão em sistemas de manejo do solo empregando o método custo de reposição. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 113-121, 2011.

PULLEMAN, M.; CREAMER, R.; HAMER, U.; HELDER, J.; PELOSI, C.; PERES, G.; RUTGERS, M. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services - an overview of European approaches. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 529-538, 2012.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Eds.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG/UFV, 1999. 359p.

RODRIGUES, W. Valoração econômica dos impactos ambientais de tecnologias de plantio em região de Cerrados. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 43, p. 135-153, 2005.

ROLOFF, T. A. Efeitos da não aplicação do controle de qualidade da água nas indústrias alimentícias. **SaBios: Revista de Saúde e Biologia**, v. 1, n. 1, p. 52-57, 2006.

SALES, J. C. A.; SILVA, D. C. C.; ROMAGNANO, L. F. T.; BERTAGNA, R.; LOURENÇO, R. W. Avaliação do impacto ambiental causado pelas alterações espaço temporal do uso do solo e da cobertura vegetal utilizando o modelo das cadeias de Markov. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 115-124, 2016.

SEADE - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **Informação dos Municípios Paulistas (IMP)**. Disponível em: <http://www.imp.seade.gov.br/>. Acesso em: 14 out. 2017.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 42, p. 72-85, 2017a.

SILVA, M. C. C.; ANDREOTTI, M.; COSTA, N. R.; ROCHA LIMA, C. G.; PARIZ, C. M. Atributos físicos do solo e produtividade do feijoeiro de inverno sob plantio direto no cerrado. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 155-163, 2017b.

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; OLIVEIRA, R. A.; SABONARO, D. Z.; ROSA, A. H. Análise da suscetibilidade do solo a processos erosivos do Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade (PNMCBIO) de Sorocaba (SP). **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 44, p. 169-180, 2018.

TELLES, T. S.; DECHEN, S. C. F.; SOUZA, L. G. A. D.; GUIMARÃES, M. D. F. Valuation and assessment of soil erosion costs. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 3, p. 209-216, 2013.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZOLIN, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MINGOTI, R.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; PAULINO, J.; ORELLANA GONZÁLES, A. M. G. Minimização da erosão em função do tamanho e localização das áreas de floresta no contexto do programa “Conservador das águas”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2157-2166, 2011.

Recebido em: 25/05/2018

Aceito em: 26/09/2019