

Análise da Entropia da Paisagem como Subsídio ao Entendimento de Processos Erosivos na Microbacia do Córrego Barreiro - Goiânia - GO.

Elizon Dias Nunes; Patrícia de Araújo Romão

Universidade Federal de Goiás - Instituto de Estudos Sócio-Ambientais

dn@geografia.grad.ufg.br; patricia1@iesa.ufg.br

Resumo

O presente trabalho versa sobre o conceito de entropia aplicado à análise da paisagem sob o enfoque da Teoria Geral dos Sistemas, com a finalidade de entender a deflagração e a aceleração de processos erosivos em uma microbacia hidrográfica. A metodologia consistiu na utilização da fórmula de cálculo de entropia aplicada a uma matriz quadrada de convolução de $n \times n$ células, do Modelo Digital de Elevação, na qual uma célula central é classificada levando em conta a probabilidade de a mesma ocorrer na referida matriz por meio de funções de operações de vizinhança. Essas funções foram desenvolvidas no programa *ArcGis* 9.2 por meio de programação em *SQL* (Linguagem de Consulta Estruturada) e aplicadas em diferentes tamanhos de matrizes de convolução, com diferentes resoluções espaciais do MDE. Também incluiu a elaboração e correlação das cartas de hipsometria, de declividade, de curvatura do perfil e plana das vertentes. Foram utilizadas também duas imagens Quickbird com resolução espacial de 60 cm - uma referente ao ano de 2002 e a última referente ao ano de 2006, nas quais foram analisados a dinâmica do uso do solo e dos processos erosivos. Constatou-se que os processos erosivos se localizam em áreas que configuram uma maior diversidade altimétrica - menor entropia do relevo - que possuem grande correlação com os segmentos retilíneos e côncavos das vertentes. Verificou-se ainda que o conceito de entropia pode ser utilizado como mais uma ferramenta aplicada na compartimentação e análise de paisagens, a partir de uma visão sistêmica. Assim, destaca-se a relevância desse conceito, que se baseia na distribuição de energia enquanto potencial de perda de solos e sua aplicação na caracterização da paisagem e no mapeamento da susceptibilidade do terreno à deflagração e evolução de processos erosivos.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica, entropia, processos erosivos.

Analysis of the Entropy of the Landscape as Subsidy to the Agreement of Erosive Processes in MicroBasin of the Barreiro Stream-Goiânia-GO.

Abstract

This work is about the concept of entropy applied to the analysis of the landscape under the focus of the General Theory of systems, in order to understand the outbreak and the acceleration of erosive processes in a micro-basin. The methodology was to use the formula for calculating the entropy applied to a square matrix of convolution of $n \times n$ cells, the Digital elevation model, in which a central node is classified taking into account the probability of it occurring in that matrix through operations functions of the neighbourhood. These functions were developed in the ArcGis 9.2 program through programming in SLC (Structured language of Consultation) and applied in different sizes of plates of convolution, with different spatial resolutions of the EAW. It also included the preparation and correlation of the letters of hypsometry, slope, curvature of the profile and flat sections. They were also used two Quickbird images with spatial resolution of 60 cm - one for the year 2002 and last for the year 2006, which were analyzed the dynamics of soil use and erosive processes. One evidenced that the erosive processes if locate in areas that configure a bigger altimetric diversity - lesser entropy of the relief - and that they possess great correlation with the rectilinear and concavous segments of the sources. It was verified despite the entropy concept can be used as plus a tool applied in the compartment and analysis of landscapes, from a systemic vision. Thus, it is distinguished relevance of this concept, that if bases on the distribution of potential energy while of loss of soil and its application in the characterization of the landscape and the susceptibility mapping of the land to the deflagration and evolution of erosive processes.

Key-words: Hydrographic basin, entropy, erosive processes

1. Introdução

A erosão compreende um conjunto de fenômenos naturais envolvendo a remoção e o transporte de materiais detríticos provenientes da decomposição e desagregação das rochas e dos solos. Ela age continuamente na superfície da Terra e representa um dos principais agentes naturais de transformação fisiográfica do planeta, modelando o relevo na formação da paisagem natural. Condicionada pela ação da gravidade, é influenciada pela erosividade das chuvas, erodibilidade do solo e pela ação antrópica predominante na área (PIMENTEL, 2006). Entretanto, o desencadeamento de processos erosivos em ritmos acelerados vem-se constituindo como um dos principais problemas sócio-ambientais. Dessa forma, o presente estudo partiu de observações da ocorrência de erosões em uma microbacia hidrográfica que - devido ao processo de urbanização - se encontra sob grandes intervenções antrópicas. Objetivou-se compreender o fenômeno relacionado à deflagração e evolução de processos erosivos, considerando a bacia hidrográfica no contexto dos sistemas dinâmicos. Para tanto, buscou-se verificar a correlação entre as cartas de hipsometria, declividades, curvaturas do perfil e plana das vertentes, entropia do relevo, em diversas resoluções, e compreender como essas representações, correlacionadas com as intervenções antrópicas, ajudam a compreender a deflagração e evolução dos processos erosivos. Segundo Christofolletti (2004, p. 92): “o conceito de sistemas na Geografia foi inicialmente introduzida na Geomorfologia por Chorley (1962)”. Assim, no estudo da composição dos sistemas, vários aspectos devem ser abordados tais como, matéria, energia e estrutura, pois os mesmos possuem grande importância quando analisados em conjunto, pois permitem estabelecer relações de conectividade entre os componentes da paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1979 a). Nesse sentido, uma microbacia hidrográfica consiste em um sistema no qual pode-se estabelecer a dinâmica da matéria condicionada pela ação da gravidade na modelagem das vertentes e dos canais.

2. Caracterização da Área de Estudos

A área de estudos compreende a microbacia do córrego Barreiro, localizada na porção sudeste do município de Goiânia (Fig. 1). A litologia da área é composta por xistos, gnaisses e quartzitos pertencentes ao grupo Araxá Sul de Goiás (CAMPOS et al, 2003 a). Pertence ao domínio geomorfológico denominado por Cassetti (1992), de Planalto Embutido de Goiânia, no qual predominam superfícies de formas tabulares e convexas. Devido a essas características Santos (1997), já destaca uma maior tendência ao desenvolvimento de

processos erosivos nesse domínio litológico do município. Na porção norte da bacia, cujo curso principal drena na direção oeste-leste, se observa uma menor dimensão dos interflúvios e uma maior dissecação do relevo, predominando o Cambissolo Áplico. Na porção sul predominam declives suaves com vertentes longas, onde predomina o Latossolo Vermelho (CAMPOS et al 2003 b).

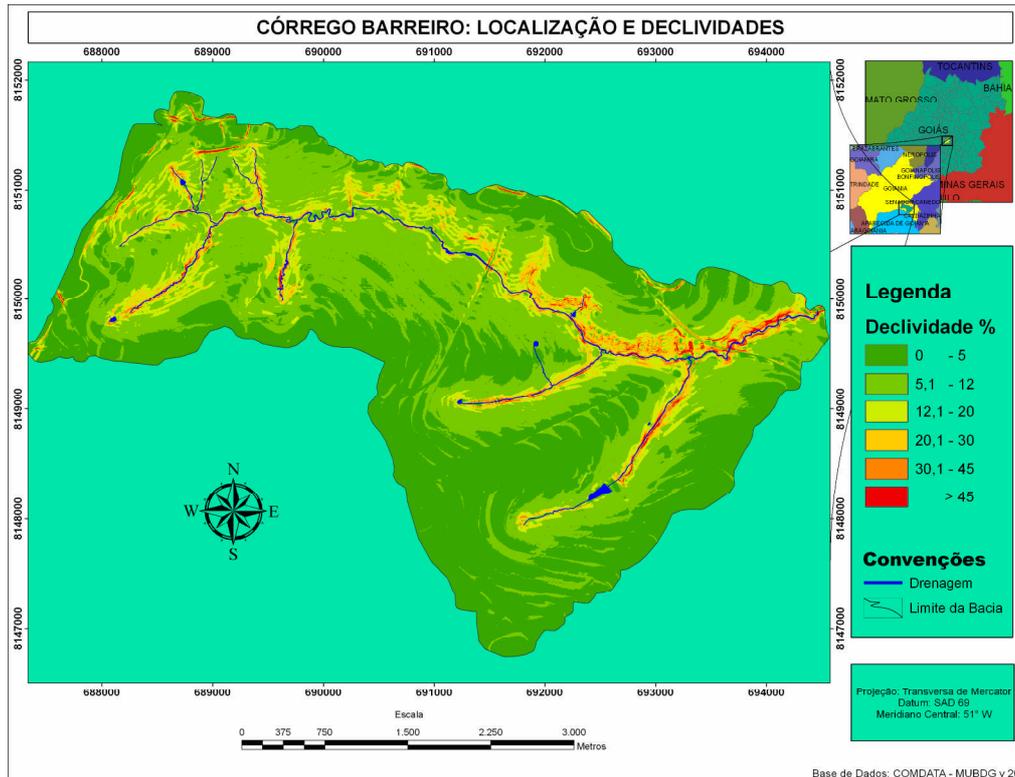


Fig. 1. Localização e declividades da área de estudo.

3. Fundamentação Teórico-Methodológica

O fenômeno dos processos erosivos em Goiânia foi abordado inicialmente por Santos (1997), que buscou verificar a comportamento de cada substrato rochoso sob influência da ação antrópica na deflagração e aceleração de processos erosivos. Nascimento e Sales (2003) destacaram como principais causas dos processos erosivos as galerias pluviais em áreas pavimentadas e a concentração de escoamento em áreas sem pavimentação. Romão (2006), em uma abordagem mais metodológica, ressalta as características morfométricas do relevo, ao associar as amplitudes altimétricas com os tamanhos dos interflúvios, potencializando a perda de solos. Tais conclusões vieram acompanhadas do fato de que Goiânia nos últimos trinta anos tem passado por um forte processo de impermeabilização do

solo influenciado pela urbanização, com o lançamento concentrado das águas pluviais nos cursos d'água das microbacias que ocorrem no município.

4. Entropia

Originária de estudos da termodinâmica, o conceito de entropia foi descrito no início da década de 1850 e introduzido na ciência em 1860 por Rudolf Clausius e se referia à razão entre a quantidade de calor trocado e a temperatura em um sistema. Entretanto, em 1824 em ensaio publicado, Nicolas Sadi Carnot já havia apresentado os conceitos de um ciclo térmico ideal, que se tornariam as bases da Segunda Lei da Termodinâmica. Essa implica em um sistema, que ao passar por algum processo em direção ao estado de equilíbrio, tende a aumentar sua entropia (MATTOS & VEIGA, 2002 a; MOREIRA et al, 2003; PASSOS, 2004). Por se inserir em uma temática mais abrangente - Teoria Geral dos Sistemas - (ZDENKOVIC & SCHEIDEGGER, 1989 a), suas aplicações se difundiram por diversas áreas do conhecimento.

4.1. A Entropia na Termodinâmica

O conceito de entropia foi definido estatisticamente por Boltzmann (1895), com o objetivo de caracterizar o estado de expansão de um gás ideal, cujas moléculas possuíam uma probabilidade w de serem encontradas em um compartimento i de um espaço-fase fechado (OREAR, 1983; ZDENKOVIC & SCHEIDEGGER, 1989 b), cuja função é apresentada (Eq. 1).

$$S = K x \ln p \quad \text{Equação 1.}$$

Onde: S é a entropia; K é a constante de Boltzmann; \ln é o logaritmo natural e p corresponde às diferentes probabilidades de estado em que o gás pode encontrar-se. Nesse sentido, as moléculas ao se expandirem estariam procurando um melhor arranjo, isto é, com o menor gasto de energia, que corresponde a uma maior probabilidade de o gás ser encontrado naquele determinado estado. Assim, o conceito de entropia foi introduzido para caracterizar o estado de ordem ou desordem em um sistema de partículas. Quanto maior for a probabilidade p de que o sistema esteja naquele estado particular, maior será o estado de desordem nas posições e velocidades de deslocamento das partículas nesse sistema, que devido a baixa energia disponível, levaria ao aumento de sua entropia.

4.2. A Entropia na Teoria da Informação

Em relação à teoria da informação, o conceito de entropia foi introduzido em 1948 por Claude Shannon que propôs uma medida para quantificá-la (Eq. 2). Segundo aquele autor uma fonte de informação é tida como um conjunto de elementos - signos - e está diretamente associada ao grau de similaridade entre as probabilidades de uma distribuição entre os mesmos. Estas probabilidades definem a entropia do conjunto na medida em que os elementos aparecem com uma dada frequência (MATTOS & VEIGA, 2002 b; ZDENKOVIC & SCHEIDEGGER, 1989 c).

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad \text{Equação 2.}$$

Onde: H é a entropia calculada a partir do somatório dos produtos das diferentes probabilidades de ocorrência p dos valores de i variando de 1 a n , pelo seu respectivo logaritmo \ln .

4.3. Entropia da Paisagem

As paisagens constituem respostas a um complexo de processos, cada um exigindo apropriadas escalas espacial e temporal para serem estudados. Tais processos se devem às interações entre as forças endógenas - que se devem à energia advinda das porções mais internas da Terra - e as forças exógenas - representadas pela interação da energia do sol com os fluídos da atmosfera e hidrosfera. No processo de esculturação do relevo essa complexidade se deve ao fluxo de matéria e à energia, bem como à estrutura na qual ocorrem inúmeras variáveis envolvidas na composição do sistema, havendo entre elas interação, interdependência e mecanismos de retroalimentação. O mecanismo de cada processo - descrito pela correlação entre as variáveis que o compõe - assim como por suas conseqüências, pode ser inferido de maneira probabilística (CRISTOFOLLETTI, 1979 b).

A aplicação do conceito de entropia no estudo das paisagens repousa sobre o conceito de energia enquanto capacidade de realizar trabalho geomorfológico, onde a distribuição da energia em uma paisagem pode ser representada como sendo a probabilidade de ocorrer determinada distribuição altimétrica do relevo em relação ao conjunto (CHRISTOFOLLETTI, 1979 c). Segundo esse mesmo autor, Luna B. Leopold e W. B. Langbein (1962), foram os primeiros a utilizar o conceito de entropia no estudo das paisagens como um todo, empregando analogias com a termodinâmica. Assim, a altitude no relevo -

aqui representada por um modelo digital de elevação - é análoga a temperatura em um sistema termodinâmico, enquanto a massa corresponde à energia térmica disponível no mesmo sistema (Eq. 3).

$$dS = dQ/t \iff dS = dM/h \quad \text{Equação 3.}$$

Onde: dS corresponde a variação de entropia para ambos os lados; dQ é a quantidade de calor e t corresponde a temperatura no sistema termodinâmico; dM é a quantidade de massa e h é a amplitude altimétrica no relevo.

Assim, as partículas de água e de sedimentos localizadas em determinadas posições altimétricas são atraídas pela ação da gravidade - energia potencial - para posições de menor altitude na paisagem, passando assim para a forma de energia cinética. Dessa forma, cada cota altimétrica possui uma determinada quantidade de energia em função da altimetria, da forma das vertentes e do comprimento das mesmas. Portanto, enquanto na termodinâmica a temperatura absoluta de um sistema isobárico corresponde ao estado de máxima entropia, na geomorfologia esse estado aconteceria quando do aplainamento por completo da paisagem, a mesma chegando ao seu nível de base de erosão. Ainda, as medidas de entropia da paisagem permitem a inferência de medidas de similaridade ou diversidade do relevo, tendo em vista a sua relação com a distribuição de frequência de altitudes em determinada área. Essas medidas auxiliam na delimitação de compartimentos morfológicos, por refletirem essa homogeneidade ou diversidade quanto às amplitudes altimétricas, e conseqüentemente quanto às feições do relevo.

5. Materiais e Métodos

No presente trabalho seguiu-se a estrutura conceitual da Teoria Geral dos Sistemas, na qual se destaca o caráter de conectividade entre as várias partes que compõem um determinado sistema. Para tanto, utilizou-se o Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia - MUBDG versão 20 - adquirido junto à Companhia de Processamento de Dados de Goiânia - COMDATA - contendo elementos da planimetria e altimetria. O cálculo de probabilidade foi realizado por meio de operações de vizinhança desenvolvidas no programa Arc Gis 9.2, em SQL, (*Linguagem de Consulta Estruturada*), em uma matriz de convolução, $n \times n$ células, do Modelo Digital de Elevação, na qual a célula central foi classificada levando-se em conta a probabilidade de a mesma ocorrer em outros locais da referida matriz por meio da fórmula: (Eq. 4).

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \quad \text{Equação 4.}$$

Onde: p_i é a probabilidade de uma determinada célula de altitude n_i ocorrer em uma matriz quadrada de convolução N , de $n \times n$ células. Em seguida aplicou-se a fórmula de cálculo de entropia: (Eq. 5).

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad \text{Equação 5.}$$

Onde: H é a entropia calculada através do somatório dos produtos dos logaritmos naturais (\ln) por suas respectivas probabilidades p , das respectivas cotas altimétricas e i , variando da menor (1) a maior (n), representa a variação altimétrica. Na área de estudo a altimetria variou de 670 a 845 m. O cálculo começou com a utilização de uma matriz 7×7 células com resolução espacial de 5 m, e em seguida com uma matriz 9×9 . Fez-se uma reamostragem do MDE para uma resolução espacial de 10m e aplicou-se as diferentes matrizes citadas acima, até chegar a uma matriz de convolução 9×9 células, a qual se mostrou compatível com a dimensão dos interflúvios. O mapeamento das feições erosivas e sua dinâmica, bem como a dinâmica da ocupação da microbacia, foram realizados utilizando duas imagens Quickbird - uma referente ao ano de 2002 disponível no LAPIG - IESA - UFG - e a última referente ao ano de 2006 disponível no Google Earth - ambas com resolução espacial de 60 cm. A correlação entre os diferentes mapas elaborados foi realizada utilizando as ferramentas de transparência disponíveis no programa Arc Gis 9.2 (ESRI).

6. Resultados Obtidos

Da elaboração das cartas de entropia e sua correlação com as feições erosivas, percebe-se que a ocorrência das mesmas se dá, predominantemente, nas áreas que configuram uma menor entropia do relevo, ou seja, áreas de maior energia potencial erosivo. No caso da carta de entropia, calculada a partir da matriz de convolução com 9×9 células, no MDE de resolução espacial de 5 m, as classes de maior energia são delimitadas somente em dissecações que ocorrem com elevada frequência, justificadas pelas operações de vizinhança no MDE com essa resolução. Verificou-se também que quanto maior a matriz de convolução aplicada em um MDE com menor resolução, maior é a tendência de homogeneização das classes de diversidade altimétrica, evidenciando assim o caráter de interdependência dos atributos morfométricos da área. Quanto à ocorrência de processos erosivos em áreas de maior entropia e médios declives, entende-se que estão sendo condicionados pela baixa

capacidade de infiltração do terreno. Esse, devido ao processo de ocupação que se encontra mais avançado na porção sul e nos interflúvios bastante impermeabilizados, favorece o escoamento superficial convergente, com elevado potencial erosivo.

Com base na entropia calculada a partir de uma matriz 9 x 9 com resolução espacial de 10m e considerando que uma erosão depende do seu entorno condicionante, entendeu-se que a energia disponível em determinado local tem o seu aumento condicionado a partir da altimetria de suas áreas adjacentes. Isso pode ser evidenciado pela carta de curvatura plana das vertentes, nas quais os segmentos côncavos (Fig. 3) se correlacionam espacialmente com as classes de menor entropia (Fig. 2). Na área tal fato foi corroborado pela tendência de alguns processos erosivos, depois de deflagrados - imagem de 2002 - terem evoluído em direção às classes de menor dissecação - imagem de 2006, configurando uma erosão remontante. Assim, a tendência à convergência de escoamento de fluxo, representada pelos segmentos côncavos das vertentes, associada aos maiores declives demonstram um maior poder de erosividade quando das chuvas intensas de verão, comuns em áreas urbanas.

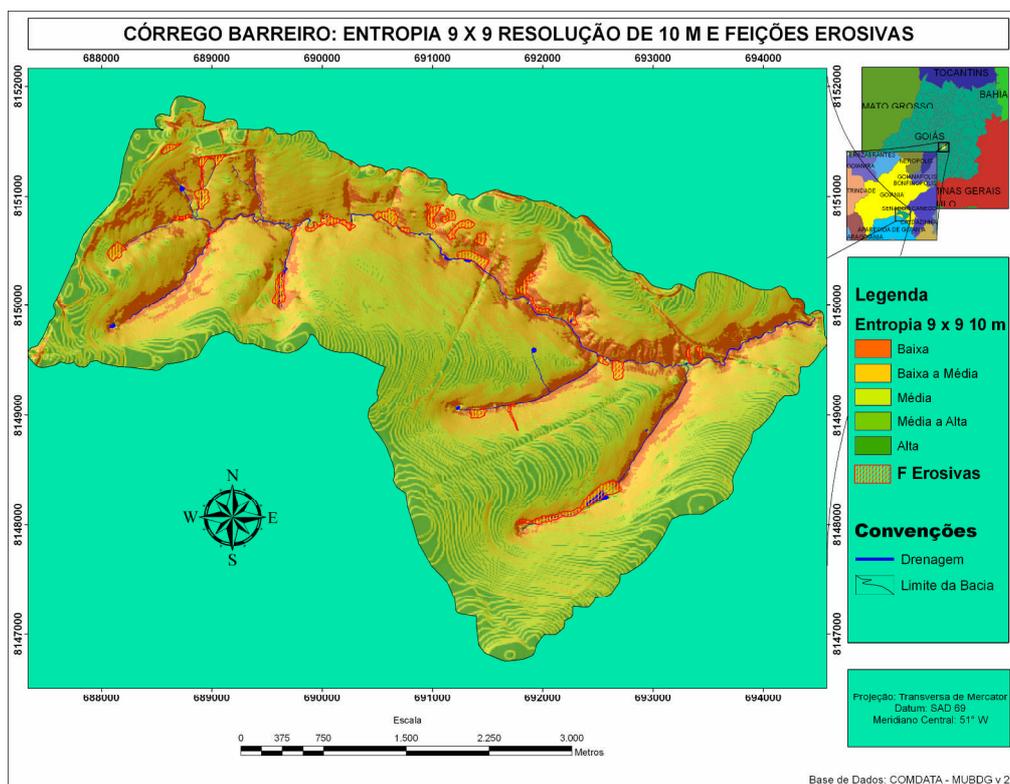


Fig. 2. Carta de entropia elaborada a partir da matriz 9x9 resolução espacial de 10m e feições erosivas.

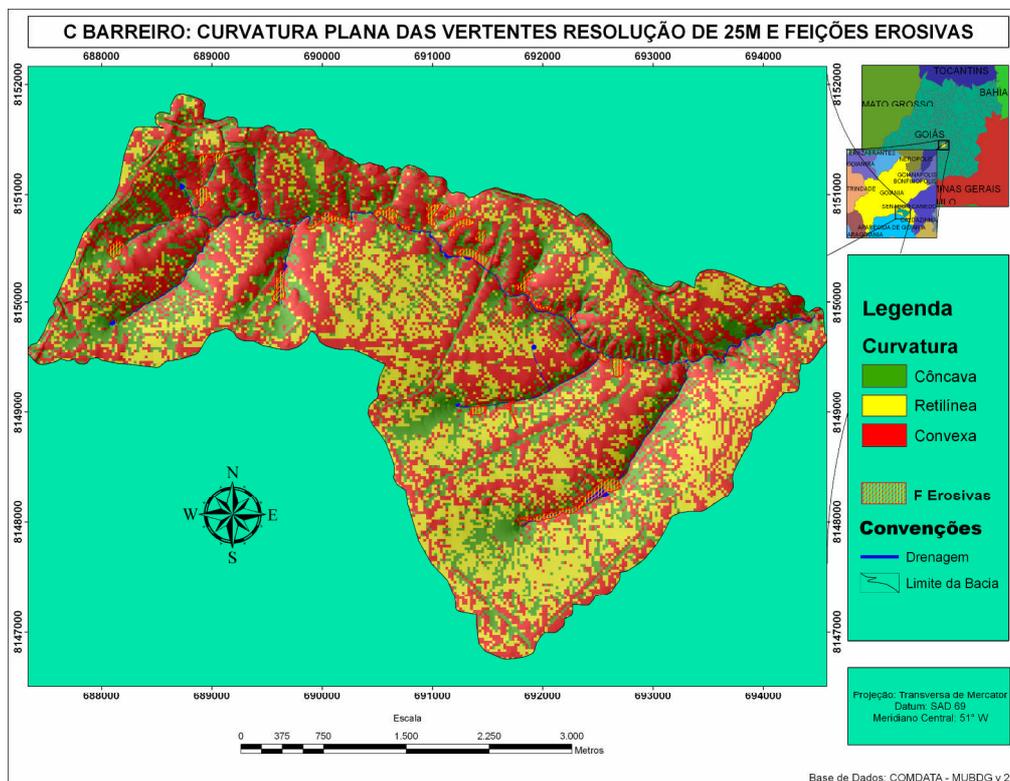


Fig. 3. Carta de curvatura plana das vertentes resolução de 25m.

7. Considerações Finais

A análise realizada por meio do mapa de declividade associado ao mapa de curvatura das vertentes ajudou na inferência da distribuição de energia ao longo da área da bacia hidrográfica. Entretanto essas representações tendem a aparecer fragmentadas. Isso porque a vizinhança a ser analisada na composição de uma classe é composta por uma matriz somente 3 x 3 células. Por conseguinte, o mapa de entropia mostrou-se representativo quanto à inferência do potencial de perdas de solos na bacia hidrográfica, por fazer uma análise com base em uma vizinhança 9 x 9 células, tendo em vista o tamanho das feições de dissecação analisadas. O emprego de operações de vizinhança com diferentes matrizes quadradas e com diferentes resoluções espaciais de células do MDE pode ser considerado como uma instrumentação tecnológica aplicada à estrutura conceitual dos Sistemas Dinâmicos. Tal procedimento ao classificar uma célula central de uma determinada matriz de altimetria, levando em conta as altitudes das células adjacentes da mesma matriz, ajuda a compreender o caráter de contigüidade e interdependência presente nas feições que caracterizam uma bacia hidrográfica, bem como se dá a distribuição da energia enquanto capacidade de realizar trabalho geomorfológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campos, J. E. G; Rodrigues, A. P; Almeida, L; Resende, L; Magalhães, L. F e Maranhão Sá, M. A. (2003) Diagnóstico Hidrogeológico da Região de Goiânia. Goiânia, GO, 125 p.

Casseti, V. (1993) Geomorfologia do Município de Goiânia - GO. Boletim Goiano de Geografia. Goiânia, 13(01): 65 - 85.

Christofoletti, A. (1980) Geomorfologia. 2º edição. Editora Edgard Blücher, São Paulo. 188p.

Christofoletti, A. (1999) Modelagem de Sistemas Ambientais. Editora Edgard Blücher, São Paulo. 236p.

Christofoletti, A. L. H. (2004) Sistemas Dinâmicos: As Abordagens da Teoria do Caos e da Geometria Fractal em Geografia. In Vitte, A. C; Guerra e A, J. T. (Org) Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 89 - 110.

Mattos, R. S e Veiga, A. Otimização de entropia: Implementação Computacional dos Princípios Maxent e Minxent. Scielo Brazil, 2002. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382002000100003>. Acesso em: 22 mar. 2007.

Moreira, C. V. R; Ferreira, O. C e Junior, P. P. M. Aplicação da Termodinâmica para a Avaliação do Equilíbrio das Redes Fluviais - a Bacia do Rio Santo Antônio. Economia e Energia, 2003. Disponível em: <<http://ecen.com/eee36/termodinamc.htm>> Acesso em: 22 nov. 2007.

Nascimento, M. A. S e Podestá Filho, A. (1993) Carta de risco de Goiânia. Boletim Goiano de Geografia. Goiânia, 13(01): 95 - 105.

Orear, J. (1983) Fundamentos da Física 1. Rio de Janeiro. Editora MacGraw-Hill do Brasil. Tradução e Coordenação de Equipe Jaime Oltramari, 229 p.

Passos, J. C. Carnnot e a Segunda Lei da Termodinâmica. ABENGE, 2003. Disponível em <http://www.lepten.ufsc.br/publicacoes/em_periodicos/2003/ABENGE/passos.pdf> Acesso em: 19 abr. 2008.

Pimentel, M. M. (2006) Processos Erosivos. In Carvalho, J. C. de; Sales, M. M; Sousa, N. M de e Melo, M. T da S. (Org) Processos Erosivos no Centro Oeste Brasileiro. Editora FINATEC, Brasília, 39 – 91.

Romão, P. A. (2006) Modelagem de Terreno com Base na Morfometria e em Sondagens Geotécnicas - Região de Goiânia - GO. Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília 166p.

Santos, R. M. M (1997) Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília, 120 p.

Zdenkovic, L. M. e Scheidegger, E. A. (1989). Entropy of Landscapes. Zeitschrift Fur Geomorphologie, N. F. 33 (3): 361-371.