



Modelagem Dinâmica do Uso e Cobertura das Terras para o Controle da Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu e Pardo – São Paulo – Brasil

Roelof Boumanns^a, Luís Alberto Ambrósio^b, Ademar Ribeiro Romeiro^c, Eneida Maria Goddi Campos^a, Maria do Carmo Ramos Fasiaben^d, Daniel Caixeta Andrade^c, Sergio Gomes Tôsto^{1,d}, Jener Fernando Leite de Moraes^b, Luiz Armando Steinle Camargo^e, Paulo Antonio de Almeida Sinisgalli^f, Wilson Cabral de Sousa Junior^g

^aGund Institute – University of Vermont

^bInstituto Agrônômico de Campinas – IAC

^cUniversidade Estadual de Campinas – UNICAMP

^dEmpresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

^eConselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq

^fUniversidade de São Paulo – USP

^gInstituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Fecha de recepción: 07/04/2008. Fecha de aceptación: 20/06/2009

Resumo

O objetivo deste artigo é a modelagem da dinâmica do uso e cobertura das terras na Bacia-Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo no Estado de São Paulo. Ele foca a restauração dos serviços ecossistêmicos do controle da erosão. São descritos e analisados a dinâmica do uso e cobertura das terras, focados nas suas principais forças direcionadoras, tais como a legislação ambiental do país e as mudanças nos preços relativos favorecendo uma forte expansão do cultivo da cana-de-açúcar na região. Esta dinâmica tem importante impacto nas taxas de erosão cujas medidas metodológicas são apresentadas com os resultados obtidos. Para simular esta dinâmica foi desenvolvido um modelo seguindo a metodologia do MIMES. O algoritmo desenvolvido modela as mudanças do uso e cobertura das terras baseado principalmente na força das leis ambientais. Espera-se que esta dinâmica contribua para a restauração dos serviços ecossistêmicos da Bacia Hidrográfica.

Palavras chave: Modelo de mudanças do uso das terras; valoração dos serviços ecossistêmicos; controle da erosão de solos; modelo dinâmico integrado multi-escala.

Abstract.

This paper aims at modeling the land use and land cover dynamics in a watershed in São Paulo State, Brazil. It focuses on the potential restoration of the ecosystem service erosion control. The studied watershed is described and its land use and land cover dynamics analyzed, focusing on its main driving forces such as the legislation enforcement and crop relative price changes favoring a very strong expansion of sugar-cane in the region. This dynamics has important impacts on erosion rates whose measurement methodology is presented along with the results obtained. To simulate this dynamics a model was built following MIMES. The algorithms developed deal with a process of forest recovery, modeling land use/land cover changes pushed mainly by legislation enforcement and environmental price movements and measuring their impacts on the erosion process. It is expected that this dynamics would lead to a restoration of the ecosystem service erosion control.

Key words: Modelo de mudanças do uso das terras; valoração dos serviços ecossistêmicos; controle da erosão de solos; modelo dinâmico integrado multi-escala.

JEL Codes: Q02, Q24.

¹ Autor de contacto: sgtosto@gmail.com.



1. Introdução

A cobertura vegetal em Bacias-Hidrográficas fornece muitos serviços ecossistêmicos como estoque de água, controle de erosão, bem como aqueles relativos à proteção da biodiversidade e solo. De acordo com a legislação ambiental brasileira, uma Bacia-Hidrográfica deve ser permanentemente protegida com floresta natural em suas áreas mais vulneráveis tais como aquelas ao longo dos rios (floresta ripária) e área com declive muito acentuado (APP's - Áreas de Preservação Permanente). Nas regiões centrais e sul do país a sua superfície deve ser coberta com 20% de floresta natural como uma reserva legal (LR).

Historicamente esta legislação tem sido largamente desrespeitada. Mais recentemente, entretanto, em alguns Estados os governos locais tem obtido mais força para fazer cumprir a lei, auxiliados pela conscientização da população e pelo medo dos fazendeiros das restrições ambientais impostas pelos potenciais compradores estrangeiros de suas commodities. Este é especialmente o caso do Estado de São Paulo onde está localizada a Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu-Pardo está localizada.

Este trabalho contribui para a modelagem da dinâmica do uso e cobertura das terras desde 1988, as quais têm sido modificadas principalmente pela força das leis ambientais e pelo movimento dos preços que favorecem as produções de cana-de-açúcar. Esta dinâmica tem importante impacto nas taxas de erosão cuja metodologia utilizada para quantificá-la é apresentada ao longo do trabalho.

Para simular a dinâmica descrita acima foi construído um modelo seguindo a estrutura do MIMES². O algoritmo desenvolvido de

² Mimes (Multi-Scale Integrated Models of Ecosystem Services of Earth's Systems) é um conjunto de modelos dinâmicos ecológicos-econômicos que ajudam no entendimento da complexidade dos ecossistemas. MIMES fornece informações da estrutura dinâmica dos ecossistemas, refletindo os serviços ecossistêmicos gerados pelas funções ecossistêmicas. As metas do MIMES são para ajudar os pesquisadores realizarem diagnósticos mais acurados do impacto humano nas atividades e fornecer um valor mais apurado dos serviços ecossistêmicos. O MIMES pode ser útil para os tomadores de decisões sobre o

acordo com o processo de cobertura florestal, modelando as mudanças do uso de cobertura das terras impulsionado principalmente pela força da legislação e os movimentos dos preços, medindo seus impactos no processo de erosão. É esperado que esta dinâmica deva liderar a restauração dos serviços ecossistêmicos do controle da erosão, de acordo com cinco tipos de uso e cobertura (agricultura, áreas urbanas, corpos d'água, floresta e pastagem) e calculados suas respectivas perdas de solos potenciais.

Finalmente, o MIMES é apresentado como uma ferramenta para extrair informações de serviços ecossistêmicos e as principais conclusões deste artigo.

2. Serviços Ecossistêmicos do Solo

As interações entre os elementos físico, químico e biológico fornecem uma variedade de bens e serviços essenciais ao bem estar humano (Costanza et al. 1997; Daily 1997; Naeem et al. 1999; de Groot et al. 2002; Millennium Ecosystem Assessment 2005). As funções dos serviços ecossistêmicos não são levadas em conta enquanto se analisa e quantifica os impactos de atividades econômicas no meio ambiente. Isto é devido a uma lacuna existente quanto ao entendimento das interações ecossistêmicas que resultam nas funções ecossistêmicas dinâmicas.

Os impactos ambientais causados pelas práticas agrícolas variam muito dependendo do modelo tecnológico adotado. Nas "práticas de agricultura moderna" as variedades das plantas são selecionadas (agora por engenharia genética) para responder a determinadas condições criadas pelo uso intensivo de agroquímicos. Os serviços ecossistêmicos (do solo em floresta) que poderia ser útil para a produção agrícola são desperdiçados e/ou degradados.

Um solo bem conservado possui certa quantidade de propriedades que se traduz

gerenciamento ambiental. Para informações adicionais veja no site <http://www.uvm.edu/giee/mimes/links.html>. A estrutura do MIMES com todos os seus sub-modelos pode ser vistos em [sourceforge.net \(http:// sourceforge.net/projects/mimes\)](http://sourceforge.net/projects/mimes).



nos serviços ecossistêmicos muito úteis para aumentar a produção agrícola: estoque de água, produção de nutriente, controle de pragas e resiliência. De acordo com Costanza et al. (1997) uma importante função ecossistêmica do controle da erosão e retenção de sedimentos é a retenção do solo dentro de um ecossistema, prevenindo perda de nutrientes quando este solo está sujeito a diferentes processos de remoção.

O solo é um recurso natural fundamental para a produção agrícola graças a um conjunto de propriedades que permitem que ofereça sustentação às plantas e lhes dê condições necessárias de desenvolvimento. Trata-se de um material poroso, que possibilita a penetração de raízes e supre as necessidades das plantas em água e em nutrientes minerais. O solo tem um papel importante no meio ambiente, onde funciona como integrador ambiental e reator, acumulando energia solar na forma de matéria orgânica, reciclando água, nutrientes e outros elementos e alterando compostos químicos. Desse modo, o solo tem importante função ecológica, influenciando de forma positiva a qualidade ambiental e o funcionamento global da biosfera.

Por causa dessas funções insubstituíveis, no contexto da crescente preocupação ambiental, não se pode mais considerá-lo sem que se leve em conta a preservação ambiental. Assim, a qualidade do solo para a agricultura deve incluir não só as condições necessárias à produção de alimentos e fibras, mas também as de seu funcionamento como interface com o ambiente.

Ampliam-se com isso o conceito de solo, que deixa de ser considerado apenas do ponto de vista agrícola, ao qual é acrescentado o papel vital que exerce em processos terrestres fundamentais. O uso adequado do solo deve ser encarado, portanto, sob uma óptica ambiental mais ampla, com o estabelecimento de limites que definam até que ponto a atividade humana pode afetar sua capacidade de funcionar como integrador ambiental.

O solo deve ser usado tendo em vista seus limites, ou capacidade de uso, mesmo

considerando que, quando submetido a estresses ambientais, tem a capacidade inerente de resiliência, ou certa elasticidade e poder de recuperação, pois funciona como um tampão ambiental para água, ar, nutrientes e produtos químicos. A avaliação da qualidade do solo deve levar em conta o interesse tanto de produzir como de manter suas funções ecológicas, com a identificação dos limites de atributos que caracterizem, de um lado, as condições desejáveis e, de outro, a ruptura das funções ecológicas ou de produção (Doran & Parkin 1996).

3. Descrição da Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu/Pardo

A Bacia Hidrográfica focada neste estudo, está localizada, na região agrícola mais importante do Estado de São Paulo, é formada por dois rios (Mogi-Guaçu/Pardo), tem uma área de drenagem aproximada de 50.000 km² (Figura 1), sendo que a maior parte de seu território está localizada no Estado de São Paulo (Região Sudeste do Brasil), com 3.000.000 de hectares estendido por 95 municípios. Seu processo de colonização ocorreu na metade do século XVIII, quando a produção de café teve início e causou grande desmatamento na região. Após 1920, a agricultura (cana-de-açúcar, soja, entre outras) e a pastagem substituíram a produção de café e em 1970, a descentralização industrial e o "Pró-álcool 2"³ intensificou a implementação do agribusiness. Originalmente estes biomas eram savana (Cerrado) e Floresta de Mata Atlântica.

³ Após o primeiro choque de petróleo nos inícios dos anos 70 o Governo brasileiro desenvolveu um plano de substituição do álcool da cana-de-açúcar por gasolina.



Figura 1. Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu/Pardo



Fonte: Projeto EcoAgri (2006)

Nestas regiões as chuvas se concentram entre outubro e março (80%), com precipitações anuais variando entre 1.200 e 1.500 mm. A temperatura varia de 13°C (taxa mínima) há 24.5°C. A área apresenta quatro províncias geomorfológica (Platô Atlântico, Depressão, Encosta Basáltica e Platô Oeste) o quais representam importantes variações de relevo e de solo. A Depressão é uma área de descarga para o mais importante Aqüífero da América do Sul (Aqüífero Guarani). Na bacia hidrográfica as florestas nativas estão reduzidas a fragmentos, com a maior porção de áreas de preservação inseridas em reservas e parques estaduais. Muitos desses fragmentos situados fora dessas áreas de proteção ainda estão sob pressão de atividades econômicas: a área coberta por florestas de savana (cerrado) de uma importante região da Bacia Hidrográfica Ribeirão Preto foi reduzida em 66% entre 1971-1973 e 1990-1992 (SMA/IF1993).

Além de sua diversidade natural a Bacia Hidrográfica, a qual cobre 60% da região nordeste da área do Estado de São Paulo, também apresenta uma importante diversidade socioeconômica, em termos de sistemas agrícolas e topologias dos produtores. Neste sentido, esta área é muito importante como um estudo de caso para uma avaliação ambiental e agrícola, que também pode ser representativa de outras regiões do estado. Além disso, econômica e tecnologicamente é a mais avançada região agrícola do país, liderando a lista de produtividades para as principais atividades

(cana-de-açúcar, fruticultura e café), e com isso gerando um produto nacional bruto de cerca de US\$25 bilhões de dólares.

Na Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu/Pardo as perdas e restaurações de seus serviços ecossistêmicos (principalmente controle da erosão) dependem da dinâmica do uso cobertura do uso da terra e da força da lei.

3.1 Dinâmica do Uso e Cobertura das Terras

A análise da dinâmica e uso e cobertura das terras da Bacia Hidrográfica foram feitas utilizando imagens de satélite datadas de 1987/1988 e 2002/2003. Esta dinâmica é caracterizada por uma expansão da cana-de-açúcar sobre outras áreas de produção principalmente sobre as pastagens bem como uma frágil expansão de áreas de florestas, pode ser explicadas por duas variáveis: força da lei e preços agrícolas, as outras desempenham um papel menor.

3.1.1 Aspecto Legal

De acordo com a legislação ambiental brasileira, as bacias hidrográficas devem ter três tipos de uso e cobertura da terra: (i) Áreas de Proteção Permanente (APP's) áreas intactas para proteger os serviços ecossistêmicos, determinado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente); (ii) Reserva Legal (RL) 20% de cada propriedade deve ter a RL para uso sustentável. Isso não inclui áreas urbanas, corpos d' água e áreas florestadas; e (iii) outras áreas com diferentes



tipos de uso todas as quais são supostamente para o uso e conservação dos sistemas produtivos.

Em áreas designadas para serem permanentemente protegidas (APP's), a vegetação natural deverá ser conservada para fornecer vários serviços ecossistêmicos, água de boa qualidade, proteção do solo, etc. O artigo 2º da Lei nº 4.771 (Código Florestal de 1965), define e determina o tipo e tamanho das áreas para serem consideradas como proteção permanente.

Historicamente esta legislação tem sido largamente desrespeitada das Bacias Hidrográficas dos Rios Mogi-Guaçú/Pardo sendo pouco respeitada pelos fazendeiros da região. Entretanto, recentemente, o poder da força do Estado de São Paulo tem aumentado, parcialmente devido à consciência ecológica da população e pelo medo dos fazendeiros de barreiras ambientais no comércio das commodities agrícolas. Também o novo programa criado pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente para restaurar as matas ripárias está sendo bem recebido. Na escala do governo federal há uma discussão de política nacional de incentivos econômicos para APP's, ainda em andamento.

Além das APP's, o Código Florestal determina que todo estabelecimento agrícola deve ter uma porção de sua área coberta com floresta natural a qual pode chegar a 80% nas regiões amazônicas e 20% na maioria das regiões do País. Desde 2001 os fazendeiros tem 30 anos para restaurar as reservas legais com vegetação natural, plantando a cada três (3) anos 1/10 da área total designada, seguindo um projeto aprovado pelo IBAMA ou pelo Departamento Estadual de Proteção dos Recursos Naturais.

Como evidência da nova capacidade de força do Estado de São Paulo, nos contratos do mercado de terras agora constam, obrigatoriamente, informações sobre a restauração de reservas legais. Procedimentos judiciais estão sendo instituídos após a inspeção policial ou ainda após denúncias anônimas sobre desrespeito

as leis pelos fazendeiros, forçando-os a fazer acordos judiciais como para restaurar APP's e/ou RL. Em resumo, nos últimos anos a não obediência às leis implica num real risco de crescimento de prejuízos financeiros e ainda o risco de expropriação da propriedade.

Também o abandono de terras menos sustentáveis para a produção comercial tem contribuído para explicar o aumento de áreas reflorestadas, mas um fazendeiro respeitador das leis ambientais é o fator chave, especialmente produtores de cana-de-açúcar aos quais tem mais receio de sanções comerciais baseados em critérios ambientais. Os produtores do Estado de São Paulo agora consideram factível manter ou recuperar as áreas de proteção ambiental, especialmente as florestas ripárias. Para os 20% da Reserva legal, eles estão negociando para compensar reflorestando áreas de menos valor agrícola. Em termos da dinâmica do uso e cobertura das terras da Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçú/ Pardo este processo de negociação pode significar um menor incremento na superfície coberta com floresta natural pois esta região concentra as terras de maior valor agrícola do Estado.

3.1.2. Aspectos de Mercado

Nas últimas décadas a agricultura em São Paulo teve um processo de modernização muito rápido impulsionado pelo agribusiness. A Tabela 1 sumariza esta situação.



Tabela 1. Uso e cobertura das terras na Bacia-hidrográfica dos Rios Mogi Guaçu/Pardo 1987/1988 – 2002/2003

	Área 1988		Área 2002	
	Superfície (ha)	%	Superfície (ha)	%
AGRICULTURA E PASTAGEM	2,418,297	79.39	2,395,867	78.65
Pastagem	751,617	24.67	391,730	12.86
Cana-de-Açúcar	760,921	24.98	1,535,058	50.39
Culturas anuais	529,537	17.38	76,794	2.52
Fruticultura	228,621	7.51	232,393	7.63
Floresta	104,912	3.44	101,123	3.32
Culturas Anuais Irrigadas	16,194	0.53	33,098	1.09
Heveicultura	175	0.01	3,141	0.10
Cafeicultura	26,319	0.86	22,529	0.74
Áreas modificadas/Humanos	59,025	1.94	79,398	2.61
Áreas Urbanas	55,411	1.82	74,352	2.44
Outros	2,971	0.10	4,390	0.14
Área Exploração Mineral	643	0.02	656	0.02
VEGETAÇÃO NATURAL	519,933	17.07	521,636	17.12
Vegetação Ripária	311,858	10.24	318,701	10.46
Vegetação Natural	208,075	6.83	202,935	6.66
Corpos d'água	48,910	1.61	49,264	1.62
Corpos d'água	48,910	1.61	49,264	1.62
TOTAL	3,046,165	100.00	3,046,165	100.00

Fonte: Projeto EcoAgri (2006)

Verifica-se inicialmente um ligeiro aumento da superfície com vegetação natural e água. Tal como as zonas urbanas elas tem apresentado um importante aumento de superfície mas, com um impacto menor na dinâmica de substituição. A maior mudança, entretanto, diz respeito à dinâmica de substituição da produção agrícola: a produção de culturas anuais e pastagens recuaram diante da expansão da cana-de-açúcar. A superfície de pastagem foi reduzida em quase 48% e àquelas de cultivos anuais diminuíram mais do que 85% entre 1987/1988 e 2002/2003. Enquanto isto, a superfície de cana-de-açúcar mais que dobrou, chegando a cerca de 1.535.058 há, o qual representa 50% da área da Bacia-Hidrográfica. As culturas do café e fruticultura (principalmente a laranja) apresentaram redução e aumento. As áreas irrigadas (pivô central) expandiram mais de 104%, mas representa uma pequena parte (cerca de 1%) da área total da Bacia Hidrográfica.

A força que explica a forte expansão da produção da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, o qual concentra 62% da produção nacional, é composta por fatores de demanda e oferta. No lado da demanda o mercado de etanol, nacional e internacional, está expandindo rapidamente. No Brasil os carros flex definitivamente contribuíram para diminuir o medo dos consumidores devido aos problemas de estocagem apresentado pelo Pró-álcool. No mercado internacional há uma preocupação sobre as mudanças climáticas combinado com uma sensata estratégia de redução da dependência do petróleo, especialmente do Oriente Médio. Assim, as pesquisas com o etanol, como alternativa tem-se tornado uma das mais promissoras no curto prazo. A exportação de álcool no ano de 2000 foi de 2,7 bilhões de litros e espera-se chegar a um total de sete bilhões de litros até 2010 (Barros 2005). Do lado da oferta, há um crescimento técnico



muito rápido da produtividade no campo, bem como no processamento industrial.

A expansão da cana-de-açúcar tem inflacionado os preços pela terra. Quartaroli et al. (2006) tem mostrado que a expansão da cana-de-açúcar ocorre principalmente sobre a produção de soja, milho, feijão, amendoim, sorgo e mandioca. Algumas destas culturas estão entre as mais beneficiadas por pesquisas científicas e suas produtividades tem aumentado nos últimos 10 anos (Barros et al. 2002; Gonçalves et al. 2007). Porém, como mostrado por Zafalon (2007), elas têm dificuldades em competir com a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

As mudanças descritas na cobertura e uso do solo tem impactos nos serviços ecossistêmicos da bacia hidrográfica. A expansão da cana-de-açúcar sobre superfície de culturas anuais, por exemplo, reduz a erosão, pois culturas semi-perenes como a cana-de-açúcar tem uma cobertura melhor e protege mais o solo. Por outro lado, o mesmo efeito dessa expansão sobre a superfície de pastagem é menos evidente pois depende do manejo de produção adotado.

3.2 Erosão de solos na Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo

O método empregado para medir as perdas de solos na Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo foi baseada no método paramétrico da Equação universal de perdas de Solo – USLE – (Wischmeier & Smith 1978) adaptado para as condições brasileiras (Bertoni & Lombardi Neto 1985). Este método permite calcular a média potencial das perdas de solos em uma área (uma bacia hidrográfica, sub Bacia hidrográfica ou mesmo a área agrícola de um Município), baseado em séries históricas confiáveis de relevo, chuva (série de 20 anos), tipo de solos e manejo das culturas.

O modelo consiste de um modelo multiplicativo, pelo qual a perda média anual de solo é obtida pelo produto de seis fatores determinantes, de acordo com a equação.

$$A = R * K * LS * C * P$$

sendo:

A = perda anual de solo em Mg.ha-1.ano-1

R = fator erosividade da precipitação e da enxurrada, em MJ.mm.ha-1.h-1.ano-1

K = fator erodibilidade do solo, definido pela intensidade de erosão por unidade de índice de erosão da chuva, para um solo específico mantido continuamente sem cobertura, mas sofrendo as operações normais, em um declive de 9% e comprimento de rampa de 25m, em Mg.h-1.MJ.mm-1.

L = fator comprimento de rampa, definido pela relação de perdas de solo entre uma encosta com um comprimento qualquer e uma encosta com 25m de comprimento, para o mesmo solo e grau de inclinação, adimensional;

S = fator grau de declividade, definido pela reação de perdas de solo entre um terreno com uma declividade qualquer e um terreno com declividade de 9%, para o mesmo solo e comprimento de rampa, adimensional;

O fator topográfico LS, reúne os fatores declividade e comprimento de rampa, sendo calculado através da equação desenvolvida por Bertoni e Lombardi Neto (1992):

$$LS = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18}$$

C = fator de cobertura e manejo da cultura, definido pela relação de perdas de solo entre um terreno cultivado e dadas condições e um terreno mantido continuamente descoberto, em condições semelhantes àquelas em que o fator K é avaliado, adimensional.

P = fator relacionado à prática de controle de erosão, definido pela relação de perdas de solo entre um terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro abaixo, adimensional.

A Tabela 2 mostra as taxas de erosão na Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e



Pardo estimada por este método das principais culturas, pastagens e floresta.

Tabela 2. Potencial Média de Perdas de solos na Bacia-Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo para o ano de 2002

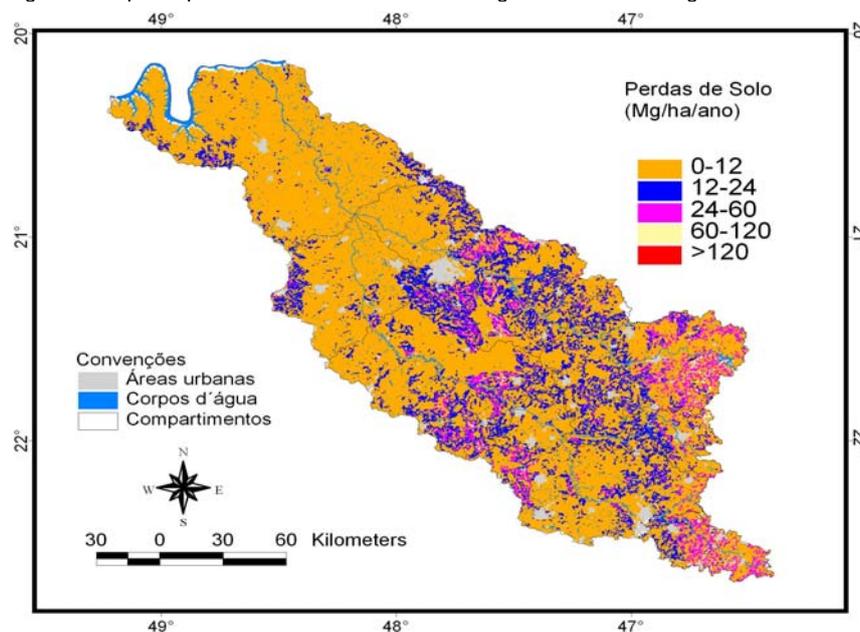
Use	Perdas de solos (ton.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) (sem terraceamento)	Perdas de solos (ton.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) (com terraceamento)
Café	54.10	5.85
Culturas anuais	26.70	17.86
Cana-de-Açúcar	26.60	9.84
Fruticultura	15.20	3.05
Floresta	13.60	3.53
Pastagem	10.50	9.03
Floresta	0.58	0.58
Heveicultura	6.25	4.91
Floresta Ripária	0.35	0.35

Fonte: Projeto EcoAgri (2006)

A produção de café foi responsável pela maior perda de solos representando uma perda de 54.1 t.ha⁻¹.ano⁻¹ seguido de culturas anuais, cana-de-açúcar e fruticultura. Entretanto, sobre terraceamento, este cenário muda radicalmente, nas quais o café e culturas anuais mudam de posição, e as culturas anuais tornam-se as principais culturas que mais causam perdas de solo. Quando produzido em sistema de produção

conservacionista, a produção de cana-de-açúcar é uma das atividades que menos causam problemas de erosão na Bacia-Hidrográfica. A Figura 2 abaixo mostra a distribuição da perdas de solos na bacia-Hidrográfica.

Figura 2. Mapa de perdas de solos na Bacia –Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu - Pardo



Fonte: Projeto EcoAgri (2006)



4. Modelagem da Restauração dos Serviços Ecosistêmicos: Descrição Conceitual

O modelo construído simula a dinâmica do uso e cobertura das terras na Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçú e Pardo, sob as forças das leis ambientais. Isto significa que o algoritmo desenvolvido está de acordo com um processo de recobertura vegetal, modelando as mudanças do uso e cobertura das terras que serão resultados das forças das leis que existem e a medida de seu impacto nos serviços ecosistêmicos (controle da erosão do solo).

O modelo tem cinco tipos de uso e cobertura (agricultura, expansão de áreas urbanas, corpos d'água, floresta e pastagem) para os quais se quantifico o potencial de perdas de solos. Implementado no SIMILE⁴, isto é, o modelo está estruturado em sub-modelos e executado com um ano de diferença. A Figura 3 mostra o diagrama do modelo em anexo.

O sub-modelo "Uso e cobertura das terras" contém cinco (um para cada tipo de uso e cobertura); a variável de estado "Área" que indica a extensão em ha de acordo com seus diferentes usos e cobertura para cada período de tempo, começando em 1988 (Uso e cobertura das terras). O fluxo "Mudança de área" determina a mudança de "área" resultante da dinâmica de substituição do uso e cobertura das terras. As taxas de substituição de áreas são reguladas por duas variáveis totalizadoras ("potencial de perda de área" e "potencial de área ganha") e as dinâmicas de interações são modeladas associando o sub-modelo "Uso e cobertura das terras".

As variáveis, "Potencial de área perdida" e "Potencial de área ganha", são influenciadas pela variável "Taxa de conversão do uso e cobertura das terras", a qual é dependente dos parâmetros fixos exógenos do sub-modelo "Agricultura" ("Tecnologia de produção agrícola"), "População urbana" e ações do Governo (emprego, educação, etc.).

⁴ Simulistic – Ltda (versão 4.8)

As equações completas e outros arquivos podem ser vistos em <http://mimes.svn.source.net/viewvc/mimes/branches/brazil>

Na simulação do modelo os parâmetros fixos "Área potencial de APP", "Área potencial de Reserva Legal" e "Área de Preservação Permanente" definem o uso legal das terras obrigatórias (Áreas de reserva Legal e Áreas de Proteção Permanente que são áreas protegidas pela legislação).

A área total da Bacia-hidrográfica dos Rios Mogi Guaçú/Pardo foi dividida em 7.826 células (locations) com uma área de 400 ha. Estas locações são diferenciadas de acordo com a proporção de uso e cobertura e seus respectivos parâmetros fixos "Taxa de Erosão Potencial de uso e cobertura das terras". As rotinas descritas acima são simuladas para cada unidade de área no que diz respeito à totalidade das variáveis gerais que calculam o potencial de perdas de solos para cada tipo de uso e cobertura e para a totalidade da Bacia hidrográfica.

O modelo também contém variáveis de controle como para limitar o tamanho das locações e variáveis auxiliares que auxiliam a calibrar os valores da simulação com os dados reais de 2002. Após a calibração, o modelo pode ser usado como referência para estabelecer cenários com a legislação ambiental comparando com cenários sem a aplicação das leis ambientais. As informações que foram utilizadas no modelo inclui dados georreferenciados em GIS (mapas de uso e cobertura das terras), séries temporais (renda, população rural e urbana) e outras variáveis estimadas como taxa de erosão de solo e perda de solo.

5. Discussão e conclusões

A estrutura do MIMES mostra o potencial de modelagem de serviços ecosistêmicos integrando sub-modelos dinâmicos multi-escalar. Ele permite a extração das interações entre serviços ecosistêmicos/funções e bem estar humano, ajudando globalmente aos tomadores de decisões estimar e entender o real valor dos serviços ecosistêmicos. Também proporciona uma modelagem regional flexível suficiente para descrever



estruturas e processos específicos de cada região.

Neste caso, o estudo/modelagem do diagrama regional demonstra claramente o complexo relacionamento entre sub-modelos e entre variáveis de estado, variáveis auxiliares e parâmetros fixados. As classes de superfície usado no MIMES inclui todas as superfícies relevantes dentro de estudo de Bacia-Hidrográfica. Entretanto, para responder a demandas regionais, estas superfícies podem ser desagregadas em sub-classes (dependendo da disponibilidade de dados), como gerar informações mais detalhadas. Por exemplo, percebemos que a classe agricultura poderia ser dividida em culturas anuais. Café, culturas irrigadas, floresta, heveicultura, cana-de-açúcar e então modelar para simular mudanças entre diferentes tipos de produção e seus impactos individuais no controle da erosão do solo, assim como a classe "Floresta", medindo o impacto dos serviços ecossistêmicos por diferentes tipos de florestas tais como: primária, secundária, floresta ripária e savana (cerrado), etc.

Este modelo apresenta um algoritmo que permite simular a dinâmica da substituição do uso e cobertura das terras numa escala global. Isso pode ser conectado para outros modelos como para extrair eficientemente o relacionamento entre uso das terras e outras variáveis de estado da Antroposfera, Hidrosfera, Litosfera, Biosfera e Atmosfera incluídos no MIMES.

O modelo construído foi apresentado na II Conferência Sobre Serviços Ecossistêmicos: Modelagem Dinâmica de Serviços Ecossistêmicos para Promover Conservação, realizado na Universidade de Vermont, em julho de 2007. Este modelo agora está pronto para ser calibrado e validado.

MIMES fornece informação econômica e biofísica que são essenciais para valoração de serviços ecossistêmicos sendo uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento de Pagamento de Serviços Ecossistêmicos (PSE). Nesse estudo de caso, o planejamento de PSE pode ajudar a forçar as mudanças no uso e cobertura das terras na

Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçu/Pardo. Alguns princípios recomendados pela Declaração de Heredia (DH) em PSE⁵ podem ser reconhecidos e/ou identificados neste estudo de caso.

Seguem as possibilidades de implementação da Declaração de Heredia em estudos em Bacias Hidrográficas: i) medida – este modelo é uma pequena contribuição para desenvolver/melhorar os métodos de medidas e valoração dos serviços ecossistêmicos; ii) facilidade – este modelo permite facilmente incluir uma lista enorme de serviços ecossistêmicos relacionados a dinâmica do uso e cobertura das terras. Ele também pode ser integrado a outros modelos como modelos de hidrologia; iii) participação na implementação de políticas públicas – A política ambiental do Estado de São Paulo criou instituições de coordenação e participação integradas como: Coordenação estadual dos Recursos Hídricos e Comitês de Bacias Hidrográficas. Também a sociedade civil tem um papel importante forçando o cumprimento da legislação e conservação dos serviços ecossistêmicos. Programas ambientais como o de restauração de florestas ripárias é desenvolvido em acordo com o Governo Federal.

Finalmente, a estrutura do MIMES, incluindo este modelo foi apresentado e discutido na Câmara Técnica do Comitê de Bacias Hidrográfica e seu potencial foi reconhecido como uma ferramenta capaz de ajudar no entendimento das interações dinâmicas em Bacias Hidrográficas e uma variedade de projetos de uso sustentável na região.

REFERÊNCIAS

- Barros, C. J. 2005. O lado azedo da cana. Repórter Brasil – Agência de notícias. Available in: <http://www.reporterbrasil.com.br/exibe.php?id=517>. (access in: 13/04/2007).
- Barros, J. R. M., Rizzieri, J. A. B. & P. Picchetti. 2002. Effects of agricultural research on the consumer. In:

⁵ Declaração de Propósitos, que afirma e ratifica o nosso esforço e dedicação para avançar na aplicação de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos como uma solução para os problemas ambientais.



- Barbosa, M. T. L. Impacts of agricultural sector technological change on Brazilian economy. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.
- Bertoni, J. & F. Lombardi Neto. 1985. Conservação do Solo. São Paulo: Livrocetes.
- Brasil. Código Florestal. Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965 – Institui o Novo Código (com alterações introduzidas pela Lei n. 7.803, de 18 de julho de 1989 que altera a redação da Lei n. 4.771 de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis n.s 6.535, de 15 de junho de 1978 e 7.511, de 7 de julho de 1986). Diário Oficial da União, Brasília, DF (1965). Disponível em: <http://legislação.planalto.gov.br/legislação.nsf>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P. & M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* Vol. 387, No.15: 253-260.
- Daily, G. C., 1997. Introduction: What are ecosystem services?. In: Daily, G. C. (ed) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, D.C.: Island Press
- De Groot, R. S., Wilson, M. A. & R. M. J. Boumanns. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* Vol. 41, No. 3: 393-408.
- Doran, J. W. & T. B. Parkin. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J. W. & A. J. Jones (eds). 1996. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, Madison.
- EcoAgri Projetc. 2006. Diagnóstico ambiental da agricultura no Estado de São Paulo: bases para um desenvolvimento rural sustentável. Available in: http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/bacia_rio_pardo/95municipios.htm (access in: 10/06/2007).
- Gonçalves, J. S., Souza, S. A. M., Ângelo, J. A. & P. S. Coelho. 2007. Agropecuária paulista: transformações do período de 1969-1971 a 2002-2004. In: Cano, W., Brandão, C. S., Maciel, C. S. & F. C. Macedo (org). 2007. *Economia paulista: dinâmica socioeconômica entre 1980 e 2005*. Campinas, SP: Editora Alínea.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, D.C.: Island Press.
- Naeem, S., Chapin III, F. S., Costanza, R., Ehrlich, P. R., Golley, F. B., Hooper, D. U., Lawton, J. H., O'Neill, R. V., Mooney, H. A., Sala, O. E., Symstad, A. J. & D. Tilman. 1999. Biodiversity and ecosystem functioning: Maintaining natural life support processes. *Issues in Ecology* No. 4. Washington, D.C.: Ecological Society of America.
- Quartaroli, C. F., Criscuolo, C., Hott, M. C. & M. Guimarães. 2006. Alterações no uso e cobertura do solo no nordeste do estado de São Paulo no período 1988 a 2003. Embrapa Monitoramento por Satélite. Documento 55.
- SMA/IF. 1993. Secretaria de Estado do Meio Ambiente/Instituto Florestal. Inventário Florestal do Estado de São Paulo. IF, São Paulo.
- Símile 4.8 Version. User Guide. System Dynamic and object-based modelling and simulation software.
- Wischmeier, W.H. & D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to a conservation planning. *Agriculture Handbook* No. 537. Washington: Department of Agriculture, USDA.
- Zafalon, M., 2007. Boom do álcool dobra valor de terra e usina. Folha de São Paulo (18/03/2007). Available in: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u115297.shtml> (access in: 13/04/2007).



ANEXO

Figura 3. Diagrama da modelagem na Bacia Hidrográfica dos Rios Mogi-Guaçú/ Pardo

A simbologia deste diagrama está disponível em: <http://www.uvm.edu/giee/mimes/> e <http://simulistics.com/tutorials/index.html>

Watershed

Classes of Land Use Cover 1 Agriculture 2 Anthropic 3 Water 4 Forest 5 Pasture

PPA is the Permanent Protected Area LR is the Legal Reserve areas

