

Variabilidade Espacial do Potencial de Erosão e seus Efeitos na Sedimentação de um Pequeno Reservatório – A Bacia dos Mottas, Sudeste do Brasil

Silvio Jorge C. Simões, George de Paula Bernardes, Cassiane M. Ferreira Nunes, Tiago Coelho March

Laboratório de Análise Geo-Espacial (LAGE), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá/UNESP

simoes@seg.unesp.br; gpb@seg.unesp.br

Recebido: 27/04/05 - revisado: 04/10/05 - aceito: 11/07/07

RESUMO

Este estudo procurou avaliar as condições de fragilidade e vulnerabilidade aos processos erosivos de uma pequena bacia buscando utilizar métodos que estimem, espacialmente, as taxas de perda de solo e buscassem estabelecer uma relação entre processos erosivos de vertentes e os sedimentos depositados em um reservatório. A bacia estudada, ribeirão dos Mottas, foi selecionada considerando sua diversidade físico-ambiental, crescentes problemas de erosão e a presença de um reservatório que permite estudar a sedimentação fluvial. A análise espacial da erosão na bacia foi obtida a partir do Mapa de Potencial de Erosão (PNE) e o Mapa de Vulnerabilidade à Erosão produzidos em um ambiente SIG (SPRING, INPE). Estimativas da quantidade de sedimentos erodidos e transportados das vertentes para o reservatório chegaram a alcançar em torno de 3200 t/ha/ano. A avaliação preliminar do grau de assoreamento da represa dos Mottas indica uma redução do volume útil de 16% em um período de 33 anos (1967-1999). Os resultados constatam elevada degradação física e ambiental e condicionante naturais que apontam para uma bacia quase totalmente inapta à urbanização.

Palavras-chaves: pequenas bacias, processos erosivos, assoreamento em reservatórios, sistema de informação.

INTRODUÇÃO

Um dos desafios para o monitoramento de pequenas bacias hidrográficas é compreender a dinâmica do meio físico considerando a diversidade dos seus elementos e dos processos envolvidos a partir de representação espacial que aponte as suas áreas de maior e menor fragilidade natural.

Na bacia do rio Paraíba do Sul, alguns dos maiores problemas relacionados ao meio físico estão associados aos processos erosivos e ao assoreamento de rios e reservatório. Apesar da importância desta questão, não existem trabalhos que procurem tratar, de maneira integrada, os processos erosivos de vertentes e o transporte e deposição de sedimentos em corpos de água.

Diante disto, este estudo buscou utilizar métodos que apontassem a fragilidade e a vulnerabilidade da bacia aos processos erosivos estimando taxas de perda de solo e avaliando a produção de sedimentos em um pequeno reservatório.

Para este estudo foi selecionada a bacia dos Mottas a qual pode ser considerada uma bacia representativa (Toebes & Ouryvaev, 1970) das condições existentes no Alto e Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Entre as razões para a seleção desta bacia pode-se destacar: a) evidências de processos erosivos acelerados; b) presença de um reservatório possibilitando estudos de assoreamento; c) potencialidade desta bacia como manancial hídrico para as cidades de Guaratinguetá e Aparecida.

Este estudo foi realizado no âmbito do Programa Recope-Rehidro promovido pela FINEP e inserido na sub-rede 1 (“Monitoramento de Bacias Hidrográficas e Processamento de Dados”). O objetivo geral desta sub-rede foi “desenvolver e aplicar metodologias de monitoramento e processamento de dados visando a obtenção de informações que permitissem dar sustentação às atividades de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos nas várias regiões do país” (Paiva *et al.*, 1998).

LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia dos Mottas se constitui um afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul, nascendo na Serra Quebra Cangalha, a uma altitude aproximada de 1000m. A Serra do Quebra Cangalha faz parte do sistema de elevações que compõem a Serra

do Mar no Estado de São Paulo. Esta bacia comprehende uma área de 102,4 Km² situada nos municípios de Aparecida e Guaratinguetá (Figura 1). Sua localização fica entre os paralelos 22 e 24 graus de latitude sul e os meridianos 44 e 47 graus de longitude oeste.

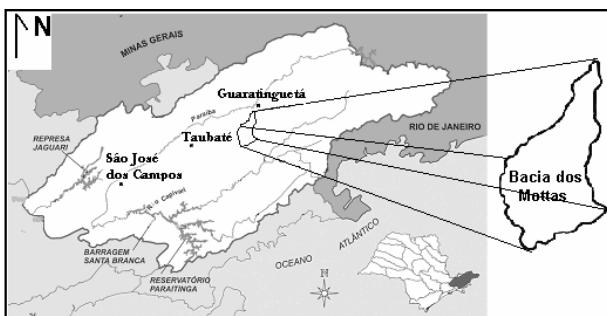


Figura 1- Localização da bacia do Ribeirão dos Mottas

No final do seu percurso, o ribeirão atravessa áreas em expansão urbana e da parte central da cidade de Guaratinguetá desaguando no rio Paraíba do Sul. Nas áreas de expansão urbana, a fragilidade dos terrenos e a ocupação desordenada têm levado a freqüentes problemas de inundação, deslizamentos de terra e processos erosivos acelerados.

Devido ao histórico de inundações relacionadas ao ribeirão dos Mottas, uma barragem de controle de cheias foi construída em 1965 no sentido de evitar as freqüentes inundações de alguns bairros na sua área urbana.

No sentido de melhor compreender os processos relacionados a erosão e a sedimentação fluvial serão descritas as principais características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e de uso da terra na bacia.

Geologia/Geomorfologia

A bacia dos Mottas é constituída por rochas do embasamento cristalino, de idade precambriana, formada principalmente por gnaisses, migmatitos e granitos (CODIVAP, 1992). Além destas rochas ocorrem pequenas faixas de sedimentos quaternários associados aos principais cursos de água da região.

Este contexto geológico favoreceu o desenvolvimento de formas de relevos mais íngremes como morros alongados e arredondados com declividades médias variando entre 20 a 40 % e amplitudes entre 100 e 300 metros normalmente associados a gnaisses e migmatitos. Os espinhos e serras locais

com declividades elevadas - 20 a 50% - estão normalmente associados às rochas graníticas e são predominantes na região sul da bacia, nos pontos mais distantes do exutório.

Pedologia

A diversidade geológica e geomorfológica se refletem na variação dos solos encontrados na bacia dos Mottas. Com base na classificação de Oliveira *et al.*(1999), as principais unidades pedológicas mapeadas na bacia são: a) Podzólico Vermelho Amarelo Orto (PV) encontrados somente em uma pequena área à oeste e associados aos topos das serras, b) Podzólico Vermelho Amarelo intergrade para Latossolo Vermelho (PVL) de maior extensão e geralmente associados aos relevos de morros alongados e arredondados, c) Solos Podzolizados com Cascalho (Pc) verificados na parte sul da bacia associada à relevos de escarpas e serras restritas, d) Latossolos Vermelho – Amarelo (fase rasa) (LVA) encontrados em pequenas áreas associados aos topos das serras.

Uso da Terra

A bacia dos Mottas pode ser considerada representativa das condições de paisagem existentes no Vale do Paraíba. Com base nos conceitos de ecologia da paisagem (Forman & Godron, 1986; Forman, 1995) as áreas de pasto representam a matriz da paisagem e as diversas formas de uso representam os “patches” (pedaços) contidos na matriz. A predominância das áreas de pastagem sobre as demais formas de uso pode ser bem observada na tabela 1, a partir de levantamentos em imagens de satélite LANDSAT geradas em 1997.

Tabela 1 - Tipo de uso e ocupação na bacia dos Mottas

Tipo	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Pastagem	82,39	80,11
Matas	11,20	10,89
Capoeira	4,58	4,45
Culturas agrícolas	4,01	3,90
Urbana	0,66	0,65

Com base na tabela 1 pode-se observar que a maior parte da bacia dos Mottas é caracterizada como área rural; as áreas de pastagem costumam ser degradadas e as práticas conservacionistas de uma maneira geral são inadequadas. Esta é uma situação

muito comum para boa parte do Médio Vale do Rio Paraíba (CEIVAP, 2000).

O desmatamento, as práticas inadequadas de manejo e a ocupação desordenada da bacia têm contribuído para a ocorrência de feições de instabilidade das cristas dos morros (Moreira, 1999), processos erosivos acelerados (Nunes, 1999), taxas de assoreamento elevadas no reservatório dos Mottas (March, 1999) e processos de inundação relativamente freqüentes (Reggiani, 1999).

A área urbana ocupa apenas 0,65% da área total da bacia (tabela 1) e corresponde a alguns bairros periféricos e centrais de Guaratinguetá situados nas proximidades do seu exutório. Em que pese o seu pequeno tamanho, a área urbana tem grande importância nos processos geo-hidrológicos da bacia comprometendo de forma significativa o equilíbrio do meio físico. Em algumas áreas foi possível detectar construções em áreas impróprias, deficiência do sistema de coleta de esgoto urbano e falta de um sistema de tratamento dos detritos e efluentes. Estes problemas se constituem restrições importantes para a manutenção da qualidade da água e do equilíbrio ecológico da bacia.

AVALIAÇÃO ESPACIAL DA EROSÃO

Metodologia

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido utilizados para estimar a erosão espacial pela facilidade de manipular e analisar dados espaciais e também por possibilitarem aos usuários identificar as áreas mais favoráveis à erosão (Lim *et al.*, 2005). Entre os procedimentos de quantificar erosão a Equação Universal de Perdas do Solo (EUPs) (Wischmeier & Smith, 1978), e suas variantes mais atuais, têm sido amplamente utilizada em regiões nas quais predominam erosão laminar e ravinas e onde o processo de formação e de desenvolvimento de voçorocas seja secundário (Lal, 1994).

Para este trabalho foram utilizados os recursos de dois sistemas de informação geográfica: a) SPRING (Sistema de Processamento de Informações Geo-Referenciadas) de domínio público, desenvolvido pelo INPE e b) os programas ArcView® 3.2. e ArcGIS® 9.0, ambos da ESRI (Environmental System Research Institute).

Do ponto de vista metodológico, foram estabelecidas três etapas principais (Nunes *et al.*, 2000). Inicialmente, foi realizado um levantamento sobre a área da bacia e adjacências produzindo um

banco de dados a partir de dados cartográficos e de imagens satélites LANDSAT geradas no período compreendido entre 1995 e 1997. Em seguida, os dados obtidos foram integrados gerando novos mapas temáticos com o objetivo de obter mapas de vulnerabilidade à erosão. Finalmente, se fez a avaliação e análise das informações através de detalhamento em laboratório e levantamentos de campo.

Com base na cartografia básica disponível (escalas 1:50.000 e 1:10.000) foram geradas as seguintes cartas temáticas: limite dos municípios, sistemas de drenagem (rios e cursos intermitentes), vegetação, malha urbana/vias de acesso e obras de engenharia. A partir das cartas temáticas disponíveis foram obtidos mapas simplificados (esboços) da geologia (litologias e estruturas), das formas de relevo, dos elementos morfométricos da paisagem e dos tipos de solos. Em um nível hierarquicamente superior de informação foram acrescentados os dados de erosividade regional e de erodibilidade dos solos cujos métodos de obtenção serão posteriormente discutidos. Os dados pluviométricos mensais foram considerados a partir de três estações distintas considerando os anos padrões de chuva definidos por Silva (1999): médio (1985), chuvoso (1983) e seco (1984).

A partir das curvas de níveis digitalizadas e cotadas foram gerados o *Mapa de Declividade* e o *Mapa Hipsométrico* da bacia. Com base no Mapa de Declividade e utilizando recursos computacionais do programa LEGAL (Linguagem Especial para Geoprocessamento Algébrico) do SPRING foi gerado o *Mapa de "Energia"*. Este mapa temático está relacionado à energia potencial das encostas e tem sido utilizado por Mazzocato (1998). A partir das características de relevo da área, foram definidas três classes de energia: a) baixa, com declividades até 10%, b) moderada, com declividades entre 10 e 35% e c) alta, com declividades maiores que 35%.

Interpretando as imagens do satélite LANDSAT, obteve-se o *Mapa de Resistência das Rochas à Erosão*. Este mapa foi produzido com base no princípio que o intemperismo origina formas de vertentes e cristas a partir das quais é possível determinar as suas características e também os processos que a afetaram (Mazzocato, 1998).

A interpretação das imagens de satélites também possibilitou a geração do *Mapa de Permeabilidade* a partir da densidade de drenagem (somatório do comprimento de todos os canais divididos pela área da bacia). Com base em análise de Sensoriamento Remoto, uma textura grossa estaria indicando uma pequena ramificação das linhas de drenagem sendo característico de materiais relativa-

mente permeáveis. De forma inversa, quando a textura é fina, existe um alto grau de ramificação e os espaçamentos são pequenos e os materiais são relativamente impermeáveis. A análise da permeabilidade não levou em conta o fraturamento existente nas rochas ígneas e metamórficas presentes na região. Infelizmente, este parâmetro não pode ser considerado devido à escassez de informação acerca do fraturamento na escala considerada.

Em seguida, com o auxílio do programa *LEGAL*, obteve-se o *Mapa de Capacidade de Transporte* a partir da integração dos mapas de energia e de permeabilidade. Uma classe de alta energia - quando associada a uma classe de baixa permeabilidade - gera alta capacidade de transporte. Analogamente, uma classe de baixa energia, quando associada a uma classe muito permeável, gera baixa capacidade de transporte. Rotinas em *LEGAL*. Este mapa contribui para definir as áreas nas quais os processos erosivos podem ser mais significativos; obviamente as áreas com maior capacidade de transporte tem um maior potencial erosivo enquanto as áreas com menor capacidade de transporte seriam áreas potenciais de deposição de sedimentos.

O *Mapa do Potencial Natural de Erosão (PNE)*, estima o risco de erosão de um solo, considerando não apenas suas propriedades intrínsecas, mas também as condições climáticas e topográficas às quais um determinado solo está sujeito. O potencial natural de erosão é fornecido pela seguinte equação:

$$PNE = RKFT \quad (1)$$

onde, R representa a erosividade da chuva, K a erodibilidade do solo e o valor FT o comprimento e a declividade da encosta.

A erosividade da chuva foi calculada a partir da equação utilizada por Bertoni & Lombardi Neto (1990):

$$R = 89,823 \left(\frac{p^2}{P} \right)^{0,759} \quad (2)$$

onde R é a erosividade, p é a precipitação média mensal e P é a precipitação média anual. A figura 2 mostra as rotinas em *LEGAL* em forma de fluxograma para a obtenção do mapa do PNE.

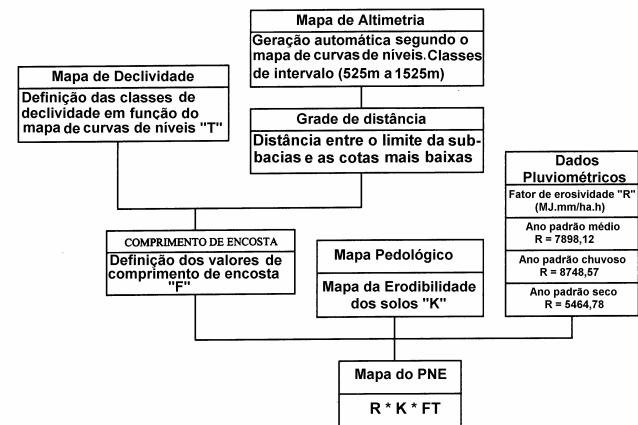


Figura 2 – Fluxograma mostrando as rotinas em *LEGAL* para a geração do Mapa do Potencial Natural de Erosão

Obteve-se dados de erosividade para um ano padrão médio, um ano padrão chuvoso e um ano padrão seco.

A erodibilidade (K) do solo foi obtida com base nos dados fornecidos por Bertoni & Lombardi Neto (1990) conforme se observa na tabela 2. As variáveis *comprimento de encosta* (F) e *declividade média* (T) foram obtidas utilizando-se as sub-rotinas do programa *LEGAL*.

Tabela 2 – Fator de erodibilidade (K). Valores em (t.h./MJ.mm). Bertoni & Lombardi Neto (1990, modificado)

Solo	Horizonte Superficial	Horizonte Subsuperficial
Podzólicos vermelho amarelo - orto	0,034	0,018
Podzólicos "inter-grade" para latossolo	0,028	0,014
Latossolo vermelho amarelo – orto	0,022	0,009
Latossolo vermelho amarelo – fase rasa	0,017	0,012

O *Mapa de Vulnerabilidade à Erosão* foi elaborado interagindo a geologia, a geomorfologia, a pedologia, a vegetação e o clima os quais representam os planos de informação de entrada (figura 3). Para cada unidade de paisagem natural foi atribuído um valor com base na relação morfogênese / pedogênese segundo a metodologia adotada por Crepani (1996; 2002) e Kawakubo (2005). O termo *pedogênese*

se refere ao predomínio da formação do solo sobre a movimentação do relevo e o termo *morfogênese* tem o sentido inverso.

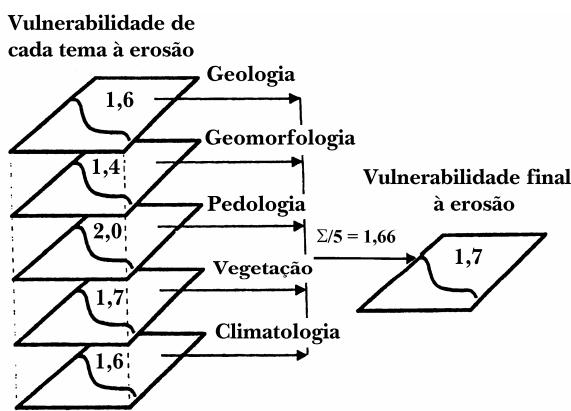


Figura 3 - Fluxograma apresentando as unidades da paisagem natural (planos de informação de entrada) e o mapa de vulnerabilidade à erosão (plano de informação de saída)

A integração dos dados disponíveis é realizada conforme um modelo que estabelece 21 classes de vulnerabilidade à erosão. Estas classes são distribuídas entre as situações de predomínio dos processos de pedogênese, passando por situações intermediárias e situação de predomínio dos processos de morfogênese aos quais se atribuem valores próximos de 1,0, 2,0 e 3,0, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 – Avaliação da vulnerabilidade das unidades de paisagem (Crepani, 1996).

Unidade	Relação Pedogênese/ Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece pedogênese	1,0
Intermediário	Equilíbrio entre pedo- gênese e morfogênese	2,0
Instável	Prevalece morfogênese	3,0

Este modelo é aplicado para cada tema individualmente (geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e clima) dentro de cada unidade de paisagem natural destes temas. Assim, a média aritmética entre os valores individuais dos temas, para cada uma das unidades permite apresentá-la numa escala de estabilidade/ vulnerabilidade com as 21 classes mencionadas.

Além da avaliação quantitativa da erosão de vertentes se buscou estimar, com o auxílio de SIG, a quantidade de sedimentos que deixam a bacia através do conceito de *Taxa de Transferência de Sedimentos (Sediment Delivery Ratio, SDR)*. Entretanto isto não foi possível, pois as versões existentes, como o SATEEL GIS (Lim *et al*, 2005), estão ainda em fase de desenvolvimento. Os valores de produção de sedimentos em bacia produzidos pelos SIGs possuem elevado grau de incerteza devido a complexidade das características e das interações dos processos de transporte de sedimentos envolvidos (Lim *et al*, 2005).

Análise do cenário - bacia

Em que pese a sua importância no cenário nacional, a região do Vale do Paraíba carece de mapeamentos temáticos em escalas compatíveis com o seu desenvolvimento e importância histórica. Desta forma, os esboços geológicos, geomorfológicos e pedológicos foram executados a partir de mapas em escala 1:250.000 (geologia) e 1:500.000 (geomorfologia e pedologia).

Ao contrário dos mapas temáticos, a base cartográfica está disponível em escala de detalhe (1:10.000) o que possibilitou a confecção de diversos sub-produtos como mapas de declividade, de hipsometria, de permeabilidade e de “energia”.

O Mapa de “Energia” foi gerado a partir de intervalos de declividade. A tabela 4 mostra a distribuição areal e a porcentagem dos três tipos de “energia” considerados: alta, média e baixa. Segundo a tabela 4 pode-se verificar que quase a metade da área possui energia baixa estando relacionada principalmente as áreas de baixadas (setores de baixa degradação e de acumulação de sedimentos). No entanto as áreas ocupadas com energia alta também possuem valores significativos. Em geral as áreas de alta energia pertencem às áreas de serras onde podem ocorrer transportes e movimentos gravitacionais de massa.

Para a obtenção do Mapa de Potencial Natural de Erosão (PNE) foram utilizados dados de erodibilidade, declividade e informações sobre as condições pluviométricas conforme procedimentos anteriormente discutidos. A definição de classes do PNE foi estabelecida a partir da proposição de Fernandez (1996), com os intervalos definidos como o dobro do anterior. A partir dos resultados alcançados, as classes determinadas foram (em t/ha.ano): até 200, 200 a 400, 400 a 800, 800 a 1600, 1600 a 3200 e maior que 3200.

Tabela 4 – “Energia” da bacia dos Mottas com base nas classes de declividade

“Energia”	Classes de Declividade	Área (Km ²)	(%)
Baixa	<5%	49,03	47,85
	5 a 10%		
Moderada	10 a 20%	21,97	21,44
	20 a 35%		
Alta	35 a 45%	31,47	30,71
	45 a 60%		
	> 60%		

Os resultados obtidos para o ano padrão chuvoso podem ser observados na tabela 5 na qual cerca de 58,6% da área apresenta taxas elevadas de erosão (> 1.600 t/ha.ano).

Tabela 5 – Quantificação do potencial natural de erosão (ano padrão chuvoso) para a bacia dos Mottas

Classe (t/ha.ano)	Área	(%)
Até 200	26,43	26,11
200 a 400	3,96	3,91
400 a 800	4,10	4,05
800 a 1600	8,07	7,97
1600 a 3200	8,65	8,55
> 3200	50,01	49,41

A espacialização dos resultados pode ser observada na figura 4 mostrando que as mais altas taxas de erosão (> 1600 t/ha.ano) estão situadas na porção oeste da bacia.

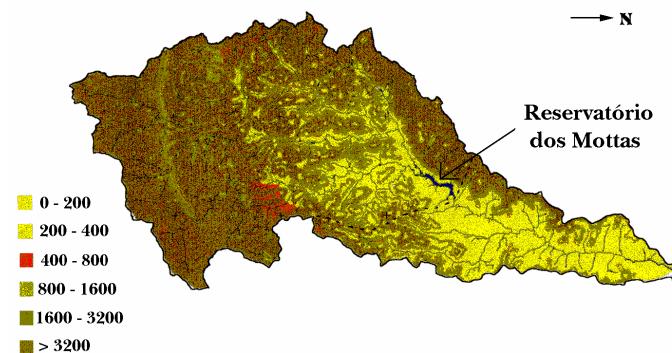


Figura 4 - Mapa do Potencial Natural de Erosão – PNE (t/ha.ano), “ano padrão” chuvoso

A distribuição dos dados mostra uma forte correlação com os elementos morfométricos do relevo onde as taxas de erosão mais elevadas estão associadas com maiores declividades e comprimentos de encostas (relevos de morros e serras). Também estão associadas com os tipos de rochas; granitos de fácies quartzosas - cujos processos de alteração geraram solos podzolizados com cascalhos – apresentam taxas mais elevadas de erosão.

Esta região com maior potencial de erosão situa-se a montante do reservatório dos Mottas (figura 4) contribuindo significativamente para o aumento do assoreamento do reservatório.

A região com menores taxas (entre 0 e 200 t/ha.ano) totaliza cerca de 26% da área total da bacia (tabela 5) e correspondem as regiões com declividades e comprimento de encostas menores (relevos colinosos); estas regiões são normalmente constituídas por rochas gnáissicas ricas em biotita cujos processos de alteração predominam solos mais argilosos. Do ponto de vista pedológico predominam os solos podzólicos vermelho amarelo “intergrade” para latossolos vermelho amarelo.

Uma forma de avaliar qualitativamente o potencial erosivo de uma região é através do Mapa de Vulnerabilidade à Erosão (Figura 5). Para a legenda deste mapa foi considerada 4 classes: moderadamente estável, medianamente estável / vulnerável, moderadamente vulnerável e vulnerável.

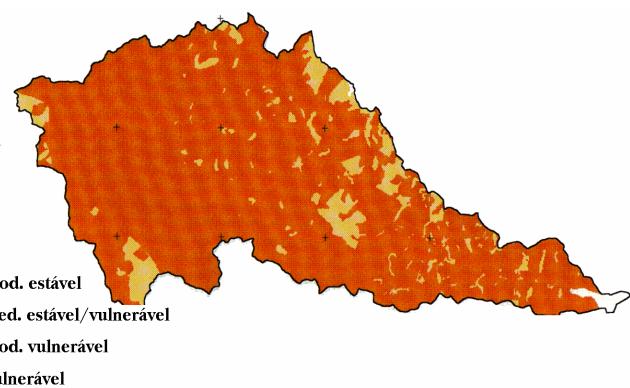


Figura 5 - Mapa de vulnerabilidade à erosão, “ano padrão” chuvoso

Em termos espaciais, a bacia dos Mottas apresenta vulnerabilidade de moderadamente estável à moderadamente vulnerável e não apresenta as classes estável e vulnerável (figura 5). A porcentagem de cada classe pode ser observada na tabela 6 para um ano padrão chuvoso.

**Tabela 6 – Quantificação da vulnerabilidade
(ano padrão chuvoso)**

Classes	Área (km ²)	(%)
Moderadamente estável	0	0
Medianamente estável / vulnerável	6,58	6,45
Moderadamente vulnerável	95,48	93,55
Vulnerável	0	0

Os locais de classe mais estável (medianamente estável / estável) correspondem a 6,45% e a região moderadamente estável corresponde a 93,55% (tabela 6). A região medianamente estável localiza-se onde a vegetação é mais protetora como mata e macega. Entretanto, a imensa maioria da bacia corresponde à classe moderadamente vulnerável (figura 5) estando associada as grandes áreas de pastos degradados que ocorrem na região.

No campo esta vulnerabilidade pode ser constatada pela presença de feições de erosão linear (sulcos e ravinas) em vários pontos da bacia e também por uma significativa erosão de margem dos cursos de água.

Por outro lado, a bacia dos Mottas não apresenta grandes ravinas e voçorocas e cicatrizes generalizadas de escorregamento. Este quadro seria condizente com uma bacia de classe “vulnerável” o que não é o caso da bacia estudada.

ANÁLISE DO ASSOREAMENTO

O reservatório dos Mottas

Até a década de 60 enchentes esporádicas, originadas na sub-bacia do ribeirão dos Mottas, provocaram alagamentos de algumas parcelas da zona urbana de Guaratinguetá. Estas enchentes eram caracterizadas por picos elevados e por volumes de água relativamente modestos.

Para reduzir este problema foi construída uma barragem a cerca de dez quilômetros à montante do centro de Guaratinguetá. O objetivo era se criar um reservatório com capacidade suficiente para amortecer os picos das maiores enchentes até torná-los compatíveis com a capacidade máxima de vazão do ribeirão à jusante.

A barragem entrou em funcionamento em 1965 e, desde então, é administrada pelo DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica), do

Estado de São Paulo, divisão do Vale do Paraíba. A barragem foi construída em concreto e possui dois estravasores laterais dotados de comportas que deixam escoar, gradativamente, as águas armazenadas no reservatório.

A capacidade de armazenamento deste reservatório foi definida considerando-se um período de retorno de 1000 anos. Conforme dados fornecidos pelo DAEE, a barragem reduz o pico de uma enchente de 450 m³/s para cerca de 170 m³/s, ou seja, 2,65 vezes.

Como se trata de uma barragem para controle de vazões, a área do reservatório fica inundada apenas esporadicamente e por curtos espaços de tempo, dependendo da magnitude e frequência das enchentes que ocorrerem. Em épocas normais, a área inundável fica descoberta e as comportas permanecem abertas, ou seja, toda a vazão que aflui ao reservatório é liberada.

Metodologia

Para se avaliar, preliminarmente, o grau de assoreamento da represa, foi executado um levantamento topobatimétrico em dez seções transversais com larguras variando entre 47 e 180 m (Figura 6). Os perfis amostrados podem ser considerados representativos, pois se situam ao longo de toda a área alagada do reservatório o qual tem uma forma longitudinal.

Na escolha dos perfis se levou em conta também às mudanças bruscas na forma do reservatório particularmente a diminuição acentuada (estrangulamento) da largura da área alagada.

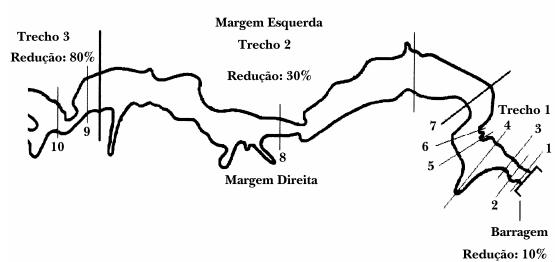


Figura 6 – Localização das seções batimétricas

A profundidade dos diversos pontos foi medida utilizando-se um barco a remo e uma corda graduada com um peso, o qual também serviu de amostrador. Os dados obtidos nos perfis selecionados foram comparados com levantamentos topoba-

timétricos efetuados pelo DAEE nos anos de 1967 e 1972.

Análise do cenário - reservatório

Com base no levantamento topobatimétrico das 10 seções e utilizando técnicas simples de interpolação, foi possível calcular a área assoreada de cada seção.

A análise da sobreposição dos levantamentos permitiu calcular e estabelecer uma redução percentual da área de cada seção e de cada trecho considerado para os anos de 1967, 1972 e 1999. Com base nos resultados foram caracterizados três trechos com reduções médias de 10%, 30% e 80% (Figura 6).

A menor taxa de assoreamento foi obtida na área próxima da barragem (trecho 1) com uma redução da área útil em torno de 10% obtidas a partir dos dados fornecidos pelas seções de 1 a 6 (Figura 5). Estas taxas mais baixas de assoreamento se devem aos extravasores laterais os quais impõem uma elevada velocidade de fluxo dificultando a deposição dos sedimentos.

Na porção central do reservatório (trecho 2), a redução média ficou em torno de 30% obtidas a partir das seções 7 e 8.

Na porção próxima ao encontro do reservatório com os ribeirões Motta e Quebra Cangalha (trecho 3) a redução atingiu cerca de 80% (seções 9 e 10). Neste trecho pode-se mesmo evidenciar o surgimento de “bancos de sedimentos” devido ao assoreamento. A diminuição da largura tende a causar mudanças nas características do regime fluvial alterando a velocidade das águas e favorecendo a deposição dos sedimentos.

Como exemplo, a figura 6 mostra os resultados obtidos na seção 9 (figura 7) a qual possui cerca de 90 metros de largura. Ainda pela figura 6 é possível observar uma significativa redução no volume útil nesta porção do reservatório quando se comparam os dados de 1999 com os dados de 1967 e 1972.

Interpolando-se os resultados de redução de área para os trechos próximos a cada seção pode-se obter o volume assoreado de cada trecho considerado. Conseqüentemente, pode-se obter o volume total e a quantidade de sedimentos depositados no reservatório (Tabela 6).

Comparando-se a capacidade do reservatório com a sua cota máxima (574,6) tem-se uma redução de 16,5 % no volume do reservatório desde o início do seu funcionamento até 1999, portanto para um período de 33 anos.

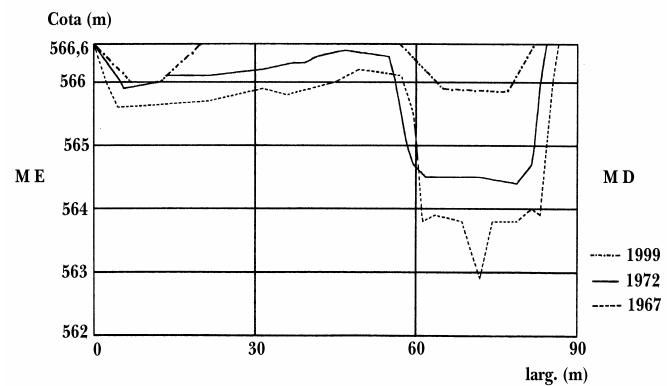


Figura 7 – Gráfico comparativo da seção 9. ME (margem esquerda); MD (margem direita)

Tabela 6 – Resumo das quantidades levantadas para o todo o reservatório considerando o período entre 1967 a 1999

Volume dos sedimentos	$611 \times 10^3 \text{ m}^3$
depositados	
Quantidade de sedimentos	$430 \times 10^3 \text{ t}$
depositados	
Taxa de assoreamento (volume de sedimentos depositados por ano)	$18 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$
Taxa de assoreamento (volume de sedimentos depositados por área da bacia por ano)	$240 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{ano}$
Taxa de assoreamento (quantidade de sedimentos depositados por ano).	$12,6 \times 10^3 \text{ t/ano}$
Redução de volume em relação a cota máxima	16,5%

DISCUSSÃO

As características físicas e de uso da terra encontradas na bacia apontam para uma elevada suscetibilidade aos processos erosivos acelerados em vertentes. Isto se deve tanto aos fatores naturais como antropogênicos.

Entre os fatores naturais destacam-se as condições de relevo acidentado, presença de rochas de baixa coesão mineral e expressiva quantidade de solos B-textural (podzólicos/argissolos).

Entre os fatores antropogênicos destacam-se as práticas inadequadas de manejo relacionadas aos

diversos ciclos com que passou o Vale do Paraíba (cana de açúcar, café e pecuária). As áreas de pastagem mostram sinais evidentes de degradação evidenciadas pela dificuldade de regeneração da paisagem. Além disto, é comum a utilização de práticas de queimadas deixando exposto o solo superficial e contribuindo para o avanço da erosão linear.

Os valores máximos de taxa de erosão encontrados neste estudo podem ser considerados muito significativos de vez que valores acima de 1600 t/ha.ano podem ser consideradas como tendo “forte potencial natural de erosão” (Valério Filho, 1994). Cerca de 59% da área situa-se nestas condições (Tabela 5).

Os mapas de Potencial Natural de Erosão - PNE (Figura 4) e de Vulnerabilidade à Erosão (Figura 5) retratam as condições de vulnerabilidade e de fragilidade da bacia dos Mottas. Enquanto as condições físicas - naturais e modificadas - apontadas no mapa de PNE são francamente favoráveis à aceleração dos processos erosionais, a ausência de cobertura vegetal de porte estabelece “condições moderadamente vulnerável” para cerca de 93,5% da bacia (Tabela 6).

A situação é mais crítica na porção à montante do reservatório onde o potencial natural de erosão situa-se acima de 800 t/ha.ano. Isto contribui efetivamente para o elevado volume de sedimentos depositado no reservatório o qual provocou uma redução de volume útil entre 30 e 80% em um período de 33 anos.

No que concerne à avaliação da quantidade de sedimentos que deixa a bacia (*Taxa de Transferência de Sedimentos*, SDR) não foi possível utilizar o SIG em face das grandes incertezas dos resultados e da grande quantidade de variáveis necessárias para esta análise. O procedimento convencional designado “curva SDR” (USDA, 1972) é relacionado apenas a área de drenagem; pequenas bacias teriam altas taxas de SDR (chegando a mais de 70% do total) e grandes bacias teriam pequenas taxas (em torno de 10% do total). Entretanto, os valores de SDR podem ser afetados por uma grande quantidade de fatores como a origem de sedimentos, a textura dos solos, a densidade dos canais de drenagem, a área da bacia, a declividade, o uso da terra e as relações precipitação-vazão (Lal, 1994; Ouyang & Bartholic, 1997).

Considerando apenas a área da bacia (curva SDR) a estimativa de sedimentos que deixa a bacia poderia ser em torno de 15% ficando a maior parte depositada como depósito coluvial. Entretanto as condições geológicas/pedológicas da bacia - solos dominantes finos oriundos de rochas gnáissicas - favoreceria o transporte de sedimentos antes que a

sua deposição. Por outro lado as condições de pastagem mal manejadas também favorecem amplamente o transporte de sedimentos. Segundo Carvalho (1994), as mudanças do uso da terra se tornam muito importantes para pequenas bacias e tendem a um valor constante nas grandes bacias de drenagem para a produção de sedimentos.

Portanto o valor de 15% obtido a partir da curva SDR poderia ser tomado como um valor mínimo e necessitaria estudos mais aprofundados para se avaliar melhor a relação entre erosão de vertentes e os valores de *Taxa de Transferência de Sedimentos*.

De qualquer forma os resultados deste trabalho apontam para o fato que esta bacia é uma das que mais contribuem para a dinâmica hidrossedimentológica do Médio Vale do Paraíba juntamente com outras bacias críticas como a do ribeirão Guaratinguetá e do ribeirão Piquete estudadas por Rego (2002).

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho evidencia-se a necessidade de uma abordagem de monitoramento em pequenas bacias que ressalte fortemente as características e os processos do meio físico interagindo erosão em vertente e sedimentação fluvial. Em face da complexidade e da diversidade dos parâmetros do meio físico, este trabalho está longe de considerar o meio físico em toda a sua complexidade.

A bacia do ribeirão dos Mottas, com elevada fragilidade e vulnerabilidade física e ambiental, constitui-se em um exemplo de bacia onde ocorrem processos hidro-geomorfológicos acelerados. As atuais condições de uso da terra e práticas de manejo na bacia podem levar a taxas de erosão que, potencialmente, podem alcançar 3200t/ha.ano.

Os estudos feitos no reservatório dos Mottas corroboram as elevadas taxas de erosão encontradas. Em 33 anos, obteve-se uma redução do volume estimada em torno de 16,5%. Em alguns lugares do reservatório, a redução do volume alcançou 80%.

Os mapas de PNE e de Vulnerabilidade à Erosão mostram uma bacia quase totalmente inapta à urbanização na qual a erosão, predominantemente laminar, vem sendo cada vez mais substituída pela erosão acelerada.

As informações contidas nestes mapas podem contribuir para o planejamento da bacia mostrando as áreas críticas nas quais poderia ser implantado um programa racional de utilização e manejo

da terra contribuindo para a redução do elevado transporte de sedimentos e os seus elevados níveis de assoreamento.

AGRADECIMENTOS

À FINEP pelo apoio recebido através do Programa Recope-Rehidro (Processo 76.97.0724.00) e a todos os colegas participantes da Sub-Rede 1 (Monitoramento de Bacias Hidrográficas e Tratamento de Dados) pelas inúmeras discussões travadas nos diversos encontros da Rede.

REFERÊNCIAS

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. – *Conservação do solo*. Piracicaba, Livroceres. 355p. 1985.
- CARVALHO, N. - Hidrossedimentologia aplicada. Rio de Janeiro, CPRM / Eletrobrás. 372p. 1994.
- CEIVAP – *Plano de Qualidade de Água da Bacia do Rio Paraíba do Sul (porção paulista)*. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Recursos Hídricos. CD-ROM. 2000.
- CODIVAP (Consórcio de Desenvolvimento Integrado do Vale do Paraíba) – *Projeto Mavale: Macrozoneamento da região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo*. INPE/CODIVAP. São José dos Campos. 33p. 1992.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENÇANO, P. – *Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico*. INPE, São José dos Campos. 115p. 1996.
- CREPANI, E.; DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y.E.; FIDALGO, E.C.C. – Sensoriamento remoto e geoprocessamento no mapeamento regional de cobertura e uso atual da terra. *Geografia*, v. 17, n. 1, p 119-135. 2002.
- FERNÁDEZ, G.A.V. – *Análise da erosão do solo usando a EUPS através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento*. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, 125p. 1996.
- FORMAN, R.T. – *Land mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Nova York, Cambridge University Press. 632p. 1995.
- FORMAN, R.T.; GODRON, M. – *Landscape ecology*. Nova York, John Wiley. 619p. 1986.
- KAWAKUBO, F.S. – *Representações gráficas do relevo e álgebras de mapas. Aplicação no estudo da fragilidade ambiental*. Dissertação de Mestrado, Faculda- de de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP. São Paulo, 130p. 2005.
- LAL, R. (ed.) – *Soil erosion. Research Methods*. Delray Beach, Soil and Water Conservation Society. 340p. 1994.
- LIM, K.J.; SAGONG, M.; ENGEL, B.A.; TANG, Z.; CHOI, J.; KIM, K-S – *GIS-based sediment assessment tool*. *Catena*, v.64, n.1, p. 61-80. 2005.
- MARCH, T.C. - *Estudo sobre o assoreamento no reservatório do ribeirão dos Mottas, Guaratinguetá, SP*. Monografia de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP. Guaratinguetá, 62p. 1999.
- MAZZOCATO, M.E. – *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao zoneamento urbano da bacia rio Uma: Município de São Sebastião, SP*. Dissertação de Mestrado, INPE. São José dos Campos. 197p. 1998.
- MOREIRA, R.C.B. – *Análise geotécnica da sub-bacia do ribeirão dos Mottas, com ênfase em movimentos gravitacionais de massa*. Monografia de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP. 191p. Guaratinguetá, 1999.
- NUNES, C.M.F. – *Características geotécnicas da sub-bacia do ribeirão dos Mottas, com ênfase para o potencial de erosão*. Monografia de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP. Guaratinguetá, 164p. 1999.
- NUNES, C.M.; MOREIRA, R.C.B.; BERNARDES, G.P.; SIMÕES, S.J.C; SILVA, J.U.L. - *Sistema de Informação Geográfica de pequenas bacias hidrográficas. Ribeirão dos Mottas, Guaratinguetá, SP*, I Congresso Sobre Aproveitamento e Gestão de recursos Hídricos em Países de idioma Português. Rio de Janeiro, abril, 2000. CD-ROM, p. 379-388. 2000.
- OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, O. – *Mapa Pedológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. Instituto Agronômico de Campinas (IAC). Campinas. 1999.
- OUYANG, D.; BARTHOLIC, J.F. – *Predicting sediment delivery ration in Saginaw Bay watershed*. National Association of Environment Professional Conference Proceedings, Orlando, maio, 1997. p. 659-671. 1997.
- PAIVA, J.B.D.; GENOVEZ, A.; TEIXEIRA, E.C.; CABRAL, J.S.P.; GOLDENFUM, J.; CAMPANA, N.; QUEIRÓZ, M.; SIMÕES, S.J.C. - Projeto FINEP-Recopel/Rehidro -Sub-Rede 1: Monitoramento de bacias hidrográficas e processamento da dados. III Encontro de Engenharia de Sedimentos, Belo Horizonte, setembro, 1998. Anais, pp 224-230. 1998.
- REGGIANI, A.G. – *Aspectos relativos a inundação da sub-bacia do ribeirão dos Mottas*. Monografia de Conclu-

- são de Curso, Departamento de Engenharia Civil, FEG/UNESP. 96p. 1999.
- REGO, A. P. M. – *Caracterização e proveniência dos sedimentos em suspensão da porção paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/UnB. Brasília, 102p. 2002.
- SILVA, J.U.L. - *A dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região oriental paulista*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Rio Claro, 195p. 1999.
- TOEBES, C.; OURYVAEV, V. – *Representative and experimental basins. An international guide for research and practice*. Paris, UNESCO. 348p. 1970.
- US Department of Agriculture (USDA) – *Sediment sources, yields, and delivery ratios*. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation. Washington, USDA. 1972.
- VALÉRIO FILHO, M. – Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: Ferreira, M.; Cruz, M.C.P. *Solos altamente suscetíveis a erosão*. Jaboticabal, FCAV/UNESP. p. 223-242. 1994.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. – *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Agriculture handbook, no. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 1978.

Spatial Variability of Erosion Potential and its Effects on Reservoir Sediment – The Ribeirão dos Mottas Basin, Southeastern Brazil

ABSTRACT

This study intends to evaluate the spatial erosion fragility and vulnerability in a small catchment and the relationship between soil erosion rates and the quantity of sediment deposited in a reservoir. The Mottas catchment was selected for this study for the following reasons: a) marked erosion processes; b) presence of a regulatory reservoir that allowed sediment analysis. Maps of Natural Erosion Potential and Erosion Vulnerability were produced from several thematic maps in a GIS environment (SPRING system). Estimations of eroded and transported sediment could be about 3200 t/ha/yr. Preliminary analysis shows a volume reduction in the Mottas reservoir of approximately 16% for a period of 33 years (1967-1999). The results showed significant constraints to urban growth in the Mottas catchment.

Key words: Catchment monitoring, spatial erosion, reservoir sediment, GIS.