

Um Indicador de Degradação de Bacias Hidrográficas obtido a partir de Modelos Digitais do Terreno e Dados Orbitais em Ambiente de Geoprocessamento

MARCOS CESAR FERREIRA¹

EDMAR MORETI²

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista

Caixa Postal 178, 13.501-900, Rio Claro - SP, Brasil

marcoscf@caviar.igce.unesp.br

²IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente dos Recursos Naturais Renováveis

Centro de Sensoriamento Remoto - CSR

70818-900 - Brasília - DF

Abstract. The aim of this paper is to present a methodology for drainage basins environmental analysis based on digital terrain model and image processing techniques, using the Idrisi for Windows 2.0 GIS. The purpose uses morphometric data generated from DTM, vegetation index and urban area rate. These parameters are integrated in GIS to obtain an index for differentiate the drainage basins in relation to the water quality.

Introdução

O crescimento populacional verificado nas grandes metrópoles latino-americanas como Cidade do México, Buenos Aires, Rio de Janeiro e São Paulo, resultam principalmente das constantes migrações ocorridas a partir dos anos 50. Este quadro tem aumentado a conversão de áreas naturais e terras agrícolas em áreas de expansão urbana nas periferias destas e de outras grandes cidades. Nestas fronteiras do espaço urbano metropolitano ocorrem os maiores graus de deterioração dos recursos hídricos, principalmente junto à áreas de mananciais.

Diferentes ações de pesquisa têm sido e estão sendo implementadas com o objetivo de diagnosticar os padrões e a intensidade do uso do solo e prognosticar possíveis alterações degenerativas em bacias hidrográficas localizadas em áreas de expansão urbana. Devido à complexidade deste tipo de avaliação, são necessárias ações de pesquisa que associem diferentes

procedimentos metodológicos e resultem em indicadores espaciais do grau de instabilidade ou resistência de bacias hidrográficas ao processo de urbanização.

Neste sentido, propomos aqui um indicador para a avaliação da degradação de bacias hidrográficas situadas em periferias de áreas metropolitanas, baseado no uso de dados digitais de imagens orbitais e dados altimétricos organizados em modelos digitais de terreno, integrados no sistemas de informação geográfica Idrisi for Windows (Eastman, 1995).

Para a avaliação e teste da metodologia proposta, utilizou-se como fonte de dados espaciais as sub-bacias hidrográficas formadoras da represa de Guarapiranga, situada na Grande São Paulo, que se configura em um exemplo de área sob forte pressão antrópica devido à expansão urbana através de loteamentos irregulares.

Revisão da Literatura

O uso de modelos digitais de terreno e sistemas de informação geográfica em hidrologia de bacias tem se intensificado a partir dos anos 80. Algumas aplicações têm sido desenvolvidas e adaptadas a modelos hidrológicos e utilizadas para estimativa de vazão fluvial. Os resultados tem sido favoráveis ao desenvolvimento de novas pesquisas nesta área.

Jensen & Domingue (1988) apresentaram um método para o levantamento de atributos topográficos de uso hidrológico a partir de modelos digitais de elevação. O método foi aplicado para delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas, conexão entre bacias, mapeamento automático da rede de drenagem e do caminho do escoamento superficial. O programa foi testado em vários estudos hidrológicos, com DTMs construídos a partir de cartas nas escalas 1:250.000 e 1:24.000 e conclui-se que o procedimento desenvolvido apresentou até 97 % de confiabilidade se comparado aos métodos convencionais de análise topográfica para hidrologia.

Band (1989) desenvolveu um sistema de informação de bacias hidrográficas organizado a partir de dados digitais de elevação do terreno. A partir de DTMs, o autor conseguiu extrair a rede de drenagem, as sub-bacias e dividir as vertentes que drenam para o canal principal da bacia e mapear o caminho do escoamento através da conexão entre bacias. Para atingir estes objetivos o autor construiu DTMs com 30 metros de resolução no terreno para bacias-teste nos EUA e os testou em interface com modelos de escoamento fluvial. Os resultados mostraram a possibilidade de se gerar curvas hidrógrafas unitárias a partir de DTMs.

Howard (1990) estudou com detalhe o papel da hipsometria na resposta hidrológica de bacias hidrográficas, analisando os efeitos da morfometria no valor máximo de cheia e no tempo necessário para se atingi-lo. Entre as inúmeras conclusões a que chegou o autor, destaca-se o fato de que o perfil longitudinal das bacias de drenagem desempenham um importante papel no controle das cheias. A este parâmetro estão relacionados a declividade, a amplitude do relevo e a concavidade da bacia.

Drayton et al. (1992) desenvolveram um modelo do tipo chuva/vazão fluvial baseado em matrizes retangulares de dados altimétricos com resolução de 50 metros. A partir desta estrutura os autores utilizaram dados de solos e cobertura vegetal associados a DTM para estimar o escoamento de bacias hidrográficas em ambiente SIG. Com o objetivo de simular o caminho e a velocidade da água na superfície, os autores calcularam a declividade e a direção da declividade para cada célula da grade utilizando o DTM, e posteriormente testaram este método para estimar parâmetros hidrológicos de pequenas bacias. Romanowicz et al. (1993) afirmam que alguns modelos de resposta hidrológica de bacias, como o Topmodel (Beven & Wood, 1983) utilizam dados topográficos derivados de DTMs para a estimativa de vazão fluvial.

Hoog et al. (1993) utilizaram DTMs para estudar a distribuição espacial do gradiente da superfície de bacias e desenvolver um método para o mapeamento digital de sub-bacias hidrográficas e da rede de drenagem, para posterior modelagem hidrológica dos processos de superfície em escalas espaço-temporais. Aplicando o procedimento a DTMs de 50 metros de resolução, os autores obtiveram através de análise digital, importantes fatores hidrológicos, como: densidade e gradiente de rios, declividade da superfície, frequência de canais de drenagem e hierarquia fluvial. Os autores concluíram que a análise de DTMs apresenta um amplo leque de possibilidades de uso em hidrologia, facilitando também a associação com dados espaciais disponíveis em sistemas de informação geográfica.

Estudos têm demonstrado que um grande número de variáveis ambientais interferem no comportamento temporal e espacial das vazões fluviais ao nível de bacias hidrográficas.. A preocupação em se conhecer o grau de dependência entre as vazões fluviais e as características físico-geográficas das respectivas bacias não é recente. Morisawa (1962) e Patton & Baker (1976) já estudaram detalhadamente o papel da morfometria intensidade das cheias, determinando o grau de correlação entre parâmetros morfométricos e valores de escoamento fluvial de pequenas bacias

hidrográficas. Estudos realizados por Ferreira (1997) demonstraram que é possível se estimar vazões fluviais de bacias hidrográficas através de parâmetros obtidos de DTMs.

A avaliação quantitativa da densidade de cobertura vegetal tem sido utilizada em vários modelos hidrológicos, com o intuito de se estimar a capacidade de retenção do escoamento superficial durante as chuvas. Uma das maneiras de se estimar espacialmente a densidade de biomassa em uma bacia hidrográfica é através da transformação linear entre duas ou mais bandas espectrais, denominada genericamente de Índice de Vegetação (IV).

A definição deste índice já é bem conhecida na literatura de sensoriamento remoto, e foi originalmente proposta por Rouse et al. (1973), sendo expressa pela seguinte relação:

$$IV = (TM4 - TM3/TM4 + TM3) \quad (1)$$

onde TM4 e TM3 são os valores de nível de cinza das bandas 3 e 4 do sensor TM Landsat, sendo esta relação conhecida como diferença normalizada.

Outras formas de cálculo do IV foram apresentadas por Huete et al. (1985) e Richardson & Wiegand (1977). No entanto o procedimento mais adequado e utilizado em processamento digital de imagens é a diferença normalizada. Os valores de IV são empregados na estimativa de parâmetros relativos a cobertura vegetal, tais como área foliar, fitomassa, taxa de cobertura do terreno, entre outros (Epiphanyo e Formaggio, 1990).

Material e Métodos

Analisada do ponto de vista global, a metodologia adotada constitui-se das seguintes etapas, distintas e interligadas: o processamento e classificação digital da imagem TM-Landsat (órbita 219, ponto 77, de 13/05/96) utilizado no cálculo do índice de vegetação e no mapeamento das áreas urbanas; o mapeamento e a caracterização morfométrica das sub-bacias hidrográficas e por fim, a análise integrada destas etapas para o cálculo do *Índice de Degradação Hídrica* das bacias hidrográficas. O desenvolvimento das etapas de pesquisa foi conduzido utilizando-se o sistema de informação geográfica Idrisi for Windows versão 2.0.

Na fase de processamento digital, as imagens originais foram inicialmente corrigidas quanto à sua distorção geométrica e às influências atmosféricas. Em seguida, com o sentido de

realçar a diferenciação cromática entre os padrões existentes nas imagens, adotou-se procedimento estatístico voltado à seleção das principais componentes das imagens multiespectrais.

Concluído este processamento preliminar, definiu-se uma legenda dos tipos de uso do solo a serem mapeados, levando-se em consideração as suas relações com os elementos hidrológicos da bacia. Entre as técnicas de agrupamento de categorias de uso do solo para fins hidrológicos, utilizou-se a proposta de Trolier & Philipson (1986). Adaptou-se esta proposta, definindo-se as seguintes classes hidrológicas de ocupação do terreno existentes na bacia da Guarapiranga: *áreas densamente urbanizadas, áreas de expansão urbana, campos antrópicos, solos expostos, matas em estágio intermediário e avançado de regeneração, matas em estágio inicial de regeneração, matas densas e silvicultura.*

O mapeamento do uso do solo foi efetuado com base na associação estatística entre os parâmetros espectrais dos pixels das amostras e os valores de nível de cinza dos demais pixels ainda não classificados nas imagens (classificação por máxima verossimilhança). Após obtidos os valores de área das diferentes classes de uso do solo, foi calculado o *coeficiente de urbanização* (K_u) definido pela relação:

$$K_u = (A_{du} + A_{eu})/A_b \quad (2)$$

onde: A_{du} é a área correspondente à classe *áreas densamente urbanizadas*

A_{eu} é a área correspondente à classe *áreas de expansão urbana*

A_b é a área da sub-bacia hidrográfica.

Posteriormente foram calculados os valores do índice médio de vegetação (IV_m) para cada bacia hidrográfica, a partir de uma operação de Query entre o layer das sub-bacias hidrográficas e a imagem obtida pela transformação linear entre as bandas TM4 e TM3, realizada pelo método da diferença normalizada.

O mapeamento das sub-bacias foi realizado com base em cartas topográficas na escala 1:50.000. Foram delimitadas no material cartográfico as sub-bacias mais representativas que formam o sistema de drenagem da represa de Guarapiranga, com área superior à 100 hectares, identificando-as através números inteiros, uma vez que algumas delas não possuem toponímia conhecida.

No sentido de qualificar e quantificar as sub-bacias segundo parâmetros hidrológicos, utilizou-se alguns índices morfométricos normalmente adotados para o diagnóstico de potencial de ocorrência de enchentes, entre os quais a *densidade de canais de primeira ordem* (D), a *taxa de relevo* (R) e o *índice de circularidade* (C) das sub-bacias. Os valores de R foram obtidos através da análise estatística do modelo digital de terreno gerado para a área de estudo. Com base neste índices, as sub-bacias foram quantificadas e ordenadas segundo o potencial de escoamento das águas das chuvas, descrito pelo *índice de escoamento fluvial* (E_f):

$$E_f = D.R.C \quad (3)$$

Quanto maior o valor de E_f , maior tende a ser a proporção de água escoada por unidade de área da bacia hidrográfica.

Os dados provenientes do mapeamento do uso do solo foram comparados com o domínio espacial das sub-bacias e sua conjuntura hidrológica, extraindo-se um indicador que nos permitiu discriminar em termos geográficos diferentes conjuntos de degradação dos recursos hídricos de superfície. O *índice de degradação hídrica* (D_h) foi obtido a partir da integração entre os seguintes parâmetros correspondentes às bacias hidrográficas: *coeficiente de urbanização* (K_u) *índice médio de vegetação* (IV_m) e *índice de escoamento fluvial* (E), através da seguinte relação:

$$D_h = E (K_u / IV_m) \quad (4)$$

Nesta relação, o parâmetro E se comporta como uma constante que depende das características morfométricas e hidrológicas da bacia e o parâmetro K_u / IV_m como um indicador da intensidade de pressão antrópica na bacia considerada, uma vez que relaciona a taxa de urbanização às áreas verdes presentes na bacia.

Resultados

A Figura 1 apresenta a área-teste correspondente às 26 bacias hidrográficas formadoras da represa de Guarapiranga. As sub-bacias hidrográficas foram analisadas do ponto de vista

hidrológico de superfície, com o objetivo de se obter um indicador capaz de hierarquizar-las quanto ao seu potencial natural de escoamento fluvial associado à intensidade urbanização.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos valores dos parâmetros K_u e IV_m , respectivamente índice médio de vegetação e coeficiente de urbanização, bem como os valores finais do índice de degradação hídrica (D_h) para as 26 sub-bacias hidrográficas analisadas. A espacialização dos valores de D_h na forma de mapa coroplético é apresentada na Figuras 2.

SUB-BACIAS	ÁREA (ha)	E	Ku	IVm	Dh
1	15375.36	0.03	17.33	125.69	0.47
2	1534.52	0.30	42.91	74.61	17.04
3	333.15	0.43	59.34	55.08	45.81
4	380.41	0.55	87.77	37.95	126.48
5	716.24	0.24	87.62	31.67	65.76
6	585.77	0.41	96.64	23.28	171.78
7	317.10	0.72	92.34	27.92	239.55
8	335.13	0.65	64.45	46.92	89.49
9	192.31	0.65	81.28	43.43	121.99
10	849.64	0.73	10.56	130.17	5.90
11	2841.98	0.10	4.92	151.14	0.32
12	531.96	0.61	47.26	81.07	35.46
13	210.20	0.91	40.96	75.62	49.35
14	280.91	1.29	21.57	101.87	27.42
15	166.66	1.44	8.64	100.27	12.37
16	1195.69	0.24	9.56	135.01	1.71
17	261.61	1.15	5.85	123.37	5.47
18	4099.72	0.10	22.06	97.21	2.17
19	1235.25	0.28	6.10	124.38	1.39
20	871.79	0.38	4.81	143.48	1.27
21	2263.37	0.21	9.53	134.13	1.51
22	510.52	0.53	7.58	134.47	2.97
23	886.57	0.48	13.98	132.03	5.07
24	2262.22	0.26	3.79	166.26	0.60
25	7795.64	0.04	6.28	164.29	0.17
26	12071.68	0.01	7.17	147.96	0.06

Tabela 1 - Valores dos parâmetros K_u e IV_m e D_h para as 26 sub-bacias analisadas.

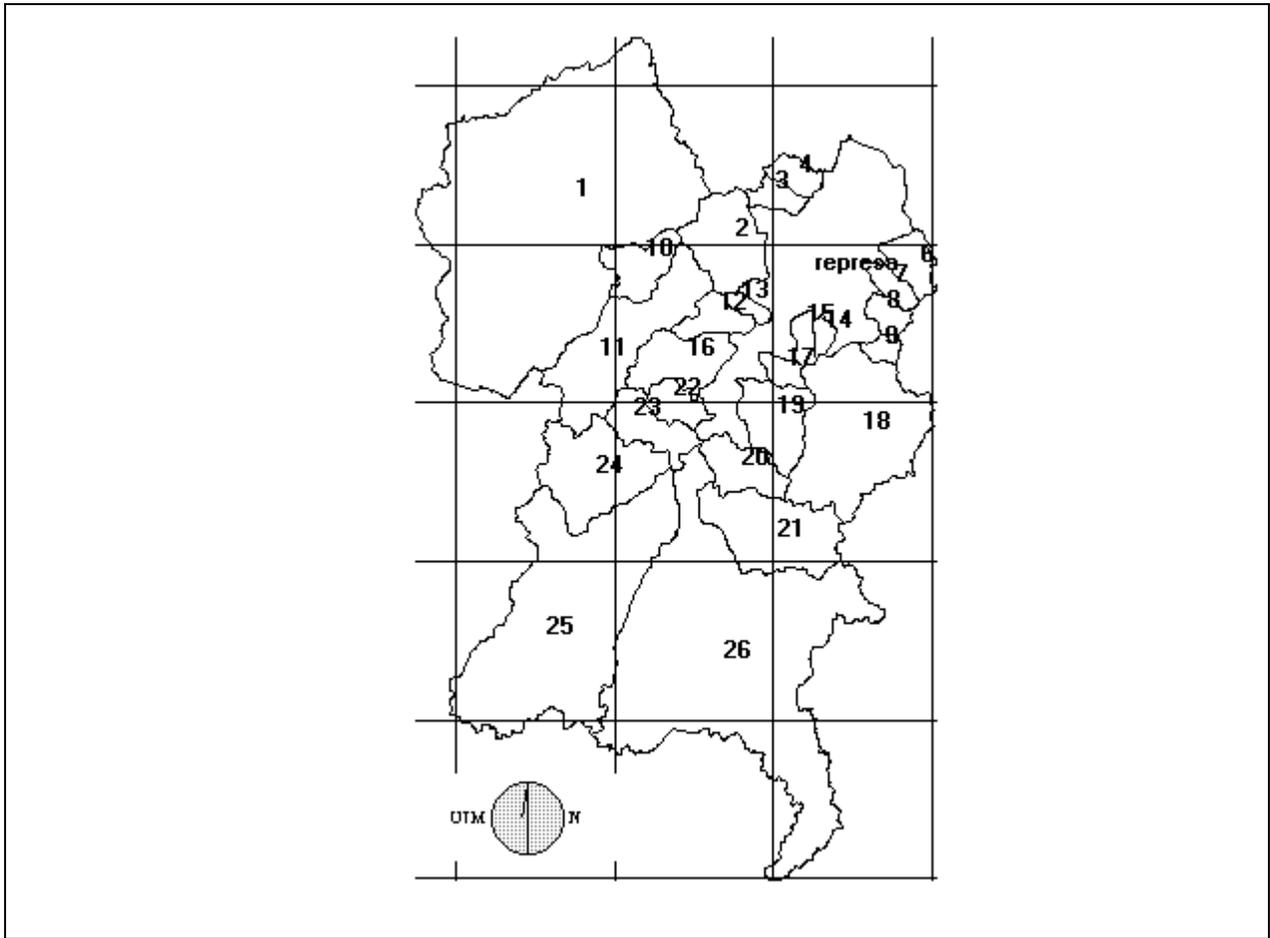


Figura 1 - Mapa das sub-bacias hidrográficas da área-teste (s/escala)

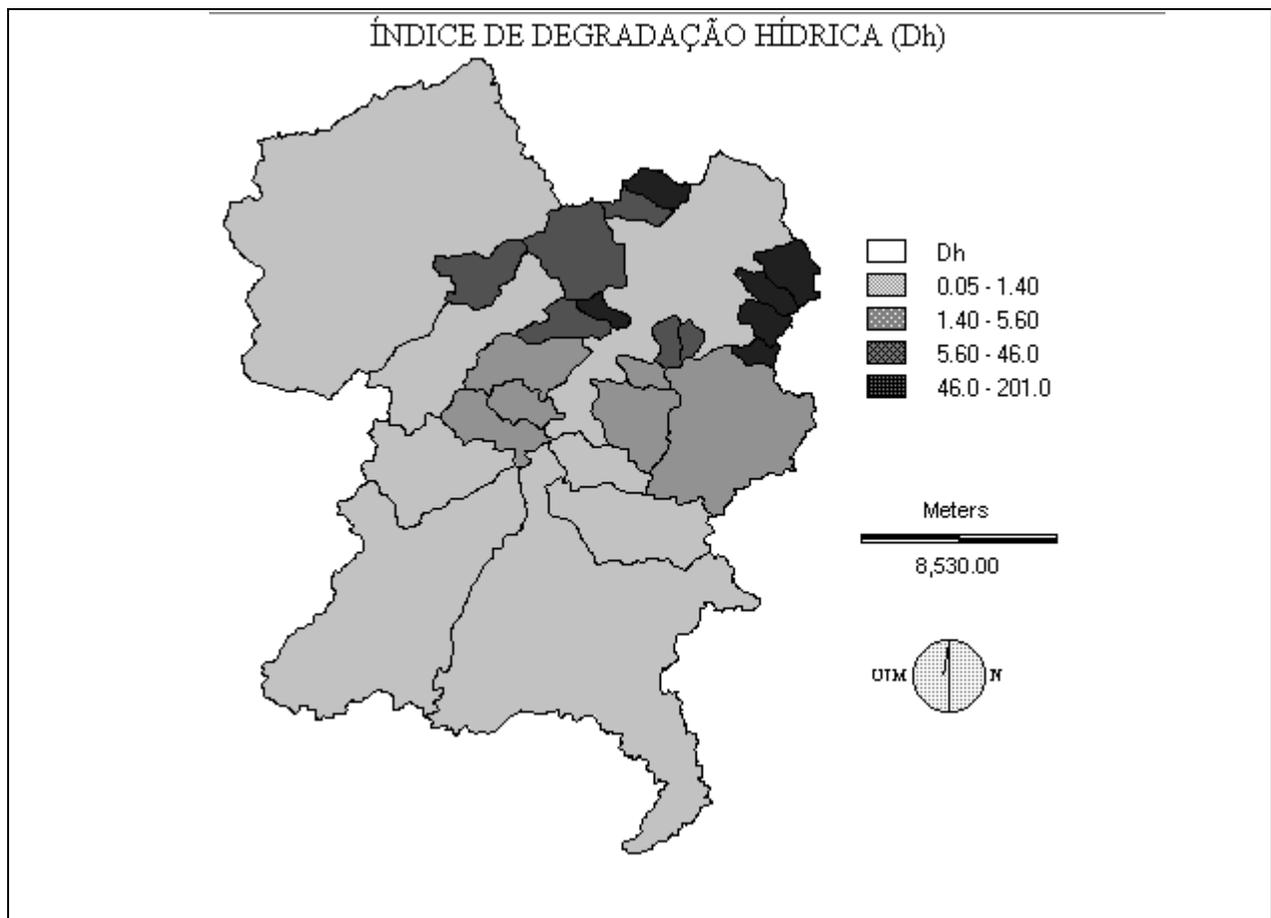


Figura 2 - Mapa da distribuição espacial dos valores de D_h para as sub-bacias.

Conclusões

O índice de degradação hídrica possibilita integrar alguns parâmetros importantes que descrevem e discriminam o grau de alteração antrópica de bacias hidrográficas situadas em áreas urbanizadas, entre os quais o índice de vegetação e o coeficiente de urbanização. Devido à facilidade de obtenção dos valores para estes parâmetros através de sensoriamento remoto, este indicador pode ser utilizado para estudos multitemporais de crescimento urbano.

Através das seqüências multianuais é possível avaliar a evolução dos valores de D_h por bacia hidrográfica e desta forma, utiliza-lo como um fator importante nas operações de modelagem e prognósticos de comprometimento dos recursos hídricos a longo prazo. Por outro lado, a discriminação entre bacias hidrográficas utilizando-se o D_h, pode auxiliar nas políticas locais de intervenção do poder público e de organizações não governamentais, visando focalizar ações de monitoramento e reordenação espacial do uso do solo urbano.

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi adaptada para ambiente ArcInfo/Erdas, e implementada no Laboratório de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto do Instituto Socioambiental (ISA), para a geração de um atlas ambiental multitemporal e um diagnóstico das sub-bacias da Bacia do Guarapiranga, para o período de 1986/1996. Os valores de Dh foram calculados para as 26 sub-bacias, nas duas datas mencionadas, possibilitando-se avaliar a taxa de variação deste índice, identificando-se assim as bacias que apresentaram um aumento na degradação hídrica devido principalmente a loteamentos clandestinos e desmatamentos ocorrido no período.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta pesquisa só foi possível devido ao apoio do Instituto Socioambiental (ISA), de São Paulo, através do projeto Diagnóstico Socioambiental Participativo Preliminar da Bacia do Guarapiranga.

Referências

- Band, L.E - A terrain-based watershed information system. *Hydrological Processes*, 3:151-162, 1989.
- Beven, K & Wood, E.F - Catchment geomorphology and dynamics of runoff of contributing areas. *Journal of Hydrology* (65):139-158, 1983.
- Eastman, J.R - *Idrisi For Windows, Version 2.0*. Clark University, Worcester, 1995.
- Epiphanyo, J.C.N. & Formaggio, A.R. - Relações entre PVI e a diferença normalizada e o índice de área foliar, cobertura do solo e densidade de clorofila do trigo e do feijão. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, *Anais*, Manaus, jun. 24-29, 1990, pp. 797-805
- Ferreira, M.C. - Utilização de modelos digitais de terreno na estimativa de enchentes em bacias hidrográficas: uma avaliação preliminar em escala regional. *Geociências*, 16(1):243-255, 1997.
- Hoog, J; McCormack, J.E; Roberts, S.A e Hoyle, B.S - *Automated derivation of stream-channel networks and selected catchment characteristics from digital elevation models*. In: Geographical Information Handling-Research Applications. Ed. By P.M. Mather, Pp. 206-235, John Wiley & Sons Ltd, 1993.
- Howard, A.D - Role of hypsometry and planform in basin hydrologic response. *Hydrological Processes*, 4:373-385, 1990.
- Huete, A.R. & Jackson, R.D. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 1985:37-53.

- Jensen, S.K. & Domingue, J.O. - Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593-1600, 1988
- Morisawa, M - Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian plateau. *Geolog. Soc. Of Am. Bull.* 73(9):1025-1043, 1962.
- Patton, P.C & Baker, V.R - Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12(5):941-952, 1976.
- Richardson, A.J. & Wiegand, C.L. - Distinguishing vegetation from background information. *Photogr. Engng & Remote Sensing* (43):1541-1552, 1977.
- Romanowicz, R.; Beven, K & Moore, R. - *Gis and distributed hydrological models.*: In: Geographical Information Handling-Research Applications. Ed. By P.M. Mather, Pp. 206-235, John Wiley & Sons Ltd, 1993.
- Trolier, L.J & Phillipson, W.R - Visual analysis of Landsat Thematic Mapper for hydrologic land use and cover. *Photogr. Engin. and Rem. Sens.*, 52(9):1531-1538, 1986