

Modelagem da produção de sedimentos usando cenário ambiental alternativo no noroeste do Rio de Janeiro - Brasil

Resumo

A região Noroeste Fluminense (RJ) tem passado por profundas transformações em seu uso e ocupação do solo, sem preocupação com práticas de manejo e conservação adequadas, o que ocasiona intensos processos erosivos. Como consequência, tem-se o aumento da produção de sedimentos, causando sérios danos aos recursos hídricos e contribuindo para o empobrecimento do solo. Em função desse quadro, este estudo visa simular o efeito de um cenário ambiental ideal, utilizando o reflorestamento nas áreas estabelecidas pelo artigo 2º do Código Florestal Brasileiro (CFB) na produção média de sedimentos e na concentração de sólidos em suspensão na água do canal da bacia do córrego Santa Maria, entre o período de 2005 a 2007. Esta bacia experimental localiza-se no município de São José de Ubá, no noroeste fluminense. Para a modelagem da produção de sedimentos e da CSS, foi utilizado o modelo matemático *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), versão 2005, devido à sua base física e capacidade de simular cenários ambientais. Para a modelagem, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), dados cartográficos de uso e cobertura da terra atual e do cenário ambiental com o CFB, da espacialização das classes de solos e suas características físico-hídricas, bem como dados climáticos e hidrossedimentológicos diários e mensais para calibração e validação. Os resultados evidenciaram que o cenário ambiental, utilizando o reflorestamento, conforme o CFB, minimiza a produção de sedimentos e a concentração de sólidos em suspensão na água do canal da bacia do córrego Santa Maria, em relação ao cenário ambiental atual.

Palavras-chave: Código Florestal Brasileiro. Reflorestamento. Bacia hidrográfica.

Abstract:

The northwestern Rio de Janeiro (RJ) area has been going through deep transformations in its soil use and occupation, which has contributed to increased sediment yield and changes in the soil-water-plant relationship. Because of this picture, this study aims at analyzing the effects of the environmental scenario using reforestation in the areas established by the Article 2 of the Brazilian Forest Code (CFB) on the average sediment yield in the period between 2005 and 2007, in relation to the current use and occupation at the Santa Maria creek experimental basin, located in the Municipality of São José de Ubá, in the northwestern Rio de Janeiro. The mathematical model Soil and Water Assessment Tool – SWAT, version SWAT2005, named AVSWAT-X was used for sediment yield modeling because of its physical basis and capacity to simulate environmental scenarios. The Digital Elevation Model (DEM), cartographic data on the current soil use and occupation, soil spatialization and its physical-water characteristics, as well as daily and monthly climate and hydrosedimentologic data were needed for the modeling. The results showed that the environmental scenario using CFB minimizes sediment yield and the concentration of suspended solids at the Santa Maria creek basin.

Key-Words: *EBrazilian Forest Code. Sediment Yield. Creek.*

Eberval Marchioro
Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG/UFES)
Departamento de Geografia

Nelson Ferreira Fernandes
Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGG/UFRJ)

José Ronaldo de Macedo
Pesquisador A - Embrapa Solos (RJ)

Silvio Barge Bhering
Pesquisador A - Embrapa Solos (RJ)

Alexandre Ortega Gonçalves
Pesquisador B - Embrapa Solos (RJ)

Rachel Bardy Prado
Pesquisadora A - Embrapa Solos (RJ)

Recebimento: 05/2014

Aprovação: 06/2014

ebervalm@gmail.com
nelsonff@uol.com.br
jrmacedo@cnps.embrapa.br
silvio@cnps.embrapa.br
aortega@cnps.embrapa.br
rachel.prado@embrapa.br

Introdução

A produção de sedimentos em bacia hidrográfica envolve processos de erosão, transporte e deposição nas encostas e no canal fluvial, os quais têm sido fortemente influenciados pela ação antrópica, que, por sua vez, modifica as relações entre a água e o solo (DUNE; LEOPOLD, 1978; BEVEN, 2001).

A erosão dos solos ocorre naturalmente em todo o mundo, mas a degradação dos solos tem sido intensificada pela ausência de práticas de manejo e conservação e pelo desmatamento da cobertura vegetal original. Segundo Pimentel (2009), as dimensões da degradação da terra são alarmantes, afetando de 30 a 50% da superfície terrestre do planeta.

Na maioria das regiões agrícolas do mundo, o problema da erosão do solo está crescendo à medida que mais terras marginais são colocadas em produção e menos resíduos de culturas são devolvidos ao solo para sua proteção e melhoria, repercutindo negativamente sobre a produção de sedimentos (MORGAN, 2005).

Em nível mundial, as taxas de perdas de solo na Europa variam entre 10 e 20 t/ha/ano; nos Estados Unidos, a perda média do solo nas lavouras foi de 16 t/ha/ano; na Ásia, África e América do Sul, as taxas de perda do solo, na faixa de terras de cultivo, variam entre 20 e 40 t/ha/ano (PIMENTEL, 2009). Já em New South Wales, na Austrália, os reflexos desse processo contribuíram para que 12,5% de suas terras fossem afetadas pela ocorrência de ravinas e 23,4% pela presença de voçorocas (GRAHAMN, 1989).

Marques (1949) salientou que, no Brasil, a perda de solo por erosão laminar era de cerca de quinhentos milhões de toneladas de terra anualmente, representando, segundo o autor, uma perda de 15 cm de espessura de solo, em uma área de 280.000 hectares de solo. Bertoni e Lombardi Neto (1999) salientam, a partir de dados obtidos pelo Serviço de Conservação de Solo, do Instituto Agrônomo, que o Estado de São Paulo perde, anualmente, por efeito da erosão, cerca de 130.000.000 toneladas de terra, representando cerca de 25% da perda do Brasil, devido à falta de práticas de manejo e de conservação, e pelo desmatamento das florestas.

No Estado do Rio de Janeiro, Costa et al. (2006), utilizando a Equação Universal de Perda de Solo, verificaram que 64% das terras apresentam perdas muito baixas, com valores inferiores a 10 t/ha/ano; enquanto aproximadamente 2% apresentam perdas extremamente elevadas, acima de 200 t/ha/ano. Indicam, também, que cerca de 21% das sub-bacias hidrográficas deste estado apresentaram perdas médias muito baixas, com valores menores que 10 t/ha/ano, e menos de 1% apresentam perdas muito altas, entre 100 e 131 t/ha/ano, destacando que, na região noroeste do Estado do Rio de Janeiro, estão as sub-bacias mais vulneráveis à erosão, devendo ser consideradas como prioritárias para programas de recuperação ambiental.

Um dos aspectos que contribuem para a situação crítica da produção de sedimentos no Estado do Rio de Janeiro é o desmatamento da cobertura vegetal original de Mata Atlântica. Segundo relatório do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), para o período entre 1985 e 1990, houve perda de 30 mil hectares de floresta, substituídos por moradias e atividades agrícolas, com destaque para a região da Serra do Mar e o Noroeste Fluminense (FUNDAÇÃO, 2003; SOFFIATI, 2005).

No noroeste fluminense, Abreu e Fidalgo (2006) verificaram que, na bacia do rio São Domingos, predominam a pastagem e a Mata Atlântica, com 88,30% e 9,24%, respectivamente. Marchioro (2008; 2011) verificou que, no ano de 2008, na bacia do córrego Santa Maria, no município de São José

de Ubá, no noroeste fluminense, predominavam pastagem (68,1% da área da bacia, ou 926,78 ha) e Mata Atlântica (19,74%, ou 267,72 ha), sendo que os fragmentos de mata existentes encontram-se, predominantemente, nas áreas mais declivosas e de difícil acesso.

Em função do quadro existente no noroeste fluminense (RJ), mais especificamente na bacia do córrego Santa Maria, no município de São José de Ubá, este trabalho tem como objetivos: a) simular o efeito do reflorestamento com Mata Atlântica nas Áreas de Proteção Permanentes (APPs) – estabelecidas pelo artigo 2º do Código Florestal Brasileiro (CFB) – na produção média de sedimentos, entre o período de 2005 e 2007, em relação ao uso e cobertura da terra no ano de 2008, na bacia do córrego Santa Maria, e (b) verificar o seu efeito sobre a concentração de sólidos em suspensão (CSS), utilizando-se como modelo o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), versão 2005, denominada AVSWAT-X.

Área de estudo

a bacia hidrográfica do córrego Santa Maria localiza-se no município de São José de Ubá, no Noroeste Fluminense, apresentando extensão de 13,56 km² ou 1.356 ha (Figura 1). A mesma bacia é integrante de um conjunto de sub-bacias que drenam suas águas para a bacia do rio Paraíba do Sul, um dos mais importantes sistemas hidrográficos do Sudeste do Brasil.

O clima de São José de Ubá foi caracterizado por Gonçalves et al. (2006) como do tipo Aw, ou seja, tropical quente e úmido, com estações climáticas bem definidas. Baseado em dados de 2005 a 2007 coletados na bacia, verifica-se que a precipitação média anual é de 1.283,72 mm. O trimestre consecutivo mais chuvoso é de novembro a janeiro, totalizando 663,29 mm, o equivalente a 51,66% do total pluviométrico. O mês mais chuvoso é janeiro, com 314,38 mm, representando 24,48% do total pluviométrico. O trimestre consecutivo seco ocorre entre junho, julho e agosto, com índices pluviométricos de 28,17 mm, 28,34 mm e 7,28 mm, representando, em termos percentuais, o equivalente a 4,97% do índice pluviométrico médio do período citado (MARCHIORO, 2008). A temperatura média para o período de 1960 a 1990 é de 23,1°C, sendo o mês de fevereiro, com 26,4°C, o mais quente, e o de junho, o mais frio, com 19,9°C. O trimestre mais quente é o compreendido entre janeiro e março, e o mais frio entre junho e agosto (GONÇALVES et al., 2006).

Geologicamente, na bacia experimental do córrego Santa Maria, ocorrem as unidades geológicas São José de Ubá e Vista Alegre (Complexo Juiz de Fora), Catalunha (Complexo Paraíba do Sul) e os Sedimentos Quaternários (REIS; MANSUR, 1995). A primeira é composta por hiperstênio, possuindo características metamórficas, com granulação fina, coloração cinza esverdeada, maciça e foliada. A segunda é formada por uma complexa associação entre migmatitos e rochas metamórficas, extremamente heterogêneas. A unidade Catalunha é constituída por gnaisses, às vezes com grafita e cordierita. Os Sedimentos Quaternários são de origem fluvial, situados nas planícies de inundação (REIS; MANSUR, 1995).

A bacia possui importante descontinuidade geológica longitudinal, com rumo NE-SW, e as rochas encontram-se cortadas por conjunto de fraturas, predominando os trends NNW-SSE e NE-SW (concordante com a estruturação geológica da bacia), concentradas na parte norte da bacia (Domínio Juiz de Fora), devido à heterogeneidade das rochas e a uma estruturação milonítica mais pronunciada (HEILBRON et al., 2005).

Figura 1 Localização geográfica do município de São José de Ubá, no noroeste do Rio de Janeiro, e da bacia hidrográfica do rio São Domingos, onde se insere a bacia experimental do córrego Santa Maria.



A bacia está inserida na unidade geomorfológica Depressão Interplanáltica com Alinhamentos Serranos do norte-noroeste fluminense (DANTAS, 2000). Essa unidade caracteriza-se por apresentar contraste brusco entre feições homogêneas de colinas, morros e morrotes associados aos alinhamentos serranos elevados.

As classes de solos predominantes na bacia são os CAMBISSOLOS HÁPLICOS lépticos, que abrangem 44% da área, os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO, abrangendo uma área de 18,5%, e os NEOSSOLOS LITÓLICOS, abrangendo uma área 16,7%, que, em conjunto, totalizam 79,2 da área da bacia. Os restantes 20,8% são compostos, em ordem decrescente de área, pelos CAMBISSOLOS HÁPLICOS gleícos, GLEISSOLOS HÁPLICOS e Afloramento de rocha (BHERING et al., 2005; ZARONI, 2006).

Materiais e métodos

Para a execução da modelagem da produção de sedimentos, foi escolhida a bacia hidrográfica do córrego Santa Maria, já que apresenta, em termos geológicos, geomorfológicos e de uso e ocupação da terra, características representativas do noroeste fluminense.

Outro fato que contribuiu para a modelagem da produção de sedimentos e da concentração de sólidos em suspensão na água (CSS), no exutório da bacia hidrográfica do córrego Santa Maria, foi a disponibilização do banco de dados para a modelagem pelo projeto “Planejamento conservacionista das terras e modelagem preditiva de sistemas aquíferos do cristalino, para recarga hídrica em bacias hidrográficas de relevo acidentado”, liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa – RJ-Brasil).

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), em sua versão SWAT2005, denominado AVSWAT-X, foi escolhido para a elaboração deste trabalho, pela sua capacidade de simular a produção de sedimentos de modo contínuo para a bacia, permitindo, desta forma, a previsão para longos períodos de tempo (> 100 anos) ou apenas para um dia; por poder simular transporte e deposição no canal; simular vazão e qualidade de água, atendendo às leis de conservação de massa e energia; ser computacionalmente eficiente para operar em pequenas, médias e grandes bacias (> 1.000 km²), pois permite o fracionamento em diversas sub-bacias; e pela sua capacidade de elaborar cenários ambientais, levando em consideração diferentes práticas de manejo e conservação do solo (NEITSCH et al., 2005).

A produção de escoamento superficial é estimada pelo modelo SWAT, por meio da informação da curva número de cada classe de uso e cobertura da terra e sua prática de manejo e conservação (USDA/SCS, 1972). O SWAT utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) (WILLIAMS, 1995) para estimar a produção de sedimentos, levando-se em consideração a força do escoamento nas vertentes e no canal. Para simulação do volume e da velocidade da água no canal, o modelo SWAT utiliza a equação de Manning e o tempo de propagação é computado pela divisão do comprimento do canal pela velocidade (NEITSCH et al., 2005). A interface do modelo com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) (ArcView 3.2) permite que as saídas do modelo sejam exibidas em mapas e gráficos (NEITSCH et al., 2005).

Os dados necessários para a modelagem são o Modelo Digital de Elevação (MDE); o mapa de uso e cobertura da terra; o mapa pedológico, com suas características físico-hídricas e dados climáticos diários e mensais, os quais foram inseridos no modelo SWAT, por meio da sua interface com o ArcView 3.2, como pode ser visto na Figura 2.

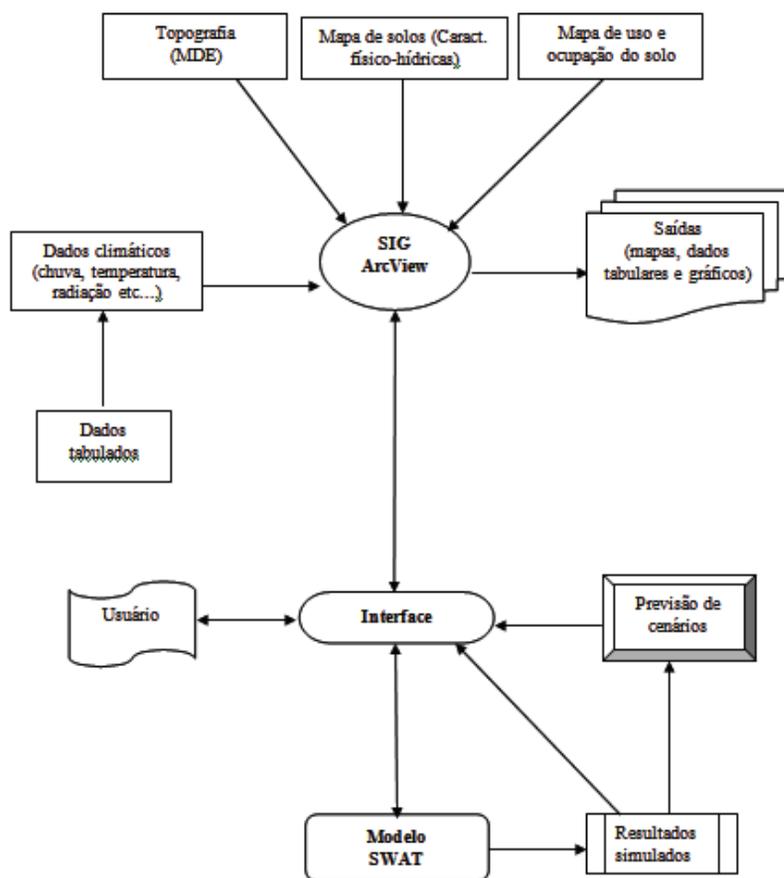
Para elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE), foi realizada a restituição planialtimétrica, na escala de 1:10.000, de fotografias aéreas pancromáticas na escala de 1:20.000 e 1:30.000 da Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro (CERJ), por Fidalgo e Abreu (2005). A equidistância das curvas utilizadas no mapa de entrada na interface do SWAT foi de 30 m.

O mapa de uso e cobertura da terra, do ano de 2008, da bacia do córrego Santa Maria foi elaborado preliminarmente por Zaroni (2006), utilizando fotografias aéreas do tipo pancromáticas, na escala de 1:20.000 e 1:30.000, de 2000, fornecidas pela CERJ. Para esse mapeamento, foi utilizada a classificação automática por meio do Sistema de Informação Geográfica (SIG) SPRING 4.1, com posterior validação em campo. Contudo, foi verificada, no mapeamento, uma faixa da bacia do córrego Santa Maria que não havia sido recoberta pelo sobrevoo, culminando na ausência de dados nessa área do mapa.

Para complementar o mapeamento supracitado, realizou-se fotointerpretação visual dessa área, não recoberta pelo sobrevoo da CERJ, utilizando o software ArcGis™ 9.0. Para tal, foram utilizadas fotografias aéreas, disponibilizadas pelo Departamento de Recursos Minerais (DRM/RJ) do Voo da Força Área Brasileira (FAB), de 1976, na escala de 1:10.000, e posterior validação de todo o mapeamento por meio de trabalho de campo na área de estudo no ano de 2008. É importante salientar que, na faixa preenchida manualmente, não foi possível manter a escala obtida na classificação automática e a riqueza de detalhes, uma vez que se buscou contornar polígonos com maior representatividade espacial.

As classes de uso e cobertura da terra mapeadas na bacia do córrego Santa Maria foram: solo exposto, pastagem, cultura anual, mata (Mata Atlântica), afloramento rochoso, área urbana e corpos de água. Para a modelagem hidrossedimentológica com essas classes de uso e cobertura da terra, foram utilizados os parâmetros disponibilizados no banco de dados do AVSWAT-X.

Figura 2 Diagrama da metodologia utilizada para geração do banco de dados e simulações do modelo SWAT na interface SIG.



Adaptado por Marchioro (2008).

O mapa de solos da bacia experimental do córrego Santa Maria e os respectivos parâmetros físico-hídricos de cada classe de solo representativo das unidades de mapeamento foram fornecidos por Bhering et al. (2005), e introduzidos ao modelo por meio da interface ArcView 3.2 e AVSWAT-X.

Para as simulações, o modelo requer um banco de dados climáticos composto por dados diários de chuva (obrigatório), temperatura (obrigatório), radiação solar (modelável), umidade relativa do ar (modelável) e velocidade do vento (modelável), bem como a inserção de uma estação meteorológica com dados médios no SWAT. A criação da estação meteorológica foi feita também na interface ArcView 3.2, com o AVSWAT-X.

Para suprir as necessidades das informações climáticas, foram utilizados dados diários de precipitação para o período de 1º de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2007, obtidos por uma estação termopluviométrica localizada nas coordenadas UTM de 0196838 e 7632887, Datum WGS 1984, Fuso 24S, situada a uma altitude de 149 metros no exutório da bacia do córrego Santa Maria, fornecidos pelo projeto “Planejamento conservacionista das terras e modelagem preditiva de sistemas aquíferos do cristalino, para recarga hídrica em bacias hidrográficas de relevo acidentado”, liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa – RJ).

Para as temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e velocidade do vento, foram utilizados dados diários da estação meteorológica automática de Itaperuna/RJ, localizada entre as latitudes 21°12' S e 41°54' W, situada a uma altitude de 123 metros, que foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), de Brasília. A radiação foi modelada pelo SWAT e o método utilizado para o cálculo da evapotranspiração foi o *Penman-Montheith*.

Os parâmetros necessários para a criação da estação meteorológica na interface ArcView 3.2 com o SWAT são: média mensal da temperatura máxima do ar [°C]; média mensal da temperatura mínima do ar [°C]; desvio padrão para temperatura máxima mensal do ar [°C]; desvio padrão para temperatura mínima mensal do ar [°C]; média da precipitação mensal [mm]; desvio padrão para precipitação diária neste mês [mm]; coeficiente de distorção da chuva diária (*Skew coefficient*); probabilidade de um dia chuvoso, seguido de um dia seco mensal; probabilidade de um dia chuvoso, seguido de outro dia chuvoso mensal; média mensal dos dias chuvosos; chuva máxima no período de 30 minutos [mm] e seu período de retorno [anos]; média mensal da radiação solar diária [MJ/m²xdia]; média mensal do ponto de orvalho [°C]; e média mensal da velocidade do vento [m/s].

Para calibração e validação do modelo, foram utilizados dados hidrossedimentológicos, obtidos por meio de estação automática Solar 2000 Mim, localizada nas coordenadas UTM de 0196838 e 7632887, Datum WGS 84, Fuso 24 S, a uma altitude de 149 metros no exutório da bacia experimental do córrego Santa Maria.

A estação Solar 200MIM é constituída de um *datalogger* e um sensor de turbidez do tipo SL2000-TS, que estima a CSS diária. O sensor de turbidez mede a frequência da luz que lhe retorna após a reflexão pelos sedimentos em suspensão na água à sua frente, na faixa de luz infravermelho entre 800 a 860 nm. Essa mudança da frequência da luz é captada e interpretada pelo sensor e transmitida na forma de sinais elétricos ao *datalogger*, que os converte em dados de CSS. Com relação à vazão, sua obtenção foi realizada levando-se em consideração a emissão de um sinal elétrico pelo sensor imerso na coluna de água até a superfície livre (atmosfera), na faixa entre 0 a 3,5 m, quantificando-se a pressão do volume da água no ponto determinado. O cálculo de vazão foi feito diretamente a partir de uma calibração por meio da curva chave determinada por Moraes (2007).

A calibração do SWAT foi feita de forma automática, utilizando-se dados de concentração de sólidos em suspensão (CSS) diários, para o período de abril de 2005 a agosto de 2006, e validação de dezembro de 2006 a setembro de 2007. Para avaliar a eficiência do SWAT em simular a CSS, utilizou-se o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), podendo variar desde menos infinito até 1, sendo 1 o indicativo de simulação perfeita do evento simulado em relação ao medido.

O coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe para a concentração de sólidos em suspensão no exutório do canal do córrego Santa Maria foi estimado pela equação 1, como indicado por Neitsch et al. (2005).

$$\text{COE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - E)^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Em é o evento observado; Es é o evento simulado; E é a média do evento observado; e n é o número de eventos.

Quanto melhor ajustado o modelo, o valor do COE será igual ou próximo de um, indicando que a variância do ajuste (média de diferenças quadráticas dos valores calibrados e observados) é um valor relativamente pequeno em relação à variância dos dados observados; enquanto que zero indica um ajuste regular, onde o grau de variabilidade do ajuste é próximo da variabilidade dos dados observados. Um COE com sinal negativo indica um ajuste ruim do modelo, com alto grau de disparidade entre valores observados e calibrados, significando que a variância do ajuste resultou em um valor muito alto em relação à variância dos dados observados, produzindo um COE negativo.

Para a definição das Áreas de Proteção Permanentes (APPs), conforme previsto no Código Florestal Brasileiro e suas especificações do artigo 2º, foi utilizado o modelo digital de elevação, a drenagem, os lagos, as nascentes e as declividades iguais ou superiores a 45°, por meio do ArcGis 9.0. Com esses parâmetros, foi possível definir a área de preservação permanente com Mata Atlântica nos limites da bacia, que foram utilizadas para o cenário ambiental.

Uma vez elaborado o respectivo plano de informação, este foi inserido no SWAT (AVSWAT-X) e posteriormente elaborada a modelagem com este cenário ambiental. O banco de dados de uso e cobertura da terra utilizado para a modelagem foi o disponibilizado pelo modelo SWAT, utilizando-se a classe dominante por Unidades de Respostas Hidrológicas (URH).

Os resultados das simulações do SWAT são apresentados neste trabalho por meio de mapas, gráficos e tabelas para as Unidades de Respostas Hidrológicas ou sub-bacia.

Resultados e discussão

A validação mensal da concentração de sólidos em suspensão (CSS) do AVSWAT-X

Em relação à concentração de sólidos, na Tabela 1 são apresentados os resultados da simulação sem calibração e calibrada, assim como os valores observados da bacia do córrego Santa Maria para o mesmo período.

Tabela 1 Concentração de sólidos em suspensão da bacia do córrego Santa Maria, no Noroeste Fluminense (RJ).

Meses	Observado	Sem Calibração	Calibrado
Dez.	12,3267	28,52880	6,2765
Jan. (2007)	11,6498	51,43182	35,9370
Fev.	12,3260	1,78500	0,0027
Mar.	11,4858	21,5300	6,6460
Abr.	12,8924	10,4440	2,0910
Mai.	11,0714	0,0493	0,0139
Jun.	8,4352	0,1840	0,0517
Jul.	8,4835	0,4384	0,1504
Ago.	6,7005	0,1291	0,3156
Set.	5,1118	0,1237	0,1270
Out.	2,9560	0,24896	0,24579
Nov.	3,4766	0,1581	0,1197
Dez.	4,0216	3,9430	1,7790
COE	-	-12,4516	-6,1136

Pode-se constatar, na Tabela 1, que os valores simulados com e sem calibração para os meses secos foram praticamente nulos, devido provavelmente à alta infiltração de água no solo assumida pelo modelo, favorecida pela condição de baixa umidade antecedente, ocasionando uma baixa produção de escoamento superficial, de sedimentos nas encostas e concentração de sólidos em suspensão para essa época do ano, em relação ao observado.

O COE obtido para as simulações sem e com calibração foram negativos, e respectivamente de -12,4516 e -6,1136, demonstrando que o AVSWAT-X não foi capaz de simular valores de concentração de sólidos próximos dos observados em campo. O COE obtido neste trabalho mostra que a variância interna dos valores simulados foi superior ao observado, sendo que, para a versão sem calibração, a variação foi de 184,6885, e, com calibração, de 97,6681. A variância na CSS da simulação sem calibração foi fortemente influenciada pelos totais mensais elevados de dezembro de 2006, janeiro e março de 2007. As CSS absolutas que mais se aproximaram da observada foram as de abril e dezembro de 2007 para a simulação sem calibração.

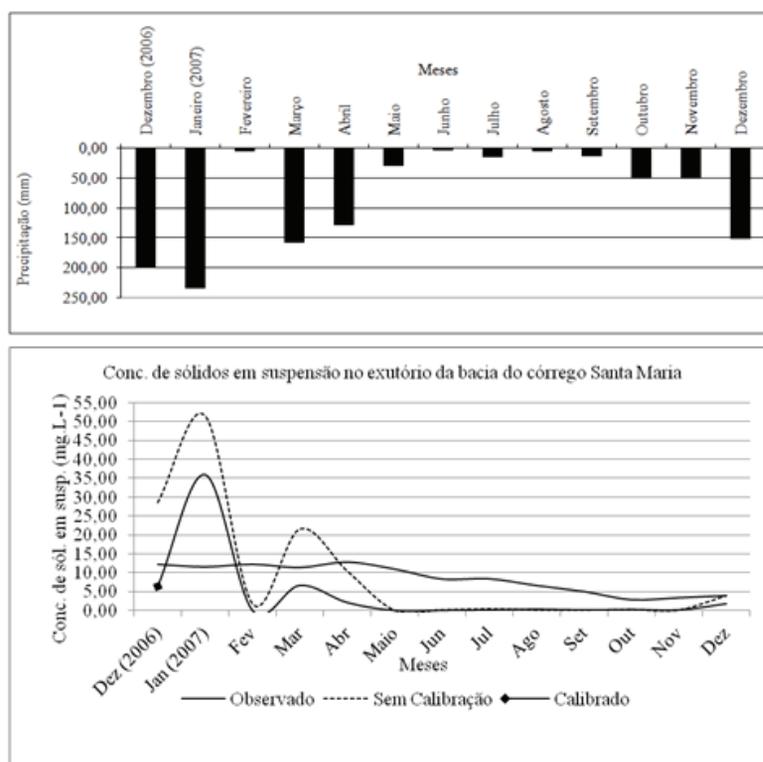
A concentração de sólidos simulada pelo modelo AVSWAT-X, depois de calibrado, superestimou o mês de janeiro e subestimou os demais meses analisados entre dezembro de 2006 e o mesmo mês de 2007, ou seja, com exceção do mês de janeiro de 2007, todos os demais valores observados foram superiores aos simulados pelo AVSWAT-X.

O comportamento dos valores de CSS simulados oscilou bruscamente em função dos dados pluviométricos e apresentou alta sensibilidade às chuvas concentradas de janeiro de 2007, quando comparados aos observados, que apresentaram declínio suave da CSS ao longo do período monitorado.

A maior discrepância entre o simulado e o observado ocorreu no mês de fevereiro, onde se constata que existe uma diferença absoluta de 12,3234 mg/l a favor dos dados observados. Isto ocorreu devido à ausência de dados durante os primeiros quatorze dias de chuva do mês, quando o sensor não funcionou. Isto também contribuiu para verificar que provavelmente o modelo está simulando um baixo tempo de concentração de sólidos em suspensão, quando comparado ao observado.

Na Figura 3, verifica-se o comportamento sazonal da concentração de sólidos em suspensão no canal, e constata-se que não existe qualquer relação próxima entre o comportamento simulado pelo AVSWAT-X e os observados em campo para o período entre fevereiro e julho de 2007. O comportamento simulado pelo AVSWAT-X foi diretamente influenciado pela distribuição da precipitação mensal, fato não verificado nos dados observados, indicando algum problema no sistema de monitoramento.

Figura 3 Comportamento sazonal da concentração de sólidos em suspensão do córrego Santa Maria simulado pelo modelo SWAT para o período entre 2006 e 2007.



A influência do cenário ambiental na produção de sedimentos

Na Tabela 2 são apresentados os valores de cada classe de uso e cobertura da terra em 2008, bem como aquele levando em consideração o cenário ambiental com o reflorestamento de APPs.

Conforme observado na Tabela 2, ocorreu profunda mudança do item pastagem, passando de 68,31% no uso e cobertura em 2008 para 39,11% com o reflorestamento de APPs. Outra categoria que teve redução expressiva foi a classe de solo exposto, que originalmente apresentava 50,22 ha ou 3,72% do uso naquele ano, passando para 16,59 ha ou 1,22% com o CFB. A classe área urbana sofreu alteração de 1,16 (0,09%) para 1,06 (0,08%), totalizando 10 ha. As classes corpo de água e

afloramento rochoso não tiveram nenhuma alteração no que diz respeito a sua representatividade espacial da bacia.

Tabela 2 **Uso e cobertura da terra considerando as APPs do Código Florestal Brasileiro (CFB) e a situação em 2008.**

Classe	Uso e cobertura da terra em 2008		Uso e cobertura da terra com o Código Florestal Brasileiro (Artigo 2º)	
	Área (ha)	Porcentagem (%)	Área (ha)	Porcentagem (%)
APP	*	*	579,96	42,75
Área urbana	1,16	0,09	1,06	0,08
Corpo de água	10,32	0,76	10,32	0,76
Cultura anual	26,76	1,97	23	1,7
Solo Exposto	50,22	3,71	16,59	1,22
Afloramento Rochoso	73,52	5,42	73,52	5,42
Mata	267,72	19,74	121,54	8,96
Pastagem	926,78	68,31	530,5	39,11
Total	1356,48	100	1356,48	100

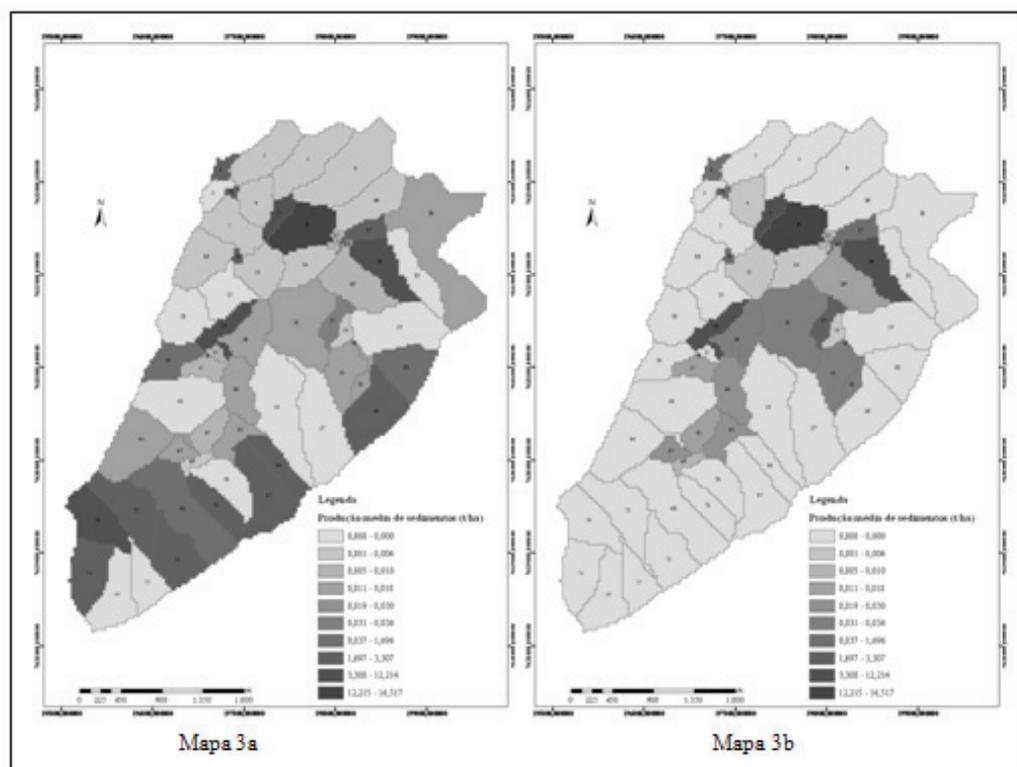
* No uso e ocupação do solo em 2008, a classe Área de Preservação Permanente era inexistente.

Na Figura 3, verifica-se o comportamento da produção de sedimentos das encostas para a bacia do córrego Santa Maria, levando-se em consideração o uso e cobertura da terra em 2008 e o cenário ambiental utilizando o reflorestamento de APPs.

A produção de sedimentos média nas encostas para o período entre 2005 e 2007 na bacia do córrego Santa Maria, levando-se em consideração o uso e cobertura da terra em 2008, foi influenciada pelo comprimento de encosta, sendo que as maiores taxas ocorreram para encostas com comprimento entre 15 e 28 metros, correspondentes a declividades mais elevadas (relevo forte ondulado e montanhoso) associadas às condições físico-hídricas dos Argissolos Vermelhos-Amarelos, Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos.

Nas URHs com classe de solos RLve (NEOSSOLO LITÓLICO – Eutrófico típico, A moderado, textura média), CXve2 (CAMBISSOLO HÁPLICO – Ta, Eutrófico léptico, A moderado, textura média/argilosa) e CXve1 (CAMBISSOLO HÁPLICO – Ta, Eutrófico gleico, A moderado, textura média), a declividade propiciou o aumento na produção média de sedimentos, contribuindo para que a URH de número 54 esteja entre as maiores produtoras de sedimentos. As URHs de número 55 e 57 não seguem a tendência verificada, pois sua produção de sedimentos é nula, devido à proteção do solo exercida pela cobertura vegetal de floresta dominante (Figura 3).

Figura 3 Mapa da produção média de sedimentos nas encostas da bacia do córrego Santa Maria para o período compreendido entre 2005 e 2007, levando-se em consideração o uso e cobertura da terra (mapa 3a) e o reflorestamento de APPs previsto pelo CFB (mapa 3b).



Nas URHs associadas às classes de solos PVad (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO – Distrófico típico, A moderado, textura média/argilosa) e CXve3 (CAMBISSOLO HÁPLICO – Tb, Eutrófico típico, A moderado, textura média, fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado), o comprimento da encosta foi o fator mais determinante para a produção de sedimentos. Assim, as URHs com comprimento de encosta entre 15 m e 25 m e declividade oscilando entre 8 a 25% foram as que apresentaram a maior produção média de sedimentos.

Para as URHs de número 17, 20, 21, 25, onde a classe de solo dominante é o GXve (GLEISSOLO HÁPLICO – Ta, Eutrófico típico, A moderado, textura média/argilosa), encontram-se áreas que estão entre as maiores produtoras de sedimentos na bacia, associadas ao comprimento de encosta de 36,59 m. Para o comprimento de encosta superior ao citado, verifica-se uma diminuição média na produção de sedimentos, evidenciando o predomínio da deposição sobre a erosão nessas URHs.

Em relação às URHs de número 2 e 6 (Figura 3), onde predominaram os solos CXbe2 (CAMBISSOLO HÁPLICO – Tb, Eutrófico típico, A moderado, textura média), não foi verificada influência das variáveis comprimento e declividade para a produção de sedimentos, pois tanto o comprimento da encosta quanto a declividade são muito próximas, sendo que a produção de sedimentos média foi de 0,0060 t/ha/ano.

A influência do reflorestamento de APPs com Mata Atlântica, segundo o CFB, reduziu significativamente a produção de sedimentos média para o período entre 2005 e 2007, devido à modificação do uso e cobertura da terra das URHs, que minimizou o efeito do impacto das gotas de chuva, aumentou a infiltração de água no solo e a redução da ação do escoamento superficial sobre as encostas. Apesar dos valores baixos de produção de sedimentos nas encostas, na maioria das URHs, propiciados pela utilização do reflorestamento, segundo o CFB, em relação ao uso de 2008, verificam-se em algumas URHs altas taxas de produção de sedimentos, pois a aplicação do CFB não resultou em mudança no uso dominante para floresta.

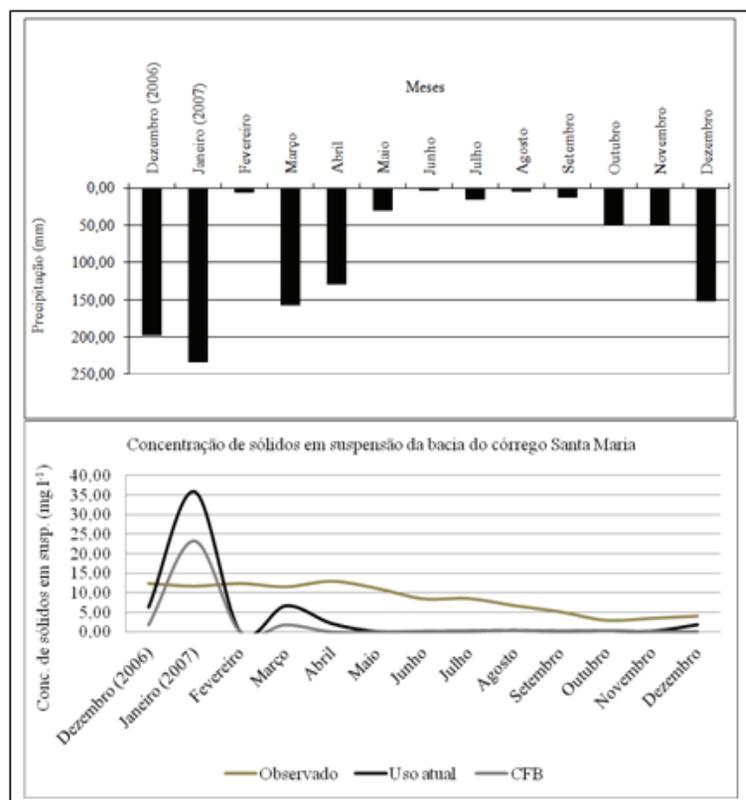
Utilizando a classificação de Montagnini (1992), que estabeleceu máximos valores de produção de sedimentos aceitáveis para florestas tropicais de 0,09 t/ha/ano, para culturas agrícolas de 4 t/ha/ano e para o arroz de 1,20 t/ha/ano, as URHs que apresentaram mudança de pastagem para floresta, em função da utilização do CFB, estão em sua maioria dentro dos limites estabelecidos pelo autor supracitado.

Como evidenciado na simulação usando o CFB, as áreas de florestas têm efeitos significativos na produção de sedimentos, estando, por exemplo, em conformidade com o encontrado por Lal (1983), que verificou taxas de produção de sedimentos em floresta de 0,001 t/ha/ano e escoamento de 1,1% ano; na pastagem, foi de 1,0 t/ha/ano e o escoamento foi de 1,6% ano. Bertoni e Lombardi Neto (1999) avaliaram que, no Estado de São Paulo, o efeito da floresta contribuiu para uma produção de sedimentos de apenas 0,004 t/ha/ano, em relação à pastagem, com 0,40 t/ha/ano.

Em virtude da minimização na produção de sedimentos nas encostas na modelagem pelo AVSWAT-X, utilizando o CFB, na bacia do córrego Santa Maria, verificou-se diminuição na CSS no corpo hídrico. A CSS na simulação calibrada, com o uso e cobertura da terra em 2008, para o período entre dezembro de 2006 e o mesmo mês de 2007, foi de 53,76mg.L⁻¹, passando, com o reflorestamento de APPs, para 27,92mg.L⁻¹, apresentando redução de 51,94% (Figura 4).

Figura 4

Concentração de sólidos em suspensão e precipitação na bacia do córrego Santa Maria para o período compreendido entre dezembro de 2006 e o mesmo mês de 2007, levando-se em consideração diferentes usos e cobertura da terra.



A concentração de sólidos em suspensão (CSS) observada para o uso e cobertura da terra em 2008, durante o período de dezembro de 2006 até o mesmo mês de 2007, foram superiores aos simulados pelo SWAT, com exceção do mês de janeiro de 2007. O comportamento dos valores de CSS simulados oscilou bruscamente em função dos dados pluviométricos e apresentaram alta sensibilidade às chuvas concentradas de janeiro de 2007, quando comparados aos observados, que apresentaram pequeno declínio da CSS ao longo do período monitorado, como pode ser observado na Figura 4.

Observa-se também que as maiores taxas de CSS para o uso e ocupação da terra em 2008 e o cenário ambiental com o CFB estão associadas ao período de dezembro a fevereiro, coincidentes com o período de maior índice pluviométrico e intensidade das chuvas elevadas, agravando a produção de sedimentos. No mês de janeiro, a CSS observada no corpo hídrico é menor que a obtida pela modelagem em relação ao uso atual e ao CFB. Tal situação reflete problemas no sistema de monitoramento, pois durante o período chuvoso ocorre o afogamento do vertedouro, promovido pelas chuvas concentradas e elevadas, minimizando o seu valor absoluto ao final do dia.

Conclusões

Ao considerar o reflorestamento de APPs, atendendo ao que está estabelecido pelo Código Florestal Brasileiro, reduziu-se a produção de sedimentos média nas encostas da bacia do córrego Santa Maria para o período 2005-2007.

A concentração de sólidos em suspensão (mg.L-1) no corpo hídrico monitorado foi minimizado drasticamente devido à redução da produção de sedimentos nas encostas, promovido pela proteção exercida pela cobertura vegetal de Floresta Atlântica, utilizada como cenário ambiental alternativo.

O uso e cobertura da terra dominante utilizado nos trabalhos com SWAT, para definir as URHs, limitou, no caso deste estudo, a interpretação e discussão do cenário ambiental proposto, sendo recomendável, em trabalhos futuros, a utilização de múltiplas respostas hidrológicas como critério de definição das URHs, pois permite uma melhor aplicação de cenários ambientais, já que todos os usos e coberturas da terra são considerados, independentemente de sua representatividade espacial.

Constatou-se, neste estudo, que o modelo SWAT é uma importante ferramenta para estudos ambientais que visam simular a produção de sedimentos em condições atuais de uso e ocupação da terra e de práticas de manejo e conservação adequadas, bem como o efeito de reflorestamento na escala de bacia hidrográfica.

Agradecimentos

Ao projeto “Planejamento conservacionista das terras e modelagem preditiva de sistemas aquíferos do cristalino, para recarga hídrica em bacias hidrográficas de relevo acidentado”, financiado pelo Programa de Apoio ao Desenvolvimento de Tecnologias Agropecuárias para o Brasil (PRODE-TAB), liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) do Estado do Rio de Janeiro, que forneceu grande parte dos dados obtidos na bacia do córrego Santa Maria, utilizados no presente estudo.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) de Brasília, pela concessão dos dados climáticos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de doutorado.

Referências Bibliográficas

- ABREU, M. B.; FIDALGO, E. C. C. Mapeamento do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio São Domingos. In: Workshop de integração de informações obtidas no âmbito do projeto Prodetab Aquíferos - Embrapa Solos. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 2006. 1cd-Rom.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. *Conservação do solo*. São Paulo: Editora Ícone, 1999. 355 p.
- BEVEN, K. J. *Rainfall-runoff modelling*. Nova York: John Willy & Sons, 2001. 360 p.
- BHERING, S. B.; PEREIRO, N. R.; MACEDOS, J. R.; CHAGAS, C. S.; SILVA, E. F.; PRADO, R. B.; NETO, N. C. S. Caracterização edafoambiental das microbacias de Cambiocó e Santa Maria no Município de São José de Ubá, região noroeste do Estado do Rio de Janeiro para fins de planejamento conservacionista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO (CBCS): solos, sustentabilidade e qualidade ambiental, 30., 2005, Recife. *Anais...* Recife: Embrapa Solos (UEP), 2005. 1 cd-Rom.
- COSTA, T. C. C.; FIDALGO, E. C. C.; UZEDA, M. C.; ZARRONI, M. J.; NAIME, U. J.; GUMARÃES, S. P. Um indicador de vulnerabilidade para sub-bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. *Geografia*, Londrina, v. 17, n. 2, jul./dez. 2008.
- DANTAS, M. E. *Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro*: Texto explicativo do mapa geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:50.000. CPRM/DRM. Rio de Janeiro: CPRM/DR, 2000. 60 p.
- DUNE, T.; LEOPOLD, L. B. *Water: in environmental planning*. Nova York: Freeman and Company, 1978. 818 p.
- FIDALGO, E. C. C.; ABREU, M. B. Uso de imagens Áster para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio São Domingos, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia (GO), 2005, p. 3747- 3753.
- FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO (CIDE). *IQM verde: índice de qualidade dos municípios*. 2. ed. ampl. rev. Rio de Janeiro, 2003. 1cd-Rom.
- GONÇALVES, A. O.; FIDALGO, E. C. C.; BASTOS, C. L.; ABREU, M. B. Caracterização climática da bacia do rio São Domingos. In: Workshop de integração de informações obtidas no âmbito do projeto Prodetab Aquíferos: Embrapa Solos. 2006, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 2006, 1 cd-Rom.
- GRAHAM, O. P. Land Degradation Survey of NSW 1987-1988: *Methodology, Soil Conservation Service of NSW (SCS)*, Technical Report No. 7, SCS, Sydney, 1989.
- HEILBRON, M. D. B. P.; NOGUEIRA, J. R.; ALMEIDA, J. C. H.; TUPINAMBÁ, M.; GERALDES, M. C.; GUIA, C.; MIRANDA, A. W. A.; SILVA FILHO, R. S.; MEDEIROS, F. F.; MANSUR, K. Geologia da bacia do rio São Domingos, São José de Ubá, Rio de Janeiro. *Anais...* Boletim de Resumos do 9º Simpósio de Geologia do Sudeste (SBG), Niterói (RJ), 2005. 118 p.
- LAL, R. Effects of slope length on soil loss from Alfisols in Western Nigéria. *Geoderma*, v. 31, n. 3, p. 185-193, 1983.
- MARCHIORO, E.; FRENANDE, N. F.; MACEDO, J. R.; BHERING, S. B.; GONÇALVES, A. O.; CAIADO, M. A. C. Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 12, n. 1, 2011.
- MARCHIORO, E. *Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria*: subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense. 2008, 196 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

- MARQUES, J. Q. A. Política de conservação do solo. *Boletim do Serviço de Informação Agrícola* - S. I. A., v. 734, 1949, p. 73.
- MONTAGNINI, F. *Sistemas agroflorestales: principios y aplicaciones en los tropicos*. San José (Costa Rica): Organización para Estudios Tropicales, 1992. 622 p.
- MORAES, M. F. *Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental/ Representativa de Santa Maria/Cambiocó - Município de São José de Ubá - RJ*. 2007. 233 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- MORGAN, R. P. C. *Soil erosion and conservation. Third Edition*. Blackwell Publishing Ltda. Oxford. UK. 304f.
- NETTSCH, S. L. et al. *Soil and water assessment tool: theoretical documentation* - version 2005. Texas: Blackland Research Center, 2005. 525 p.
- PIMENTEL, D. Overview. In: PIMENTEL, D. *World soil erosion and conservation*. Nova York: Cambridge University Press, 2009.
- REIS, A. P.; MANSUR, K. L. *Sinopse geológica do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:400.000*. Nitéroí (RJ): Departamento de Recursos Minerais (DRM). Secretaria do Estado de Meio Ambiente do Rio de Janeiro, 1995. 60 p.
- SOFFIATI, A. História das ações antrópicas sobre os ecossistemas vegetais nativos das regiões norte e noroeste do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Perspectivas*, Campos dos Goytacazes, v. 4, n. 7, p. 67-79, jan./jul. 2005.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - SOIL CONSERVATION SERVICE (USDA/SCS). *Hydrology*. Section 4. National Engineering Handbooks. Washington, Chapters 4-10, 1972.
- WILLIAMS, J. R. Chapter 25: The EPIC Model. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Computer models of watershed hydrology*. Littleton: Water Resources Publications, 1995, p. 909-1000.
- ZARONI, M. J. *Estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas por meio do modelo de erosão USLE e do índice de transferência de sedimentos - SDR*. 2006, 143 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.