

AVALIAÇÃO DO MODELO *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* PARA O SISTEMA CANTAREIRA: MÓDULOS DE HIDROLOGIA E DE PERDA DE SEDIMENTOS

*Sandra Isay Saad*¹; *Humberto Ribeiro da Rocha*²; *João Guimarães*³; *Jonathan Mota da Silva*⁴

Resumo

O modelo InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*) é uma ferramenta para a tomada de decisões ambientais, que quantifica os valores dos Serviços Ambientais, agregando informações climáticas, geomorfológicas e de uso da terra. Neste trabalho mostram-se resultados preliminares sobre a avaliação dos módulos hidrológico e de sedimentos do InVEST, para o Sistema Cantareira, em São Paulo. Foram analisados quatro mapas de uso da terra: pastagem e floresta em todo o domínio, o cenário de uso da terra real, e o mesmo mas com restauração das Áreas de Preservação Permanente (APP). O deflúvio foi maior no cenário real, condizente com valores menores de evapotranspiração no cenário, e a geração de sedimentos foi maior na pastagem. Os valores de deflúvio foram superestimados devido à prescrição de uma baixa evapotranspiração potencial. Os resultados obtidos pela Equação Universal de Perda de Solo foram comparáveis com outros estudos próximos à região ($\sim 4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), mas a carga de sedimentos foi superestimada. Ainda que alguns parâmetros prescritos e estimativas precisem ser reavaliados, o InVEST se mostrou uma ferramenta com grande potencial para se avaliar e valorar os serviços ambientais nas bacias brasileira, e uma ótima ferramenta para apoio à tomada de decisões de cunho ambiental.

Abstract

The *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST) model is a tool to support environmental decision-making. It quantifies the value of environmental services, by aggregating climate, geomorphological, and land use information. In this work, we show preliminary results on the evaluation of the hydrological and sediment modules of InVEST, for Cantareira Water Supply System in Sao Paulo. Four maps of land use were used for the simulations: pasture and forest in the entire domain, the actual land use, and the same but with restoration of Permanent Protection Areas (APP). Water yield was higher in the actual scenario, consistent with lower values of evapotranspiration, and sediment load was higher in the pasture. Water yield values were overestimated due to the prescription of a low potential evapotranspiration. Results obtained by the Universal Soil Loss Equation were comparable with other studies nearby the region ($\sim 4 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), but the sediment load was overestimated. Although some prescribed parameters and estimations still need to be revised, InVEST proved to be a great potential tool to evaluate and appraise environmental services in Brazilian basins, and to support environmental decision-making.

Palavras-Chave – Serviços Ambientais, produção de sedimentos, modelo hidrológico.

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM), Universidade de São Paulo. (11) 3091-4772. sandraisaad@gmail.com

² Instituto de Astronomia, Geofísica e de Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo. (11) 3091-4772. humberto@model.iag.usp.br

³ The Nature Conservancy, Curitiba (PR). (41) 211-8769. jguimaraes@tnc.org

⁴ Instituto de Astronomia, Geofísica e de Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo. (11) 3091-4772. jsilva@model.iag.usp.br

1. INTRODUÇÃO

Os impactos da mudança do uso da terra são bastante diversos, afetando o clima desde a escala local até a escala global (Werth e Avissar 2002), o ciclo hidrológico, a qualidade da água (Vanacker et al. 2003), a biodiversidade, e outros. O desmatamento de florestas nativas, a introdução de atividades agrícolas, pavimentação de estradas, construção de hidrelétricas e outras atividades realizadas em prol do desenvolvimento econômico, muitas vezes causam maiores danos do que benefícios. Balancear os prós e contras de uma determinada atividade é importante para maximizar os ganhos, minimizar as perdas, e, principalmente, prevenir a ocorrência de externalidades com impactos ambientais e sócio-econômicos irreversíveis.

A substituição da vegetação primária pode alterar o ciclo hidrológico e a vazão sobre uma bacia, por alterar o balanço entre a precipitação, a evaporação, a infiltração e conseqüentemente a resposta do escoamento superficial (Costa et al. 2003). O desmatamento tende a aumentar as vazões de pico (Andréassian 2004), aumentando o risco de enchentes, e diminuir o escoamento básico (pela diminuição da infiltração), podendo reduzir as vazão mínimas durante o período de estiagem, com conseqüências diretas e indiretas para a biodiversidade e a demanda da água pelo homem. Adicionalmente, um dos maiores problemas gerados pelo desmatamento principalmente próximo aos pequenos afluentes e corpos d'água, é o acúmulo de sedimentos seguido pelo assoreamento, que se estende aos médios e grandes rios. É notório o problema da hidrelétrica de Assis Chateaubriand, MS, desativada em menos de dez anos de uso devido ao assoreamento. Outros exemplos de problemas desta natureza são a dragagem de vias navegáveis e portos, o aumento do custo de tratamento de água e o aumento da intensidade e freqüência dos alagamentos. O transporte de sedimentos é originado por processos erosivos do solo e transportado para os cursos d'água (Zolin 2010), processo que é acelerado com o desmatamento e má conservação do solo. Por outro lado, um ecossistema pode gerar uma série de benefícios à sociedade provenientes de recursos naturais, que são os serviços ambientais (Millennium Ecosystem Assessment, 2003). Estes incluem serviços de suprimento (como água, comida, combustível), serviços de regulação (regulação do clima, controle de doenças, purificação da água, polinização), serviços culturais (espiritual, recreativo, ecoturismo, educacional, estética), e os serviços de manutenção necessários para existência dos demais (formação do solo, reciclagem de nutrientes). O pagamento por serviços ambientais é uma política recente e inovadora, que envolve um afastamento das políticas ambientais de comando e controle, utilizando as forças de mercado para obter maiores resultados ambientais, e recompensando os provedores de serviços ambientais. No Brasil, esta política está sendo iniciada através do Programa

Produtor de Águas, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas (ANA). É um programa voluntário de melhoria da qualidade e da quantidade de água em mananciais, através do incentivo financeiro aos produtores rurais. O programa prevê pagamentos efetuados por agentes financiadores aos produtores rurais que, através de práticas e manejos conservacionistas e de melhoria da cobertura vegetal, venham a contribuir para o abatimento efetivo da erosão e da sedimentação, e para o aumento da infiltração de água (Conservador das Águas, 2010).

Um modelo desenvolvido pelo Natural Capital Project⁵ aborda os serviços ambientais e sua valoração econômica, o *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST) (Tallis et al. 2011), que é um conjunto de algoritmos para quantificar os valores dos serviços ambientais, para o suporte na tomada de decisões ambientais. O InVEST considera os seguintes serviços ambientais: produção e purificação da água, sedimentação evitada, polinização de grãos, seqüestro de carbono, produção de madeira, manutenção da biodiversidade e outros.

Neste trabalho mostram-se resultados preliminares sobre a avaliação das partes físicas dos módulos hidrológicos e de sedimentos do InVEST, para o Sistema Cantareira, sistema de abastecimento de água responsável por produzir metade da água consumida pelos 19 milhões de habitantes da Região Metropolitana de São Paulo (Whately e Cunha, 2007).

2. METODOLOGIA

2.1 O modelo InVEST

O modelo InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) é um conjunto de modelos que tem por finalidade quantificar os valores dos serviços ambientais. Com o uso destes modelos, é possível identificar áreas de alta ou baixa produção de serviços ambientais e os trade-offs e sinergias entre os serviços em condições atuais e futuras (Tallis et al. 2011). Trata-se de um software livre com código aberto, de modo que alterações nas rotinas podem ser feitas, e rodados como ferramentas de scripts (escritos em *python*) do software ArcGIS. Neste trabalho foram analisados os módulos físicos dos modelos de produção de Energia Hidrelétrica e de retenção de sedimentos.

Modelo Produção de Energia Hidrelétrica

O modelo de produção de energia elétrica gera a quantidade de água produzida em um reservatório. Para isso, faz o balanço entre os seguintes componentes do ciclo hidrológico: a precipitação, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e de base (sem distinção

entre estes) e recarga do aquífero profundo. Após a quantificação do total de água produzida no reservatório, o modelo gera a quantidade de água disponível para a produção de energia hidrelétrica, a quantidade de energia que pode ser produzida e o valor financeiro associado à energia.

Modelo de Retenção Evitada de Sedimentos

O modelo de retenção de sedimentos estima a quantidade de sedimentos que a cobertura vegetal mantém, evitando com que estes sejam depositados em um reservatório. A estimativa é feita comparando a cobertura vegetal e uso da terra com uma situação de solo nu, através da subtração de USLE (eq. 1) de RKLS (eq. 2), respectivamente:

$$USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

onde *USLE* é a perda de solo média anual ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), *R* é o fator de erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), *K* é o fator de erodibilidade do solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), *LS* é o comprimento e declividade da encosta, *C* é o fator de uso e manejo do solo, e *P* é o fator de práticas conservacionistas.

$$RKLS = R \cdot K \cdot LS \quad (2)$$

onde *RKLS* é a perda de solo média anual para um solo sem vegetação.

O modelo dá valor ao serviço ambiental de ter evitado o acúmulo de sedimentos no reservatório, em termos biofísicos e econômicos. Para o último, a valorização é feita considerando os custos da retirada de sedimentos.

2.2 Região de estudo: O Sistema Cantareira

O Sistema Cantareira (Figura 2.1) é o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo, produzindo metade da água consumida pelos 19 milhões de habitantes da Região Metropolitana de São Paulo (Whately e Cunha, 2007). O Sistema Cantareira possui 20% de Mata Atlântica e com mais de 70% do território alterado por atividades econômicas e usos diversos por ação humana. Apenas 0.5% do domínio do sistema encontra-se efetivamente protegido – os parques estaduais da Cantareira e do Juquery. O relatório do ISA (Whately e Cunha, 2007) aponta para os perigos do aumento da exploração da região, que impactam na piora da qualidade da água. No período entre 1989 e 2003, 3184 ha de Mata Atlântica foram reprimidos, o que representa 6,3 % da área total do Sistema. Foi observada também uma piora na qualidade de água nos reservatórios,

⁵ O Natural Capital Project é um projeto da Stanford University's Woods Institute for the Environment, University of Minnesota's Institute on the Environment, The Nature Conservancy e World Wildlife Fund que tem a finalidade de alinhar forças econômicas com a conservação integrando capital da natureza nas decisões.

principalmente no período de estiagem que ocorreu entre 1999 e 2004. O relatório alerta que, ainda que a qualidade de água obtida do sistema ainda possa ser considerada boa, o contínuo aumento da exploração da terra de uso inadequado e aumento na disposição de esgotos principalmente sem tratamento, poderão prejudicar a água produzida pelo sistema.

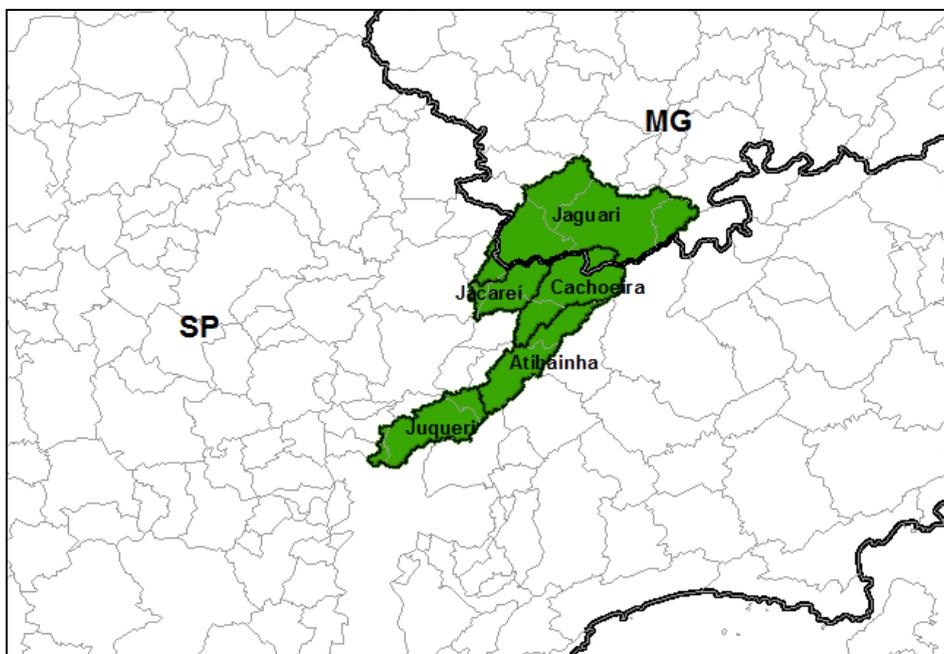


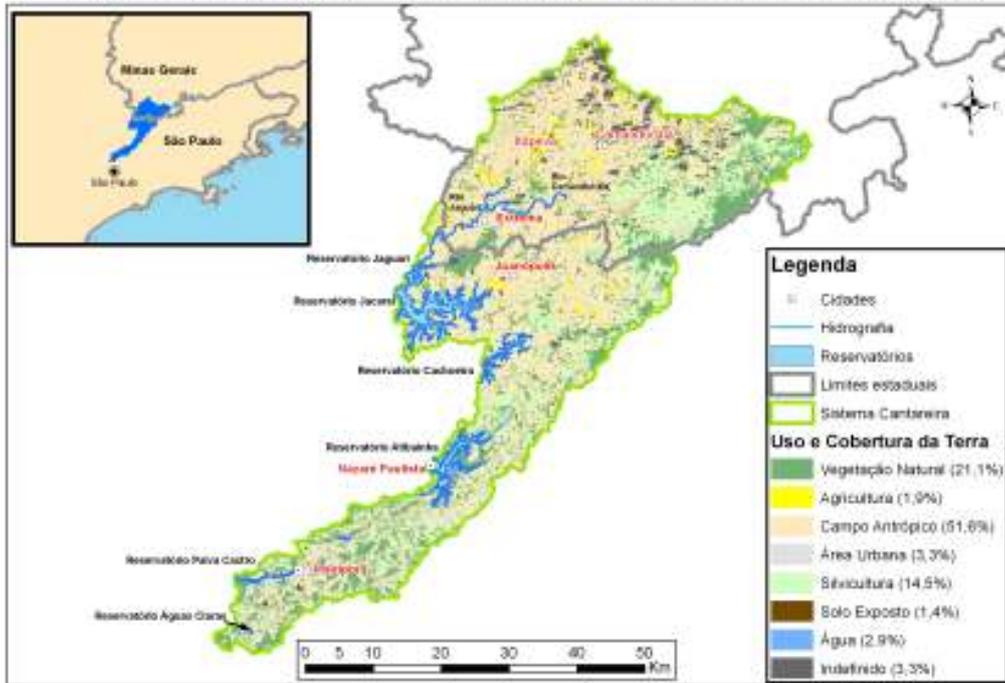
Figura 2.1 – Bacias do Sistema Cantareira, em verde. Em preto, o contorno dos Estados de São Paulo e de Minas Gerais.

2.3 Configurações das simulações

Foram feitas simulações com o modelo de hidrologia (“*Reservoir Hydropower Production*”) e de perda de sedimentos (“*Avoided Reservoir Sedimentation Model*”) do InVEST, considerando quatro mapas de uso da terra:

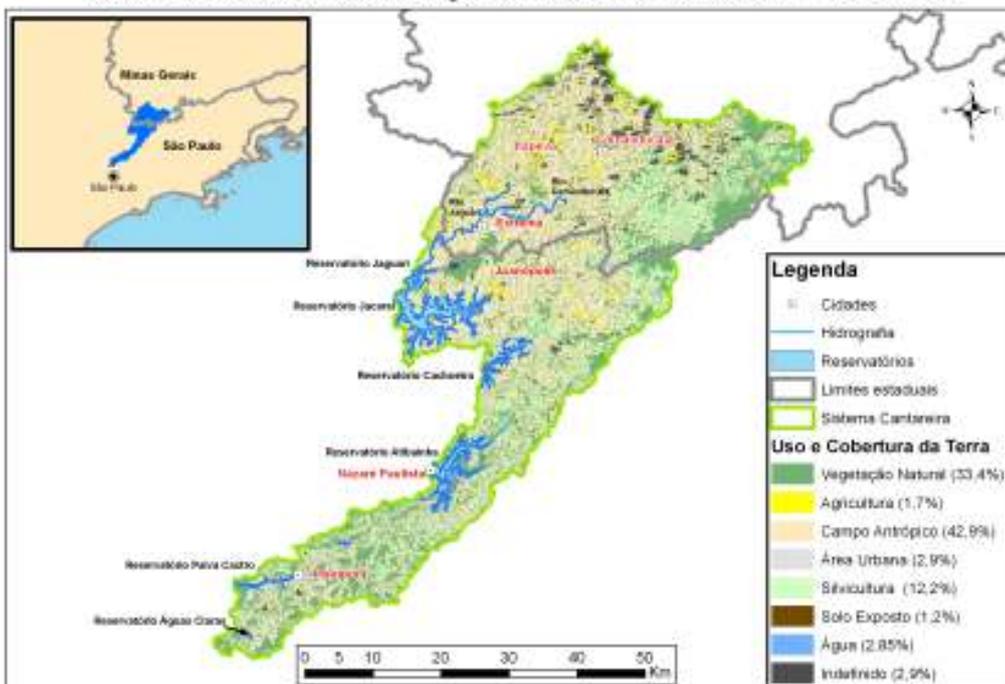
- O mapeamento da vegetação feito pelo Instituto Socioambiental para 2003 (Whately e Cunha, 2007), aqui chamado de ISA2003 (Figura 2.2a);
- Semelhante ao ISA2003, mas com as Áreas de Preservação Permanente de matas ciliares, alta declividade e topos de morros, aqui chamado de APP (Figura 2.2b);
- Floresta em todo o domínio (FLO);
- Pastagem degradada em todo o domínio (PAS).

Sistema de Abastecimento de Água Cantareira - Uso e Cobertura da Terra (2003)



(a)

Sistema de Abastecimento de Água Cantareira - Cenário de APP restauradas



(b)

Figura 2.2 – (a) Mapeamento da vegetação feito pelo Instituto Socioambiental para 2003 (Whately e Cunha, 2007) (ISA2003), e (b) semelhante ao ISA2003, mas com as Áreas de Preservação Permanente (APP's).

A topografia utilizada nos dois módulos é dada pela Figura 2.3.

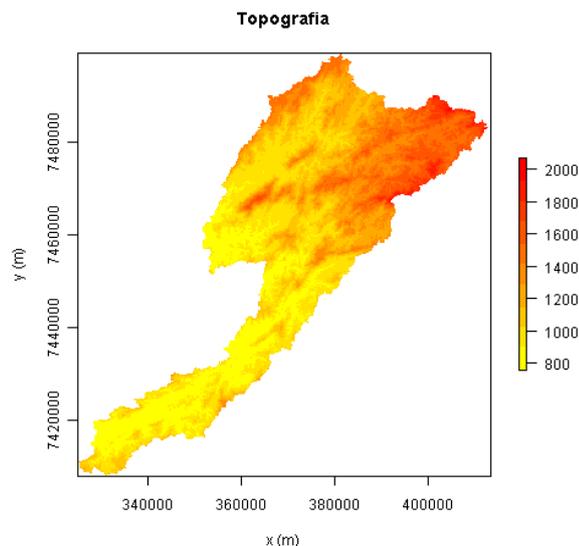


Figura 2.3 - Topografia do Sistema Cantareira utilizada nas simulações. Obtido de: Whately e Cunha (2003).

Modelo de Hidrologia

A Tabela 2.1 mostra os principais dados de entrada do modelo hidrológico do InVEST. Foram realizadas simulações de solo homogêneo com cada um dos solos da Tabela 2.2, presentes no Sistema Cantareira.

Tabela 2.1 - Principais dados de entrada necessários para a rodada do modelo de produção de energia hidrelétrica.

| Dado | Tipo de informação | Descrição | Valor |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Modelo de elevação digital (DEM) | GIS raster ⁶ | Topografia (m) | Figura 2.3 |
| Profundidade do solo | GIS raster | Unidade: mm | Tabela 2.2 |
| Capacidade de água disponível (CAD) | GIS raster | É a fração de água no solo disponível para as plantas (valor entre 0 e 1) | Tabela 2.2 |
| Precipitação | GIS raster | Precipitação anual (mm) | Figura 2.4a |
| Evapotranspiração potencial de referência (ETP) anual | GIS raster | É a perda potencial de água do solo pela evaporação do solo e transpiração da alfafa (ou grama) saudável quando há água suficiente disponível | Figura 2.4b |
| Uso e cobertura da terra ou <i>Land Use Land Cover</i> (LULC) | GIS raster | Mapa com um código LULC para cada célula | Figura 2.2 |
| Bacias | GIS raster | Mapas com as bacias que servem de domínio para as regiões analisadas | Figura 2.1 |
| Profundidade das raízes | Coluna de uma tabela (<i>Biophysical Table</i>) | Profundidade máxima das raízes (mm) para a vegetação de determinado LULC. Para LULC não vegetados a variável deve ser igual a zero | 7000mm – floresta; 2500mm - pastagem |
| Coefficiente de evapotranspiração | Coluna de uma tabela (<i>Biophysical Table</i>) | Coefficiente de evapotranspiração para cada LULC, utilizado para obter a evapotranspiração potencial do LULC a partir da de referência (da alfafa) | 1 – floresta; 0.85 - pastagem |
| Demanda de água | Coluna de uma tabela (<i>Demand Table</i>) | Água consumida pelo homem por LULC, retirada do balanço de água na bacia. | - |

Tabela 2.2 - Solos utilizados nas simulações e respectivas características necessárias como dados de entrada no modelo.

| | Nome | CAD (mm mm ⁻¹) | Profundidade (mm) |
|--------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| Solo 1 | Latossolo Vermelho-Amarelo | 0,37 | 1500 |
| Solo 2 | Argissolo | 0,30 | 1300 |
| Solo 3 | Cambissolo | 0,18 | 1170 |

⁶ GIS raster é um mapa georeferenciado com informações a cada ponto de grade (ou pixel)

Simulações foram feitas para o período de 1980 a 2010. A Figura 2.4 mostra precipitação e a evapotranspiração do ano de 2000, como exemplo, utilizando os dados do NCEP-CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*; Saha et al. 2010, Silva et al. 2011). Médias no domínio do Sistema Cantareira são apresentadas na Figura 2.5.

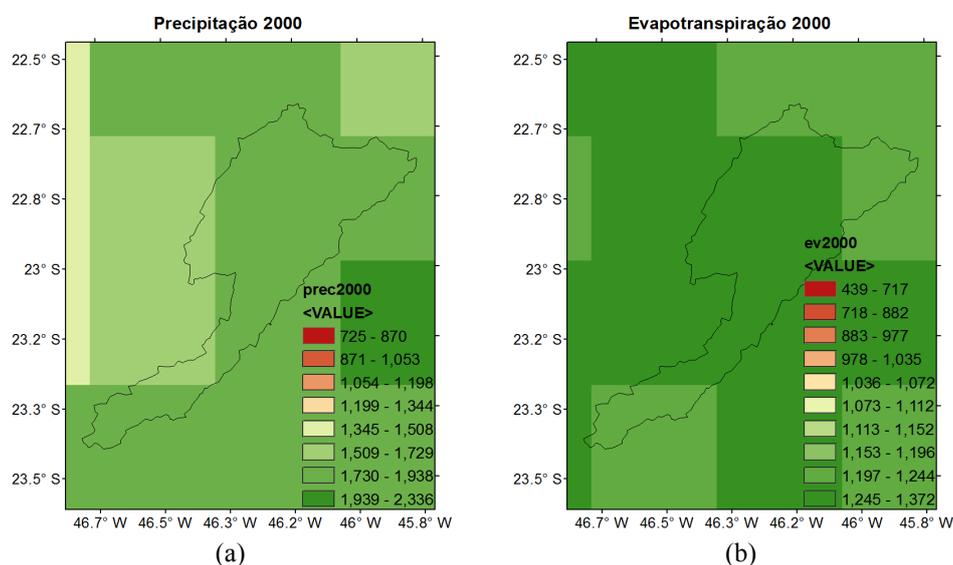


Figura 2.4 - (a) Precipitação e (b) evapotranspiração para o ano de 2000, utilizadas para as simulações. Dados da reanálise NCEP-CFSR.

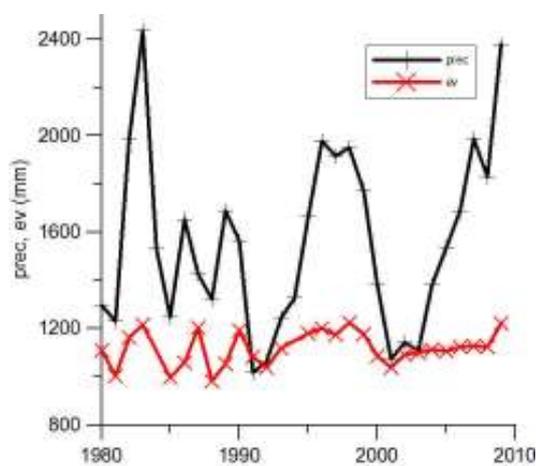


Figura 2.5 - Precipitação e evapotranspiração médias no domínio do Sistema Cantareira, em função do ano. Dados da reanálise NCEP-CFSR.

Modelo de Sedimentos

A Tabela 2.3 mostra os dados de entrada para os modelos de retenção de sedimentos. A erosividade (Figura 2.6 a) foi obtida através de interpolação de pontos das ferramentas NetErosividade SP e NetErosividade MG (disponíveis em <http://www.ufv.br/dea/gprh/software.htm>). A resolução utilizada foi de 20 m de espaçamento horizontal.

Tabela 2.3 - Principais dados de entrada necessários para a rodada do modelo de retenção de sedimentos.

| Dado | Tipo de informação | Descrição | Valor |
|-----------------------------------|--|---|-------------------------------|
| Modelo de elevação digital (DEM) | GIS raster | Topografia (m) | Figura 2.3 |
| Índice de erosividade da chuva | GIS raster | Unidade: MJ mm ha ⁻¹ ano ⁻¹ | Figura 2.6b |
| Erodibilidade do solo | GIS raster | Unidade: t ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ | Figura 2.6a |
| Sub-bacias | GIS raster | Mapas com as sub-bacias onde a sedimentação é uma questão importante | Figura 2.1 |
| Bacias | GIS raster | Mapas com as bacias onde a sedimentação é uma questão importante | Figura 2.1 |
| USLE_C | Coluna de uma tabela (Biophysical Table) | Fator de uso e manejo do solo para cada código LULC | 50- floresta; 250 - pastagem |
| USLE_P | Coluna de uma tabela (Biophysical Table) | Fator de práticas conservacionistas para cada código LULC | 1000 |
| sdret_eff | Coluna de uma tabela (Biophysical Table) | Valor de retenção de sedimentos para cada código LULC | 100 – floresta; 30 - pastagem |
| Limiar de área acumulada | Número | Número de células corrente acima que são consideradas para formar a corrente | 100 |
| Limiar de inclinação das encostas | Número | Descreve as características do terreno, como as práticas de manejo das encostas | 25 |
| Custo da remoção de sedimentos | Coluna de uma tabela (Sediment Table) | Custo da remoção de sedimentos em \$ (moeda)/m ³ para cada código de bacia | R\$295,00 |
| Tempo de integração | Coluna de uma tabela (Sediment Table) | Período a ser utilizado para o cálculo do serviço ambiental de remoção de sedimentos | 100 anos |

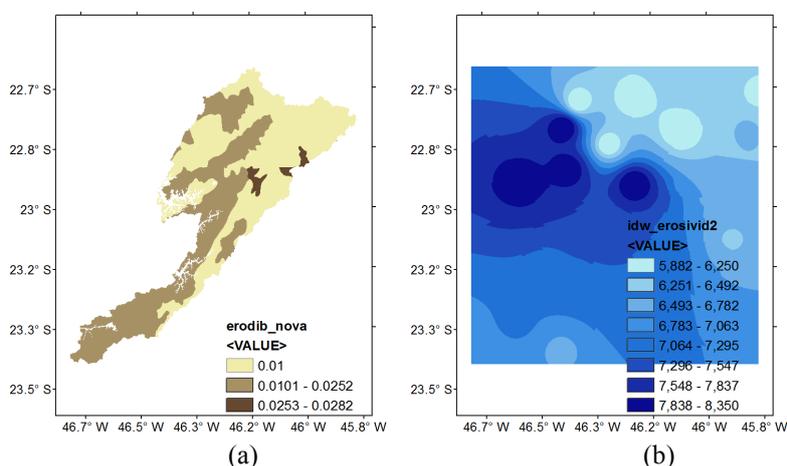


Figura 2.6 - (a) Erodibilidade (t h MJ⁻¹ mm⁻¹) e (b) erosividade (MJ mm ha⁻¹ ano⁻¹), utilizados para as simulações do modelo de carga de sedimentos.

3. RESULTADOS

3.1 Modelo Hidrológico

Simulações para o ano de 2000

A Figura 3.1 e a Figura 3.2 mostram as variáveis de saída do modelo hidrológico do InVEST fração da evapotranspiração real com a chuva (*actual_et*) e deflúvio (*wyield*), respectivamente, utilizando os dados de precipitação e evapotranspiração do ano de 2000. Os campos de pastagem e de floresta refletem o padrão da precipitação e evapotranspiração (Figura 2.5), enquanto os campos de ISA2003 e APP refletem, além destes campos, o campo de uso da terra (Figura 2.2).

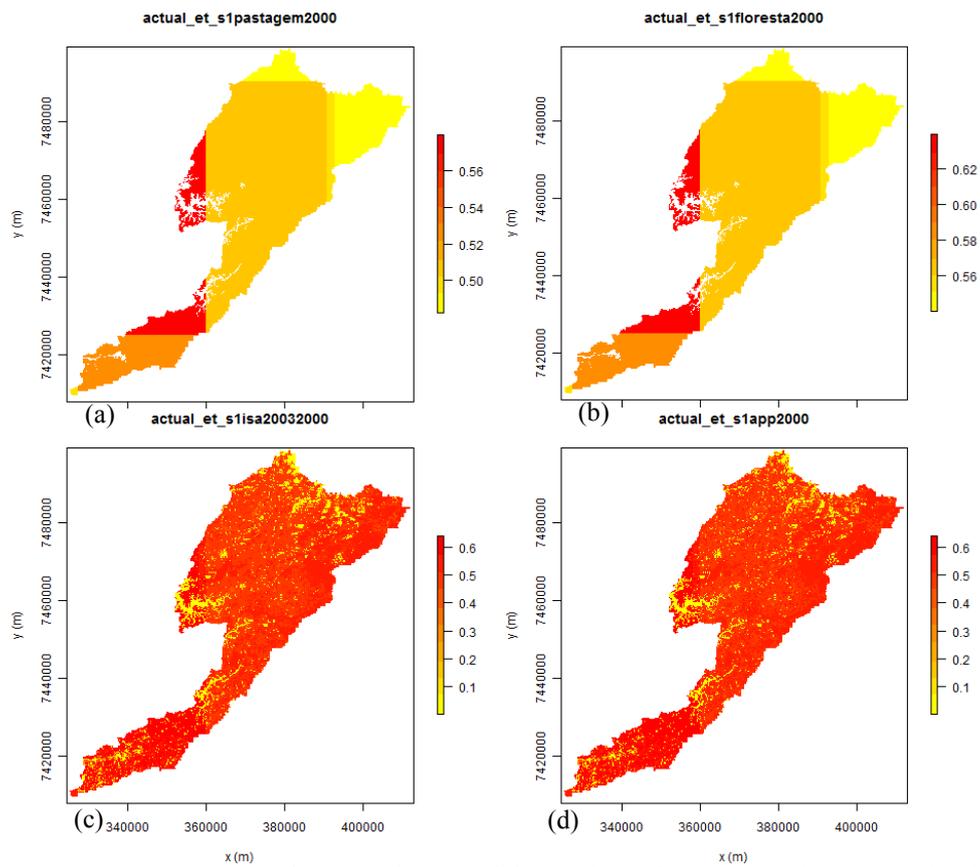


Figura 3.1 - Razão entre a evapotranspiração real e a precipitação (*actual_et*) para a (a) pastagem (PAS), (b) floresta (FLO), (c) ISA2003 e (d) APP, utilizando o solo Latossolo Vermelho-Amarelo (solo1 ou s1).

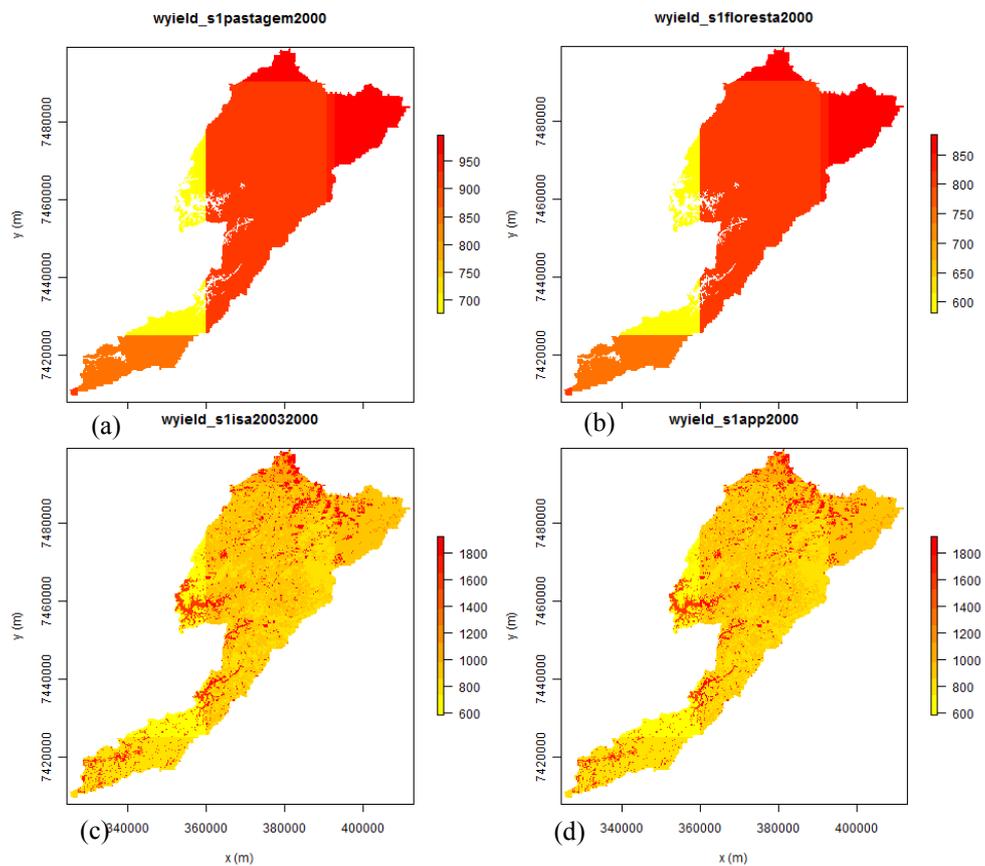


Figura 3.2 - Idem à Figura 3.1, mas para a variável deflúvio (*wyield*), em mm.

Em termos médios (Tabela 3.1), a fração da evapotranspiração real com a chuva (*actual_et*) foi maior na floresta (0,57), devido à maior evapotranspiração, seguido da pastagem (0,51), do cenário de APP (0,49) e de ISA2003 (0,47). O cenário de APP apresenta maior cobertura vegetal do que o cenário ISA2003, e menor do que a pastagem, por isso a diferença na evapotranspiração. O deflúvio (*wyield*) teve padrão inverso, apresentando maiores valores para ISA2003 (965 mm), seguido do cenário de APP (944 mm), pastagem (900 mm) e floresta (792 mm). Em resumo, em termos anuais, uma maior quantidade de floresta e de cobertura vegetal contribuiu para um menor deflúvio, devido à maior taxa de evapotranspiração.

Tabela 3.1- Média espacial dos campos das variáveis Fração da Evapotranspiração real com a chuva (*actual_et*) e produção da água (*wyield*), para o ano de 2000, solo 1.

| | actual_et | Wyield (mm) |
|---------|-----------|----------------|
| PAS | 0,51 | 900 |
| FLO | 0,57 | 792 |
| ISA2003 | 0,47 | 965 |
| APP | 0,49 | 944 |

Para a comparação com valores reais, utilizaram-se os dados de vazão da estação fluviométrica do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) no município de Valinhos, no Rio Atibaia, que é próximo da região do Sistema Cantareira e possui uma área de drenagem semelhante (2152 km²). O deflúvio para o ano de 2000 para a estação foi de 311 mm, que é muito menor do que o resultado para as quatro simulações com diferentes usos da terra. A superestimativa do deflúvio deve-se, principalmente à subestimativa da evapotranspiração real, que foi estimada a partir da evapotranspiração potencial de referência (dado de entrada para o modelo). O dado inserido para a evapotranspiração potencial de referência foi, na verdade, a evapotranspiração da reanálise, que é menor do que a potencial de referência.

Comparação entre os diferentes anos e solos

Para as simulações em que se variou o tipo de solo, foi utilizada a pastagem (PAS) em todo o domínio. A Figura 3.3 mostra as médias espaciais das variáveis em função do ano. Verifica-se a relação de linearidade entre as simulações dos três tipos de solos (Figura 3.3a). O solo 1 (Latosolo Vermelho-Amarelo), cuja capacidade de água disponível e profundidade foram os maiores (Tabela 2.2), foi o que apresentou maior evapotranspiração e menor deflúvio. Em seguida segue o solo 2 (Argissolo), com os valores intermediários das propriedades do solo, apresentando as variáveis de saída do modelo intermediária, e o solo 3 (Cambissolo), que apresenta os menores valores das propriedades do solo, apresentando menor evapotranspiração e maior deflúvio.

As duas variáveis do modelo discutidas neste trabalho (fração da evapotranspiração real com a chuva e deflúvio) se mostraram fortemente correlacionadas (Figura 3.3). O que ocorreu também com a alteração de vegetação (Figura 3.4), que mostra a média espacial da variável deflúvio (*wyield*) para cada ano de simulação.

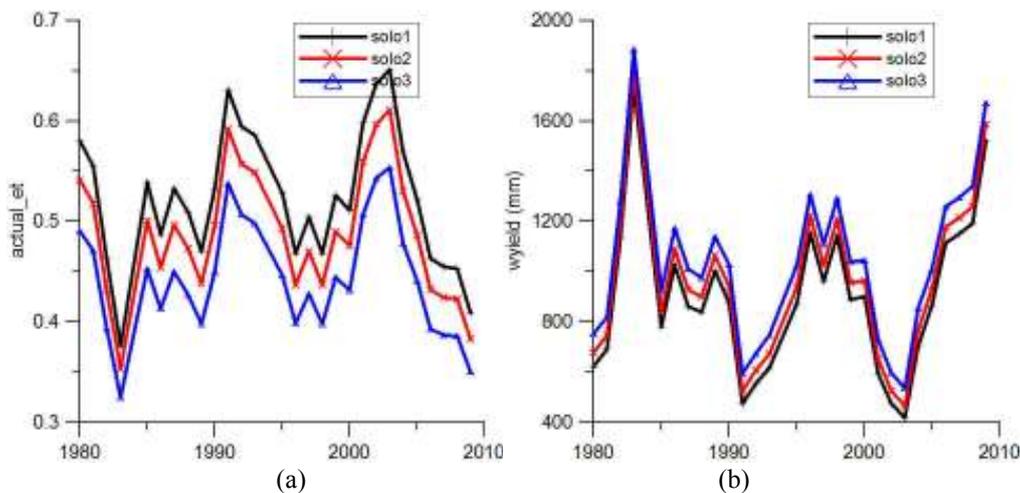


Figura 3.3 - Média no Sistema Cantareira de: (a) *actual_et* e (b) *wyield* (mm).

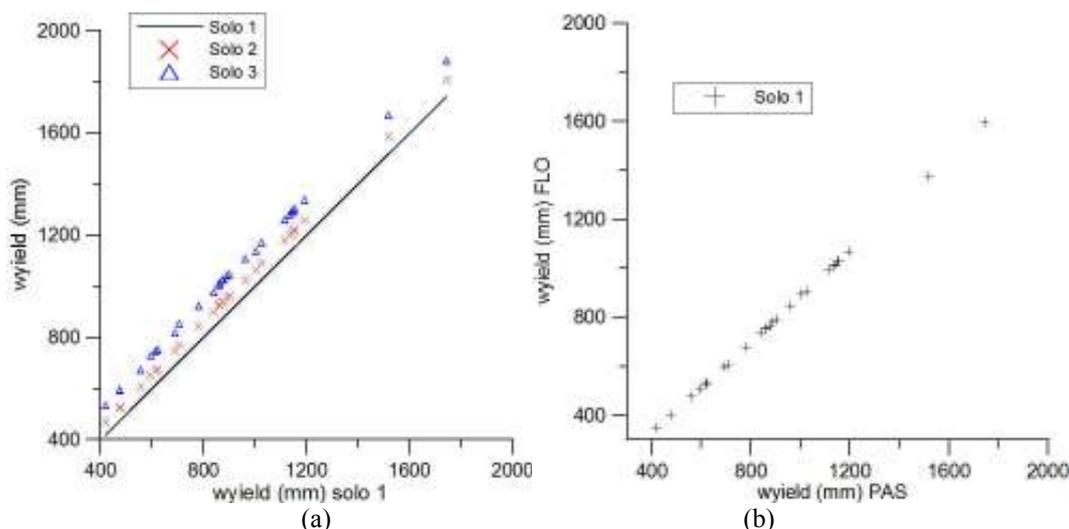


Figura 3.4 - Médias no domínio do Sistema Cantareira da variável deflúvio (*wyield*, mm) para cada ano de simulação para (a) Solo 2, Solo 3 em função de Solo 1, ambos para o caso Pastagem, (b) a Floresta em função da Pastagem, ambos com o Solo 1.

3.2 Modelo de Sedimentos

A Figura 3.5 mostra os resultados da perda do solo (*USLE*, eq. 1) para as simulações de pastagem, floresta e para os usos da terra de ISA2003 e de APP. O padrão espacial dos campos de perda de solo reflete o padrão da erodibilidade (Figura 2.6 b). Além disso, nota-se uma proporcionalidade entre os três campos de perda de solo, principalmente entre a floresta e a pastagem (Figura 3.5 a, b). Isto se deve devido aos diferentes valores de *C* da equação de *USLE* (eq. 1) para cada uso do solo, que foi a única variação entre as simulações. A perda de solo foi maior na

pastagem (média espacial de $4,87 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), seguida pelo ISA2003 ($2,99 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), por APP ($2,52 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e por último pela floresta ($0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Com exceção dos valores da floresta, estes valores estão um pouco menores em relação aos de Zolin (2010), que encontrou valores entre 7 e $30 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ mas para Bacia das Posses, uma sub-bacia que compõe o Sistema Cantareira, e possui uma área de 1217 ha .

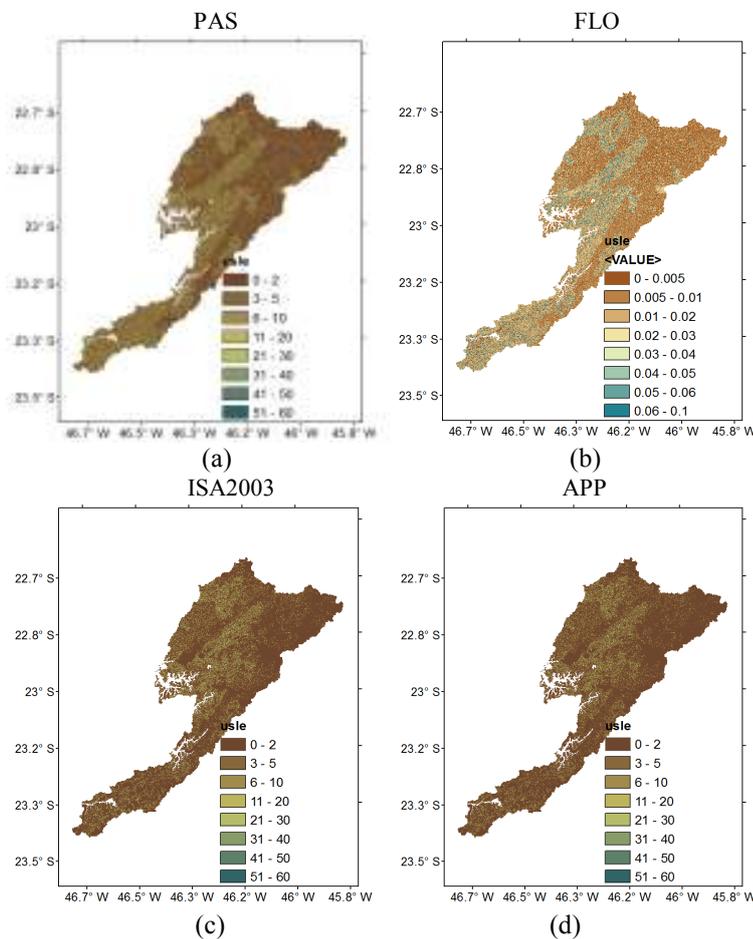


Figura 3.5 - Campo de *USLE*, variável de saída do modelo, que representa a perda de solo em cada ponto de grade, em $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para: (a) pastagem, (b) floresta, (c) ISA2003 e (d) APP.

Para comparar com os dados observados de carga (ou produção) de sedimentos, analisa-se a variável de saída do modelo *tot_sed*, ou total de sedimentos exportados ao exutório de cada bacia (em t ano^{-1} ou t dia^{-1}). Os valores resultantes de *tot_sed* foram de 7530 t dia^{-1} , 4872 t dia^{-1} , 1460 t dia^{-1} e 9 t dia^{-1} para a pastagem, ISA2003, APP e floresta, respectivamente. Nascimento (2001) mediu valores de carga de sedimentos no Rio Atibaia que variavam de $\sim 10 \text{ t dia}^{-1}$ (estiagem) até $\sim 500 \text{ t dia}^{-1}$ (picos), chegando até mais de 2000 t dia^{-1} , para casos de dias de chuva. A área de drenagem da bacia do ponto de medição possui uma área de drenagem semelhante à área do Sistema Cantareira ($\sim 2000 \text{ km}^2$). Os valores encontrados nestes resultados preliminares foram muito maiores do que os maiores picos de 2000 ton/dia observados por Nascimento (2001). Portanto o modelo parece estar superestimando a produção de sedimentos. A variável é definida no modelo como o

valor máximo dos sedimentos acumulados nos canais, que deve ocorrer no exutório da bacia, e pode não estar sendo adequada para representar a carga de sedimentos reais.

Tabela 3.2 - Resultados de valores médios da perda de solo (*USLE*) no domínio do Sistema Cantareira, para as simulações de pastagem (PAS), floresta (FLO), ISA2003 e APP, e carga total de sedimentos (*tot_sed*) que apresenta um único valor (e não representa uma média espacial).

| | USLE (t ha ⁻¹ ano ⁻¹) | tot_sed (t ano ⁻¹) | tot_sed (t dia ⁻¹) |
|---------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| PAS | 4,87 | 278460 | 7530 |
| FLO | 0,02 | 3375 | 9 |
| ISA2003 | 2,99 | 1778480 | 4872 |
| APP | 2,52 | 533017 | 1460 |

Padrão de *USLE*

A Figura 3.6 mostra a *USLE* em função da declividade, o parâmetro *LS* da eq. (1), para cada ponto de grade da pastagem. Para interpretação deste padrão, divide-se *USLE* por *K* e por *R*, *K* e *S* (parâmetros da eq. (1)) (Figura 3.7), parâmetros que variam nos pontos de grade. A erodibilidade, ou *K* (Figura 3.7a), explica as duas retas visíveis para a declividade maior do que ~18 graus (Figura 3.6a). Já na Figura 3.7b, a divisão de *USLE* por *RK/S* é proporcional ao fator de comprimento da encosta (*L*), já que os demais parâmetros da eq. (1), *C* e *P*, são constantes em todo o domínio no caso da simulação de pastagem. A mudança no padrão observada na Figura 3.7b é explicada pelo uso de mais de uma equação pelo modelo para o cálculo de *L*: uma equação para pequenas inclinações e outra para maiores inclinações, o que deverá ser reavaliada em etapas futuras.

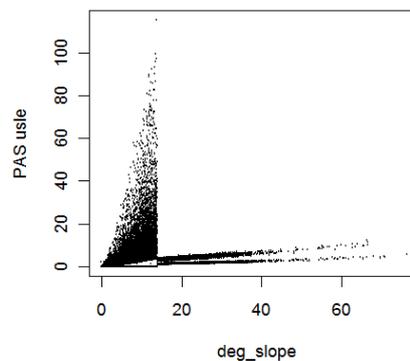


Figura 3.6 - *USLE* (t ha⁻¹ ano⁻¹) em função da declividade (graus) para a pastagem.

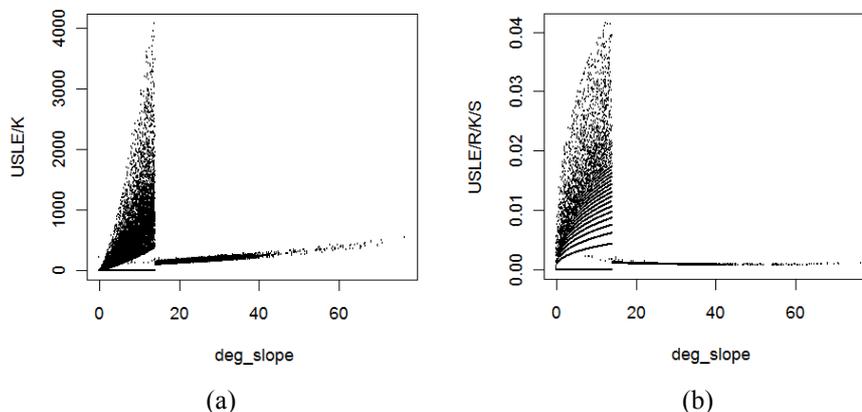


Figura 3.7 - (a) *USLE/K* e (b) *USLE/R/K/S*, em função da declividade (graus) para a pastagem, onde *K* é a erodibilidade, *R*, é a erosividade e *S* é a declividade, ambos parâmetros da eq. (1).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados preliminares da regionalização dos módulos de hidrologia e de retenção de sedimentos do modelo InVEST para a região do Sistema Cantareira. O InVEST utiliza como base mapas de uso da terra e parâmetros do solo, e é bastante dependente dos parâmetros prescritos para cada unidade de uso da terra. Para o modelo de hidrologia, o deflúvio é calculado como a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração real, uma aproximação razoável em termos anuais, e variou linearmente conforme a mudança de vegetação ou do tipo de solo. Em termos de valores absolutos, o deflúvio foi superestimado em relação a valores reais, o que ocorreu devido aos valores baixos de evapotranspiração potencial, inseridos no modelo. Comparando as simulações com os distintos cenários de uso da terra, o cenário uso da terra atual de acordo com o Instituto Sócio Ambiental para 2003 (ISA2003) foi o que apresentou o maior deflúvio, coerente com a menor evapotranspiração em relação aos demais. Em seguida, o deflúvio foi maior no cenário com as Áreas de Preservação Permanentes (APP), a vegetação homogênea de pastagem e a de floresta.

Com relação ao módulo de sedimentos, foram analisados padrões da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e a carga total de produção de sedimentos. Os valores médios de *USLE* foram iguais a $4,87 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $2,99 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $2,52 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a pastagem, ISA2003, APP e floresta. A variável apresentou uma queda abrupta para uma declividade maior que 18 graus. Isto ocorreu devido a limiares de definições do parâmetro de declividade de encostada da Equação Universal de Perda de Solo. A carga total de sedimentos foi superestimada em relação ao observados para os rios da região. Esta é definida no modelo como o valor máximo dos sedimentos acumulados nos canais, que deve ocorrer no exutório da bacia. O cálculo da declividade e da carga total de sedimentos pelo módulo de sedimentos deverão ser analisados em etapas futuras.

Ainda que alguns parâmetros prescritos no modelo precisem ser reavaliados, e também algumas estimativas por parte do modelo, o InVEST se mostrou uma ferramenta com grande potencial para se avaliar e valorar os serviços ambientais nas bacias brasileira, e uma ótima ferramenta para apoio à tomada de decisões de cunho ambiental.

BIBLIOGRAFIA

- Andréassian, V. (2004) “*Review - Waters and forests: from historical controversy to scientific debate*”. *Journal of Hydrology*, 291, 1-37.
- Conservador das Águas, Pereira P. H., Cortez B. A., Trindade T., Mazochi M. N. Dep. Meio Ambiente Extrema – MG, Edição 2010.

- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. A Framework for Assessment. Island Press (2003). Cap. 2 Ecosystems and their services
- Saha, S., e co-autores (2010). “*The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91:8, 1015-1057.
- Silva, V. B. S., V. E. Kousky, R. W. Higgins (2011). “*Daily Precipitation Statistics for South America: An Intercomparison between NCEP Reanalyses and Observations*”. *J. Hydrometeor.*, 12, 101–117.
- Tallis, H. T., T. Ricketts, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, N. Olwero, K. Vigerstol, D. Pennington, G. Mendoza, J. Aukema, J. Foster, J. Forrest, D. Cameron, E. Lonsdorf, C. Kennedy, G. Verutes, C. K. Kim, G. Guannel, M. Papenfus, J. Toft, M. Marsik, J. Bernhardt (2011). “*InVEST 2.0 beta User’s Guide*”. The Natural Capital Project, Stanford.
- Vanacker, V., G. Govers, S. Barros, J. Poesen, J. Deckers (2003). “*The effect of short-term socio-economic and demographic changes on landuse dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment, Ecuador*”. *Landscape Ecology*, 18,1-15.
- Werth, D., R. Avissar (2002). “*The local and global effects of Amazon deforestation*”. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20), doi:10.1029/2001JD000717.
- Whately, M., P. Cunha (2007). “*Cantareira 2006: um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo*”. São Paulo, Instituto Socioambiental.
- Zolin, C. A. (2010). “*Análise e otimização de projetos de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) - o caso do município de Extrema, MG*”. Programa de Pós-Graduação de Irrigação e Drenagem, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado.