

**V SimpGEO - SIMPÓSIO PARANAENSE DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM  
GEOGRAFIA: Estado da Arte, tendências e desafios**

**ANÁLISE DA RELAÇÃO EMPÍRICA ENTRE MECANISMOS DE GERAÇÃO  
DE ESCOAMENTO E SENSIBILIDADE HIDROLÓGICA DAS PAISAGENS:  
UMA POSSIBILIDADE DE INTERVENÇÃO PONTUAL A PARTIR DAS  
ZONAS CRÍTICAS DE MANEJO**

Cesar Augusto Crovador Siefert / Irani dos Santos

Universidade Federal do Paraná / Programa de Pós-Graduação em Geografia

cesarsiefert@ufpr.br / irani@ufpr.br

**Resumo**

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão teórica introdutória sobre a relação entre mecanismos de geração de escoamento superficial e o conceito de área hidrologicamente sensível (AHS). Compreendem-se como AHS aquelas áreas da bacia hidrográfica que possuem uma maior probabilidade de atingirem o estado de saturação do solo. Busca-se, a partir da incorporação do conceito de AHS em estudos de cunho geográfico, mostrar a viabilidade de utilização de características hidrológicas da paisagem como forma de possibilitar uma intervenção pontual em zonas críticas de manejo, contribuindo para a manutenção e preservação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica.

**Palavras-chave:** áreas hidrologicamente sensíveis, zonas críticas de manejo, área variável de afluência.

**Abstract**

The present work aims to perform an introductory theoretical review about the relationship between mechanisms of runoff generation and the concept of hydrologically sensitive area (HSA). The HSA is considered as the area of the watershed with a higher probability of reaching a soil saturation condition. With the incorporation of the HSA in studies of geographical slant, seeks to show the feasibility of using hydrological features of the landscape as a way to providing a located intervention in critical areas of management, contributing to the maintenance and preservation of water resources in the watershed.

**Keywords:** hydrologically sensitive areas, critical management zone, variable source area.

(Dinâmica ambiental da paisagem)

## **Introdução**

A água é de importância fundamental para a existência de vida no planeta. É um elemento essencial aos seres humanos e constitui a base para a existência de um ecossistema aquático. Um dos grandes problemas da sociedade contemporânea é conter o ímpeto desenvolvimentista que degrada os recursos naturais. Isso pressupõe a busca constante de novas formas de utilização racional e o estabelecimento de diretrizes que venham consolidar uma gestão integrada e participativa dos recursos naturais. Prova disso é o aumento de pesquisas oriundas de diferentes áreas do conhecimento, visando consolidar novas metodologias e ferramentas que permitam assegurar a conservação de padrões mínimos de qualidade de água, novas técnicas agrícolas sem uso de poluentes que possam contaminar os corpos de água, entre outras.

Atualmente a preocupação com a conservação e manutenção de padrões de qualidade mínimo nos recursos hídricos ultrapassa as esferas de cada ciência, fazendo com que o tema seja tratado a partir de uma ótica multidisciplinar. A partir da necessidade de se preservar os recursos hídricos, desenvolvem-se meios para quantificar e delimitar possíveis áreas de risco que identificadas em um processo de planejamento ambiental devem receber um manejo diferenciado.

As diversas formas de interação da bacia hidrográfica e o ciclo hidrológico possibilitaram o surgimento de múltiplos conceitos explicando os processos e subprocessos decorrentes destas ações recíprocas. Sendo assim, surge a noção de área variável de afluência (AVA) (HEWLETT & HIBBERT, 1967), processo observado frequentemente em áreas onde o escoamento superficial por saturação é dominante, tratando o escoamento de retorno e a precipitação incidente nas áreas saturadas como elementos chaves na geração de escoamento. Considerando que as AVA's possuem uma clara importância na bacia hidrográfica referente à preservação e conservação ambiental e dos recursos hídricos, salienta-se também a possibilidade de comportarem uma micro-fauna e uma flora adaptada às variações das condições de saturação do solo nestas áreas. Desta maneira, surge a possibilidade de uma intervenção pontual, através de práticas de manejo restritivas a usos do solo diretamente nas AVA's que venham comprometer a qualidade dos recursos hídricos.

Neste contexto surge o conceito de área hidrologicamente sensível (AHS) (WALTER et al., 2000). Consideram-se as AHS's como determinadas áreas da bacia hidrográfica que apresentariam uma maior probabilidade de saturação do solo, servindo

como um aporte ao planejamento ambiental e a manutenção de padrões mínimos de qualidade e disponibilidade de água.

Este artigo tem como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica sobre a relação entre o processo de geração de escoamento superficial por saturação e a sensibilidade hidrológica das paisagens, expressa no conceito de AHS. Procura-se então, demonstrar a possibilidade de uma abordagem que vise delimitar e quantificar áreas de risco ambiental pautado na observância da dinâmica hidrológica da paisagem, considerando primordialmente a probabilidade de determinadas áreas da bacia hidrográfica em atingirem o estado de saturação do solo.

### **Mecanismos de geração de escoamento superficial e sensibilidade hidrológica**

A partir das constatações de Dunne & Black (1970) em um estudo sobre os mecanismos de geração de escoamento em uma pequena bacia hidrográfica, chegou-se a conclusão de que a teoria de escoamento superficial hortoniano (HORTON, 1933) não seria aplicável a bacias florestadas contidas em áreas úmidas e solos rasos, onde por consequência os solos exibem altos índices de permeabilidade. Aliado a esta característica, observa-se ainda condições topográficas específicas, onde o lençol freático se encontra próximo à superfície. Nestas áreas a probabilidade de ocorrer saturação do solo é elevada, pois com a infiltração da água no solo, a tendência é que se eleve o nível do lençol freático, fazendo com que o solo atinja o estado de saturação em todo o perfil, inibindo assim a continuidade da infiltração e gerando o processo conhecido como escoamento superficial por saturação.

Uma das características desse processo de escoamento é a sua variação espacial de acordo com as condições de umidade na bacia, fazendo com que as áreas saturadas possam expandir-se (em períodos chuvosos) e retrair-se (em períodos de estiagem), dando origem ao conceito de área variável de afluência (AVA). Este mecanismo foi descoberto a partir de distintas pesquisas em bacias experimentais, que ocorreram de forma independente e simultânea na França (CAPPUS, 1960), Japão (TSUKAMOTO, 1963) e Estados Unidos (HEWLETT & HIBBERT, 1967). 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 tempo (KIRKBY, 1969; DUNNE, 1970; DUNNE & BLACK, 1970; DUNNE et al., 1975).

De acordo com a teoria das AVA's, 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, configurando uma parcela de área da bacia variável entre 1% e 50% da área total (DICKINSON & WHITELEY, 1970), dependendo da quantidade e da intensidade de precipitação. Como forma de compreensão desse processo dinâmico, a Figura 1 mostra a variação das áreas saturadas em relação aos diferentes tempos do hidrograma.

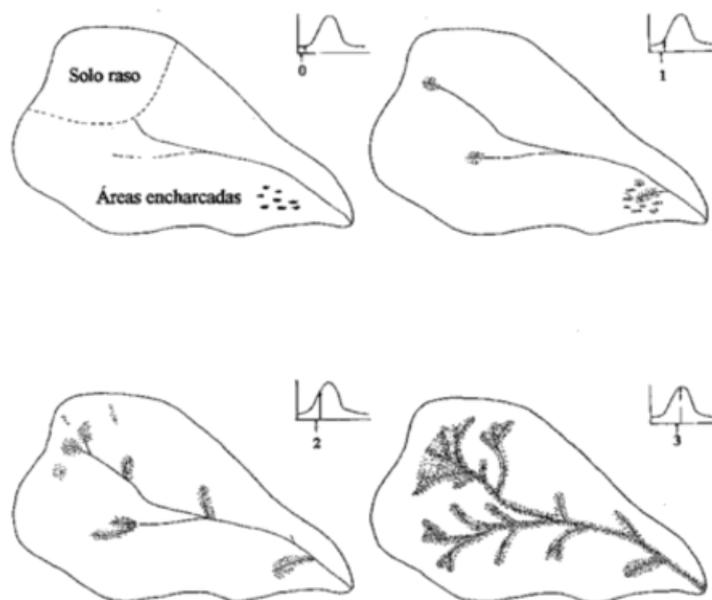


Figura 1 – Dinâmica das AVA's no processo de geração de escoamento.

Fonte: HEWLETT & NUTTER, 1970.

Em um evento de precipitação contínua, na maior parte da área da bacia hidrográfica irá ocorrer o processo de infiltração. Desta forma, ao analisar a contração e expansão das AVA's também se deve levar em conta a umidade já existente no solo, que junto da parcela de água proveniente da infiltração, formará os escoamentos subsuperficial e subterrâneo, alimentando os canais e cursos de água. Quando a taxa de escoamento subsuperficial exceder a transmissividade do solo, desencadeará o processo de elevação do nível do lençol freático, emergindo à superfície como escoamento de retorno, de importância direta nos processos de escoamento superficial por saturação, fazendo com que expandam as AVA's.

Attanasio et al (2006) indicam que as AVA's encontram-se situadas principalmente ao longo dos cursos de água e em suas cabeceiras, nas concavidades de terrenos para as quais convergem as linhas de fluxo e, em alguns casos específicos, em porções de áreas saturadas encontradas em pontos elevados de encostas. Sendo assim, pode-se dizer que o processo de expansão das AVA's 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), conforme observado na Figura 1.

Qiu (2003) enfatiza que a Hidrologia possui um papel importante no planejamento do uso, conservação e preservação da bacia hidrográfica ao sugerir que os padrões das AVA's em paisagens forneceriam uma base científica para definição e localização das áreas de conservação, com o objetivo de impedirem a formação de fluxos concentrados de escoamento, alcançando rentabilidade e viabilidade econômica e ambiental. Lu et al (2007) cita que a degradação do solo e dos recursos hídricos devido a práticas agrícolas inadequadas tornou-se uma questão ambiental de preocupação internacional, salientando ainda que, os mecanismos de geração de escoamento superficial são os vetores primários de transporte de possíveis poluentes em direção aos corpos de água. Estas afirmações são corroboradas pelas ações recentes de grandes empresas madeireiras que, com base nos resultados de monitoramento hidrológico em pequenas bacias, optaram pela inclusão de áreas saturadas como parte de áreas de reserva legal por serem enquadradas como *áreas sensíveis* da bacia (IPEF, 2008, grifo nosso).

Considera-se então, que o conceito de AVA está ligado às características físicas da paisagem, enquanto o conceito de AHS (WALTER et al., 2000) trata de uma forma de avaliação e prevenção de impactos na qualidade da água a partir dos riscos de contaminação dos corpos de água, considerando a probabilidade de geração de escoamento em uma determinada área de uma bacia hidrográfica (AGNEW et al., 2006).

Desta forma, a importância da compreensão das AHS's é evidente ao tratarmos da gestão dos recursos hídricos, pois estas áreas surgem como um elemento de ligação entre as vertentes e os corpos de água, propiciando o rápido transporte de poluentes através dos processos de escoamento (WALTER et al., 2000).

Destaca-se ainda que, com a delimitação das AHS's em uma bacia hidrográfica surge a possibilidade de uma intervenção pontual nestas áreas de risco, servindo também como uma maneira de prever possíveis desastres ambientais. Assim a noção de AHS's está intimamente relacionada ao uso do solo nas áreas variáveis de afluência de uma bacia hidrográfica, servindo de subsídio ao planejamento ambiental. A Figura 2 mostra a relação entre as AVA's e a delimitação espacial das AHS's em uma bacia hipotética.

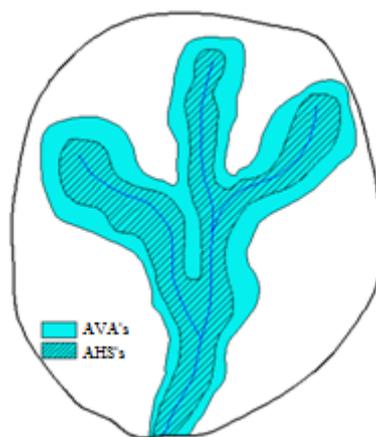


FIGURA 2 – Relação entre AVA's e AHS's.

O conceito de AHS's aliado à noção de AVA's tem implicações diretas na conservação dos recursos hídricos, contribuindo para uma gestão sustentável e diminuindo riscos de contaminação dos corpos de água por poluição difusa provenientes, principalmente, de práticas agrícolas e/ou de pecuária inadequadas.

Em bacias hidrográficas onde o processo de AVA é o processo dominante na geração de escoamento, as áreas com uma maior probabilidade de permanecer saturadas e conseqüentemente gerar escoamento são consideradas como sendo AHS's. Neste caso, observa-se o limite de sensibilidade hidrológica ( $L_{AHS}$ ) ao longo da bacia hidrográfica, analisada a partir da probabilidade de saturação ( $P_{sat}$ ), para delimitação espacial das AHS's.

Desta forma, as AHS's são definidas a partir da estimativa da probabilidade de geração de escoamento superficial por saturação, ou seja, a probabilidade de esta área atingir o estado de saturação durante um evento de precipitação (SIEFERT & SANTOS, 2010). Para expressar esse conceito, AHS's são quaisquer áreas ( $A$ ) onde a probabilidade ( $P$ ) de serem consideradas sensíveis é maior que o limite de sensibilidade hidrológica ( $L_{AHS}$ ), conforme definido por Walter et al., (2000), expresso na relação:

$$A^1 = \text{AHS's se } P(A^1 = \text{sensível}) > (L_{AHS}) \quad (1)$$

Devido à alta capacidade de geração de escoamento, aliado a uma potencial e inerente característica de transporte, os sedimentos e poluentes incidentes nestas áreas tenderão a escoar diretamente aos corpos de água, estabelecendo zonas críticas de manejo (Figura 3), o que demonstra a necessidade de mapeamento e preservação dessas áreas.

Considera-se uma AHS da bacia hidrográfica como sendo uma zona crítica de manejo quando as práticas de uso do solo diretamente nas AHS's possam vir a degradar a qualidade dos corpos de água a partir da emissão de poluentes nestas áreas de risco. Ou seja, são consideradas zonas críticas de manejo as AHS's da bacia que apresentem uso do solo inadequado a dinâmica natural destes ambientes. Assim, a utilização da noção de zonas críticas de manejo na gestão de bacias hidrográficas surge como uma forma de prever possíveis impactos negativos na qualidade dos recursos hídricos.

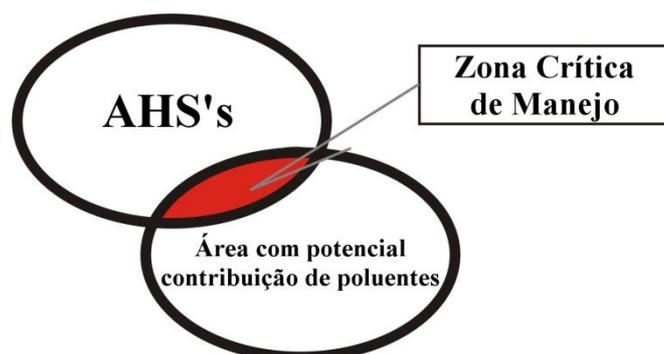


FIGURA 3 – Representação das AHS's em relação a áreas potenciais de contribuição poluentes.

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

A delimitação de zonas críticas de manejo na paisagem e a adoção de práticas adequadas de manejo têm sido reconhecidas como uma maneira eficaz no controle da poluição difusa, alcançando resultados que corroboram uma melhora na qualidade da água em bacias agrícolas (QIU, 2009). Salienta-se ainda que, o manejo da bacia hidrográfica realizado em consonância com as potencialidades e fragilidades hidrológicas da paisagem, providenciará uma melhor orientação para melhorar a qualidade dos recursos hídricos (GORSEVSKI *et al.*, 2008). Desta forma, realizar o manejo do solo e recursos hídricos considerando a dinâmica espacial e temporal das AHS, especificamente em áreas da bacia hidrográfica onde se observa a produção de sedimentos causados pelas atividades de uso do solo, 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 ( $\text{NO}_3$ ) e fósforo (P) (PIONKE *et al.*, 2000; WALTER *et al.*, 2001).

Em trabalhos recentes, os conceitos de AHS's e zonas críticas de manejo foram adotados com o objetivo de orientar práticas agrícolas e de pecuária no sentido de diminuir substancialmente o nível de contaminação dos corpos de água por poluição difusa causada pelo manejo inadequado de fertilizantes (WALTER *et al.*, 2000;

WALTER et al., 2001; GBUREK et al., 2002; AGNEW et al., 2006, SRINIVASAN & MCDOWELL, 2007) ou ainda, com o objetivo de estabelecer um panorama quanto a situação das áreas de preservação e as AHS's (GORSEVSKI et al., 2008; SIEFERT & SANTOS, 2010), conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplos da utilização dos conceitos de AHS's e zonas críticas de manejo.

Localização	Área (km <sup>2</sup> )	Uso do Solo	Descrição	Referências
2 Sub-bacias - Catskill Mountains, New York – EUA.	40,1 e 93,8	Destinado a criação de gado leiteiro.	Determinar Limite de sensibilidade hidrológica, $P_{sat} > 30\%$ .	Walter et al. (2000)
Arredores de Catskill Mountains, New York – EUA	1,43	Destinado a criação de gado leiteiro.	Teste de cenário, considerando a época do ano para determinar a relação $P_{sat}$ e AHS's	Walter et al. (2001)
Bacia piloto FD-36, Pennsylvania - EUA	0,395	Misto (pastagens, milho, soja, feijão e florestas).	Metodologia que inclui o “índice de fósforo” ao conceito de AVA's, com o objetivo de determinar zonas críticas de manejo.	Gburek et al. (2002)
3 bacias piloto, New York – EUA.	1,6 a 37	Pastagens e florestas.	Teste comparativo da variação das AHS's a partir do valor de $P_{sat} > 5\%$ , obtidas por dois parâmetros distintos.	Agnew et al. (2006)
2 bacias hidrográficas: do rio Glenomar e do rio Silverstream	Glen.:3,3 Silv.: 81,3	Glen.: agricultura e mata nativa Silv.: mata nativa e uso urbano	Teste de cenários comparativos com 5 abordagens hidrológicas para determinar zonas produtoras de escoamento	Srinivasan & McDowell (2007)
Bacia hidrográfica de Pete King, Idaho - EUA	72	Florestas	Proposta de <i>buffers</i> de conservação dinâmicos, a partir do conceito de AHS's e zonas prioritárias de manejo	Gorsevski et al. (2008)
Bacia Hidrográfica do Rio Barigui, PR, Brasil.	58,5	Misto (florestas, pastagens e urbano)	Delimitação das AHS's a partir de modelagem hidrológica e comparativo com a Lei 6.774/65	Siefert & Santos (2010)

Estas considerações a respeito do processo de geração de escoamento superficial por saturação e sensibilidade hidrológica das paisagens consideram o relevo como um agente fundamental no controle do escoamento superficial em bacias hidrográficas e

vem permitindo a difusão da aplicação de modelos hidrológicos que possam simular o processo de AVA e, por consequência estabelecer as AHS e zonas críticas de manejo.

O TOPMODEL (BEVEN & KIRKBY, 1979), um dos modelos hidrológicos mais difundidos entre os que possuem esta característica (SANTOS, 2009), surge como um modelo de simulação do processo precipitação-vazão que vem sendo utilizado em recentes trabalhos envolvendo modelagem em bacias hidrográficas devidamente monitoradas. Destaca-se ainda o grande potencial de utilização do TOPMODEL para simulação das AHS's em bacias de média-escala com clima úmido e relevo suavemente ondulado, onde o processo de AVA é dominante na geração de escoamento (SIEFERT & SANTOS, 2010).

### **Conclusões preliminares**

Com base no exposto, torna-se evidente que a incorporação do conhecimento da relação entre processos hidrológicos e a sensibilidade das paisagens em um processo de manejo do solo, que venha integrar uso, preservação e conservação dos recursos hídricos, ainda é um bastante incipiente.

A noção de AHS's demonstra uma grande aplicabilidade no gerenciamento de bacias hidrográficas frente à demanda por água em quantidade e qualidade adequadas ao consumo, que faz com que a preservação dos recursos hídricos seja fundamental à sociedade contemporânea. Salienta-se ainda que a incorporação do conceito de AHS em futuros estudos surge como uma possibilidade de realização de uma abordagem integradora de noções clássicas de Hidrologia e premissas da Geografia e análise ambiental.

### **Agradecimentos**

O primeiro autor, Cesar Augusto Crovador Siefert, agradece a CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

### **Referências Bibliográficas**

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.

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.

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.

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.

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

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, 1970.

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

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.

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.

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.

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, Vol. 14, p. 446-460, 1933.

IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais). 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.

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

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

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, p. 325-335, 2000.

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

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

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**, 2009. 146 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SIEFERT, C. A. C. & SANTOS, I. Áreas Hidrologicamente Sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui-PR. **Revista Ambiente & Água**, 2010. (no prelo)  
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.

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.; 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.