



O ESPAÇO GEOGRÁFICO EM ANÁLISE

Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: uma abordagem hidrogeomorfológica para delimitação de áreas de preservação permanente

Runoff generation processes and hydrologically sensitive areas: a hydrogeomorphological approach to delineating permanent preservation areas

Cesar Augusto Crovador Siefert ¹

Irani dos Santos ²

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão conceitual sobre a relação entre os mecanismos de geração de escoamento e as áreas hidrologicamente sensíveis (AHS). Propõe-se a aproximação do conceito de AHSs na delimitação de áreas de preservação permanente (APPs) devido à capacidade de geração de escoamento superficial por saturação destas áreas, estabelecendo assim a transferência de sedimentos e poluentes incidentes à jusante em direção aos canais. Reconhece-se a importância das AHSs como um novo paradigma na delimitação de APPs de acordo com características hidrogeomorfológicas da bacia hidrográfica. Por fim, observa-se ainda a necessidade de um aprofundamento na busca de um indicador de sensibilidade hidrológica das paisagens que possa ser utilizado em bacias hidrográficas com distintas características fisiográficas.

Palavras-chave: áreas hidrologicamente sensíveis; zona ripária; área variável de afluência; processos hidrogeomorfológicos.

ABSTRACT

This paper presents a conceptual review about runoff generation processes and hydrologically sensitive areas (HSA). It is proposed to use the concept of HSA

¹ Geógrafo e MSc. em Geografia (UFPR), Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), cesarsiefert@ufpr.br

² Geógrafo, MSc. em Ciências do Solo (UFPR) e Dr. Em Geografia (UFSC), Professor Adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), irani@ufpr.br

to delimitation of permanent preservation areas (PPA) due the capacity of these areas generate surface runoff by saturation establishing sediment and pollutants delivery upstream transported toward the channel. Thus, it recognizes the importance of this concept as a new paradigm in the delimitation of PPA according to the watershed's hydrogeomorphic characteristics. Finally, it was observed that studies of the relationship between HSA and PPA require further clarification in order to seek an indicator of hydrological sensitivity in the landscapes that can be uses in watershed with distinct physiographic features.

Keywords: hydrologically sensitive areas; riparian buffers; variable source area; hydrogeomorphic processes.

Introdução

Atualmente, no Brasil considera-se a delimitação de *buffers* de preservação permanente da zona ripária ao longo dos corpos hídricos de acordo com o exposto na Lei Federal 4.771/65, que delibera o Código Florestal Brasileiro. Consideram-se como áreas de preservação permanente (APP) a faixa marginal de terra com largura variável de acordo com a largura do canal e ao longo de lagos e nascentes, estabelecendo *buffers* de preservação na paisagem. Estes são definidos como sendo uma área de vegetação permanente ao longo dos corpos hídricos ou áreas úmidas com o propósito de filtrar poluentes carreados via escoamento superficial ou subsuperficial (POLYAKOV *et al.*, 2005).

Em tese, os *buffers* devem servir como filtros biogeoquímicos da paisagem, reduzindo também a energia do escoamento superficial e aumentando a capacidade de infiltração da bacia hidrográfica, auxiliando na deposição de partículas e retenção de solutos permitindo a sua transformação, degradação ou captação pelo solo (BUTTLE, 2002). De fato, tais *buffers* são estabelecidos de acordo com a lei visando proteger os recursos hídricos, entretanto ainda observa-se a necessidade de um maior aprofundamento na relação entre a extensão adequada da faixa de vegetação nativa a ser preservada com a preservação efetiva da funcionalidade hidrológica e ambiental dos corpos hídricos (WALTER *et al.*, 2009). Desta forma, o estabelecimento de APPs a partir de distâncias do canal não garante a plena funcionalidade do ecossistema ripário e abrangência da zona ripária³.

³ Com base em Kobiyama (2003), entende-se aqui a zona ripária como sendo o espaço tridimensional próximo aos canais que contém vegetação, solo e água; compreendida horizontalmente até o alcance da

Salienta-se que a metodologia exposta no Código Florestal Brasileiro desconsidera quaisquer outras características naturais das áreas marginais, como por exemplo: características topográficas, características pedológicas ou ainda características hidrológicas presentes na paisagem. Desconsidera-se ainda qualquer processo hidrogeomorfológico inerente a interação destes condicionantes naturais.

Com base em Sidle & Onda (2004, p. 597), compreende-se a Hidrogeomorfologia como sendo “[...] a ciência interdisciplinar que estuda a interação e articulação entre os processos hidrológicos com as formas de relevo [...]”, reconhecendo ainda os processos hidrogeomorfológicos como seu objeto de estudo (GOERL *et al.*, 2011). Assim, considera-se que processos de origem hidrogeomorfológica devem ser aqueles que denotam a evolução da paisagem e tem sua gênese a partir da interação entre a topografia e os processos hidrológicos, como por exemplo, os mecanismos de geração de escoamento.

Considera-se que a compreensão da movimentação da água na paisagem tem origem nos estudos pioneiros da Hidrologia moderna, remetendo aos trabalhos de Horton (1933) e a teoria da infiltração-escoamento, no início do século XX. Já nos anos 60, surge a noção de área variável de afluência (AVA) (CAPPUS, 1960; TSUKAMOTO, 1963; HEWLETT & HIBBERT, 1967), processo observado frequentemente em áreas onde o escoamento superficial por saturação é dominante, considerando as áreas saturadas como fontes de escoamento superficial. Desta forma, o estudo das AVAs possui um interesse ambiental devido ao seu comportamento hidrológico distinto na paisagem, surgindo a possibilidade de delimitação e intervenção pontual nestas áreas, mediante práticas de manejo restritivas a usos do solo que possam comprometer a qualidade dos recursos hídricos, configurando assim a noção de *buffers* de preservação dinâmicos (GORSEVSKI *et al.*, 2008).

Neste contexto, como evolução do conhecimento sobre as AVAs surge o conceito de área hidrologicamente sensível (AHS) (WALTER *et al.*, 2000). Consideram-se as AHSs como determinadas áreas da bacia hidrográfica que

inundação e verticalmente do regolito até o dossel de vegetação. Sendo o termo “ecossistema ripário” utilizado ao tratar do sistema ripário como um todo além dos processos envolvidos.

apresentam maior probabilidade de geração de escoamento superficial por saturação. Gorsevski *et al.* (2008) afirma que as AHSs surgem como áreas de grande importância para o controle e amortecimento do aporte de sedimentos e poluentes em direção aos corpos hídricos, podendo serem consideradas no processo de delimitação de áreas de preservação.

Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste em realizar uma revisão bibliográfica sobre a relação intrínseca entre os mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis. Sendo que este artigo será estruturado de forma a, primeiramente demonstrar como evolui o conhecimento referente aos mecanismos de geração de escoamento e como ocorre a construção do conceito de AHSs, além de seus princípios enquanto categoria de análise da dinâmica hidrogeomorfológica da bacia hidrográfica e suas aplicações.

Por fim, procura-se demonstrar e difundir a possibilidade de uma abordagem que vise delimitar e quantificar áreas de preservação ambiental pautada na observância da dinâmica hidrogeomorfológica da paisagem, considerando a propensão de determinadas áreas da bacia hidrográfica a atingirem o estado de saturação hídrica do solo.

Mecanismos de geração de escoamento como processos hidrogeomorfológicos

O conhecimento dos mecanismos de geração de escoamento remete ao pioneiro trabalho de Horton, publicado em 1933, no qual é proposto o primeiro modelo clássico de Hidrologia para a teoria de infiltração-escoamento. O autor descreve quantitativamente o mecanismo de geração de escoamento superficial a partir da intensidade de precipitação e a capacidade de infiltração do solo. Neste sentido, o escoamento superficial como excedente da infiltração é proposto por Horton (1933) ao considerar que:

A infiltração divide a precipitação em duas partes, que posteriormente prosseguem por diferentes caminhos através do ciclo hidrológico. Uma parte vai alimentar os rios como escoamento superficial durante os eventos de precipitação, a outra vai inicialmente para o solo e daí, vai alimentar os rios

como escoamento subterrâneo ou retorna para a atmosfera pelos processos de evaporação (HORTON, 1933, p. 445).

Desta forma, a ocorrência de escoamento superficial na bacia hidrográfica ficaria restrita apenas a eventos de grande magnitude onde a capacidade de infiltração do solo seria excedida pela intensidade da chuva. Assim, a parcela da água que infiltra no solo iria alimentar o aquífero raso e deixaria a bacia na forma de escoamento de base. Ainda segundo a teoria de infiltração-escoamento proposta por Horton, o conceito de capacidade de infiltração do solo seria constante no espaço, podendo-se considerar que o escoamento superficial provinha de todas as partes da bacia (CHORLEY, 1978).

Atualmente, a teoria de escoamento superficial hortoniano refere-se ao processo de escoamento gerado em perfis de solos alterados por ações antrópicas (p.ex. bacias agrícolas e solo urbano pavimentado) ou compactados por pisoteio de animais, regiões áridas e semi-áridas (CHOW *et al.*, 1994) ou ainda em locais onde a densidade de vegetação é baixa, fazendo com que as taxas de infiltração sejam inferiores a intensidade de chuva (HORNBERGER *et al.*, 1998).

A aceitação universal da teoria de Horton permanece vigente até a década de 60 quando evidências empíricas culminaram no avanço do entendimento dos mecanismos de geração de escoamento.

Com o intuito de desenvolver um modelo matemático para quantificação de escoamento direto em bacias hidrográficas baseado em três variáveis físicas independentes (intensidade da precipitação, duração do evento e umidade do solo), Betson (1964) propõe uma modificação na teoria de infiltração-escoamento. A partir de dados mensurados em duas bacias hidrográficas, Betson (1964) considera que o escoamento superficial provinha de uma “área parcial de afluência” e não de toda a extensão da bacia. Partindo das premissas do paradigma hortoniano neste trabalho, Betson (1964) conclui que o escoamento superficial era oriundo de uma porção pequena, porém estável da área da bacia hidrográfica independente do uso do solo.

Esta constatação referente à “área parcial de afluição” (APA) vai de encontro com trabalhos contemporâneos oriundos de projetos independentes de monitoramento em bacias experimentais desenvolvidos na França (CAPPUS, 1960), Japão (TSUKAMOTO, 1963) e Estados Unidos (HEWLETT & HIBBERT, 1967). Tal questão é evidenciada também em relação a Hewlett & Hibbert (1963) e Weyman (1970), cujos trabalhos indicam que mesmo em eventos extremos, o volume precipitado irá infiltrar-se dentro do solo nas partes altas da bacia. Conseqüentemente, esta água infiltrada aumenta consideravelmente o teor de umidade no perfil do solo, deslocando-se no sentido da vertente até emergir próximos aos canais, provocando a saturação do solo. Neste sentido, propõe-se um novo mecanismo de geração de escoamento onde o processo de AVA é dominante.

De acordo com Santos (2009), o conhecimento do processo de geração de escoamento superficial por saturação com “área parcial de contribuição” levou naturalmente a constatação de que o fluxo subsuperficial, a chuva e a umidade inicial do solo influenciam a expansão e a contração da porção saturada e da rede de drenagem da bacia, originando assim o conceito de AVA.

A Figura 1 apresenta os principais mecanismos de geração de escoamento na escala da vertente.

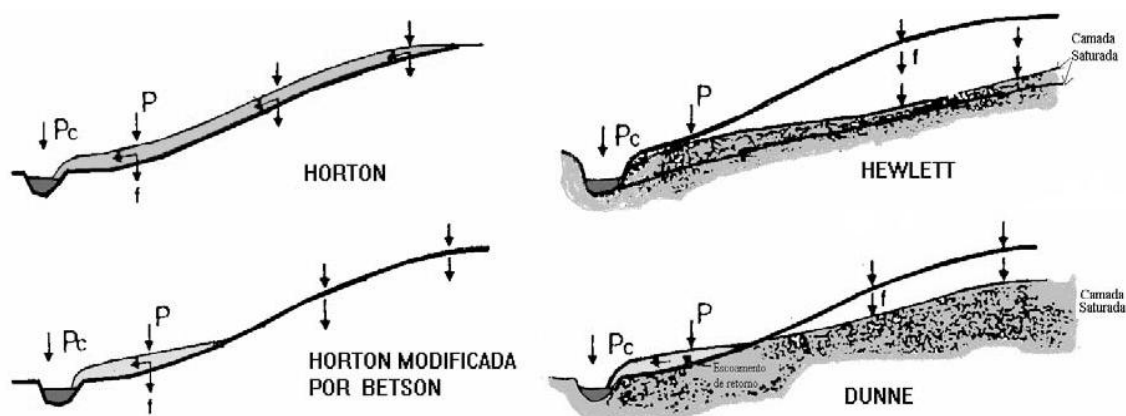


Figura 1 – Principais mecanismos de geração de escoamento superficial.
Fonte: adaptado de Mendiondo & Tucci, 1997.

Uma das primeiras aproximações sobre a descrição do processo de AVA e a demonstração da sua utilização na análise do comportamento dos

hidrogramas é encontrada em Cappus (1960). Para a bacia experimental de Alrance, na França, Cappus (1960) sugere uma divisão em duas principais zonas referentes à propensão de geração de escoamento: áreas de escoamento (S_r , com extensão A_r) e áreas de infiltração (S_i , com extensão A_i). Os resultados observados são contrários a teoria da infiltração-escoamento, indicando que o escoamento superficial somente seria produzido em áreas impermeáveis ou em condições de solo saturado, cuja extensão varia de acordo com o nível freático.

Tsukamoto (1963) propõe a relação entre o armazenamento da umidade no perfil do solo e sua variabilidade espacial de acordo com a sua posição na paisagem e incrementos de umidade oriundos da precipitação. Com o objetivo de estimar a variação espacial e sazonal da umidade do solo, o autor descarta a existência de escoamento superficial hortoniano antes que o perfil do solo atinja o estado de saturação. Desta forma, segmenta-se uma encosta hipotética em cinco setores de acordo com a sua localização na paisagem, utilizando primeiramente o atributo da localização espacial para estimar o armazenamento inicial de umidade do solo.

O núcleo da teoria proposta por Tsukamoto (1963) consiste na idéia de que a variação espacial do armazenamento inicial da umidade no perfil vertical do solo indicará a sua dinâmica de saturação. Assim, o incremento de umidade no perfil do solo desencadeará o processo de saturação, uma vez que áreas com maior déficit de umidade irão atingir o estado de saturação mais lentamente que as demais. Esta variação espacial do déficit de umidade do solo configura a dinâmica temporal das áreas saturadas. Neste sentido pode-se considerar que a idéia de representação da propensão de saturação do solo em função do déficit de armazenamento (TSUKAMOTO, 1963), serve como um dos pilares para a construção do conceito do índice topográfico, posteriormente propostos por Kirkby (1975) e Beven & Kirkby (1979).

Ao buscar a separação do hidrograma em escoamento superficial, escoamento subsuperficial e escoamento de base, Hewlett & Hibbert (1967) reconhecem a importância das AVAs e do escoamento subsuperficial no comportamento dos hidrogramas. Assim, os autores indicam que: “[...] a

parcela de água infiltrada retornaria a superfície via saturação do perfil do solo formando canais efêmeros antes de o fluxo atingir o canal principal” (HEWLETT & HIBBERT, 1967, p. 276).

A contribuição fundamental dos autores para a compreensão do processo de AVA surge no aprofundamento da idéia que a dinâmica da saturação do solo é resultado da dinâmica do nível freático. Sendo assim, afirma-se que: “[...] o processo de expansão das AVAs está intrinsecamente ligado à extensão das áreas saturadas próximas aos canais perenes em direção aos canais intermitentes, resultantes dos processos desencadeados a partir do evento de precipitação.” (HEWLETT & HIBBERT, 1967, p.279). Salienta-se ainda que a descrição do mecanismo de geração de escoamento realizado por Hewlett & Hibbert (1963; 1967) reconhece o papel da topografia na localização das áreas variáveis de afluência a partir do deslocamento da umidade na vertente no sentido de jusante (BONNEL, 1993).

De acordo com Mendiondo & Tucci (1997, p.84) a proposta de AVA realizada por Hewlett & Hibbert (1967) pode ser analisada a partir de três premissas principais: (1) as áreas saturadas atuam como únicas fontes de “escoamento rápido”, porém absorvem parte da precipitação incidente, transformando este incremento de umidade no perfil do solo em escoamento subsuperficial, mais lento; (2) estas áreas saturadas são contíguas aos canais principais e; (3) as áreas saturadas são alimentadas pelo escoamento subsuperficial produzido a montante pela chuva incidente.

Hewlett & Hibbert (1967) reconhecem ainda a dinâmica das áreas saturadas, indicando o seu tamanho variável de acordo com a intensidade do evento e condições iniciais de umidade no solo. Diversos trabalhos posteriores consolidaram o conhecimento de que o escoamento superficial seria produzido em uma pequena parte da bacia hidrográfica, cujas dimensões são variáveis no espaço e no tempo (p.ex.: KIRKBY, 1969; DUNNE, 1970; DUNNE *et al.*, 1975).

Em geral, o processo de expansão das áreas saturadas remete ao acréscimo de água no perfil do solo via escoamento subsuperficial fazendo com que capacidade de transmissividade do solo seja superada. Em determinadas áreas da bacia, como resultado da ação combinada dos

processos de infiltração, escoamento subsuperficial e escoamento de retorno condiciona-se o aparecimento de uma camada saturada no solo. Desta forma, diferentemente da teoria proposta por Horton (1933), a teoria das AVAs incorpora a dimensão espacial na produção de escoamento superficial em bacias hidrográficas.

Considera-se então que o escoamento superficial por áreas saturadas provém de uma porcentagem variável da área da bacia hidrográfica, que sofre contração (em períodos de estiagem) e expansão (em períodos chuvosos) mediante a sinergia dos processos de fluxo subsuperficial, a intensidade de precipitação e a umidade antecedente no solo. Assim, pela teoria das AVAs considera-se que existem áreas mais propensas à geração de escoamento superficial por saturação, sendo variáveis no espaço-tempo e que tendem a expandir-se e contrair-se de forma sazonal, daí o nome “área variável”, configurando uma parcela de área da bacia altamente variável entre 1% e 50% da área total (DICKINSON & WHITELEY, 1970) dependendo da quantidade e da intensidade de precipitação.

A Figura 2 mostra a variação das áreas saturadas em relação aos diferentes tempos do hidrograma.

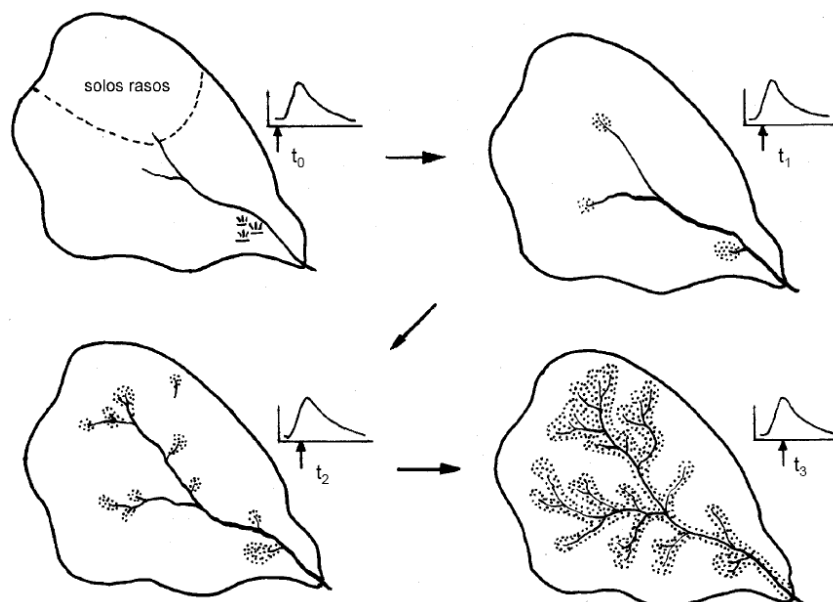


Figura 2 – Dinâmica das áreas variáveis de afluência em relação ao hidrograma. Fonte: HEWLETT & NUTTER, 1970 *apud* CHORLEY, 1978.

Também a partir de estudos de monitoramento em bacias hidrográficas florestadas, Dunne & Black (1970a) indicam que a teoria de escoamento hortoniano é inadequada para explicar a geração de escoamento em bacias com densa cobertura vegetal, clima úmido e solos com altos índices de permeabilidade. Nestas condições, devido à interação natural dos elementos relacionados, a taxa de infiltração sempre será superior a intensidade de infiltração, impedindo assim a ocorrência do escoamento superficial hortoniano.

Aliado a estas características naturais, observa-se ainda condições topográficas específicas dentro da bacia hidrográfica, como por exemplo, baixas declividades e grandes áreas de contribuição, que fazem com que a superfície freática se encontre próxima à superfície nos fundos de vale (HORNBERGER *et al.*, 1998). Nestas áreas, a probabilidade de ocorrer saturação do solo é elevada, pois quando o volume precipitado for o suficiente para ocasionar a rápida infiltração e conseqüente elevação do nível freático, ocorre à saturação do perfil do solo. Assim, o processo de infiltração não é mais possível devido às condições saturadas e toda a precipitação subsequente irá gerar escoamento (LOAGUE *et al.*, 2010). O escoamento gerado nestas áreas de intersecção do aquífero raso com a superfície é alimentado pelo escoamento subsuperficial de montante e atingiria o canal via escoamento superficial quando a precipitação incidente nas áreas saturadas, essencial para a expansão do sistema de canais (DUNNE & BLACK, 1970a). Dunne & Black (1970a; 1970b) contribuíram de forma significativa para a compreensão dos mecanismos de geração de escoamento ao indicar que o escoamento superficial rápido via áreas saturadas é mantido pelo escoamento subsuperficial oriundo da vertente a montante.

Assim, considera-se que a definição do mecanismo de geração de escoamento por saturação (DUNNE & BLACK, 1970a; 1970b) seria complementar a teoria da AVA ao descrever os processos de escoamento que predominam nas áreas saturadas. Considera-se então que o trabalho de Dunne & Black (1970a, 1970b) é uma descrição mecânica dos processos resultantes da interação da água entre a topografia, solos e zona ripária numa escala a partir da vertente, enquanto que a teoria das AVAs seria uma

abordagem conceitual mais ampla do processo de escoamento na escala da bacia, partindo da descrição do processo de variação temporal e espacial das áreas saturadas.

As considerações de Cappus (1960), Hewlett & Hibbert (1963; 1967), Tsukamoto (1963), Betson (1964), Dunne & Black (1970a; 1970b), Weyman (1970) e outros consolidam o conhecimento do mecanismo de escoamento via áreas saturadas. Desta maneira, este processo é então resultado dos processos de precipitação incidente nas AVAs e do incremento de umidade no perfil do solo a partir do afloramento da superfície freática junto à superfície (escoamento de retorno) especificamente em áreas onde o perfil do solo apresenta propensão a atingir o estado de saturação (DUNNE, 1970; DUNNE & BLACK, 1970a; DUNNE & BLACK, 1970b). Sendo assim, considera-se o escoamento subsuperficial na zona não-saturada em direção a jusante e o escoamento de retorno como elementos chaves na produção de escoamento superficial via áreas saturadas.

Destacam-se ainda as hipóteses para geração de escoamento superficial em bacias hidrográficas que partem da integração de processos (KIRKBY, 1988) e processos internos de escoamento como, por exemplo: efeito pistão (WARD, 1984), escoamento de retorno (DUNNE, 1978; WARD, 1984), fluxos de macroporos (BEVEN & GERMANN, 1982) e intumescência da camada saturada (SKLASH & FARLVODEN, 1979). Atualmente, conforme McDonell (2003) fala-se na era do pós-AVA e no papel da “água velha⁴” na geração de escoamento superficial, visão construída a partir do reconhecimento da complexidade de vertentes e bacias hidrográficas como sistemas não-lineares e que, conseqüentemente irão produzir respostas não-lineares a diferentes *inputs*. Salienta-se, estas abordagens distintas dos mecanismos de geração de escoamento são complementares e não substitutos as teorias explicitadas anteriormente, podendo serem consideradas como uma mudança de escala na análise dos processos hidrológicos que irão determinar a produção de escoamento superficial em bacias hidrográficas.

⁴ “*Old water*”, termo que designa o predomínio da água disponível pré-evento de precipitação na bacia que irá condicionar o comportamento do hidrograma, sendo que as saídas do sistema bacia hidrográfica não são mais proporcionais às entradas por evento.

Áreas hidrologicamente sensíveis e a delimitação de APPs

A relação entre os mecanismos de geração de escoamento e a necessidade de preservação dos corpos hídricos torna-se evidente quando se analisa conjuntamente a problemática e os objetivos da delimitação de áreas de preservação e o transporte de sedimentos via processos de escoamento superficial.

Conforme Lu *et al.* (2007, p. 1549) “[...] a degradação do solo e dos recursos hídricos devido a práticas agrícolas inadequadas tornou-se uma questão ambiental de preocupação internacional [...]”, salientando-se ainda que os mecanismos de geração de escoamento superficial são os vetores primários de transporte de possíveis poluentes em direção aos rios. Buttle *et al.* (2005) afirmam que os modelos de delimitação de áreas de preservação utilizados até então (*buffers* ripários) sofrem da falta do entendimento dos processos hidrológicos que irão controlar a produção de água e transporte de sedimentos de áreas florestadas e quais as implicações destes processos nos ambientes aquáticos.

Neste sentido, o Código Florestal Brasileiro, definido pela Lei Federal nº 4.771 / 65 considera como APPs a faixa marginal de terra composta por floresta nativa com comprimento definido a partir da largura da lâmina de água no canal ou ainda áreas ao redor de nascentes e lagos com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, proteger o solo, entre outros (BRASIL, 1969). Considerando o exposto na Lei, as APPs são definidas exclusivamente considerando a distância em relação aos canais, onde áreas mais próximas apresentariam uma maior sensibilidade hidrológica independente dos processos hidrogeomorfológicos que ocorrem na bacia hidrográfica.

Como extensão da aplicação do Código Florestal Brasileiro, em 2008 exclusivamente para o estado do Paraná foi promulgada a resolução conjunta IBAMA/SEMA/IAP nº 005 que, baseada na Convenção de Ramsar⁵, define

⁵ Convenção sobre Zonas Úmidas de Importância Internacional, conhecida como Convenção de Ramsar, assinada no Irã em 02 de fevereiro de 1971, no Brasil foi aprovada pelo Decreto Legislativo nº 33, de 16 de junho de 1992 e promulgada pelo Decreto nº 1.905, de 16 de maio de 1996. Considera fundamentais

critérios para avaliação das áreas úmidas e seus entornos protetivos, normatiza sua conservação e estabelece condicionantes para o licenciamento das atividades permitidas. Definem-se as áreas úmidas como o segmento da paisagem constituídos por solos hidromórficos⁶, julgando necessária a sua preservação (PARANÁ, 2008). Assim, considera-se a definição de um entorno protetivo variável junto às áreas úmidas definidas a partir das características topográficas locais (declividade do terreno) e características granulométricas do solo.

Em uma análise geral, admite-se que ambas as deliberações normativas são baseadas na proteção de determinadas áreas da bacia hidrográfica produtos da ação conjunta de processos hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos que irão permitir a execução da função ecológica das zonas ripárias. E, principalmente para a adoção da resolução de áreas úmidas para o estado do Paraná, o processo de execução torna-se extremamente oneroso e demorado para sua realização, uma vez que tornam-se necessários mapeamentos pedológicos e topográficos compatíveis com a escala da pequena propriedade e análises texturais do solo.

Ademais, considera-se ainda que ambos os paradigmas de preservação permanente são caracterizados como formas estáticas de estabelecer uma APP. Entretanto, existem aspectos controversos na delimitação de APPs a partir destes princípios.

Easton *et al.* (2008) afirma que as metodologias de *buffers* fixos e pré-estabelecidos irão contemplar algumas áreas que seriam menos propensas em gerar escoamento superficial em detrimento as mais propensas a atingirem o estado de saturação.

Este problema pode ser contornado a partir da delimitação dos *buffers* de preservação permanente baseada na probabilidade de geração de

as funções ecológicas das zonas úmidas enquanto reguladoras dos regimes de água e enquanto habitat de uma flora e fauna características e, consciente de que elas constituem um recurso de grande valor econômico, cultural, científico e recreativo. Cada parte contratante do tratado, inclusive o Brasil, assume a obrigação de promover a conservação e proteção adequadas de tais áreas e de sua flora e fauna, por ações locais, regionais, nacionais e internacionais.

⁶ A relação entre o processo de AVA e solos hidromórficos é encontrada em Mérot (1988), indicando a possibilidade de utilização do processo de AVA para explicar as condições pedológicas de pequenas bacias hidrográficas, originando assim solos com caráter hidromórfico.

escoamento por saturação, sendo que estas áreas devem ser preservadas no sentido de dissociar as áreas mais propensas de gerar escoamento das áreas propensas a receberem atividades agrícolas independente do manejo utilizado (WALTER *et al.*, 2009).

As premissas discutidas até então consideram que a compreensão dos mecanismos de geração de escoamento superficial é essencial para a compreensão dos mecanismos de geração de poluição difusa em bacias hidrográficas e dão origem aos conceitos intrinsecamente interconectados de áreas críticas de afluência (ACA) (GBUREK & SHARPLEY, 1998) e áreas hidrologicamente sensíveis (AHS) (WALTER *et al.*, 2000). Ambas as abordagens partem do pressuposto de integração dos condicionantes naturais da geração de escoamento superficial por saturação para evitar a dispersão de contaminantes na paisagem e impactos negativos da poluição difusa nos corpos hídricos e solos. Considera-se que os conceitos de AHSs e áreas críticas de afluência são abordagens construídas a partir da extensão do processo de AVA e devem ser entendidos em conjunto por terem seus objetivos imbricados.

A descrição do processo de escoamento superficial via AVA estaria ligada às características físicas da paisagem, enquanto o conceito de AHSs trata de uma forma de avaliação e prevenção de impactos negativos na qualidade da água a partir da probabilidade de saturação do solo (AGNEW *et al.*, 2006). Pode-se então, analisar de forma discreta a probabilidade de geração de escoamento via AVA em uma bacia para estabelecer um plano de manejo adequado às condições de saturação do perfil do solo (GBUREK & SHARPLEY, 1998; WALTER *et al.*, 2000).

Considera-se ainda que, de acordo com a teoria das AVAs, existem áreas mais propensas a atingir o estado de saturação do solo em uma bacia hidrográfica e existiria também uma maior sensibilidade hidrológica associada a estas áreas em relação a áreas pouco propensas a gerar escoamento, uma vez que o transporte de sedimentos e nutrientes via escoamento é potencializado (WALTER *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2001). Portanto, de uma maneira geral, definem-se as AHSs como sendo as áreas de uma bacia

hidrográfica mais propensas a atingirem o estado de saturação do solo e produzirem escoamento superficial (WALTER *et al.*, 2000), demonstrando assim um potencial para utilização do processo de AVA e do conceito de AHSs como subsídios à delimitação de áreas de preservação permanente, conforme demonstrado em Creed *et al.* (2008) e Gorsevski *et al.* (2008).

Assim, a grande contribuição da consideração dos processos hidrogeomorfológicos, expressos no conceito de AHSs, para o processo de delimitação das APPs recai sobre a possibilidade de preservação da função ecológica das planícies de forma dinâmica. Isto é possível uma vez que a ocorrência do processo de AVA configura extensão variável das áreas saturadas, configurando uma susceptibilidade de saturação distinta em cada porção da bacia hidrográfica. Pode-se então, considerar a delimitação de APPs a partir da dinâmica das AVAs como uma alternativa ao estabelecimento de *buffers* de preservação fixos obtidos a partir de distância pré-estabelecidas dos canais ou nascentes ou ainda pelas características específicas do solo. Desta forma, ao relacionar os processos hidrogeomorfológicos e a delimitação de APP torna-se possível abordar a questão das áreas saturadas como objeto de preservação ambiental em bacias hidrográficas a partir do processo de AVA e do conceito de AHS.

Para a construção do conceito de AHSs, parte-se então da premissa de que o escoamento superficial atua como um dos vetores primários do transporte de sedimentos e nutrientes do local de origem até os rios (McDOWELL *et al.*, 2004; HEATHWAITE *et al.*, 2005), destacando-se ainda que a poluição difusa via escoamento é um dos maiores contribuintes para o comprometimento ecológico dos rios (GORSEVSKI *et al.*, 2008).

O reconhecimento da conectividade hidrológica⁷ entre o transporte de sedimentos e poluentes via escoamento superficial e as AVAs é notadamente aceito como sendo uma maneira eficaz de assegurar a qualidade da água a partir da compreensão dos mecanismos de geração de escoamento superficial, vide o pioneiro trabalho Hewlett & Troendle (1975). Desde então, uma série de trabalhos publicados a partir de estudos de campo remetem a relação entre as

⁷ Considera-se aqui a conectividade hidrológica como a mediação feita pela água na transferência de matéria, energia e/ou organismos dentro ou entre elementos do ciclo hidrológico (PRINGLE, 2003).

AVAs e o transporte de sedimentos e poluentes (p.ex.: PIONKE *et al.*, 1996; GBUREK *et al.*, 2000; PIONKE *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2001; GBUREK *et al.*, 2002; HEATHWAITE *et al.*, 2005; OCAMPO *et al.*, 2006; SRINIVASAN & MCDOWELL, 2007). Evidenciam-se ainda as propostas de utilização das áreas saturadas como indicadores para a delimitação de *buffers* de preservação em bacias hidrográficas (QIU, 2003; AGNEW *et al.*, 2006; GORSEVSKI *et al.*, 2008; QIU, 2009; WALTER *et al.*, 2009). Nesta mesma linha de raciocínio, no Brasil destacam-se as abordagens relacionando a delimitação das AVAs com a zona ripária e APPs a partir de modelagem hidrológica (ZAKIA, 1998; ATTANASIO *et al.*, 2006; SANTOS, 2001; SIEFERT & SANTOS, 2010).

Qiu (2003) cita a possibilidade da preservação das AVAs no sentido de impedir a formação de fluxos concentrados de escoamento superficial alcançando rentabilidade e viabilidade econômica e ambiental da produção agrícola. E Creed *et al.*, (2008) destacam a importância das áreas saturadas como um indicador hidrológico para compreensão dos processos hidrológicos no que tange aos caminhos superficiais da água, reforçando a possibilidade de enquadramento quanto a APPs em uma bacia.

Estas afirmações são corroboradas pelas ações recentes de grandes empresas madeireiras que, com base nos resultados de monitoramento hidrológico em pequenas bacias incluem as áreas saturadas como parte de áreas de reserva legal por serem enquadradas como *áreas sensíveis* da bacia (IPEF, 2008, grifo nosso).

A essência do conceito de AHS é explicitamente hidrogeomorfológica uma vez que destaca a dependência intrínseca entre os processos hidrológicos, características pedológicas e geomorfológicas das paisagens locais para identificar a sensibilidade da bacia hidrográfica em relação à propensão de saturação do solo, conforme diagrama conceitual de localização das AHSs na paisagem na Figura 4.

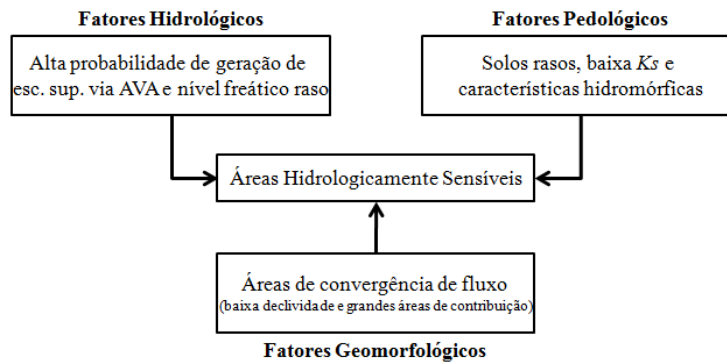


Figura 4 – Diagrama conceitual para localização de AHSs na paisagem.

A relação estabelecida entre o processo de AVA e o conceito de AHS é observada na Figura 5. Observa-se que a extensão da área em que ocorre o processo de AVA é superior a extensão das áreas definidas como AHS devido às diferentes probabilidades de saturação existentes ao longo da bacia hidrográfica. Considera-se então que as AHSs irão ocorrer onde o processo de saturação hídrica do solo é recorrente, ou seja, apresenta uma maior probabilidade de saturação decorrente dos mecanismos de geração de escoamento. Nota-se ainda pela Figura 5 que a extensão das áreas saturadas é variável ao longo da bacia de acordo com o déficit de armazenamento de umidade em um determinado período, caracterizando este estado dinâmico do processo de AVA.

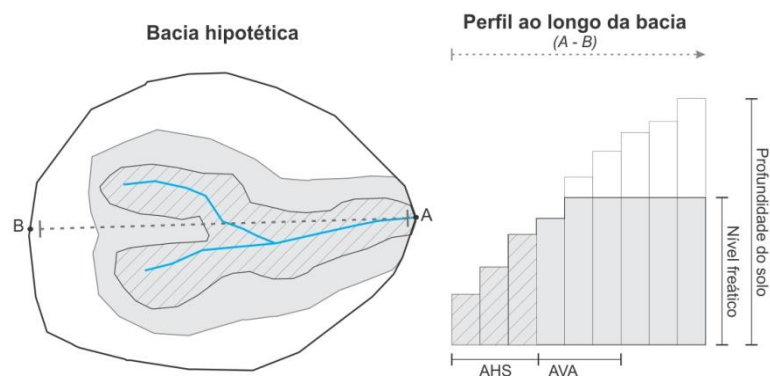


FIGURA 5 – Relação entre o processo de AVA e o conceito de AHS.

A teoria de AHSs também tem sido relacionada com a delimitação das áreas críticas de afluência para manejo do solo reduzindo o escoamento superficial oriundo de áreas agrícolas (JOHNES & HEATHWAITE, 1997;

HEATHWAITE *et al.*, 2000). Sendo assim, para Pionke *et al.* (2000), o reconhecimento das ACAs remete ainda a compreensão da dinâmica da paisagem e um alto potencial de transferência de nutrientes a partir de atividades agrícolas intensivas localizadas nas AHSs. Assim, tais áreas devem ser enquadradas em um plano de manejo distinto, restringindo a ocupação das áreas saturadas com atividades potencialmente poluidoras do solo e recursos hídricos.

Assim, definem-se ACAs como sendo as áreas da bacia hidrográfica com uma alta probabilidade de produzir escoamento superficial por saturação – AHSs onde existem altas concentrações de sedimentos e nutrientes devido a práticas agrícolas (LYON *et al.*, 2006; QIU, 2009), conforme Figura 6. Ademais, pelo potencial intrínseco de geração de escoamento das AHS aliado as ACAs devem ser evitadas na paisagem, reiterando a possibilidade de utilização das AHSs como suporte a delimitação de APPs.

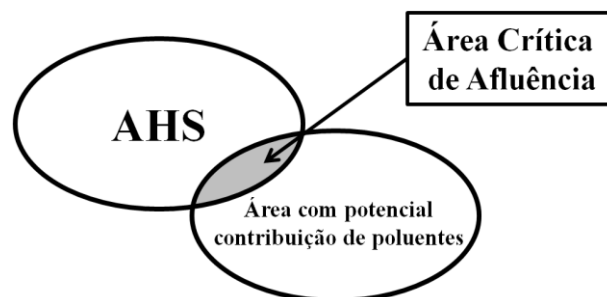


FIGURA 6 – Representação de uma área crítica de afluência.

FONTE: adaptado de Walter *et al.*, 2000.

Diversos estudos evidenciam a questão do manejo adequado nas áreas críticas de afluência evitando assim a contaminação dos rios e eutrofização de reservatórios devido à dispersão de fósforo (P) por meio de poluição difusa via escoamento superficial (p.ex.: GBUREK & SHARPLEY, 1998; WALTER *et al.*, 2001; GBUREK *et al.*, 2002).

Salienta-se ainda que o manejo da bacia hidrográfica realizado em consonância com as potencialidades e fragilidades hidrológicas e geomorfológicas da paisagem providenciará uma melhor orientação para manutenção da qualidade dos recursos hídricos. Desta forma, realizar o manejo do solo e recursos hídricos considerando as AHSs pode ser

fundamental para controlar a difusão de sedimentos e poluentes em direção a corpos de água adjacentes (GORSEVSKI *et al.*, 2008), evitando assim a eutrofização dos corpos de água causada pelo excesso de nitrato (NO_3) e fósforo (P) (PIONKE *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2001), estabelecendo áreas prioritárias para serem delimitadas como APPs.

Por fim, a delimitação de AHS e áreas críticas de afluência na paisagem e a adoção de práticas adequadas de manejo nestas áreas têm sido reconhecidas internacionalmente como uma maneira eficaz no controle da poluição difusa, alcançando resultados que corroboram uma melhoria na qualidade da água em bacias agrícolas (QIU, 2009).

Problemática da delimitação de AHSs: metodologias para a definição do limite de sensibilidade hidrológica das paisagens

Conforme exposto na seção anterior, as áreas com uma maior probabilidade de atingir o estado de saturação do solo e conseqüentemente produzirem escoamento serão consideradas como hidrológicamente sensíveis (WALTER *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2001, AGNEW *et al.*, 2006). Entretanto apesar da definição simples, a grande dificuldade em adoção da proposta no manejo de bacias hidrográficas e delimitação de APPs recai sobre qual a metodologia a ser adotada para o estabelecimento da probabilidade de saturação mínima que será utilizada como limiar para o enquadramento como AHSs.

Assim, para a classificação de uma área enquanto AHS deve-se atentar para o limite de sensibilidade hidrológica (L_{AHS}) da bacia hidrográfica (WALTER *et al.*, 2000). De uma maneira geral, o L_{AHS} irá corresponder ao índice ou atributo natural que será utilizado para a distinção das AHSs na paisagem.

Salienta-se ainda que a contração e expansão das AVAs irá depender da umidade inicial no perfil do solo, características topográficas e o volume precipitado (WALTER *et al.*, 2001). Para Gorsevski *et al.* (2008) o caráter dinâmico das AVAs faz com que o mapeamento das AHSs e a adoção de *buffers* de preservação restritivos englobando-as sejam extremamente complexos. Portanto, a grande dificuldade na relação entre AVAs e AHSs

consiste no estabelecimento limite da probabilidade de saturação que será utilizado para classificação de uma área como AHS. Sendo que, de acordo com Walter *et al.* (2000), o desafio de reconhecer as AHSs na paisagem reside na plena compreensão dos mecanismos de geração de escoamento superficial para buscar uma metodologia eficaz para delimitação do L_{AHS} .

Diversas metodologias já foram utilizadas no sentido de buscar a melhor abordagem para estabelecimento do L_{AHS} , podendo ser divididas em duas vertentes principais: (a) delimitação das AHSs a partir de características intrínsecas das bacias hidrográficas (WALTER *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2001, AGNEW *et al.*, 2006; GORSEVSKI *et al.*, 2008; QIU, 2009) e (b) pela avaliação das práticas de uso e manejo utilizado diretamente nas áreas geradoras de escoamento superficial por saturação, ou seja, delimitação das áreas críticas de afluência (GBUREK *et al.*, 2002; LYON *et al.*, 2006b; SRINIVASAN & MCDOWELL, 2007). Em virtude dos objetivos deste artigo, somente a vertente (a) será abordada.

Na proposta pioneira de delimitação das AHSs para duas bacias experimentais inseridas na bacia hidrográfica de Cannonsville - EUA, Walter *et al.* (2000) propõem a seguinte relação para indicar a sensibilidade hidrológica:

$$A_i = \text{AHS se } P(A_i = HS) \geq L_{AHS} \quad (1)$$

onde $P(A_i = HS)$ é a probabilidade de saturação limite de uma área para ser reconhecida como sendo hidrológicamente sensível ou não, sendo resultante da fração do número total de dias que uma determinada área A_i irá gerar escoamento superficial por saturação:

$$P_{sat} A_i = \frac{\sum n_{sat}}{\sum n_{tt}} \quad (2)$$

onde n_{sat} é o número de dias em que o pixel A_i permanece saturado, n_{tt} é a quantidade total de dias considerado no período simulado.

Assim, os autores destacam que uma das possibilidades de delimitação do L_{AHS} é determinar a probabilidade limite de geração de escoamento que sirva para equilibrar objetivos distintos de viabilidade agrícola e preservação de áreas sensíveis. Porém deve-se então buscar um valor ótimo para o parâmetro P da equação (2), uma vez que a relação entre o parâmetro P e a área considerada hidrologicamente sensível da bacia é inversamente proporcional (WALTER *et al.*, 2001). Por exemplo, para uma das bacias estudadas os autores afirmam que esta relação seria extremamente variável, sendo que em uma série de 10 anos, considerou-se de forma empírica um valor de $P=10\%$ ⁸, 37,2% da área total da bacia hidrográfica seriam consideradas hidrologicamente sensíveis, sendo esta fração da área responsável por 62,7% do escoamento total gerado na bacia. Entretanto, para um $P=80\%$, apenas 2,8% da área total da bacia seriam consideradas sensíveis, sendo esta área responsável por apenas 1,9% do total de escoamento gerado.

Desta forma, conclui-se que quanto menor o valor de P adotado, mais restritiva será a metodologia e maior será a porcentagem de área enquadrada como hidrologicamente sensível (WALTER *et al.*, 2001). A grande vantagem desta metodologia é o estabelecimento de um valor de P variável de acordo com as características de uso do solo de cada bacia hidrográfica.

A partir da formulação de um modelo empírico relacionando a produção total de escoamento, área da bacia produtora de escoamento, porcentagem de área a ser enquadrada como AHS, Walter *et al.* (2001) propõe um L_{AHS} igual a uma probabilidade de saturação mínima de 30%. Entretanto, conforme posição adotada pelos próprios autores, esta proposta de delimitação do L_{AHS} carece da utilização de atributos essencialmente físicos.

Neste sentido, destaca-se a proposta de Agnew *et al.* (2006) analisando a potencialidade do uso de uma versão modificada do índice topográfico⁹ com a inserção de atributos pedológicos na formulação e *buffers* de distâncias pré-estabelecidas da rede de drenagem para delimitação das AHS. Salienta-se que

⁸ Neste caso, um valor de $P=10\%$ indicará que o L_{AHS} adotado garante o enquadramento quanto à sensibilidade hidrológica da bacia as áreas que atingirem o estado de saturação do solo durante um período mínimo de 10% do tempo total simulado.

⁹ O índice topográfico é usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial, demonstrando os efeitos do relevo na localização e extensão das áreas de acumulação de água (MOORE *et al.*, 1993) mais propensas a atingirem o estado de saturação (SCHULER *et al.*, 2000)

a utilização da proximidade dos canais como indicador para delimitação de áreas saturadas para delimitação de áreas críticas de afluência havia sido observada em Gburek *et al.* (2002), expresso na relação entre densidade de drenagem e um índice empírico que indica as interações entre as fontes de sedimento e fatores de transporte em relação as práticas de manejo agrícola e a natureza da bacia hidrográfica.

De uma maneira geral, Agnew *et al.* (2006, p. 72) cita que “[...] o índice topográfico é um indicador da sensibilidade hidrológica mais consiste e confiável do que a proximidade dos canais”. Porém, destaca-se que a proximidade dos canais é um indicador mais simples de ser mensurado em campo, entretanto os resultados apresentados não garantem a sua utilização isolada como indicador do limite de sensibilidade hidrológica. Por fim, os autores concluem que existiria uma correlação consistente entre o índice topográfico e a probabilidade de saturação para delimitação do L_{AHS} em três bacias hidrográficas analisadas.

Este estudo desenvolvido por Agnew *et al.* (2006) permite a construção de um paralelo entre a preservação de áreas sensíveis da bacia e a proximidade dos canais para definição de *buffers* de preservação permanente a partir da distância dos canais, adotado pelo Código Florestal Brasileiro. Desta forma, pode-se afirmar que o Código Florestal Brasileiro visa à proteção das áreas ao longo do canal ao invés de restringir o uso em áreas mais propensas a atingir o estado de saturação, ou seja, diretamente nas AHS.

Em um estudo sobre a delimitação das AHSs na bacia hidrográfica do rio Barigui, PR, Siefert & Santos (2010) consideraram, conforme sugerido em Walter *et al.* (2001), uma probabilidade de saturação superior a 30%. Os autores demonstraram que com base neste critério, apenas 5% das áreas definidas como AHSs são espacialmente coincidentes as APPs com base no Código Florestal Brasileiro.

Em relação à adoção do índice topográfico como indicador quanto à sensibilidade hidrológica das paisagens observa-se a ausência de critérios na definição do valor limite para o enquadramento, mesmo sendo esta a forma mais prática de enquadramento de áreas quanto à sensibilidade hidrológica

(QIU, 2009). Por exemplo, Herron & Haisine (1998) indicam que a utilização de 20% da área total da bacia com os maiores valores de índice topográfico seriam suficientes para prevenir que uma porção considerável do volume de escoamento superficial atinja diretamente o canal. Para a bacia hidrográfica do rio Neshanic (EUA), Qiu (2009) optou pela escolha de um valor arbitrário de índice topográfico para a delimitação das AHS ($IT \geq 11$), classificando 13,7% da área total da bacia como AHS. Neste sentido, destaca-se a subjetividade inerente a adoção arbitrária de um valor limite de índice topográfico para enquadramento das AHS, sendo desta forma também inviável a adoção de um valor global para diferentes bacias hidrográficas. E ainda, considera-se que o índice topográfico representa a propensão de uma área atingir o estado de saturação mediante um volume de precipitação específico, assim não seria recomendada a sua adoção sem a utilização de um processo de modelagem hidrogeomorfológica das AVAs.

Destaca-se ainda a abordagem de Gorsevski *et al.* (2008) que utiliza a delimitação das AHS combinadas com a distância percorrida pelo escoamento superficial através da movimentação do fluxo em direção aos canais. Utilizou-se esta relação para determinar a probabilidade de uma área ser sensível associada com a distância dos canais, culminando no estabelecimento de um *buffer* apropriado para preservação da zona ripária considerando as condições de saturação do solo e produção de escoamento superficial. Assim, os autores criam 3 cenários com larguras de *buffers* distintas (50m, 100, e 200m) para relacionar com as AHSs mapeadas a partir de modelagem matemática da distribuição com a distância percorrida pelo escoamento superficial até o canal.

Como resultado demonstra-se que a produção de escoamento nas AHS é associada com uma maior probabilidade de estar próxima aos canais perenes, possuindo conseqüentemente uma menor distância a ser percorrida pelo escoamento superficial em direção aos canais (GORSEVSKI *et al.*, 2008). Isso faz com que a delimitação de APP com a utilização da proposta de AHS e da distância do escoamento superficial corresponda a uma área menor do que a delimitada a partir de distâncias fixas pré-definidas. Entretanto, os autores destacam a arbitrariedade na definição dos cenários indicados no trabalho.

Por fim, a título de constatação observa-se também que não existe consenso na busca de uma metodologia para enquadramento de uma área como sendo ACA. Diversas metodologias e índices tem sido testados com distintos resultados no sentido de identificar áreas propícias ao transporte de sedimentos e poluentes em direção aos canais perenes (p.ex. HEATHWAITE *et al.*, 2000; PIONKE *et al.*, 2000; GBUREK *et al.*, 2002; DAVIES *et al.*, 2006; LYON *et al.*, 2006a; SRINIVASAN & McDOWELL, 2007; McDOWELL & SRINIVASAN, 2009;)

Conclusão

Este trabalho apresentou inicialmente uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de geração de escoamento e a relação destes processos com os conceitos de áreas hidrologicamente sensíveis e áreas críticas de afluência. Através da revisão bibliográfica procurou-se demonstrar a potencialidade da utilização do conceito de AHS em um processo de delimitação de APPs. Desta forma, utiliza-se uma noção sistêmica da paisagem ao considerar os processos hidrológicos, pedológicos e características topográficas, expressos nos processos hidrogeomorfológicos de geração de escoamento superficial como esteio para reconhecimento de áreas necessárias a preservação.

Pesquisas relacionadas à temática das áreas saturadas enquanto AHS ainda são recentes para a realidade brasileira. Neste sentido, este trabalho buscou salientar a possibilidade de uma nova abordagem para o enquadramento de áreas de preservação permanente passíveis de serem utilizados em condições tropicais.

Conforme indicado na literatura, o índice topográfico surge como o indicador de base física mais difundido para delimitação das áreas saturadas e áreas hidrologicamente sensíveis. Entretanto, destaca-se a necessidade de um maior aprofundamento sobre a definição de critérios para sua utilização como indicador em conjunto com outros atributos da bacia hidrográfica para enquadramento de AHS.

Recomenda-se ainda, que sejam utilizadas mais informações sobre a dinâmica hidrogeomorfológica da bacia hidrográfica para construção de novas metodologias para delimitação dos *buffers* de preservação. Assim, considerando o processo de AVA, surge ainda a possibilidade de estabelecimento de *buffers* dinâmicos, baseados na propensão de atingir o estado de saturação do solo específica da bacia hidrográfica, assegurando uma representação de base física das áreas fontes de escoamento superficial por saturação. Existindo ainda a possibilidade de, em conjunto com o uso do solo da bacia, estabelecer um plano de manejo restritivo apenas nas AHS reconhecidas como áreas críticas de afluência.

Por fim, embora exista a possibilidade de utilização do conceito de AHS para delimitação de áreas de preservação observa-se uma falta de consenso geral na literatura consultada pela busca de um L_{AHS} viável de ser aplicado em distintas bacias. Os casos observados foram aplicados estritamente para uma única bacia ou bacias com as mesmas características fisiográficas considerando relações empíricas entre atributos físicos. Desta forma, recomenda-se que o L_{AHS} represente um atributo relativo à natureza da bacia hidrográfica e que sirva como um limiar quanto à sensibilidade hidrológica da própria bacia ou de outras com características distintas, servindo ainda como subsídio para delimitação de um valor ótimo do limite de probabilidade de saturação que englobe as AHS para a delimitação APPs.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Referências

AGNEW, L. J.; LYON S.; GERARD-MARCHANT P.; COLLINS V. B., LEMBO A. J.; STEENHUIS T. S.; WALTER, M. T. Identifying hydrologically sensitive areas: Bridging the gap between science and application. *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 78, p. 63-76, 2006.

AMBROISE, B. Variable 'active' versus 'contributing' areas or periods: a necessary distinction. *Hydrological Process*, v.18, p. 1149-1155, 2004.

ATTANASIO, C. M.; LIMA, W. P.; GANDOLFI, S.; ZAKIA, M. J. B. Método para a identificação da zona ripária: microbacia hidrográfica do Ribeirão São João (Mineiros do Tietê, SP). *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 71, p. 131-140, 2006.

BECKER, A. Runoff process in mountain headwater catchments: recent understanding and research challenges. In: Huber, et al (Ed.). *Global change and mountain regions*. Netherlands, p. 283-295, 2005.

BETSON, R.P. What is watershed runoff? *Journal of Geophysical Research*, v. 69, nº 8, p. 1541-1552, 1964.

BEVEN, K., GERMANN, P.. Macropores and Water Flow in Soils, *Water Resources Research*, Washington, v.18, nº.5, p.1311-1325, 1982.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v.24, p. 43-69, 1979.

BONNEL, M.. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal Of Hydrology*, v. 150, p.217-275, 1993.

BRASIL. Lei Federal nº 4771/65, de 15 de setembro de 1965, alterada pela Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Brasília, DF: Congresso Nacional, 2001.

BUTTLE, J. M.; CREED, I. F.; MOORE, R. D.. Progress in Canadian forest hydrology: 1999–2003. *Hydrological Process* v.19, p. 169–200, 2005.

BUTTLE, J. M.. Rethinking the donut: the case for hydrologically relevant buffer zones. *Hydrological Process*. V.16, p. 3093–3096, 2002

CAPPUS, P. Bassin experimental d'Alrance: etudes dès lois de l'écoulement. Application au calcul et a la prevision des debits. *La Houille Blanche*, v. A, p. 493-514, 1960.

CHORLEY, R. J. The hillslope hydrological cycle. In: Kirkby, M. J. (Ed.). *Hillslope Hydrology*. J. Wiley, p. 1-42, 1978.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W.. *Hidrología Aplicada*. Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá, Colombia. 583 p., 1994.

CREED, I. F.; SASS, G. Z.; WOLNIEWICZ, M. B.; DEVITO, K. J.. Incorporating hydrologic dynamics into buffer strip design on the sub-humid Boreal Plain of Alberta. *Forest Ecology and Management*, v. 256, p. 1984-1994, 2008.

DAVIES, P. J.; COX, J. W.; FLEMING, N. K.; DAUGHERTY, W. J.; NASH, D. M.; HUTSON, J. L.. Predicting runoff and phosphorus loads from variable source areas A terrain-based spatial modelling approach. *Journal of Spatial Hydrology*, v. 6, nº 2, p.82 - 104, 2006.

DICKINSON, W.T.; WHITELEY, H. Watershed areas contributing to runoff. In: IAHS Publ., v. 96, p. 12-26, 1970.

DUNNE, T.; BLACK, R. D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, v. 6, p. 1296-1311, 1970a.

DUNNE, T.; BLACK, R. D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, v. 6, p. 478-490, 1970b.

DUNNE, T.; MOORE, T. R.; TAYLOR, C. H. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 20, p. 305-327, 1975.

Dunne, T. Runoff production in humid areas. U.S. Department of Agriculture Publication, ARS-41-160, 108 p., 1970.

EASTON, Z. M.; WALTER, M. T.; STEENHUIS, T. S.. Combined monitoring and modeling indicates the most effective agricultural best management practices. *Journal of Environmental Quality*, v. 37, nº5, p. 1798–1809, 2008.

GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. N.. Hydrologic controls of phosphorus loss from upland agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*, v.27, nº 2, 267-277, 1998.

GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. N.; HEATHWAITE, L.; FOLMAR, G. J.. Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index. *Journal of Environmental Quality*, v.29, p. 130–144, 2000.

GBUREK, W.J.; DRUNGIL C.C.; SRINIVASAN M.S.; NEEDELMAN B.A.; WOODWARD D.E. Variable-source-area controls on phosphorus transport: Bridging the gap between research and design. *Journal of Soil Water Conservation*, v. 57, p. 534-543, 2002.

GOERL, R.F.; KOBAYAMA, M.; SANTOS, I.. Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. Laboratório de Hidrogeomorfologia/UFPR, 2011. (no prelo)

GORSEVSKI, P. V.; BOLL, J. GOMEZDEL CAMPO, E. BROOKS, E. S. Dynamic riparian buffer widths from potential non-point source pollution areas in forest watersheds. *Forest Ecology and Management*, v. 256, p. 664-673, 2008.

HEATHWAITE, L.; SHARPLEY, A.; GBUREK, W. J.. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. *Journal of Environmental Quality*, v.29, nº 1, p.158–166, 2000.

HEATHWAITE, A. L.; QUINN, P. F.; HEWETT, C. J. M.. Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology*, v.304, nº 10, p. 446-461, 2005.

HERRON, N. F.; HAIRSINE, P. B..A scheme for evaluating the effectiveness of riparian zones in reducing overland flow to streams. *Australian Journal of Soil Research*, v.36, nº 4, p.683–698, 1998.

HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *J. Geophys. Res.*, v. 68, nº 4, p.1081-1087, 1963.

HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. International Symposium of Forest Hydrology. Pergamon Press, Oxford. p. 275-290, 1967.

HEWLETT, J. D.; TROENDLE, C.A. Non-point and diffused water sources: a variable source area problem. In: Watershed management. Proceedings of a Symposium on Watershed Management, Utah State University, Logan, Utah, New York, NY, USA, and American Society of Civil Engineers. p. 21–45., 1975.

HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K. N. Elements of Physical Hydrology. J. Hopkins, p. 302, 1998.

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Am. Geophys. Un., 14, p.446-460, 1933.

HURSH, C. R.. Storm water and absorption. Trans. Atn. Geophys. Union, Part II, p. 301-302, 1936.

HURSH, C. R.; BRATER, E. F.. Separating hydrographs into surface and subsurface flow. Trans. Am. Geophys. Union, v. 22, p.863-871, 1944

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS (IPEF). International Paper implementa melhorias no manejo florestal com base nos resultados do monitoramento em microbacias. In.: IPEF Notícias, nº 194, p. 4-5, Setembro/Outubro 2008.

JOHNES, P.J., HEATHWAITE, L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments. Hydrological Processes, v. 11, nº 3, p. 269–286, 1997.

KIRKBY, M.J. Infiltration, throughflow and overland flow. In: CHORLEY R.J. Water, Earth and Man. Methuen, London, p.215-227, 1969.

KIRKBY, M. J. Hydrograph modelling strategies. In.: Process in Physical and Human Geography, Heinemann, Londres, p.69-90, 1975.

KIRKBY, M.. Hillslope Runoff Processes and Models. Journal of Hydrology, Amsterdam, v.100, p.315-339, 1988.

KOBIYAMA, M.. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. In.: KOBIYAMA, M.; SILVA, R.V.; CHECCHIA, T.; ALVES A.. Anais de I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias. Florianópolis: UFSC/PPGEA, 2003. 148p.

LEACH, H. R.; COOK, H. L.; HORTON, R. E. Storm-flow prediction. Trans. Am. Geophys. Un. v.14, p. 436-446, 1933.

LOAGUE, K.; HEPPNER, C. S.; EBEL, B. A.; VANDERKWAAK, J. E..The quixotic search for a comprehensive understanding of hydrologic response at the surface: Horton, Dunne, Dunton, and the role of concept-development simulation. Hydrological Process, v.24, p. 2499-2505, 2010.

LOWDERMILK, W. C.. Forests and streamflow: a discussion of the Hoyt-Troxell report. J. Forestry, v. 21, p. 296-307, 1934.

LU, H.; YIN, C.; WANG, W.; SHAN, B.. A comparative study of nutrient transfer via surface runoff from two small agricultural catchment in north China. *Environmental Geology*, v. 52, p. 1549-1558, 2007.

LYON, S. W.; MCHALE, M. R.; WALTER, M. T.; STEENHUIS, T. S.. The impact of runoff generation mechanisms on the location of critical source areas. *Journal of American Water Resources Association*. v. 42, p. 793–804, 2006a.

LYON, S. W.; LEMBO, A. J.; WALTER, M. T.; STEENHUIS, T. S.. Defining probability of saturation with indicator kriging on hard and soft data. *Adv. Water Resour.*, 292, 181–193, 2006b.

McDONNELL, J.J. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological Processes*, v. 17, p.1869–1875, 2003.

MCDOWELL, R. W.; BIGGS, B. J. F.; SHARPLEY, A.N.; NGUYEN, L.. Connecting phosphorus loss from agricultural landscape to surface water. *Chem. Biol.* v.20, nº 1, p. 1–40, 2004.

MCDOWELL, R. W.; SRINIVASAN, M.S.. Identifying critical source areas for water quality: 2. Validating the approach for phosphorus and sediment losses in grazed headwater catchments. *Journal of Hydrology*, v. 379, nº 15, p. 68-80, 2009.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M.. Escalas Hidrológicas II: Diversidade de processos na bacia vertente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, ABRH, v. 2, n. 1, p. 59-122, 1997.

MÉROT, P.. Les zones de sources surface variable et la question de leur localisation. *Hydro. continent.*, v.3, p. 105–115, 1988.

OCAMPO, C. J.; SIVAPALAN, M.; OLDHAM, C. Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchments: Implications for runoff generation and nitrate transport. *Journal of Hydrology*, v.331, nº 15, p. 643-658, 2006.

PIONKE, H. B.; GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. N.; SCHNABEL, R. R.. Flow and nutrient export patterns for and agricultural hill-land watershed. *Water Resources Research*, v.32, p. 1795–1804, 1996.

PIONKE, H. B.; GBUREK, W. J.; SHARPLEY, A. N.. Critical source area controls on water quality in an agricultural watershed located in the Chesapeake Basin. *Ecological Engineering*, v.14, nº 4, p. 325-335, 2000.

POLYAKOV, V.; FARES, A.; RYDER, M. H.. Precision riparian buffers for the control of nonpoint source pollutant loading into surface water: a review. *Environmental Rev.* v. 13, p. 129-144, 2005.

PRINGLE, C.. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, v. 17, p. 2685-2689, 2003.

QIU, Z. A VSA-based strategy for placing conservation buffers in agricultural watersheds. *Environmental Management*, v. 32, p.299–311, 2003.

QIU, Z. Assessing Critical Source Areas in Watersheds for Conservation Buffer Planning and Riparian Restoration. *Environmental Management*, v. 44, p. 968-980, 2009.

SANTOS, I. Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR. Curitiba: Curso de Pós-graduação em Agronomia, 2001. 93p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná.

SANTOS, I. Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, 2009. 167f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.

SCHULER, A.E.; MORAES, J.M.; MILDE, L.C.; GROppo, J.D.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; CALIJURI M.L. Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de meso escala localizada nas cabeceiras do Rio Corumbataí, São Paulo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre. v. 5, n. 2, p. 5-25, 2000.

SIDLE, R.C., ONDA, Y. Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological Process*, 18, 2004. p. 597–602.

SIEFERT, C. A. C., SANTOS, I.. Áreas Hidrologicamente Sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do Rio Barigui, PR. *Revista Ambiente & Água*, v. 5, nº 2, 2010

SKLASH, M.; FARVOLDEN, R.. The Role of Groundwater in Storm Runoff, *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.43, p. 45-65, 1979.

SRINIVASAN, M. S.; MCDOWELL, R. W.; Hydrological approaches to the delineation of critical-source areas of runoff. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, v. 50, p. 249-265, 2007.

TSUKAMOTO, Y. Storm discharge from an experimental watershed. *Journal of the Japanese Forestry Society*, v. 45, p. 186-190, 1963.

WAGENER, T.; SIVAPALAN, M. TROCH, P. A.; MCGLYNN, B. L.; HARMAN, C. J.; GUPTA, H. V.; KUMAR, P.; RAO, P. S. C.; BASU, N. B.; WILSON, J. S.. The future of hydrology: an evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, v. 46, W05301, p. 1-10, 2010.

WALTER, M. T.; WALTER M. F.; BROOKS E. S.; STEENHUIS T. S.; BOLL, J.; WEILER, K. R. Hydrologically Sensitive Areas: Variable Source Area Hydrology Implications for Water Quality Risk Assessment. *Journal of Soil Water Conservation*. v. 55, p. 277-284, 2000.

WALTER, M. T.; BROOKS, E. S.; WALTER, M. S.; STEENHUIS, T. S.; SCOTT, C. A.; BOLL, J. Evaluation of soluble phosphorus transport from manure-applied fields under various spreading strategies. *Journal of Soil Water Conservation*. v. 56, p.329-336, 2001.

WALTER, M. T.; ASCE, M.; ARCHBALD, J. A.; BUCHANAN, B.; DAHLKE, H.; EASTON, Z. M.; MARJERISON, R. D.; SHARMA, A. N.; SHAW, S. B.. New paradigm

for sizing riparian buffers to reduce risks of polluted storm water: practical synthesis. Journal of Irrigation and drainage Engineering, v. 135, nº 2, p. 200-210, 2009.

WARD, R.. On the Response to Precipitation of Headwater Streams in Humid Areas, Journal of Hydrology, Amsterdam, V.74, p.171-189, 1984.

WEYMAN, D. R.. Throughflow on Hillslopes and its relation to the stream hydrograph. Hydrological Sciences Journal, v. 15, nº 3,p. 25-33, 1970.

ZAKIA, M. J. B.. Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas. São Carlos: USP, 1998. 98 p. Tese (doutorado).

Recebido em 25/07/2011.

Aceito em 13/02/2012.