

VALORAÇÃO  
ECONÔMICO-ECOLÓGICA DE  
SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS  
ILUSTRAÇÃO PRELIMINAR PARA O CASO  
DO SOLO AGRÍCOLA DE ARARAS, SÃO PAULO

*Daniel Caixeta Andrade  
Ranulfo Paiva Sobrinho  
Sérgio Gomes Tôsto*

*Ecosystems provide a wide range of services. Because of the complex ecological processes that interact to produce these services, it is often difficult – and possibly misleading – to isolate and value just one ecosystem service without simultaneously considering other services.<sup>1</sup>*

**T**rata-se aqui de ilustrar preliminarmente uma proposta de valoração de serviços ecossistêmicos à luz da Economia Ecológica, cuja ideia básica é a utilização de ferramentas metodológicas capazes de apreender a complexidade inerente aos serviços ecossistêmicos. O exercício empírico realizado compreende a valoração do serviço de fertilidade natural e de regulação de água prestados pelo solo agrícola do município de Araras, São Paulo, no ano de 2007. Procurou-se mostrar o potencial da ferramenta de modelagem ecológica no processo de valoração, de forma a aproximá-lo da visão da Economia Ecológica.

<sup>1</sup> BARBIER, E. B. & HEAL, G. M. Valuing Ecosystem Services. *The Economists' Voice* 3(3), artigo 2, 2006. Disponível em: <http://www.bepress.com/ev/vol3/iss3/art2>. Acesso: abril de 2009.

Desde muito tempo, os economistas ecológicos dirigem várias críticas a alguns dos métodos utilizados na prática de valoração, mormente ancorados na microeconomia neoclássica, muito embora a grande maioria a aceite (com ressalvas) como ferramenta auxiliar para a gestão ambiental ou mesmo a adote de maneira idêntica. Sobre este último caso, alguns pesquisadores apontam para uma certa incoerência, uma vez que estudiosos do campo da Economia Ecológica criticam a prática corrente da valoração ambiental e ainda assim a reproduzem.

Apesar de as críticas teóricas da Economia Ecológica estarem firmemente consolidadas na literatura econômica heterodoxa e respaldadas por nomes como o de Georgescu-Roegen, Herman Daly, Robert Costanza e Joan Martínez Alier, nota-se que há uma relativa carência em termos de avanços metodológicos que diferenciam efetivamente as análises de cunho neoclássico daquelas econômico-ecológicas. Este estado contribuiu para que economistas ecológicos frequentemente utilizassem o mesmo conjunto de técnicas adotadas por economistas neoclássicos, originando clamores – justificáveis até certo ponto – de que não haveria distinção operacional entre as duas correntes.

É no campo da valoração de serviços ecossistêmicos que tal confusão metodológica se manifesta de maneira mais contundente. Recentemente, porém, esforços de pesquisa vêm sendo direcionados no sentido de delinear de forma clara os princípios norteadores de uma plataforma valorativa coerente com os princípios da Economia Ecológica.<sup>2</sup> Para isso, é preciso invocar o recurso à transdisciplinaridade, cuja operacionalização é áspera e às vezes pouco palatável, mas absolutamente indispensável no tratamento dos fenômenos complexos do mundo real.

Este artigo tem como objetivo ilustrar preliminarmente uma proposta de valoração de serviços ecossistêmicos à luz da Economia Ecológica, cuja ideia básica é a utilização de ferramentas metodológicas capazes de apreender a complexidade inerente aos serviços ecossistêmicos. Inicialmente, aplicou-se um método amplamente utilizado – o custo de reposição de nutrientes – que consegue captar apenas o valor do serviço de fertilidade natural, representado pelo custo de se repor os nutrientes perdidos com a erosão por meio de fertilizantes disponíveis no mercado. Entretanto, embora válida como estimativa do valor do serviço ecossistêmico em questão, deve-se ter em mente que esta não representa a totalidade do valor dos serviços ecossistêmicos ameaçados pela erosão.

<sup>2</sup> ANDRADE, D. C. *Modelagem e valoração de serviços ecossistêmicos: uma contribuição da Economia Ecológica*. Tese de Doutorado – Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, 2010.

São vários os serviços ecossistêmicos fornecidos por um solo em condições ecológicas ideais – capacidade de estocagem de água, mobilização de nutrientes, produção de metabolitos fitossanitários, estruturação adequada ao enraizamento e absorção de nutrientes pela planta. A consideração em si destas variáveis ecossistêmicas, cada uma com parâmetros de sustentabilidade específicos, não é factível sem uma ferramenta de modelagem. Além disso, o tratamento de cada uma delas exige também ferramentas de modelagem de modo a se ter em conta as variações espaciais do fluxo de determinado serviço ecossistêmico, considerando-se a heterogeneidade dos ecossistemas. Mesmo ao se considerar individualmente um serviço, a modelagem é necessária para a simulação dos impactos recebidos sob diferentes hipóteses quanto ao comportamento dos principais vetores de mudança.

Para fins de demonstração do potencial da modelagem e da proposta de valoração econômico-ecológica, além do serviço de fertilidade natural do solo, cujo valor foi obtido pelo tradicional método do custo de reposição de nutrientes, foi utilizado como exemplo ilustrativo o serviço de capacidade de estocagem de água prestado pelos solos do município de Araras, São Paulo, para o ano de 2007, cuja dinâmica foi analisada por meio da aplicação do modelo “número da curva” (*curve number*). A intenção deste exercício ilustrativo é apontar para limitações do processo usual de valoração que desconsidera a interconexão entre funções e serviços ecossistêmicos. Um dos diferenciais da perspectiva econômico-ecológica é a tentativa de incorporar aspectos relacionados à complexidade do capital natural. Uma plataforma valorativa compatível com esta visão deve, portanto, levar em conta critérios ecológicos e sociais, além daqueles estritamente econômicos.

### **Valoração econômica da erosão do solo no município de Araras, São Paulo: a prática usual**

O município de Araras, no estado de São Paulo, possui 98,65% de sua área (aproximadamente 643,40 km<sup>2</sup>) inserida nas bacias hidrográficas dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo.<sup>3</sup> Sua população em 2009 era de cerca de 117.044 habitantes (95,87% residentes na zona urbana e 4,13% na zona rural). O valor de seu PIB gerado no ano de 2006 foi de R\$ 1.167,24 milhões.<sup>4</sup>

A quantificação das perdas físicas de solo por erosão no município foi feita por meio do método conhecido como

<sup>3</sup> Andrade e colaboradores realizaram uma avaliação dos serviços ecossistêmicos prestados por esta bacia hidrográfica. ANDRADE, D. C. *et al.* Dinâmica do uso do solo e valoração de serviços ecossistêmicos: notas de orientação para políticas ambientais. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 25, p. 53-71, 2012.

<sup>4</sup> FUNDAÇÃO SEADE. População total, população urbana e população rural dos municípios paulistas – 2009, 2010. Disponível em: <http://www.seade.gov.br/>. Acesso em janeiro de 2010. IPEADATA. Produto Interno Bruto (PIB) dos municípios paulistas – 1985-2006, 2010. Disponível em: [www.ipeadata.gov.br](http://www.ipeadata.gov.br). Acesso em janeiro de 2010.

<sup>5</sup> BERTONI, J. & LOMBAR-  
DI NETO, F. Conservação  
do solo. São Paulo: Livrosce-  
res, 1985.

Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), adaptado para as condições brasileiras.<sup>5</sup> Os resultados obtidos para as perdas de solo por categoria de uso no município, bem como a configuração do uso da terra em 2007, encontram-se a seguir (tabela 1).

A média de perda de solo no município no ano de 2007 foi de 5,00 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, sendo a cultura de cana-de-açúcar queimada aquela que apresentou maior estimativa de perda, seguida pelas culturas anuais. Vegetação ripária e pastagem apresentaram as menores taxas.

*Tabela 1:* Uso da terra e estimativas de perdas de solo por categoria de uso no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (ha, t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>). Fonte: elaborada pelo autor.

Categorias de uso do solo	Área total (ha)	Perda ponderada (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )
Cafeicultura	328,55	2,88
Cana-de-açúcar crua	25.496,05	3,96
Cana-de-açúcar queimada	9.105,71	14,88
Floresta antropizada	3.013,13	1,02
Corpos d'água	1.254,48	2,98
Cultura anual	1.688,11	14,40
Fruticultura	11.971,42	2,94
Pastagem	1.336,22	1,82
Vegetação ripária	6.702,29	0,11
Média		5,00

O método do custo de reposição de nutrientes (equação 1), cuja ideia básica é a quantificação das perdas de nutrientes em função das taxas de perda de solo, utiliza como parâmetro a equivalência de preços de fertilizantes encontrados no mercado e segue-se com quatro procedimentos: 1) quantificação das perdas de solo por cultura (tabela 1); 2) identificação da quantidade de nutrientes carregada pelo processo erosivo (nitrogênio – N, fósforo – P, potássio – K, cálcio e magnésio – Ca+Mg); 3) conversão da quantidade de nutrientes em equivalentes de fertilizantes necessários para repor a fertilidade do solo (sulfato de amônia, superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário dolomítico); 4) mensuração dos custos de aplicação dos fertilizantes.

$$VEPS = \sum_{i=1}^n (Q_i * P_i) + C_a \quad (1)$$

Em que:  $VEPS$  = valor econômico da perda de solo (serviço de fertilidade natural);  $Q_i$  = quantidade necessária do fertilizante  $i$  para reposição da fertilidade do solo;  $P_i$  = preço de mercado do fertilizante  $i$ ;  $C_a$  = custo de aplicação.

Para a quantificação dos nutrientes carreados junto ao solo perdido, foram utilizados dados contidos em Bellinazzi Jr. *et al.*<sup>6</sup>, que identificaram o teor médio de nutrientes do solo paulista. Em seguida, a perda média de nutrientes pelo processo de erosão foi calculada pela seguinte equação:

$$NS_i = \sum_{i=1}^4 PS * TN_i \quad (2)$$

Em que:  $NS_i$  = quantidade perdida do  $i$ -ésimo nutriente, em toneladas (t);  $PS$  = perda de solo (em t);  $TN_i$  = correspondente à média do teor de nutrientes nos tipos de solo da bacia, em porcentagem.

A tabela 2, em seguida, sintetiza as perdas totais de solo e nutrientes no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007. Percebe-se que os tipos de usos que mais apresentaram perdas totais de solo foram, respectivamente, a cana-de-açúcar queimada, cana-de-açúcar crua, fruticultura e cultura anual. Considerando apenas o sistema cana-de-açúcar (crua e queimada), tem-se que ele é responsável por aproximadamente 75,69% das perdas de solo no município. Trata-se de uma informação ilustrativa da importância do cultivo de cana-de-açúcar na região no que tange aos impactos ambientais causados. Os quatro tipos de uso do solo citados anteriormente são responsáveis pela quase totalidade das perdas ocorridas na área em estudo no ano de 2007 (cerca de 94,13%).

*Tabela 2:* Estimativa de perda total de solo e de nutrientes por categoria de uso do solo no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (em toneladas). Fonte: elaborada pelo autor.

Categorias de uso do solo	Total de Perda de Solo	Perda total de N	Perda total de P	Perda total de K	Perda total de Ca+Mg
Cafeicultura	946,22	0,92	0,02	0,10	0,90
Cana-de-açúcar crua	100.964,36	97,68	2,67	10,15	95,79
Cana-de-açúcar queimada	135.492,96	131,09	3,58	13,63	128,54
Floresta antropizada	3.073,39	2,97	0,08	0,31	2,92
Corpos d'água	3.738,35	3,62	0,10	0,38	3,55
Cultura anual	24.308,78	23,52	0,64	2,44	23,06
Fruticultura	35.195,97	34,05	0,93	3,54	33,39
Pastagem	2.431,92	2,35	0,06	0,24	2,31
Vegetação ripária	737,25	0,71	0,02	0,07	0,70
Total	306.889,22	296,92	8,10	30,87	291,15

<sup>6</sup> BELLINAZZI JUNIOR, R.; BERTONI, D. & LOMBARDI NETO, F. A ocorrência de erosão rural no Estado de São Paulo. In: Simpósio sobre o controle da erosão. 2ª edição, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, 1981. p. 117-137, 1981.

O próximo passo constitui em converter as quantidades perdidas de nutrientes em equivalentes de fertilizantes. Isso foi feito utilizando-se a seguinte equação e o índice de equivalência fornecido por Bellinazzi Jr. *et al.*<sup>7</sup>:

$$QF_i = \sum_{j=1}^4 NS_j * TF_i \quad (3)$$

Em que:  $QF_i$  = quantidade correspondente de fertilizantes (t);  $NS_j$  = teor médio do j-ésimo nutriente perdido nos solos da bacia (t);  $TF_i$  = índice de equivalência entre nutrientes e fertilizantes.

A tabela 3, em seguida, apresenta as quantidades de fertilizantes necessárias para repor a fertilidade perdida no processo de erosão por tipo de uso do solo na região. Com base nos preços de mercado dos fertilizantes considerados (sulfato de amônia, superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário dolomítico)<sup>8</sup> (IEA, 2010)<sup>9</sup> – tabela 4 –, foi possível conhecer o custo monetário de aquisição dos fertilizantes necessários (tabela 5).

*Tabela 3:* Estimativa da quantidade de fertilizantes necessária para reposição dos nutrientes perdidos pelo processo de erosão do solo por categoria de uso no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (em toneladas). Fonte: elaborada pelo autor.

Categorias de uso do solo	Sulfato de amônia	Superfosfato Simples	Cloreto de Potássio	Calcário Dolomítico
Cafeicultura	4,58	0,14	0,16	2,36
Cana-de-açúcar crua	488,42	14,83	17,47	251,92
Cana-de-açúcar queimada	655,45	19,90	23,44	338,07
Floresta antropizada	14,87	0,45	0,53	7,67
Corpos d'água	18,08	0,55	0,65	9,33
Cultura anual	117,59	3,57	4,21	60,65
Fruticultura	170,26	5,17	6,09	87,82
Pastagem	11,76	0,36	0,42	6,07
Vegetação ripária	3,57	0,11	0,13	1,84
Total	1.484,58	45,06	53,09	765,73

*Tabela 4:* Preço médio dos fertilizantes no ano de 2007 (em reais de 2007 por tonelada). Fonte: Instituto de Economia Agrícola (IEA).

Fertilizante	Preço médio <sup>10</sup>
Sulfato de amônia	832,79
Superfosfato simples	650,80
Cloreto de potássio	1.083,67
Calcário dolomítico	31,25

<sup>7</sup> Conforme estes autores, são necessários 5 quilogramas (kg) de sulfato de amônia para repor 1kg de nitrogênio, 5,56kg de superfosfato simples para 1kg de fósforo, 1,72kg de cloreto de potássio para 1kg de potássio e 2,63kg de calcário dolomítico para repor 1kg de cálcio+magnésio.

<sup>8</sup> Corresponde à média dos preços pagos pela agricultura nos meses do ano de 2007.

<sup>9</sup> IEA. Instituto de Economia Agrícola. Preços médios mensais pagos pela agricultura - 2007, 2010. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/index.php>. Acesso em janeiro de 2010.

<sup>10</sup> Média dos preços nos meses do ano de 2007.

**Tabela 5:** Estimativa do custo monetário dos fertilizantes necessários para reposição da fertilidade do solo por categoria de uso no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (em reais de 2007). Fonte: elaborada pelo autor.

Categorias de uso do solo	Sulfato de amônia	Superfosfato Simples	Cloreto de Potássio	Calcário Dolomítico
Cafeicultura	3.811,98	90,42	177,39	73,78
Cana-de-açúcar crua	406.747,20	9.648,48	18.928,02	7.872,49
Cana-de-açúcar queimada	545.849,89	12.948,14	25.401,18	10.564,78
Floresta antropizada	12.381,54	293,70	576,18	239,64
Corpos d'água	15.060,40	357,25	700,84	291,49
Cultura anual	97.930,89	2.323,03	4.557,22	1.895,43
Fruticultura	141.791,27	3.363,44	6.598,27	2.744,33
Pastagem	9.797,29	232,40	455,92	189,62
Vegetação ripária	2.970,11	70,45	138,21	57,49
Total	1.236.340,55	29.327,32	57.533,23	23.929,05

A etapa final de aplicação do método consistiu em agregar ao custo monetário calculado acima os custos de aplicação dos fertilizantes (equação 1). Estes foram retirados do Relatório do Projeto ECOAGRI<sup>11</sup>, que calculou os custos associados de serviços e transportes para aplicação dos fertilizantes por tipo de cobertura do solo na bacia dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, na qual o município de Araras, São Paulo, se insere (R\$ 42,02 por tonelada de sulfato de amônia, superfosfato simples e cloreto de potássio, e R\$ 128,87 por tonelada para o calcário dolomítico – tabela 6<sup>12</sup>). As tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, os custos de reposição de nutrientes total e por hectare (reais de 2007) para as categorias de uso analisadas no município em questão.

**Tabela 6:** Custo de aplicação dos fertilizantes necessários para reposição da fertilidade do solo por categoria de uso no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (em reais de 2007). Fonte: elaborada pelo autor.

Categorias de uso do solo	Sulfato de amônia	Superfosfato Simples	Cloreto de Potássio	Calcário Dolomítico
Cafeicultura	192,34	5,84	6,88	304,26
Cana-de-açúcar crua	20.523,20	622,97	733,95	32.464,87
Cana-de-açúcar queimada	27.541,89	836,02	984,95	43.567,47
Floresta antropizada	624,73	18,96	22,34	988,24
Corpos d'água	759,90	23,07	27,18	1.202,06
Cultura anual	4.941,29	149,99	176,71	7.816,44
Fruticultura	7.154,35	217,17	255,85	11.317,19
Pastagem	494,34	15,01	17,68	781,98
Vegetação ripária	149,86	4,55	5,36	237,06
Total	62.381,91	1.893,57	2.230,89	98.679,57

<sup>11</sup> ECOAGRI. *Diagnóstico Ambiental da Agricultura no estado de São Paulo: Bases para um desenvolvimento rural sustentável*. III Relatório Técnico. Maio de 2006. Disponível em <http://ecoagri.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em janeiro de 2010.

<sup>12</sup> Os valores originais calculados são R\$ 39,00 por tonelada e R\$ 119,61 por tonelada para o ano de 2005, que atualizados para o ano de 2007 (ano da análise) pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) resultam nos valores citados e utilizados nos cálculos do custo total de aplicação de nutrientes. IPEADATA. Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) – 1994-2007, 2010. Disponível em: [www.ipeadata.gov.br](http://www.ipeadata.gov.br). Acesso em janeiro de 2010.

**Tabela 7:** Estimativa do custo de reposição de nutrientes (custos dos fertilizantes + custos de aplicação) por categoria de uso do solo no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (em reais de 2007). Fonte: elaborada pelo autor.

Categorias de uso do solo	Sulfato de amônia	Superfosfato Simples	Cloreto de Potássio	Calcário Dolomítico	Total
Cafeicultura	4.004,32	96,26	184,27	378,04	4.662,89
Cana-de-açúcar crua	427.270,40	10.271,45	19.661,97	40.337,36	497.541,17
Cana-de-açúcar queimada	573.391,78	13.784,16	26.386,13	54.132,26	667.694,32
Floresta antropizada	13.006,27	312,67	598,52	1.227,88	15.145,34
Corpos d'água	15.820,30	380,32	728,01	1.493,55	18.422,18
Cultura anual	102.872,18	2.473,02	4.733,93	9.711,86	119.791,00
Fruticultura	148.945,61	3.580,61	6.854,12	14.061,52	173.441,87
Pastagem	10.291,63	247,41	473,60	971,60	11.984,23
Vegetação ripária	3.119,97	75,00	143,57	294,55	3.633,10
Total	1.298.722,46	31.220,89	59.764,12	122.608,62	1.512.316,09

**Tabela 8:** Estimativa do custo de reposição de nutrientes (custos dos fertilizantes + custos de aplicação) por hectare e por categoria de uso do solo no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007 (em reais de 2007 por hectare). Fonte: elaborada pelo autor.

Tipo de Uso do Solo	Custo de Reposição de Nutrientes (por hectare)
Cafeicultura	14,19
Cana-de-açúcar crua	19,51
Cana-de-açúcar queimada	73,33
Floresta antropizada	5,03
Corpos d'água	14,69
Cultura anual	70,96
Fruticultura	14,49
Pastagem	8,97
Vegetação ripária	0,54
Média	24,63

A tabela 8 resume o custo de reposição de nutrientes por cultura no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007. Percebe-se que as coberturas de cana-de-açúcar queimada e cultura anual apresentam uma estimativa de custo de reposição acima da média apresentada pelo município (R\$ 24,63 por hectare). Com relação à bacia na qual se insere a área estudada, o custo de reposição por hectare corresponde aqui a 62,82% do valor estimado para toda a bacia (R\$ 39,21 por hectare de acordo com o Projeto ECOAGRI).<sup>13</sup>

O método do custo de reposição de nutrientes, cuja aplicação é relativamente simples em função da disponibilidade de informações, apresenta várias limitações. Particular-

<sup>13</sup> O valor original do custo de reposição de nutrientes por hectare para toda a bacia dos rios Mogi-Guaçu e Pardo é de R\$ 36,40 (reais de 2005), que atualizados para 2007 pelo IPCA equivalem a R\$ 39,21 por hectare (IPEA-DATA, Índice de Preços... *Op. cit.*).

mente, as estimativas aqui calculadas não consideram dados empíricos de teor médio de nutrientes e de equivalência de nutrientes-fertilizantes para a região em estudo, o que não corresponde ao cenário ideal para a valoração dos danos da erosão *on site*.

Não obstante, os resultados encontrados podem servir como parâmetro para a tomada de decisão sobre a adoção de práticas de conservação do solo por parte dos produtores rurais do município. Tais estimativas também podem funcionar como medida pedagógica para os produtores no que tange aos custos econômicos provocados pela erosão do solo, deixando-se claro que representam apenas um dos serviços ecossistêmicos gerados pelo solo (fertilidade natural), não estando computados os valores ecológicos e socioculturais.

A despeito de algumas limitações de natureza informacional, deve-se ter em mente algumas considerações de ordem ecológica sobre os impactos da erosão. A interpretação frequente e direta de que o valor monetário da erosão do solo no município de Araras, São Paulo, foi de R\$ 1.512.316,09 (tabela 7) deve ser evitada, pois este valor reflete apenas um aspecto dos impactos ambientais causados (perdas de nutrientes estocados no solo).

### **Avaliando o serviço de regulação de água no município de Araras, São Paulo: o modelo do “número da curva”**

De acordo com Kremen<sup>14</sup>, a mensuração biofísica dos processos ecológicos e do seu papel na geração de serviços ecossistêmicos tem sido negligenciada na maioria das análises. A elucidação das relações sugeridas configura-se como uma agenda de pesquisa importante, pois a falta de informações e as incertezas sobre como os serviços são gerados a partir das funções ecossistêmicas restringem análises mais acuradas sobre a quantificação dos fluxos de serviços ecossistêmicos em função das intervenções antrópicas.

Certamente, a erosão do solo pode afetar vários serviços ecossistêmicos prestados pelo solo. A consideração de todas estas variáveis, resultantes de múltiplas e frequentemente inter-relacionadas funções ecossistêmicas, bem como dos respectivos parâmetros de sustentabilidade com seus limiares não lineares de sustentabilidade, é impossível sem o emprego de uma ferramenta de modelagem. Também é preciso considerar que a ferramenta de modelagem pode ser necessária para tratar apenas de uma variável ecossistê-

<sup>14</sup> KREMEN, C. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 8, p. 468-479, 2005.

mica. Como será demonstrado, este é o caso da variável representada pelo serviço de regulação hídrica (ou capacidade de estocagem de água no solo).

Em se tratando do serviço de regulação de água, este é afetado pela erosão na medida em que esta tem um impacto negativo sobre a estrutura do solo, que se torna mais compactada e, conseqüentemente, com menor capacidade de infiltração e condutividade hidráulica. Como resultado, há um aumento no escoamento superficial (*run-off*).

Farber *et al.*<sup>15</sup> descrevem o serviço de regulação de água simplesmente como “fluxo de água sobre a superfície do planeta”, enquanto que Costanza *et al.*<sup>16</sup> o descrevem como “regulação dos fluxos hidrológicos”. Independente de qual seja sua interpretação semântica, o importante a se notar é que os dois principais benefícios que podem ser derivados a partir desse serviço é a purificação de água e a modulação dos ciclos de seca e enchentes/inundações.<sup>17</sup>

Gately<sup>18</sup> conceitua regulação de água como sendo o processo de abstração hidrológica que pode ser medido universalmente em termos de volume de água regulada. O conceito de escoamento superficial relaciona-se diretamente com a definição apresentada, sendo que, na maioria das vezes, quanto maior este último, maiores serão as descargas em rios/corpos d’água e menores serão as recargas dos aquíferos, reduzindo, portanto, a capacidade de regulação dos fluxos de água. Além disso, o escoamento superficial se relaciona com a capacidade de purificação de água dos ecossistemas, uma vez que, quanto maior o volume de água, maiores serão as quantidades esperadas de poluentes que entram no sistema hídrico.

Por escoamento superficial entende-se o fluxo de água que ocorre quando o volume proveniente de precipitações excede a capacidade de infiltração do solo. Depende de vários fatores físicos e meteorológicos, como tipologia de solo e intensidade das chuvas, e fatores antrópicos, como as características de cobertura dos solos. Sartori afirma que “o escoamento superficial é uma das fases do ciclo hidrológico e seu estudo é de grande importância devido ao dimensionamento de obras de engenharia e manejo agrícola. Sua quantificação é uma tarefa complexa e dependente de vários fatores, os quais são agregados a parâmetros ou variáveis em modelos de chuva-vazão”<sup>19</sup>.

Variações nos fluxos de escoamento superficial em uma determinada área podem ser uma *proxy* para variações no fluxo do serviço de regulação de água. Considera-se que quanto maior a magnitude da primeira variável, menor será

<sup>15</sup> FARBER, S. *et al.* Linking ecology and economics for ecosystem management. *Bio-science*, 56(2)117-129, 2006.

<sup>16</sup> COSTANZA, R. *et al.* The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260, 1997.

<sup>17</sup> Assume-se que a palavra “fluxo”, contida nas duas descrições apresentadas, refere-se apenas aos fluxos de água doce que ocorrem em nível de bacia hidrográfica.

<sup>18</sup> GATELY, M. *Dynamic modeling to inform environmental management: applications in energy resources and ecosystem services*. Community Development and Applied Economics; University of Vermont. Master Thesis, 2008. p. 41.

<sup>19</sup> SARTORI, A. *Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 161 p., 2004.

a quantidade de água regulada. Nesse caso, aumenta-se a quantidade de água perdida, o que gera impactos econômicos, tais como a perda de produtividade das plantas por meio da redução da quantidade de água disponível.

Para estimar o volume de água que foi convertido em escoamento superficial no ano de 2007 no município de Araras, usou-se o modelo conhecido como “número da curva” (*curve number*) ou simplesmente “modelo CN”. Este modelo foi originalmente desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Para maiores detalhes sobre o modelo utilizado, consultar SARTORI, A. *Op. cit.*

O primeiro passo para a utilização do modelo acima descrito foi a estimação dos valores do parâmetro CN (*curve number*) para 9 categorias de uso do solo no município de Araras (tabela 9). Quanto mais próximo do valor 100, menor será a capacidade de infiltração, ou seja, maior será o potencial de escoamento superficial. Deve-se notar que tais valores representam a combinação das características de tipo de solo e tipo de cobertura, obtidas pelos bancos de dados do Instituto Agronômico de Campinas (IAC).

Aos valores de CN, foram agregados os dados de precipitação, os quais foram obtidos junto à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Os 7 eventos pluviométricos utilizados são apresentados na tabela 10, com os respectivos volumes precipitados (em mm).

A partir dos dados de precipitação e das estimativas para o parâmetro CN, foi possível o cálculo do volume de escoamento superficial por categoria de solo no município de Araras, em 2007, em metros cúbicos por hectare/ano (tabela 11<sup>21</sup>).

<sup>21</sup> Foram consideradas somente as atividades agrícolas.

Os resultados mostram-se coerentes com o esperado, já que, em função do tipo de manejo considerado, aquelas culturas com práticas menos adequadas ou que propiciam menor proteção ao solo são as que apresentaram maior volume escoado. É necessário destacar os baixos volumes escoados para a citricultura e cafeicultura, devidos à boa cobertura dos solos nestas duas atividades. Quanto às culturas anuais e pastagem, é de se esperar um alto volume de escoamento, em consequência, principalmente, do intenso uso de maquinaria e pisoteio do gado, respectivamente, o que compromete a capacidade de infiltração do solo. A classe de floresta secundária apresentou um elevado escoamento devido à sua característica de antropização. Entretanto, o potencial de escoamento em matas ciliares é mais reduzido, resultado igualmente esperado.

Tabela 9: Determinação do parâmetro “CN” por categoria de uso do solo no município de Araras, São Paulo.

Uso	Tipo de Cobertura	Tipo de Manejo do Solo	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Cana-de-açúcar crua	Plantio em linha	Contorno e terraceamento com incorporação da palhada no solo	Má	X	X	X	X
			Média	X	X	X	X
			Boa	61	70	77	80
Citricultura	Plantio em linha	Contorno e terraceamento	Má	X	X	X	X
			Média	X	X	X	X
			Boa	32	58	72	79
Cana-de-açúcar queimada	Plantio em linha	Contorno e terraceamento com queima da parte aérea	Má	66	74	80	82
			Média	X	X	X	X
			Boa	X	X	X	X
Mata ciliar	Arbustiva	Sem manejo	Má	X	X	X	X
			Média	X	X	X	X
			Boa	30	48	65	73
Áreas urbanas	Ruas e rodovias pavimentadas com calçadas, guias e galerias de drenagem		Má	98	98	98	98
			Média	X	X	X	X
			Boa	X	X	X	X
Floresta antropizada	Área antropizada	Sem manejo	Má	X	X	X	X
			Média	43	65	76	82
			Boa	X	X	X	X
Cultura Anual – Soja + Milho	Plantio em linha	Curva de nível com resíduos de colheita	Má	60	71	78	81
			Média	X	X	X	X
			Boa	X	X	X	X
Pastagem	Plantio a lanço	Terraceamento	Má	68	79	86	89
			Média	X	X	X	X
			Boa	X	X	X	X
Cafeicultura	Plantio em linha	Curva de nível e terraceamento	Má	X	X	X	X
			Média	32	58	72	79
			Boa	X	X	X	X

A última coluna da tabela acima apresenta o volume total escoado por categoria de uso do solo no município analisado, que é de aproximadamente 81,8 milhões de m<sup>3</sup>. Se tal volume de água perdido pudesse ser valorado, por exemplo, pelo preço da água praticado por alguns Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs), ter-se-ia um indicador da perda econômica propiciada pelo escoamento superficial. No comitê dos rios Piracicaba, Corumbataí e Jundiá, tal preço é R\$ 0,0003/m<sup>3</sup>, o que geraria um total de R\$ 24.531,90. Trata-se de um montante relativamente baixo, devido ao preço simbólico cobrado por unidade de volume

de água. Entretanto, ao se considerar um valor arbitrário de R\$ 10,00/m<sup>3</sup> para uso doméstico, a ser cobrado dos habitantes do município de Araras, a perda econômica total equivale a R\$ 817.697.359,40.

O volume de água regulada é resultado da diferença entre o total precipitado e o total de escoamento superficial ( $L=P - Q$ )<sup>22</sup>. Admitindo-se  $L$  como indicador da provisão do serviço ecossistêmico de regulação de água, os resultados acima podem ser utilizados para demonstrar o estado desse serviço no município, no ano de 2007.

<sup>22</sup>  $P$  é o total de precipitação e  $Q$  representa o total de escoamento superficial (*run-off*).

**Tabela 10:** Dados de precipitação para 7 eventos pluviométricos no município de Araras, São Paulo, no ano de 2007. Fonte: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Evento 1		Evento 2		Evento 3		Evento 4		Evento 5		Evento 6		Evento 7	
Data	Vol.												
31/12/06	2,4	14/01/07	25,0	06/02/07	26,0	15/03/07	14,8	15/04/07	14,8	16/07/07	4,8	23/07/07	0,4
01/01/07	71,4	15/01/07	5,4	07/02/07	0	16/03/07	28,2	16/04/07	28,2	17/07/07	47,0	24/07/07	5,6
02/01/07	12,6	16/01/07	1,0	08/02/07	38,0	17/03/07	56,2	17/04/07	56,2	18/07/07	25,8	25/07/07	58,0
03/01/07	6,6	17/01/07	0	09/02/07	59,8	18/03/07	4,6	18/04/07	4,6	19/07/07	1,4	26/07/07	4,4
04/01/07	27,2	18/01/07	25,4	–	–	19/03/07	53,6	19/04/07	53,6	–	–	–	–
05/01/07	34,0	19/01/07	59,8	–	–	20/03/07	1,4	–	–	–	–	–	–
06/01/07	18,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
07/01/07	9,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
08/01/07	2,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

**Tabela 11:** Estimativa de volume de água escoado por categoria de uso do solo no município de Araras, São Paulo, em 2007. Fonte: elaborada pelo autor

Uso e cobertura	Escoamento de água superficial (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Escoamento total (m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )
Cana-de-açúcar crua	166	42.348.096,68
Cana-de-açúcar queimada	283	25.713.895,44
Citricultura	10	1.141.773,50
Cafeicultura	6	20.121,79
Cultura anual - Soja+milho	215	3.633.536,18
Pastagem	263	3.507.016,56
Mata ciliar	31	2.072.015,39
Floresta secundária	111	3.333.280,40
Total	1.084	81.769.735,94

Para fins ilustrativos e de modelagem espacial, o modelo utilizado (*curve number*) foi apresentado em forma diagramática dentro da plataforma SIMILE (figura 1). A integração com *softwares* de informação georreferenciada permite a visualização do mapa da área de estudo e os resultados de forma espacializada.

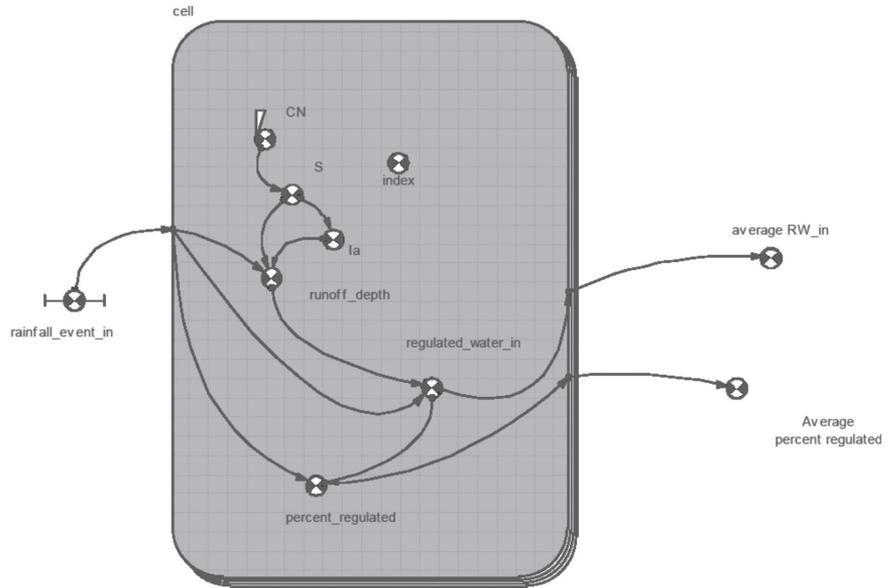


Figura 1: Representação do modelo de Regulação de Água

Para o município de Araras, o diagrama apresentado na figura acima foi construído baseado em células (*cellgrid*), com um total de 104 linhas e 106 colunas, com uma resolução de 300m<sup>2</sup>.<sup>23</sup> O mapa do município foi obtido no Laboratório de Geoprocessamento do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

Os submodelos representados acima equivalem a cada uma das unidades de área, cujos objetos são modelados pelas relações sugeridas no diagrama. É como se o mapa do município fosse dividido em várias quadrículas, sendo o comportamento de cada uma apontado pelo modelo. Os *inputs* do modelo são os dados estimados para o parâmetro CN (tabela 9), calculados com base na combinação das categorias de uso e tipologia do solo, e informações sobre precipitação (tabela 10) (variáveis “*rainfall\_event\_in*” e “*CN*”). Os parâmetros  $I_a$  e  $S$  no diagrama acima representam, respectivamente, a abstração hidrológica inicial e o potencial máximo de retenção, ambos influenciando o volume de escoamento superficial.

<sup>23</sup> O número de unidades de área (linhas e colunas) é definido pelo usuário de acordo com a resolução utilizada. Entretanto, um modelo com alta resolução pode representar um grande esforço computacional, nem sempre disponível.



Figura 2: Representação do parâmetro CN estimado

A figura 2 mostra, de forma espacializada, as estimativas de CN para o município. A área mais clara da figura representa o perímetro urbano de Araras, no qual o CN estimado é próximo a 100, representando uma capacidade mínima de infiltração de água. Áreas com cores mais fortes são aquelas em que o CN estimado é menor, representando uma maior capacidade de infiltração.

Os dados de saída são o volume de água regulada (diferença entre o volume precipitado e o escoado, este último dado pela variável “*runoff-depth*”) e representado pela variável “*regulated-water-in*”. As variáveis “*Average RW-in*” e “*Average percent regulated*” representam, respectivamente, a

média do volume de água regulada em mm e porcentagem, considerando todas as unidades de área do modelo. A figura 3 indica a evolução do volume de água regulada no município de Araras no período de 31 de dezembro de 2006 a 26 de julho de 2007.

Segundo a proposta feita por Hein *et al.*<sup>24</sup>, um processo de valoração dos serviços ecossistêmicos deve compreender cinco etapas, quais sejam: 1) definição do ecossistema ou região onde os serviços ecossistêmicos serão valorados; 2) avaliação biofísica dos serviços ecossistêmicos contemplados; 3) valoração *stricto sensu*; 4) agregação e comparação dos diferentes valores; e 5) consideração das escalas apropriadas do ponto de vista dos *stakeholders*. Em termos de tal proposta, o modelo acima, ao analisar a trajetória do serviço de regulação, deve ser usado se o objetivo é um processo de valoração que considere as alterações dos fluxos de serviços ecossistêmicos.

Os resultados derivados de um modelo como o acima apresentado permitem ao pesquisador maior clareza sobre a “performance” de determinado serviço ecossistêmico. A partir daí, procede-se a valoração *stricto sensu* com base nas informações obtidas pelo procedimento da modelagem.

<sup>24</sup> HEIN, L. *et al.* Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 57(2), 209-228, 2006.

No caso da regulação de água, por exemplo, uma opção para valoração desse serviço seria a estimativa da perda de produtividade em culturas agrícolas devido à perda de água disponível para as plantas, diminuindo sua resistência em períodos de veranico. Pode-se, ainda, estimar o aumento do custo de irrigação para compensar a umidificação natural dos solos.<sup>25</sup>

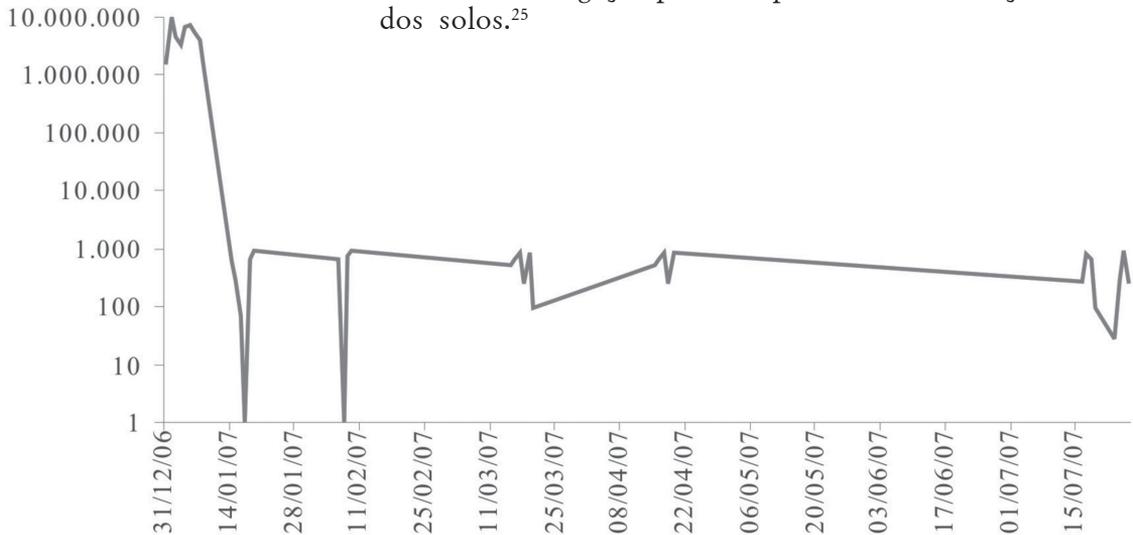


Figura 3: Evolução do volume regulado de água no município de Araras, São Paulo, no período de 26/12/2006 a 26/07/2007.

<sup>25</sup> Pimentel e colaboradores estimaram o custo adicional de irrigação nos EUA de US\$ 30.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, considerando-se uma perda de 75mm de água por hectare e uma taxa de erosão eólica de 17 toneladas (t) por hectare por ano. PIMENTEL, D. *et al.* Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, p. 1.117-1.123, 1995.

Independente da forma selecionada para se valorar o dano associado à redução do fluxo do serviço ecossistêmico analisado, o fato é que um processo de valoração fundamentado em resultados da modelagem torna-se mais crível do ponto de vista dos *stakeholders* envolvidos. Estes também podem auxiliar na valoração dos impactos causados, visto que os modelos permitirão a visualização dos efeitos negativos resultantes, favorecendo a avaliação dos próprios *stakeholders* dos prejuízos causados pelas suas ações. Assim, ao tornarem mais claras as interdependências ecológicas, os modelos podem funcionar como uma fonte de informações integradora para *experts* e não *experts* na avaliação e valoração dos serviços ecossistêmicos. Ademais, a forma como os modelos são construídos e, mesmo modelos simplificados de apenas um serviço ecossistêmico (como o adotado a título de ilustração), torna possível conhecer espacialmente a dinâmica dos serviços ecossistêmicos. Trata-se de uma importante informação, pois pode ser utilizada como forma para subsidiar mecanismos de geração de incentivos para preservação do capital natural.

É importante destacar ainda que a abordagem preliminar aqui utilizada ainda não permitiu explorar integralmente o potencial da ferramenta de modelagem. Na construção de cenários, por exemplo, é possível analisar a trajetória do serviço de regulação de água sob a hipótese de o município analisado cumprir totalmente com a legislação ambiental (20% de averbação de Reservas Legais e manutenção de Áreas de Proteção Permanente). Outra possibilidade seria a junção do modelo acima com modelos de mudanças de uso do solo. Estes últimos, ao analisarem dinamicamente a evolução do uso de solo em determinada área, permitem ao usuário conhecer os impactos sobre os serviços ecossistêmicos advindos da expansão/redução de usos mais ou menos propícios à provisão de serviços ecossistêmicos.

### **Considerações finais**

Este artigo ilustra de que maneira a valoração de serviços ecossistêmicos poderia se aproximar das premissas da Economia Ecológica. Ainda em caráter preliminar, procurou-se demonstrar que a ferramenta da modelagem é importante para a correta avaliação e valoração dos serviços ecossistêmicos. Trata-se de um elemento auxiliar no processo de valoração, permitindo ao seu executor ter melhor compreensão da dinâmica dos serviços ecossistêmicos.

O caminho aqui percorrido foi o de, primeiramente, valorar um serviço ecossistêmico prestado pelo solo (fertilidade natural) por meio da aplicação de um método tradicional, qual seja, o do custo de reposição de nutrientes. Posteriormente, a ilustração da modelagem foi feita para mostrar que apenas a aplicação dos métodos não é suficiente para se avaliar corretamente todos os serviços ecossistêmicos que estão em jogo. Essa insuficiência não se deve exclusivamente ao método do custo de reposição de nutrientes, cuja construção metodológica é considerada adequada para os objetivos a que se propõe. Entretanto, não se pode esquecer que o solo, no exemplo utilizado, provê outros tipos de serviços ecossistêmicos que também são afetados pelo processo de erosão. É o caso do serviço de regulação de água, o qual pode ser mensurado a partir da avaliação da capacidade de retenção de água.

Apesar de o modelo utilizado retratar a dinâmica de apenas um serviço ecossistêmico (regulação de água), a ilustração colocada é uma amostra da potencialidade da utilização de modelos ecológicos no processo de valoração. Estes permitem a visualização espacial dos fenômenos analisados

**Daniel Caixeta Andrade** é economista, doutor em Desenvolvimento Econômico e professor do Instituto de Economia da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.  
[caixetaandrade@ie.ufu.br](mailto:caixetaandrade@ie.ufu.br)

**Ranulfo Paiva Sobrinho** é ecólogo, doutor em Desenvolvimento Econômico e pesquisador do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.  
[ranulfops@yahoo.com.br](mailto:ranulfops@yahoo.com.br)

**Sérgio Gomes Tôsto** é agrônomo, doutor em Desenvolvimento Econômico e pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite.  
[sergio.tosto@embrapa.br](mailto:sergio.tosto@embrapa.br)

e também a integração de modelos mais simples a modelos mais complexos, visando ao entendimento das interdependências ecológicas.

Como uma aproximação do que se considera adequado para um processo de valoração dos serviços ecossistêmicos realmente dinâmico e integrado, a análise aqui feita pode ser considerada como um primeiro esforço no sentido da efetiva junção da modelagem de serviços ecossistêmicos e de sua valoração. Acredita-se ser esta uma importante agenda de pesquisa, a qual deve ser encampada principalmente pelos economistas ecológicos, para os quais deve existir a integração das perspectivas econômica e ecológica para se enfrentar o problema de degradação ambiental. Não se pode deixar de mencionar, ainda, que desdobramentos futuros de pesquisa devem atentar para outros aspectos da valoração econômico-ecológica, como a incorporação dos valores socioculturais dos serviços ecossistêmicos.