

Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização: Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP)

Dener Toledo Mathias¹, Cenira Maria Lupinacci da Cunha¹, Rodrigo Braga Moruzzi²

denertm@yahoo.com.br, cenira@rc.unesp.br, rmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 07/05/12 - revisado: 03/07/12 - aceito: 05/08/13

RESUMO

Este trabalho busca avaliar as implicações geomorfológicas do escoamento superficial, gerado no meio urbano, sobre a evolução de processos erosivos lineares localizados em áreas peri-urbanas. Foi escolhida como estudo de caso a bacia do córrego Tucunzinho (São Pedro/SP) por apresentar formas erosivas lineares cuja dinamização está associada, entre outras causas, à expansão urbana sobre áreas de fragilidade e implantação de dispositivos dissipadores inadequados. Adotou-se o método do Soil Conservation Service (SCS) para obtenção do Número de Deflúvio (CN) e para obtenção dos hidrogramas de escoamento superficial dos diferentes setores da bacia. A classificação da cobertura (uso e ocupação) fundamentou-se na análise de fotografias aéreas de dois períodos (1964 e 2006, atualizados em campo em 2011). Foi utilizado o modelo IPHSI para a simulação do método, o que permitiu a análise do comportamento hidrológico sob as condições pré-ocupação urbana e condições atuais. A análise hidro-geomorfológica permitiu um melhor entendimento sobre a influência do escoamento do meio urbano na dinamização erosiva, evidenciando a ineficácia dos dispositivos dissipadores de energia existentes na área, a qual possui suscetibilidade natural à erosão devido às características lito-pedológicas.

Palavras-Chave: Processos erosivos. Drenagem urbana. Modelos hidrológicos.

INTRODUÇÃO

Os processos de erosão linear acelerada constituem-se um fenômeno que acarreta graves danos ao meio ambiente, bem como prejuízos para a sociedade. É bastante comum a ocorrência de formas erosivas nas periferias de áreas urbanas, as quais contribuem na dinamização dos processos mediante as interferências que produzem na paisagem. A expansão da malha urbana sobre áreas de fragilidade, ou que já possuem histórico de ocorrência de processos erosivos, destituída de dispositivos dissipadores adequados acarreta, dentre outros impactos, a dinamização erosiva.

Considera-se que os processos de erosão linear têm sua gênese associada à predisposição das terras ao desencadeamento erosivo que, associada à concentração do escoamento superficial produzida pela urbanização, resulta em potencialização da sua dinâmica. A ausência de equipamentos dissipadores

adequados ao disciplinamento das águas do escoamento superficial tende a produzir efeitos notáveis, sobretudo na periferia das áreas urbanas, ou seja, no contato destas com as áreas de suscetibilidade erosiva.

Este trabalho busca avaliar de que maneira o escoamento superficial, condicionado às estruturas urbanas, influencia na evolução de formas erosivas lineares na bacia do córrego Tucunzinho (São Pedro/SP), simulando, através de um método hidrológico, diferentes cenários de uso e ocupação. A área de estudo caracteriza-se por apresentar formas erosivas ocorrendo na periferia da área urbana, além de possuir dissipadores de energia distribuídos de forma descontextualizada em relação à situação de instabilidade geomorfológica que se verifica na bacia hidrográfica. A associação de técnicas geomorfológicas com a aplicação de um método hidrológico no estudo dos processos de erosão linear, ocorrentes em contexto urbano, apresenta-se como uma alternativa metodológica cujos resultados podem ser de grande utilidade na tomada de decisão e na proposta de medidas corretivas.

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia/UNESP - Presidente Prudente

² Instituto de Geociências e Ciências Exatas/ UNESP - Rio Claro

**Drenagem urbana e erosão linear:
a bacia do córrego Tucunzinho (São Pedro/SP)**

Dentre os impactos negativos gerados pela expansão urbana destaca-se a dinamização de processos erosivos lineares. Tais processos ocorrem em virtude de fragilidades dos solos ao desencadeamento erosivo, fato que associado à ausência de um disciplinamento das águas de escoamento advindas do meio urbano, vêm a ter seus efeitos agravados.

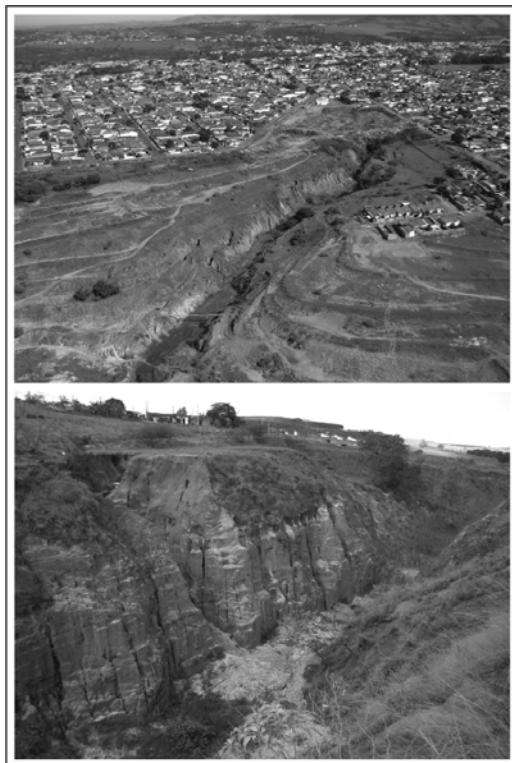
O processo erosivo é, preferencialmente, dinamizado pelo homem em ambientes naturalmente suscetíveis. Geralmente, esta dinamização é desencadeada pela substituição da vegetação natural por outro tipo de cobertura que, além de não protegê-lo eficientemente da ação erosiva da chuva, dificulta, com isso, o estabelecimento do processo pedogenético que recomporia a camada pédica. Dessa forma, o fator pedológico, juntamente com o geológico e geomorfológico, tem relevância significativa para o desenvolvimento dos processos erosivos.

A bacia hidrográfica do córrego Tucunzinho, no Município de São Pedro, no estado de São Paulo, caracteriza-se pela ocorrência de formas erosivas lineares em amplo desenvolvimento, as quais se encontram posicionadas nas áreas de contato com a malha urbana do município. De maneira geral, identifica-se a evolução de uma voçoroca, contendo ao longo do seu eixo longitudinal inúmeras ramificações na forma de sulcos e ravinas (Figuras 1a e 1b).

Na bacia hidrográfica ocorrem litologias sedimentares, com destaque para os arenitos da Formação Pirambóia e Formação Botucatu, bem como solos associados a tal embasamento, em que predominam os Argissolos e Neossolos Quartzarénicos. As mencionadas litologias possuem como característica marcante a alta suscetibilidade aos processos erosivos, dado sua friabilidade. Além disso, os solos apresentam baixa capacidade de retenção de nutrientes devido à lixiviação (CARPI JR, 1996; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1981; OLIVEIRA, 1999).

As formas do relevo também contribuem na dinâmica processual que ocorre na área, pois se caracterizam por vertentes amplas nas quais o escoamento tende a ganhar energia, atingindo os fundos de vale com elevado potencial erosivo. A presença de rupturas topográficas condicionadas pelo avanço dos taludes da voçoroca constitui-se fator potencializador à energia do escoamento (MATHIAS, 2011). Aliam-se a tais atributos condicionantes, outros tais como a proximidade das serras de São Pedro e Ita-

queri e lineamentos geológicos associados, bem como processos hidrológicos subterrâneos resultantes da presença das formas de relevo mencionadas (FACINCANI, 1995).



Figuras 1a e 1b – Fotografia aérea da voçoroca córrego Tucunzinho e talude erosivo da mesma voçoroca, respectivamente.

Fonte: Autores (2011).

O uso da terra confere mais atributos à suscetibilidade erosiva da bacia hidrográfica. Observa-se o avanço da malha urbana sobre antigas pastagens, cuja cobertura apresenta-se já um tanto degradada (MATHIAS, 2011; SANCHEZ, 1986/1987). A expansão urbana ocorrida nos últimos 40 anos foi responsável por intensas modificações na paisagem da bacia, fazendo com que de 0% de área urbanizada (de acordo com fotografia aérea do ano de 1964) se passasse à condição atual de 84% de taxa de urbanização, conforme dados atuais de uso da terra (MATHIAS, 2011). Um dos aspectos marcantes relacionados às intervenções antrópicas na área refere-se à presença de depósitos tecnogênicos e formas de relevo antropomórficas. Os depósitos antropogênicos estão relacionados à deposição de resíduos (entulho) em ampla área de cabeceira do córrego e as

formas encontram-se associadas as diversas obras de engenharia executadas na bacia visando minimizar os problemas erosivos (CARPI JR; MENDES, 1992; MATHIAS, 2011). A presença de tais depósitos e formas antropogênicas confere à fisionomia da paisagem da bacia um aspecto de intensa degradação ambiental, além de se constituírem em agravantes dos processos erosivos.

Diante do quadro físico exposto assume grande importância a presença de dispositivos dissipadores de energia apropriados às condições hidrológicas que ocorrem na bacia, face à estrutura urbana e seu contato com áreas de fragilidade.

Metodologia: Método Hidrológico Aplicado na Área de Estudo

Visando avaliar o escoamento superficial da bacia como mais um condicionante da dinâmica erosiva e simular diferentes cenários de uso e ocupação, foram realizados estudos a partir da aplicação de um método de precipitação-vazão. Optou-se pelo método apresentado pelo Soil Conservation Service (SCS), de acordo com as orientações de Porto (1995), segundo o qual é feita a separação de escoamento por meio do Número de Deflúvio (CN), considerando os atributos físicos da bacia e os diferentes tipos de uso e ocupação. A área da voçoroca foi determinante para avaliação dos escoamentos produzidos, tendo em vista que nela concentraram-se as análises dos escoamentos superficiais diretos para os cenários de ocupação investigados. A duração da chuva foi adotada em função das vazões obtidas nessa área para o tempo de concentração da bacia hidrográfica no cenário de pré-ocupação urbana. Tucci (1998) aponta que o método SCS tem sido amplamente utilizado em virtude de duas características: “i) reduzido número de parâmetros; ii) relação entre os parâmetros e características físicas da bacia” (p. 278). São encontradas na bibliografia diversas referências em torno do método em questão (MORUZZI et al., 2009; MORUZZI; LUPINACCI; OLIVEIRA, 2010; TUCCI, 1998) apresentando resultados satisfatórios para a obtenção de dados do escoamento superficial em bacias hidrográficas diversas.

A aquisição e o tratamento dos dados se realizaram pelo uso do modelo IPHS1, de acordo com as orientações de Tucci, Zamanillo e Pasinato (1989), cujo princípio se baseia na modelagem de dados de precipitação correlacionados aos demais atributos da bacia de acordo com o método SCS referido. Para tanto, torna-se necessário definir os valores dos parâmetros que servirão de entrada ao

método, o que compreende os dados pluviométricos, os atributos físicos da bacia e as características de uso e ocupação da terra.

Para a avaliação da tormenta de projeto em geral são utilizadas séries históricas de dados pluviométricos, das quais se extrai, mediante cálculos específicos, os valores das vazões de projeto para diferentes durações e períodos de recorrência, o que corresponde ao pico dos deflúvios associado a uma precipitação crítica e a um determinado risco assumido. A ausência de dados pluviométricos ou mesmo a inconsistência de dados pode ser suprida utilizando-se curvas IDF (Intensidade-Duração-Freqüência) obtidas por meio de softwares que realizam a interpolação e ponderação entre dados pluviométricos de diversos postos. Neste trabalho foram utilizadas as curvas IDF do município de São Pedro (SP), obtidas do programa Pluvio 2.1, cuja interpolação é realizada através do “Método do Inverso da Quinta Potência da Distância”, considerando as informações de todas as localidades em que a equação de Intensidade-Duração-Freqüência da precipitação é conhecida, em vários estados brasileiros (PRUSKI et al., 2006). A Equação 1 apresenta a curva I.D.F e seus parâmetros obtidos pelo referido interpolador. Para a realização das simulações dos cenários foi adotada chuva com duração de 60 minutos, correspondente ao tempo de concentração da bacia hidrográfica (Área de aproximadamente 0,9 km²) na condição pré-ocupação urbana no cenário de 1962. A tormenta de projeto, obtida a partir da I.D.F, foi distribuída no tempo com base no método dos Blocos Alternados.

$$I = \frac{3063,58 \cdot T_R^{0,176}}{(d + 23,73)^{0,971}} \quad (1)$$

Em que: I é a intensidade da chuva (mm/h); TR é a recorrência (anos); d é a duração da chuva (minutos).

A chuva excedente foi obtida por meio do algoritmo do Soil Conservation Service (2004) para 30 intervalos de tempo de 120 segundos cada. As Equações 2 e 3 apresentam o algoritmo para obtenção da vazão excedente de acordo com o método proposto pelo Soil Conservation Service (SCS).

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (2)$$

Em que: Q é a precipitação excedente (mm) P é a precipitação acumulada (mm);

Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização:
Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP)

S=potencial máximo de armazenamento do solo (mm), para perda inicial correspondente a 20% da capacidade de armazenamento máxima do solo.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Em que: o Número de Deflúvio (CN) varia entre 0, para condutividade hidráulica infinita, e 100, para uma bacia totalmente impermeável.

Os dados de uso da terra foram obtidos por meio de fotointerpretação utilizando-se fotografias aéreas dos anos de 1962 (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO) e 2006 (BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S/A), as quais foram inseridas na base topográfica da área, no programa AutoCAD 2004, sendo georreferenciadas a partir de pontos de controle levantados em campo. Procedeu-se, em seguida, à vetorização dos polígonos referentes às classes de uso da terra. A soma dos polígonos de cada classe foi convertida em valores de porcentagem a fim de servir como entrada no método IPHS1.

Outro fator que é considerado no método refere-se às características dos solos, mais precisamente às condições do teor de umidade antecedente e ao grupo hidrológico, definidos por meio de tabelas propostas no SCS e contidas em Porto (1995), Tucci (1998), entre outros. Para este trabalho optou-se pela simulação em condições médias de umidade. Quanto ao grupo hidrológico, identificou-se o grupo B como sendo o único ocorrente na bacia, a partir dos dados apresentados por Mathias (2011) acerca das características texturais dos solos da área, as quais segundo o autor possuem pouca variabilidade.

Alguns dados morfométricos são também inseridos ou calculados no modelo IPHS1. A declividade média do terreno em porcentagem é apresentada nos dados obtidos por Mathias (2011) através da elaboração de um MDT (Modelo Digital do Terreno) da área. A declividade do canal foi utilizada para o cálculo do tempo de concentração (T_c), obtido no próprio IPHS1, a partir de dados de comprimento da drenagem e cota altimétrica da nascente e foz do canal por meio da equação de Kirpich (1940), de acordo com (PAIVA; PAIVA, 2003).

Foram definidos os valores do parâmetro Curva Número – CN, indicativas da influência do complexo solo-vegetação, na determinação da precipitação efetiva, de acordo com tabelas apresentadas pela S.C.S/E.U.A., e referidas por vários autores

(MORUZZI et al., 2009; PORTO, 1995; TUCCI, 1998).

Neste trabalho, foram adotados os valores de CN de acordo com as tabelas referidas, acrescidos de algumas adaptações. A tabela 1 apresenta tais valores.

Tabela 1 – Parâmetros CN adotados na bacia do córrego Tucunzinho

Descrição do uso da terra	Características	CN
Uso residencial (lotes até 500 m ²)	65% da área é impermeável	85
Uso institucional (lote > que 500 m ²)	38% da área é impermeável	75
Espaços abertos	Matos ou gramas cobrem 75% ou mais da área	61
Ruas e estradas	Pavimentadas e com drenagem pluvial	98
Áreas degradadas	Pastagens pobres (solo exposto e erosões)	67
Cerrado	Florestas normais	60

O termo “Uso institucional” refere-se a terrenos com lote superior a 1000 m² que tem como característica apresentarem 38% de sua área impermeabilizada. Nas tabelas contidas na bibliografia não consta essa classe, que na área estudada é representada por uma creche e um ginásio de esportes. Assim, foi adotado o valor correspondente à classe que indica áreas residenciais com lotes acima de 500 m². Trata-se de uma aproximação que se baseia nas observações de campo, considerando que o grau de impermeabilização não é mais intenso nesses usos do que em residências estabelecidas em grandes lotes. Assim, definiu-se a adoção do valor de 38%, considerando que as modificações de cobertura nas áreas institucionais não influenciam diretamente no escoamento na área erodida, uma vez que estas são drenadas por galerias. Quanto ao termo “cerrado”, corresponde ao que é definido como “florestas normais”, enquanto “áreas degradadas” se enquadra na classificação “pastagens pobres” uma vez que grande parte da área considerada degradada, ou seja, aquela onde se situam as formas erosivas e seu entorno, possui cobertura por gramíneas, sendo parte utilizada como pastagem para gado bovino (12,6 %) e o restante coberturas rasteiras, as quais embora apresentando-se esparsas, podem ser enquadradas na classificação referida.

Modelagem Hidrológica da Área: Procedimentos

Tendo sido definidos os parâmetros a serem inseridos no modelo IPHS1, procedeu-se à uma setorização da área visando o refinamento do método e sua adequação aos objetivos do trabalho. Para tanto, foi realizado um mapeamento das condições do escoamento superficial da bacia, o qual teve por finalidade orientar a discretização da área de drenagem em setores, de acordo com as características do escoamento superficial, considerando a influência da malha urbana e das estruturas hidráulicas existentes.

A técnica empregada para o referido mapeamento teve como base a proposta apresentada por Fontes (2009), fundamentada nos procedimentos apontados por Schäuble (2004) e resultou na elaboração da Carta de Fluxo Acumulado. O método utilizado é denominado “fluxo múltiplo”, também descrito como “fluxo acumulado” e possibilita calcular as áreas de drenagem convergentes de montante para jusante da bacia hidrográfica com base no parâmetro declividade, que é uma das principais variáveis-controle na determinação de zonas de convergência. Por meio deste método é possível gerar uma espacialização das áreas de contribuição que correspondem à tendência do percurso do escoamento em condições naturais.

Para o presente estudo, a elaboração da Carta de Fluxo Acumulado baseou-se nos procedimentos técnicos descritos nos trabalhos de Fontes (2009) e Mathias (2011). A partir do MDT (Modelo Digital do Terreno) da área, apresentado pelo último autor citado, gerou-se no software ArcGIS 9.2 um arquivo na extensão grid. Tal arquivo, inserido no software ArcView 3.2, foi submetido a operações envolvendo a ferramenta denominada Hydrotools. O Hydrotools consiste em um módulo do Arc View 3.2 composto por várias ferramentas que permitem realizar, a partir de dados topográficos, análises relacionadas ao comportamento da água frente a referida topografia. Nesta etapa definiu-se o algoritmo MD (Multiple Flow) e então procedeu-se ao cálculo de “flow accumulation”, que culminou na geração do documento cartográfico em questão.

Segundo Fontes (2009), o algoritmo do fluxo simples seleciona na matriz do terreno (Grid gerado pelo MDT), apenas a célula de declive mais íngreme para a orientação do fluxo a jusante, tornando-se um método simples e passível de generalizações, no entanto fugindo das condições reais. Já o algoritmo do fluxo múltiplo “calcula a área de contribuição considerando a distribuição proporcional

do escoamento do fluxo entre todas as células a jusante de uma célula central” (FONTES, 2009, p. 150). Assim, esta proposta tende a minimizar os erros gerados pelo método do fluxo simples visto que, em condições naturais, o escoamento superficial tende a se espalhar em diferentes orientações de menor altitude. Dessa forma, esse foi o método escolhido, pois como salienta Fontes (2009, p. 151), é o modelo que apresenta o escoamento de forma mais dispersa, correspondendo de maneira mais adequada à realidade de ambientes quentes e úmidos, com muita água, e relevo com concavidades de vertentes, que concentram os fluxos, e convexidades, que dispersam o fluxo, como é o caso de várias regiões do Brasil.

As classes geradas pelo programa se apresentam com valores em pixel, devendo ser convertidas em unidades de área, as quais, nesse caso, foram em m². Isso se faz a depender da escala de trabalho e da resolução espacial do modelo digital, por exemplo, uma matriz com resolução de 10x10 m terá como unidade representativa o valor de 100 m². A fim de se obter uma representação dos dados condizente com os objetivos de análise do trabalho foram testadas visualmente diferentes reclassificações a partir das classes definidas automaticamente pelo programa. A área total da bacia do córrego Tucunzinho é de 946330 m², assim, foram considerados 7 intervalos de 0 a 20000 m² e mais um intervalo correspondente aos valores acima de 20000 m², os quais apresentaram a menor ocorrência, embora o intervalo abrangesse valores bem mais elevados que os demais (por exemplo, no setor 1 o referido intervalo de classe tinha valores de 20000 m² a 53960 m²). A classificação em 8 intervalos foi a que apresentou melhor resultado, no qual se tornam nítidos os pontos de acumulação, ou concentração, do escoamento que já haviam sido reconhecidos em campo. A figura 2 apresenta um recorte da Carta de Fluxo Acumulado da bacia do córrego Tucunzinho.

Com base nos resultados obtidos na Carta de Fluxo Acumulado, a área foi setorizada de acordo com a identificação dos pontos de concentração de fluxo proveniente do escoamento superficial direto. A ferramenta Hydrotools auxiliou na definição da discretização da bacia hidrográfica, possibilitando definir com maior segurança os objetos representativos das bacias, pontos de controle e trechos de água, a serem aplicados no modelo IPHS1. Assim, a bacia do córrego Tucunzinho foi discretizada em 9 setores, conforme ilustra a figura 3. Na tabela 2 são apresentadas as características levantadas nos trechos simulados.

Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização:
Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP)

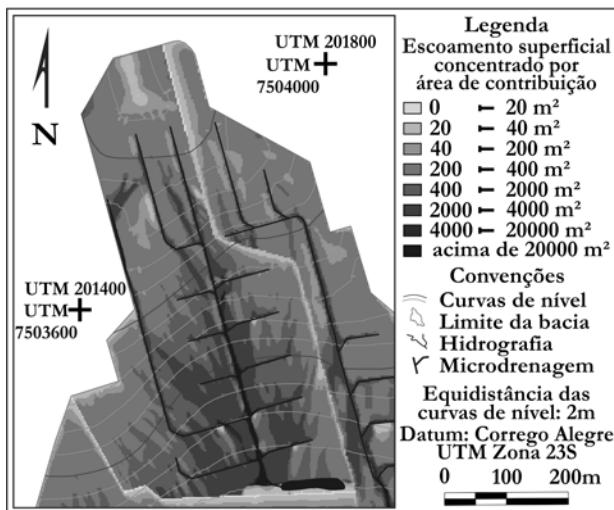


Figura 2 - Recorte da Carta de Fluxo Acumulado da bacia do córrego Tucunzinho

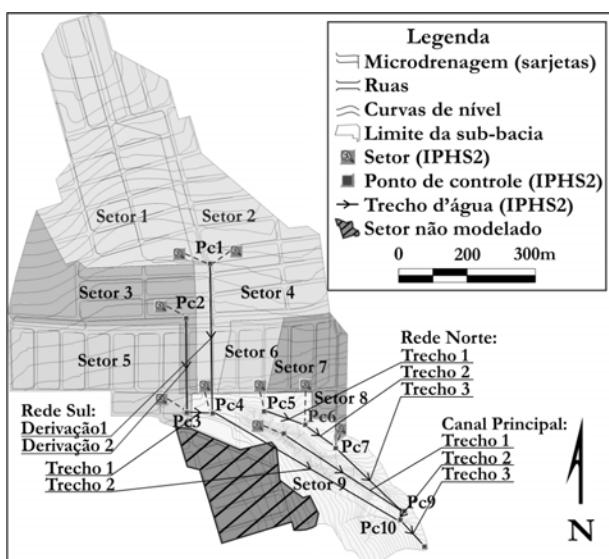


Figura 3 – Discretização da bacia do córrego Tucunzinho no programa IPHS1

Dois outros setores resultantes da discretização da área foram desconsiderados na modelagem hidrológica da bacia devido ao fato de terem como exutório bacias de detenção que não estão ligadas ao canal principal. Tais áreas (destacadas na Figura 3 com hachuras), portanto, estão isoladas do restante da bacia em termos de escoamento superficial.

Tabela 2 – Características dos trechos de água e galerias do córrego Tucunzinho

Canal	Desn. Vertical (m)	Extenção (m)	Declividade (m/100m)	Dimensões (m)	Tipo*
Rio Principal	33	685,11	4,82	Entre 0,40 e 2,00	FA
Rede Norte	37	477,3	7,75	Ø 1,20	GP
Rede Sul	44	718,87	6,12	Ø 1,50	GP
Derivação 1	14	278,68	5,02	Ø 0,80	GP
Derivação 2	20	437,24	4,57	Ø 1,00	GP
Sub-divisões rede sul					
Trecho 1	2	71,86	2,78	Ø 1,50	GP
Trecho 2	42	647,02	6,49	Ø 1,50	GP
Sub-divisões rede norte					
Trecho 1	6	130,49	4,60	Ø 1,20	GP
Trecho 2	2	111,83	1,79	Ø 1,20	GP
Trecho 3	30	234,98	12,77	Ø 1,20	GP
Sub-divisões Canal Principal					
Trecho 1	21	471,45	4,45	Entre 0,40 e 2,00	FA
Trecho 2	2	82,22	2,43	Entre 0,40 e 2,00	FA
Trecho 3	10	131,44	7,61	Entre 0,40 e 2,00	FA

* Coeficiente de Manning (n) de 0,06 para canal com fundo de arcia (FA) e de 0,013 para trechos de galeria pluvial (GP).

A partir da elaboração do esquema apresentado foram inseridos os dados no contexto de cada um dos elementos existentes na área. Alguns dos dados referidos encontram-se apresentados na tabela 3, na qual pode-se verificar as características dos setores pertencentes à bacia do córrego Tucunzinho.

A simulação das condições para o cenário pré-ocupação urbana se deu mediante a alteração estimada do Número de Deflúvio (CN). Destaca-se que a condição pré-ocupação urbana refere-se a um domínio de uso da terra caracterizado plenamente por pastagens, o que já implica em uma situação de modificação da condição natural. Assim foram obtidos os hidrogramas para cada setor em diferentes cenários, resultando em dados imprescindíveis às análises hidrológicas propostas neste trabalho.

Tabela 3 – Características dos setores discretizados do córrego Tucunzinho.

Setor	Área (km ²)	Decliv. terreno (%)	Decliv. canal (%)	Uso e ocupação*
1	0,187	2,87	4,65	52% UR; 29% EA e 19% RP
2	0,128	2,26	3,79	46% UR; 34% EA e 20% RP
3	0,113	2,39	3,02	53% UR; 28% EA e 19% RP
4	0,087	2,14	3,35	59% UR; 1% UI; 11% EA e 29% RP
5	0,118	2,40	2,31	63% UR; 2% UI; 12% EA e 23% RP
6	0,031	3,21	6,24	61% UR; 16% EA e 23% RP
7	0,034	3,97	7,21	56% UR; 23% EA e 21% RP
8	0,021	4,34	6,35	68% UR; 6% EA; 2% AD e 24% RP
9	0,150	11,94	4,81	1% UR; 14% EA; 79% AD; 1% RP e 5% C

* Legenda das abreviaturas: UR = Uso Residencial (lotes até 500m²); EA = Espaços Abertos; RP = Ruas Pavimentadas; UI = Uso Institucional (lote > que 500 m²); AD = Áreas Degradadas; C = Cerrado.

Resultados e Discussão

A modelagem da bacia realizada por meio do modelo IPHS1 permitiu a obtenção dos dados de vazão de cada setor mencionado. Entretanto, a setorização foi retrabalhada em função das obras hidráulicas de microdrenagem existentes na área, as quais foram integradas ao modelo, de acordo com as orientações do método adotado. Os hidrogramas contendo os valores de vazão das áreas setorizadas, com períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 e 50 anos para chuvas de 60 minutos de duração, foram analisados individualmente e em conjunto, colaborando para o entendimento acerca do volume da água de escoamento que chega até o curso d'água e sua vazão de pico.

Em relação aos procedimentos de modelagem adotados é importante ressaltar que foi necessária a concepção de três projetos, dois referentes a cada rede de galerias responsáveis pela coleta e condução das águas do escoamento das sub-bacias mencionadas e um referente à sub-bacia em que se encontra o córrego Tucunzinho e seus entornos. Cumprindo com os objetivos propostos neste trabalho foram realizadas as operações hidrológicas simu-

lando duas situações distintas: a atual e a de pré-ocupação urbana. O parâmetro CN atual, que se refere às condições de cobertura e de uso relacionadas com a classe de solo após urbanização, foi estabelecido conforme os dados da fotointerpretação e trabalhos de campo. Considera-se, portanto, que os dados de uso da terra são atuais (2011) devido à reambulação dos dados das fotografias aéreas de 2006. De posse de tais dados, foi realizada a média ponderada do CN de acordo com a área ocupada por cada classe, em cada setor da bacia hidrográfica. Para a simulação da situação pré-ocupação urbana adotou-se o valor de CN referente à classe de pastagens normais, que corresponde à situação anterior à urbanização segundo dados da bibliografia (SANCHEZ, 1986/1987) e de fotografias aéreas de 1962. A tabela 4 apresenta a organização das sub-divisões da bacia em projetos e setores, bem como os valores de CN adotados.

Tabela 4 – Planificação dos objetos do método e parâmetros CN

Projeto	Setor	CN médio - Condição	
		Atual (2011)	Pré ocupação (1962)
Rede Sul	1	81	59*
	2	80	59
	3	81	59
	4	86	59
	5	85	59
Rede Norte	6	84	59
	7	82	59
	8	87	59
Voçoroca	9	66	59

* Refere-se à situação de uso da terra vinculada as pastagens no cenário de pré-ocupação urbana.

Convém esclarecer que, de acordo com as fotografias aéreas de 1962, o voçorocamento já existia nesse cenário de pré-ocupação urbana e a área de entorno era recoberta por pastagens. Portanto, o valor de CN para a condição de pré-ocupação urbana foi estabelecido de acordo com essa característica do terreno.

Assim, dentre os hidrogramas obtidos nas simulações escolheram-se os que se referem à pontos de controle específicos para representação neste trabalho, pois são aqueles cujos dados resultam da

Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização:
Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP)

combinação das operações hidrológicas de cada setor a qual se encontra conectado. Nas figuras 4a, 4b e 4c são apresentados os referidos hidrogramas de chuva excedente, enquanto nas tabelas 5 e 6 são apresentadas as lâminas precipitadas e escoadas para diferentes tempos de recorrência bem como as razões entre as vazões máximas registradas na área da voçoroca nas condições pré e pós-ocupação urbana (RA/Pré), respectivamente.

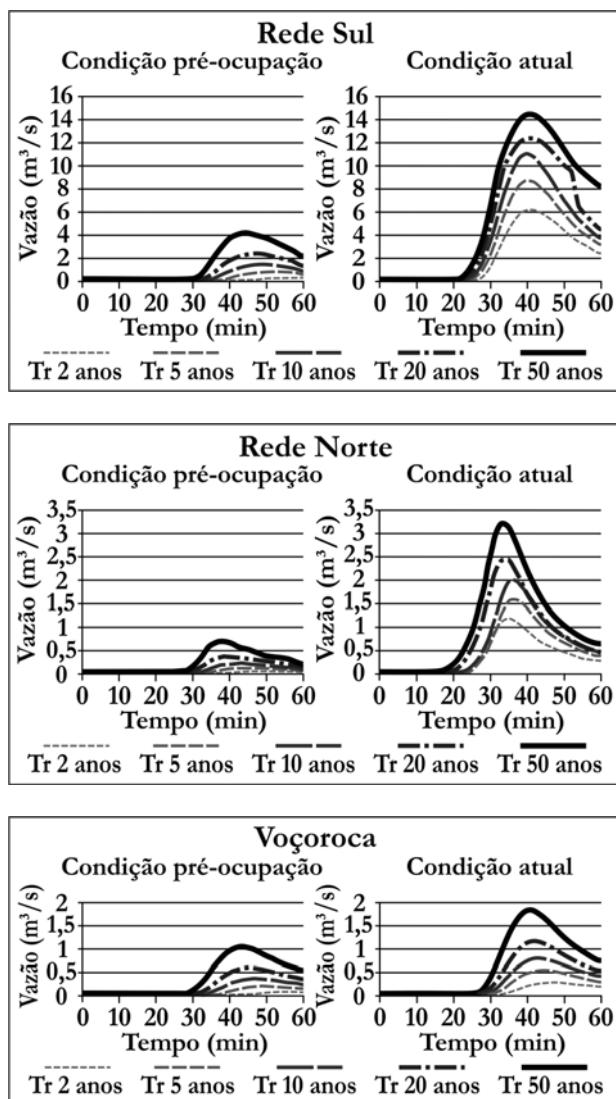


Figura 4a, 4b e 4c – Hidrogramas dos pontos de controle representativos dos projetos concebidos para a modelagem da bacia do córrego Tucunzinho, simulando as condições pré-ocupação urbana (1962) e atual (2011)

Tabela 5 – Lâminas precipitadas e escoadas para os setores investigados em diferentes tempos de recorrência e para o cenário de condição atual (2011) e pré-ocupação urbana (1962)

Sub-Bacia	TR	Lâm. Prec. (mm)	Lâm. Esc. (mm)		RA/Pré
		Pré-ocup (1962)	Atual (2011)	RA/Pré	
1	2	47,0	0,73	13,00	17,81
	5	55,0	2,02	17,50	8,67
	10	62,4	3,60	23,15	6,43
	20	70,5	5,85	29,04	4,96
	50	82,8	10,08	38,50	3,82
2	2	47,0	0,73	12,03	16,48
	5	55,0	2,02	16,60	8,22
	10	62,4	3,60	27,53	4,71
	20	70,5	5,85	36,80	3,65
	50	82,8	10,08	45,30	3,12
3	2	47,0	0,73	13,00	17,81
	5	55,0	2,02	17,71	8,77
	10	62,4	3,60	29,04	4,96
	20	70,5	5,85	38,60	3,83
	50	82,8	10,08	47,21	3,26
4	2	47,0	0,73	18,73	25,66
	5	55,0	2,02	24,31	12,03
	10	62,4	3,60	37,40	6,39
	20	70,5	5,85	48,00	4,76
	50	82,8	10,08	57,45	3,96
5	2	47,0	0,73	17,50	23,97
	5	55,0	2,02	22,88	11,32
	10	62,4	3,60	35,59	6,08
	20	70,5	5,85	46,00	4,56
	50	82,8	10,08	55,3	3,81
6	2	47,0	0,73	16,25	22,26
	5	55,0	2,02	21,26	10,52
	10	62,4	3,60	33,9	5,79
	20	70,5	5,85	44,02	4,37
	50	82,8	10,08	40,4	2,79
7	2	47,0	0,73	14,05	19,25
	5	55,0	2,02	18,95	9,38
	10	62,4	3,60	30,60	5,23
	20	70,5	5,85	40,31	4,00
	50	82,8	10,08	49,20	3,39
8	2	47,0	0,73	20,08	27,51
	5	55,0	2,02	25,84	12,79
	10	62,4	3,60	39,3	6,72
	20	70,5	5,85	50	4,96
	50	82,8	10,08	59,7	4,12
9	2	47,0	0,73	2,9	3,97
	5	55,0	2,02	5,20	2,57
	10	62,4	3,60	11,25	1,91
	20	70,5	5,85	17,2	1,56
	50	82,8	10,08	23	1,59

Na tabela 5 nota-se que houve um incremento nas lâminas excedentes com variação de até vinte e sete vezes maior em alguns dos períodos de retorno. Destaca-se que os eventos mais recorrentes foram os que sofreram o maior acréscimo pós-

ocupação urbana, indicando um aumento significativo da exposição das áreas fragilizadas. Da mesma forma, a comparação entre os cenários pré-ocupação urbana e atual (Tabela 6) permite a constatação de que houve significativo aumento na vazão de pico que atinge o curso d'água bem como a antecipação do tempo de pico. Na área da voçoroca (Tabela 6) foi constatado o incremento das vazões entre as condições atual (2011) e pré-ocupação urbana (1962) na cabeceira do setor 9 (RA/Pré), local onde constata-se o avanço erosivo. Apesar das configurações de drenagem na condição atual favorecerem o desvio dos fluxos dos setores de montante, verifica-se incrementos da ordem de 1,6 a 3,3 para as vazões máximas na cabeceira do setor 9. Da mesma forma, o exutório do setor 9 sofreu interferência da rede de drenagem instalada pós-ocupação urbana. Ainda, nos TR(s) superiores a 50 anos a diferença no tempo de pico do escoamento não é significativa. Esse fato se deve a cobertura de pastagens do cenário pré-ocupação, a qual, em chuvas excepcionais, leva a geração de vazões significativas visto que a baixa cobertura vegetal não cria condições de quebra de energia que propiciem o desenvolvimento de processos de infiltração.

Tabela 6 – Razão entre as vazões máximas (RA/Pré vazão) (m³/s) e os respectivos tempos de pico (RA/Pré Tp) no cenário de condição atual (2011) e pré-ocupação urbana (1962) para TR de 2, 5, 10, 20 e 50 no setor correspondente à área da Voçoroca

TR (anos)	pré-ocup.		pós-ocup.		$R_{A/Pré}$ vazão	$R_{A/Pré}$ Tp
	Urb. (1962)	Urb. (2011)	(min.)	(m ³ /s)		
Cab.*	0,1	58	0,3	48	3,3	0,83
2	Exut.*	0,2	–	0,5	–	2,9
Cab.	0,2	50	0,6	46	2,5	0,92
5	Exut.	0,4	–	0,7	–	2,0
Cab.	0,4	48	0,8	44	2,2	0,92
10	Exut.	0,6	–	8,8	–	14,9
Cab.	0,6	46	1,2	42	2,0	0,91
20	Exut.	0,8	–	9,6	–	11,5
Cab.	1,1	44	1,9	42	1,7	0,95
50	Exut.	7,4	–	10,0	–	1,3

*Cabeceira (Cab.) e exutório (Exut.) do setor correspondente à área da Voçoroca

No conjunto da bacia hidrográfica, sabe-se que o escoamento superficial das águas pluviais é acelerado por estruturas de microdrenagem, fato agravado pela quase inexistência de dissipadores de energia na área investigada. Assim, a mudança na magnitude do escoamento deveria ter sido acompanhada por elementos adequados de dissipação de energia, fato que não ocorre. Grande parte da rede de microdrenagem é composta por galerias pluviais de seção circular de concreto, cujo coeficiente de rugosidade é bastante baixo. Além do mais há evidências que algumas galerias foram subdimensionadas considerando as vazões que fluem pela rede, o que se corrobora pela análise de tais estruturas em campo, algumas das quais se encontram avariadas em função de tal fato (Figuras 5a e 5b). Essas estruturas inadequadas, juntam-se a suscetibilidade natural da área, favorecendo o avanço das atividades erosivas.



Figura 5a e 5b – Poços de visita com degrau próximos ao emissário: da “rede sul” e “rede norte”, respectivamente, apresentando danos em função da erosão diferencial no contato da estrutura com os solos devido ao transbordamento

Fonte: Acervo do autor. Data: Julho de 2010

Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização:
Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP)

Tais observações corroboram o fato de que o escoamento advindo do setor urbano atinge o leito do córrego com grande volume em curto espaço de tempo, resultando em um potencial erosivo bastante expressivo.

O único setor que apresentou pouca variação é aquele onde se situa a voçoroca, pois esta não possui áreas urbanizadas. Entretanto cabe ressaltar que o efeito remontante da erosão que se produz nos pontos de lançamento das águas pluviais constitui por si só um elemento de extrema atuação na dinâmica erosiva da área, conforme evidencia as figuras 6a e 6b.



Fig. 6a e 6b - Ponto de deságüe do emissário da Rede Sul com formação de lagoa e solapamento das margens, respectivamente

Fonte: Acervo do autor. Data: Julho de 2010

A comparação entre fotografias aéreas de diferentes períodos permite a constatação de que houve expressiva dinamização erosiva vinculada à expansão urbana. Entretanto, verifica-se que entre os cenários simulados tal fenômeno aparenta pouca notabilidade em termos de expansão em área. Isso se deve ao fato de que no período entre um cenário (1962) e outro (2006) o setor foi submetido a intensas obras que contemplaram o soterramento das formas erosivas, o terraceamento das vertentes e a instalação de redes de galerias pluviais. Assim, têm-

se no ano de 1962 a ocorrência de uma voçoroca apresentando-se em estágio evolutivo imaturo, no qual se constata a morfologia de entalhe em "V" do canal erosivo, conforme pode ser visualizado na imagem aérea do período, apresentada na figura 7. Nota-se que predominam as pastagens como uso da terra.



Fig. 7 – Fotografia aérea do ano de 1962 – setor de ocorrência da voçoroca

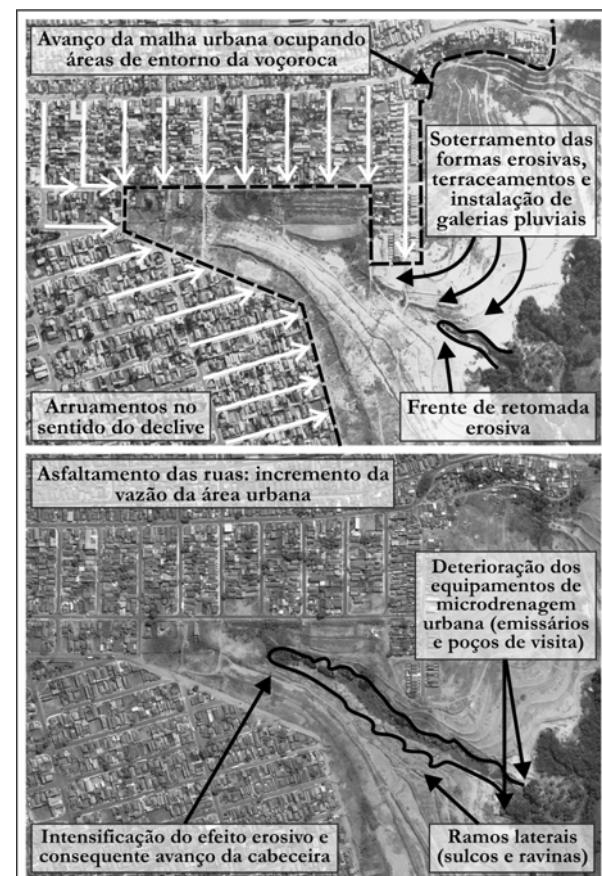


Figura 8 – Comparação entre os cenários do ano de 2000 e 2006, respectivamente

Entretanto, comparando-se a fotografia aérea do ano de 2000 à do ano de 2006 é possível verificar que houve o avanço da frente de retomada erosiva, além do fato de que a voçoroca consequente possui feições que denotam um estágio mais evoluído do fenômeno, tais como fundo chato e ramificações laterais. Tal fato pode ser associado à concepção de obras de infra-estrutura e drenagem urbana inadequadas, as quais foram instaladas na área por ocasião das obras já referidas.

A figura 9 apresenta os hidrogramas desse ponto da rede, representando as vazões em situação pré-ocupação urbana e situação atual.

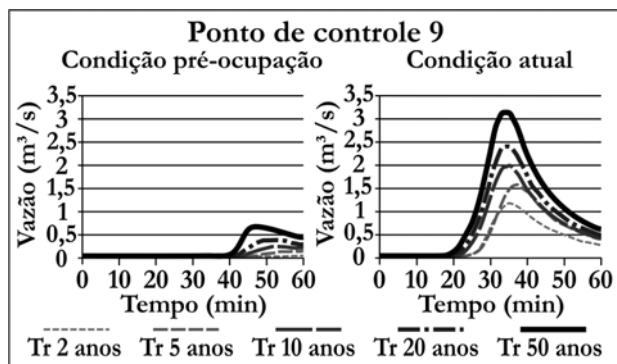


Figura 9 – Hidrogramas do PC 9 (emissário Rede Norte) para as condições pré-ocupação urbana (1962) e atual (2011)

É possível notar o incremento de vazões na condição atual mais de 10 vezes superior às vazões sob a condição pré-ocupação urbana (tormenta de 60 minutos, tempo de retorno de 2 anos), além de uma diminuição significativa no tempo que tal vazão leva para atingir o pico (até 20 minutos a menos), o que corrobora a hipótese de que o escoamento superficial direto constitui fator preponderante na evolução do processo erosivo.

CONCLUSÕES

As análises hidro-geomorfológicas integradas apresentadas nesse estudo permitem afirmar que, acerca do comportamento do escoamento de superfície da bacia do córrego Tucunzinho (São Pedro/SP), comparando-se o cenário pré-ocupação urbana à situação atual, têm-se um quadro no qual o incremento das vazões propiciado pelo aumento da impermeabilização no contexto urbano é significati-

vo. Levando-se em consideração a ocorrência de processos de erosão linear acelerada, cujas formas desenvolvem-se no contato com o setor urbanizado da bacia, tal comportamento hidrológico constitui motivo de grande preocupação no âmbito do planejamento, uma vez que o escoamento advindo do meio urbano é concentrado e direcionado ao leito do córrego, ocasionando com isso, a dinamização dos processos erosivos. Tais processos erosivos devem-se, portanto, tanto a suscetibilidade natural dos terrenos como as perturbações do escoamento superficial advindas da urbanização. Assim, verifica-se que a voçoroca já existia antes da ocupação urbana (Figura 7) devido às características lito-pedológicas da área, as quais propiciam condições naturais de instabilidade e que foram aceleradas pela cobertura vegetal por pastagens, presente no cenário de 1962. Contudo, é o uso urbano que leva a um avanço da frente erosiva (Figura 8) a qual responde a pequenas modificações de uso da terra devido a instabilidade deflagrada pelo desenvolvimento do processo de erosão linear.

Nessas condições, verificou-se que, a despeito das intervenções efetivadas no sentido de prover a estrutura urbana de galerias e dispositivos dissipadores e, evidentemente evitar o aumento dos efeitos erosivos, o que foi verificado foi a implementação de obras hidráulicas de drenagem sub-dimensionadas ou concebidas em desacordo com os atributos físicos da área e, consequentemente com a dinâmica erosiva ocorrente na bacia.

Os resultados obtidos nesse trabalho, portanto, corroboram fatos evidenciados pela observação de campo e apresentam dados por meio dos quais é possível nortear intervenções, que possam vir a ser efetuadas no local com a finalidade de corrigir as falhas de infraestrutura apontadas.

REFERÊNCIAS

BASE AEROFOTOGRAMETRIA E PROJETOS S/A. Levantamento aerofotogramétrico do Estado de São Paulo. São Paulo: [S.N.], 2006. B-917, faixa 131, foto 3779. Escala 1:30000.

CARPI JR, S. Técnicas cartográficas aplicadas à dinâmica da bacia do Ribeirão Araquá – SP. 1996. 188 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização:
Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro – SP)

CARPI JR, S; MENDES, I. A. As vertentes do córrego Tucunzinho (São Pedro, SP) e seu significado morfogenético. *Geografia, Rio Claro*, v. 17, n. 1, p. 77-90, 1992.

FACINCANI, E. M. Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro: proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais correlatos. 1995. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

FONTES, N. Proposta Metodológica para planejamento de sistemas de espaços livres: Ribeirão Preto – SP. 2009. 193 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa geológico do Estado de São Paulo; escala 1:500.000. v1 (texto) e v2 (mapa). São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1981.

MATHIAS, D. T. Propostas de recuperação de áreas peri-urbanas erodidas com base em parâmetros hidrológicos e geomorfológicos: Córrego Tucunzinho (São Pedro/SP). 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

MORUZZI, R. B.; CUNHA, C. M. L.; CONCEIÇÃO, F. T.; PEREIRA, L. H. Efeito da ocupação urbana e de obras de drenagem sobre o hidrograma de cheia de uma bacia urbanizada: o caso da bacia do córrego da servidão em rio claro, SP. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2009.

MORUZZI, R. B.; LUPINACCI, C.; OLIVEIRA, J. N. Aplicação de métodos hidrológicos para avaliação de reservatório de retenção e detenção combinados a obra de recuperação do canal de macro-drenagem no controle de cheias em uma bacia hidrográfica urbanizada. *Ciência & Engenharia*, v. 18, n. 1/2, p. 11-20, 2010.

OLIVEIRA, J. B. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 112 p. (Boletim científico, 45).

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. 628 p.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (Org.). *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: AB-RH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. p. 107-165.

PRUSKI, F. F.; TEIXEIRA, A. F.; SILVA, D. D.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J. M. A. Pluvio 2.1: Chuvas intensas para o Brasil. In: PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J. M. A.; GRIEBELER, N. P. (Org.). *Hidros: dimensionamento de sistemas hidroagrícolas*. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. p. 15-25.

SANCHEZ, M. C. Monitoramento de forma de erosão acelerada no córrego Tucunzinho, no município de São Pedro (SP, Brasil). *Boletim de Geografia Teórica*, v. 16-17, n. 31-34, p. 276-284, 1986/1987.

SCHÄUBLE, H. HydroTools 1.0 for ArcView 3.x. [S.l.: s.n.], 2004. Disponível em: <http://www.terracs.de/ArcView_3_x/Oldies/oldies.html>. Acesso em: 15 mar. 2011.

SOIL CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook, Chapter 10. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall U.S. Washington, DC: Department of Agriculture, 2004. Originally prepared in 1964 by Victor Mockus and revised in 1998 by Allen T. Hjelmfelt.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS ABRH, 1998. 650 p.

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO H. D. Sistema de Simulação Precipitação Vazão I-PHS1. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1989. (Publicação recursos hídricos, n. 20).

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. DG/FFLCH-USP. Estado de São Paulo – Levantamento aeroftogramétrico. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1962. Foto 9303. Escala 1:25.000.

**Geomorphological Consequences Of Changes Due
To Urban Runoff: Analysis Of Erosion Processes At
Tucunzinho Watershed, (São Pedro - SP)**

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of the geomorphological implications of urban runoff on the evolution of linear erosion processes in peri-urban areas. The Tucunzinho watershed (São Pedro/SP) case was chosen because it presents linear erosive forms in which the dynamic is associated with urban expansion into fragile areas and implantation of inadequate dissipation devices. The method proposed by the Soil Conservation Service (SCS) was adopted to obtain the Curve Number (CN) and runoff hydrographs of different sectors of the basin. The coverage classification (use and occupancy) was based on analysis of aerial photographs of two periods (1962 and 2006, updated in the field in 2011). The IPHS1 model was used for the simulation and analysis of the hydrological behavior for both the pre-urban occupation and the current occupation. The hydrogeomorphological analysis helped understand the influence of the urban run-off on the erosion dynamics, clearly showing the ineffectiveness of dissipation energy devices in the area, which has a natural susceptibility to erosion due to litho-soil characteristics.

Keywords: Erosive processes. Urban drainage. Hydrological models.