



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**ANÁLISE DE GRUPOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS
DO ESTADO DE GOIÁS UTILIZANDO PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS**

Aline Brignol Menke

Orientador: Renato Fontes Guimarães
Co-orientador: Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Dissertação de Mestrado

Brasília-DF: Junho / 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

**ANÁLISE DE GRUPOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS
DO ESTADO DE GOIÁS UTILIZANDO PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS**

Aline Brignol Menke

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, e linha de pesquisa Geoprocessamento para Gestão Territorial e Ambiental.

Aprovado por:

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães, Universidade de Brasília.
(Orientador)

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Universidade de Brasília.
(Co-orientador)

Prof. Dr. Archimedes Perez Filho, Universidade Estadual de Campinas.
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Nilton Correia da Silva, UniEVANGÉLICA.
(Examinador Externo)

Brasília-DF, 29 de Junho de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

MENKE, ALINE BRIGNOL

Análise de grupos para classificação de bacias hidrográficas do estado de Goiás, utilizando parâmetros morfométricos. 86 p, 297 mm, (UnB-IH-GEA-LSIE, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| 1. Goiás | 2. Classificação de bacias |
| 3. Análise de grupos | 4. Morfometria |
| I. UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENKE, Aline Brignol. Análise de grupos para classificação de bacias hidrográficas do estado de Goiás, utilizando parâmetros morfométricos. (Dissertação de Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2012, 86 p.

CESSÃO DE DIREITOS

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Aline Brignol Menke

“O desenho de nossas vidas, como a chama da vela, é continuamente conduzido em novas direções por diversos eventos aleatórios que, juntamente com nossas reações a eles, determinam nosso destino.”

Leonard Mlodinow

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram com esse trabalho. Em especial ao meu orientador Renato, por toda atenção, por todas as revisões, por todas as contribuições teóricas e pelos momentos de descontração, que ajudaram a aliviar a carga de tantas horas em frente ao computador. Agradeço ao meu co-orientador Osmar, por toda ajuda nas partes conceituais e pelas contribuições técnicas.

Agradeço aos meus familiares, em especial aos meus pais, por compartilharem a minha alegria e por me darem suporte nos momentos mais difíceis.

À UnB/ CAPES, pela bolsa de mestrado, ainda no início do curso.

Aos colegas de LSIE, que me acompanharam/acompanham desde a iniciação científica, e aos colegas de laboratório: Thiago Avelar, Wátala Portela, Robson Sodré, Sandro Nunes, Miriam, Marcus Fábio, Felipe Lima, Gabriel Daldegan e Fernanda Figueiredo. E aos demais colegas de mestrado que compartilharam as mesmas dificuldades e alegrias.

Aos meus amigos, agradeço pela força e pela alegria transmitida. Agradeço às minhas grandes amigas Luiza Troina e Carine Roos, por todo carinho e incentivo.

Também gostaria de agradecer ao Roberto Gomes, pelas horas que passamos juntos discutindo idéias novas, pelo companheirismo, pela amizade, pela força e pela confiança incondicional que ele sempre demonstrou nesse trabalho. Ele acompanhou de perto meu crescimento acadêmico e sempre apostou que, ao final, tudo daria certo. Obrigada pelo otimismo tão necessário para que esse trabalho chegasse ao fim e por entrar na minha vida de uma forma tão especial. Que possamos levar essa admiração mútua pelo resto de nossas vidas.

Agradeço a toda equipe da pós-graduação e aos professores do curso de mestrado, que também contribuíram para que esse trabalho tomasse forma.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. A área de estudo.....	3
1.2. Aspectos fisiográficos.....	4
2. ORIENTAÇÕES CONCEITUAIS.....	6
2.1. Bacia hidrográfica como unidade básica de análise.....	6
2.2. Geomorfometria em bacias hidrográficas.....	9
2.3. Análise multivariada de dados e a Análise de Grupos (<i>Clusters</i>).....	12
2.4. Os mapas auto-organizáveis de Kohonen e a análise de grupos.....	14
2.5. Os parâmetros morfométricos.....	16
2.5.1. Amplitude Topográfica.....	16
2.5.2. Curvatura.....	17
2.5.3. Direção de fluxo.....	17
2.5.4. Acumulação de fluxo.....	18
2.5.5. Declividade.....	19
2.5.6. Área.....	19
2.5.7. Perímetro.....	19
2.5.8. Índice de Circularidade.....	19
2.5.9. Índice de sinuosidade.....	20
2.5.10. Densidade de drenagem.....	20

2.6. A classificação de bacias hidrográficas.....	20
3. METODOLOGIA.....	22
3.1. Tratamento do produto <i>Hydrosheds</i> do SRTM.....	22
3.2. Delimitação das bacias.....	23
3.3. Cálculo dos atributos morfométricos das bacias de drenagem.....	24
3.4. Classificação das bacias de drenagem a partir do método das K-médias.....	25
3.5. Classificação das bacias de drenagem a partir do método adaptado de mapas auto-organizáveis de Kohonen.....	26
3.6. Análise comparativa das classificações e dos atributos morfométricos.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5. CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	47
ANEXOS.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do Goiás e do Distrito Federal.....	3
Figura 2 - Hierarquia dos canais pelo método de Strahler.....	7
Figura 3 - Área das não bacias, ou " <i>nonbasins</i> ", selecionada em laranja.....	8
Figura 4 – Comparação entre bacias de várias ordens, pelos métodos de Strahler (1952), Scheidegger (1965) e Shreve (1967), mostrando pequenas diferenças de delimitação das bacias de ordem superior entre os métodos de Strahler, Scheidegger e Shreve.....	9
Figura 5 - Correção de pequenas depressões por meio da execução da função “ <i>fill sinks</i> ” (Fonte: Sobrinho et al., 2010).....	10
Figura 6 - Representação simplificada de um neurônio (Fonte: Ferneda, 2006).....	14
Figura 7 - Modelo matemático de um neurônio (Fonte: Ferneda, 2006).....	15
Figura 8 - Relação entre os coeficientes do polinômio e os nove valores de elevação (ESRI, 2007).....	17
Figura 9 - Representação do modelo de direção de fluxo, pelo método D8, com o gradiente de elevação representado pelas linhas de contorno, analisando a influência de um <i>pixel</i> à montante (extraído de Tarboton, 1997).....	18
Figura 10 - Representação do modelo de direção de fluxo, pelo método D-Infinito, com o gradiente de elevação representada pelas linhas de contorno, analisando a influência de um <i>pixel</i> à montante (extraído de Tarboton, 1997).....	18
Figura 11- (a) Número de células que fluem por cada célula e (b) a representação vetorial do caminho do fluxo (ESRI, 2007).....	19
Figura 12 - Exemplo da delimitação das bacias pelo <i>hydrotools</i> sem a divisão das bacias (a), e com a divisão das bacias (b).....	24
Figura 13 - Perfil topográfico longitudinal A-B e C-D.....	28
Figura 14 - Histograma de frequência dos valores de altimetria do modelo <i>Hydrosheds</i>	29
Figura 15 - Mapas morfométrico de altimetria (a) e declividade (b).....	29
Figura 16 - Mapas morfométrico de aspecto (a), curvatura (b) e área de	30

contribuição (c).....	
Figura 17 - Bacias de drenagem do estado de Goiás, com incisão dos canais de drenagem.....	31
Figura 18 - Histograma da quantidade de bacias por área antes da incisão da rede de drenagem.....	32
Figura 19 - Histograma da quantidade de bacias por área depois da incisão da rede de drenagem.....	32
Figura 20 – Matriz de dispersão dos parâmetros morfométricos, parte 1.....	34
Figura 21 – Matriz de dispersão dos parâmetros morfométricos, parte 2.....	35
Figura 22 - Estatísticas zonais de amplitude altimétrica (a), desvio padrão da altimetria (b), altimetria média (c), altimetria máxima (d), altimetria mínima (e) e declividade média (f).....	37
Figura 23 - Estatísticas zonais de declividade máxima (a), declividade mínima (b), curvatura média (c), curvatura máxima (d), curvatura mínima (e) e aspecto médio (f).....	38
Figura 24 - Estatísticas zonais de aspecto máxima (a), aspecto mínima (b), área de contribuição média (c), área de contribuição máxima (d), direção de fluxo média (e) e direção de fluxo máxima (f).....	39
Figura 25 - Estatísticas zonais de direção de fluxo mínima (a), área (b), perímetro (c), índice de circularidade (d), índice de sinuosidade média (e) e densidade de drenagem (f).....	40
Figura 26 - Melhor classificação das bacias, pelo método das K-médias (a) e pelo método adaptado dos mapas auto-organizáveis de Kohonen (b).....	41
Figura 27 – Classificação após o reagrupamento das classes encontradas pelo método das K-médias.....	42
Figura 28 – Classificação após o reagrupamento das classes encontradas pelo método adaptado dos mapas auto-organizáveis de Kohonen.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Atributos primários de topografia (adaptado de Moore et al., 1991).....	11
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APC - Análise de Principais Componentes

COO - Classificação Orientada ao Objeto

DTED - *Digital Terrain Elevation Data*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

InSAR - *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

LSIE - Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais

MDE - Modelo Digital de Elevação

SOM - *Self Organized-Maps*

SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission*

USGS - *U.S Geological Service*

WGS - *World Geodetic System*

RESUMO

A bacia é a unidade fundamental em estudos ambientais, em que são relacionadas as formas do relevo e os processos que a modificam. A área das bacias é usada em estudos ambientais, principalmente em estudos morfométricos, a partir de sistemas de informações geográficas. A geomorfometria é definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre. Em geomorfometria, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são a principal fonte de informações. Nesse trabalho é usado o modelo *Hydrosheds*. A partir desse modelo, foi possível derivar mapas de declividade, curvatura, aspecto, área de contribuição e direção de fluxo. O presente trabalho possui como objetivo obter uma classificação de bacias, a partir do método de análise de grupos, utilizando atributos morfométricos em bacias de drenagem, no estado de Goiás. A metodologia pode ser dividida nas seguintes etapas: (1) tratamento do produto *Hydrosheds* do SRTM; (2) delimitação automatizada de bacias; (3) cálculo dos atributos morfométricos; (4) classificação das bacias de drenagem a partir do método adaptado de mapas auto-organizáveis de Kohonen, (5) classificação das bacias de drenagem a partir do método de K-médias e (6) análise comparativa das classificações e dos atributos morfométricos. Os métodos das K-médias e de Kohonen permitem obter grupos com características morfométricas similares com base na distância euclidiana. Os mapas obtidos apresentam bons resultados para classificação de bacias. As classes definidas possuem correlação com os atributos morfométricos e permitiram definir grupos com base nesses atributos. Ambos os métodos podem ser estendidos a outros estudos morfométricos, tanto regionais quanto locais. Dessa forma, foram obtidos dois mapas, como base em características morfométricas, com quatro classes: Classe 1; Classe 2; Classe 3; e Classe 4.

Palavras-chave: classificação de bacias, análise de grupos, bacias hidrográficas.

ABSTRACT

Basin is the fundamental unit in environmental studies, which are related to land form and its changing process. Watershed is used in environmental studies, mainly in morphometric studies, based on geographic information systems. The geomorphometry is defined as a science of quantitative analysis of the surface. In geomorphometry, the Digital Elevation Models (DEMs) are the main source of information. In this work, we use the model HydroSHEDS. From this model, it was possible to derive maps as slope, curvature, aspect, contribution area and flow direction. This work aims to obtain a classification of basins, from cluster analysis method, using morphometric attributes of drainage basins in the state of Goias. The methodology can be divided into the following steps: (1) HydroSHEDS SRTM processing, (2) automated basin delineation, (3) calculation of morphometric attributes, (4) classification of drainage basins from self-organizing maps (SOM) Kohonen method adapted, (5) classification of drainage basins from K-means method and (6) comparative analysis of classification and morphometric attributes. The K-means and Kohonen method allow to obtain groups with similar morphometric characteristics based on Euclidean distance. The maps show good results for basins classification. The classes have high correlation with the morphometric attributes and allowed to define units based on these attributes. Both methods can be extended to other morphometric studies, either regional or local. Thus, we obtained two maps, based on morphometric characteristics, with four classes: class 1; class 2; class 3; and class 4.

Key-words: basin classification, cluster analysis, watersheds.



1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é a unidade territorial mais utilizada em estudos ambientais pelo fato da rede de drenagem consistir em um dos caminhos preferenciais de boa parte das relações de causa e efeito que envolvem o meio físico. As configurações espaciais das bacias de drenagem são modeladas pela difusão e incisão dos processos erosivos de forma a minimizar a perda de energia (Langbein, 1964; Langbein e Leopold, 1964; Montgomery e Dietrich, 1992). Por outro lado, as formas terrestres são resultado da interação entre o fluxo de matéria e de energia dentro dos limites dos divisores de água, considerando a resistência da superfície topográfica. Portanto, conhecer as feições e os padrões do terreno que compõe uma bacia hidrográfica permite inferir sobre os fatores e processos nela atuantes.

As bacias hidrográficas podem ser delimitadas utilizando técnicas manuais ou automatizadas. As vantagens das técnicas automatizadas são: maior rapidez, menor subjetividade, maior facilidade de reprodução, diminuição de custos e de tempo. Nesse propósito as novas geotecnologias permitiram um grande avanço na extração de informações hidrográficas e geomorfológicas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Utilizando ferramentas de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) em modelos digitais é possível obter atributos morfométricos como: fluxo da água; redes hidrográficas (Morris e Heerdegen, 1988); bacias e sub-bacias hidrográficas (Tarboton, 2005; Oliveira, 2008); formas topográficas (Pike e Thelin, 1989) e compartimentos geomorfológicos (Martins et al., 2004; Carvalho Júnior et al., 2001).

O modelo *Hydrosheds* de elevação (SRTM, v.4.1), disponibilizado pela USGS (U.S. Geological Survey), provê informações mais confiáveis a respeito de onde rios e bacias ocorrem na superfície da Terra e como a água escoar na paisagem. Como produtos, estão disponíveis os modelos de acumulação e direção de fluxo, além dos vetores de bacias e drenagem em escala global (Lehner et al., 2008). Analisando a aplicação do *Hydrosheds* em escala global, Guth (2011) utilizou dados de elevação, sinuosidade e rugosidade em bacias hidrográficas e encontrou bons resultados, o que corrobora o uso desse modelo em estudos morfométricos, apesar das limitações de escala e de qualidade do dado. Análises morfométricas em bacias também já foram realizadas por Oliveira et al. (2007) para compartimentar o relevo, utilizando a técnica estatística de análise de grupos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos. Sodré et al. (2007), também testou o método de análise de grupos para classificar bacias hidrográficas, identificando sete grupos, e concluiu que o



método é adequado para evidenciar padrões espaciais contínuos, cuja dinâmica ambiental é similar. Utilizando o desnivelamento altimétrico em bacias hidrográficas, Silva (2009) realizou a compartimentação topográfica do estado do Rio de Janeiro, considerando a área das bacias de primeira e segunda ordem até sua confluência com a rede coletora. Além desses, outros estudos ressaltam a importância das variáveis morfométricas para caracterização de bacias quanto a tendência a inundação (Yevjevich et al., 1972; Souza, 2009), controle hidrosedimentar (Raux et al., 2009), identificação de compartimentos geomorfológicos (Adediran et al., 2004), e na caracterização de unidades ambientais (Calvo, 1990).

Este estudo se baseia nos trabalhos recentes desenvolvidos pela equipe do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE-UnB), sendo uma contribuição para o aperfeiçoamento da técnica de classificação morfométrica utilizando análise de grupos em bacias de primeira ordem. O objetivo desse trabalho é realizar uma classificação de bacias hidrográficas do estado de Goiás utilizando a técnica de análise de grupos (método das K-médias e do mapas auto-organizáveis de Kohonen) a partir de parâmetros morfométricos. Os objetivos específicos são:

- Adquirir um MDE, com consistência hidrológica;
- Identificar e analisar a correlação entre os parâmetros morfométricos;
- Aplicar os métodos de agrupamento K-médias e mapas auto-organizáveis de Kohonen;
- Avaliar e selecionar o melhor resultado entre os métodos de agrupamento;
- Analisar as classificações obtidas.



1.1. A área de estudo

A área de estudo escolhida foi a região do estado de Goiás, incluindo o quadrilátero do Distrito Federal (**Figura 1**).

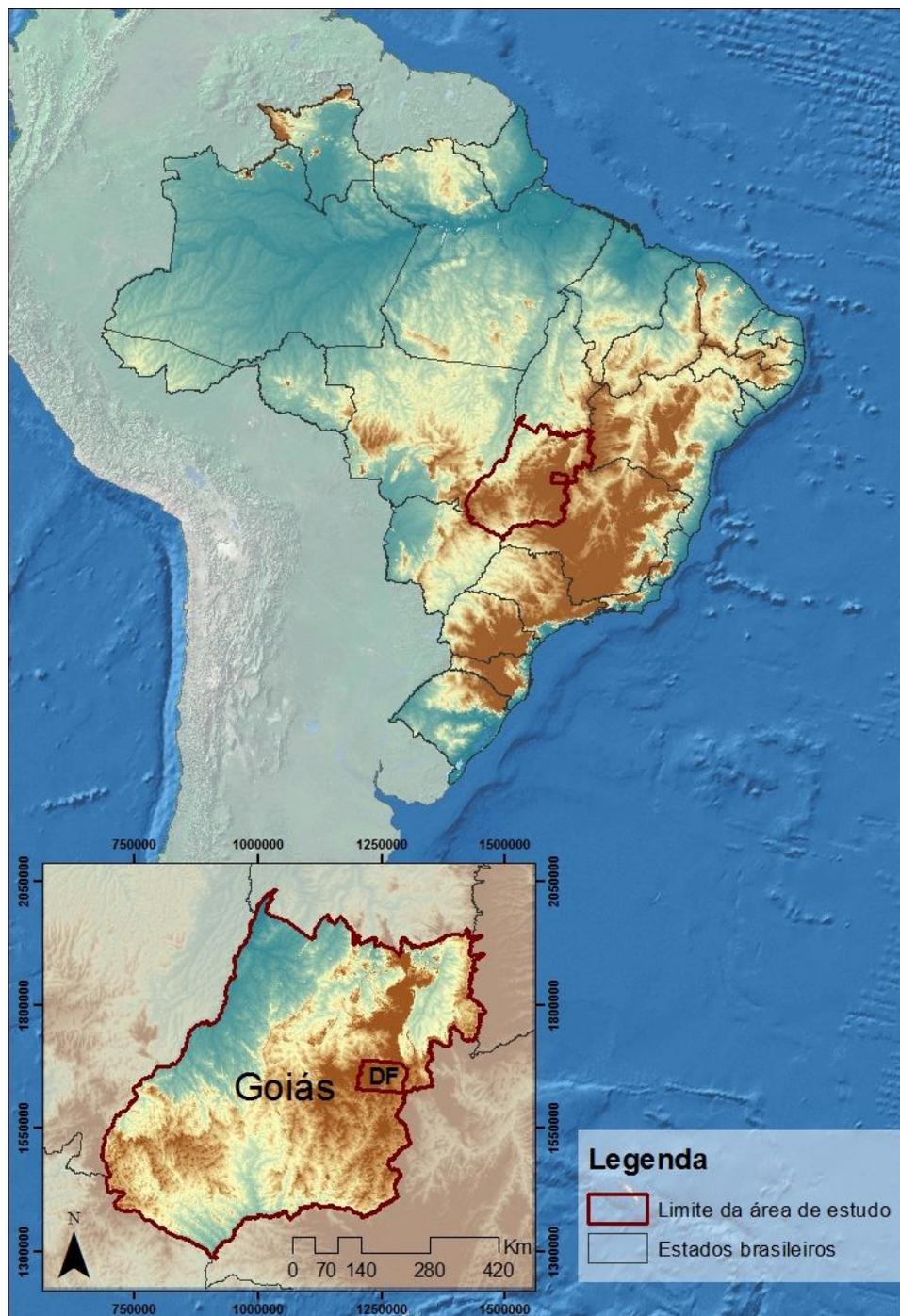


Figura 1 - Mapa de localização do Goiás e do Distrito Federal.



1.2. Aspectos fisiográficos

O estado de Goiás possui duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca. Em estudo realizado por Silva e Assad (1998), o período compreendido entre 21 de abril e 28 de setembro, é de deficiência hídrica. Nesse período observa-se uma elevada temperatura, baixa umidade e ventos mais fortes. No período chuvoso, foi registrada uma pluviometria da ordem de 20 e 160 mm (Silva e Assad, 1998).

O estado de Goiás é banhado por três das grandes bacias brasileiras: Bacia do Paranaíba, Bacia do Tocantins-Araguaia e Bacia do São Francisco. Essa região possui importância estratégica para o manejo e conservação dos recursos hídricos do país visto que abriga as principais nascentes. A Bacia do Paranaíba possui a maior extensão, sendo que ela banha 125 municípios goianos. Essa bacia possui 220.195 km² de captação e drenagem (SEPLAN-GO, 2003). As nascentes do estado de Goiás, por sua posição central, alimentam a maioria das grandes bacias brasileiras.

As redes de drenagem no Goiás, que possuem alta densidade hidrográfica, estão relacionadas ao Complexo Basal Goiano (granitos, gnaisses) e ao Grupo Araxá (micaxistos, quartzitos), responsáveis pelo maior escoamento superficial. Na bacia sedimentar do Paraná, as áreas com rochas sedimentares apresentam menor densidade de drenagem. Os padrões mais anastomosados são encontrados, principalmente, na planície do Bananal, que está associada aos depósitos aluvionares, depósitos coluvionares e arenoargilosos (Nascimento, 1991).

O mapeamento geomorfológico do estado de Goiás foi realizado utilizando critérios genéticos pela Secretaria de Estado e Comércio do estado de Goiás (GOIÁS, 2005). A classificação baseia-se em dois sistemas básicos: Sistemas de Agradação e Denudação. Os sistemas de agradação incluem: Planícies Fluviais; Terraços; e Sistemas Lacustres. Nos sistemas de denudação aparecem as Superfícies Regionais de Aplainamento, que é a superfície mais representativa da região, e foi gerada a partir do arrastamento/ aplainamento, independente dos controles geológicos regionais. A evolução desse modelado pode ser explicada a partir do processo de etchplanação (GOIÁS, 2005). Ainda nas superfícies de denudação estão as Zonas de Erosão Recuante, que são áreas de transição para as Superfícies Regionais de Aplainamento e as Colinas e Morros, que estão localizadas nas cotas menores, sendo, portanto, remanescentes em áreas mais resistentes à erosão. Além dessas também é possível destacar a Unidade de Estruturas Dobradas, como os Hogbacks, que provem da associação entre morros e colinas e que explicam a formação das cristas do Vale do Paranã,



por exemplo. Já as Braquianticlinais, que também são estruturas dobradas, são corpos intrusivos. As Formas Dômicas, no qual podemos destacar a bacia do Paranoá, no Distrito Federal, é produto também da etchplanação (Martins, 2004), sustentada pelas lateritas ao seu redor. No sistema denudacional do Goiás, também é possível encontrar estruturas de blocos falhados e áreas cársticas, porém, com menor dimensão.



2. ORIENTAÇÕES CONCEITUAIS

2.1. Bacia hidrográfica como unidade básica de análise.

A bacia é a unidade fundamental em estudos ambientais, na qual podem ser relacionadas as formas do relevo aos processos que a modificam, pois os cursos d'água consistem em um dos processos morfogenéticos mais ativos na esculturação da paisagem terrestre. Segundo Coelho Netto (2005), além da importância das bacias para a distribuição da água superficial, essa também desempenha um importante papel na distribuição de sedimento e substâncias dissolvidas.

Flint (1971) aponta a erosão fluvial ocorrida após a glaciação no período Pleistoceno, que cobriu um terço da superfície terrestre, como o principal agente modelador da feição das bacias atuais. Essa tendência da superfície em organizar-se em bacias hidrográficas é devido ao princípio da minimização da perda de energia (Leopold e Langbein, 1962).

Em geral, os conceitos de bacias hidrográficas tendem a caracterizá-la quanto a aspectos relacionados à área de captação e quanto ao sistema que ela encerra. Ressaltando o fator área, Suguio (1990) define a bacia como a área compreendida por um rio ou por um sistema fluvial, composto por um rio principal e seus tributários, por onde a água da chuva flui preferencialmente. Para Tucci (1993), uma bacia hidrográfica pode ser definida como a área de captação natural das precipitações que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exultório. Langbein e Iseri (1995) definem a bacia como uma parte da superfície, ocupada por uma rede de drenagem, que consiste em um fluxo superficial ou um corpo de água superficial unido a todos os fluxos de superfície afluentes e corpos d'água superficiais. Em uma perspectiva sistêmica, Selby (1985) define a bacia como uma unidade topográfica, vista como um sistema físico aberto em termos de entrada de chuva e radiação solar e saída de evaporação e descarga de rios.

A relação entre hidrografia e relevo é bem conhecida. Se por um lado os rios erodem para formar seus próprios vales, por outro lado, as características hidrológicas de um sistema fluvial são influenciadas pelas condições topográficas, geológicas e pedológicas da bacia. Essa relação depende dos seguintes aspectos: a. da altitude e orientação da bacia hidrográfica; b. do relevo, forma e declividade da bacia; c. da estrutura geológica e dos tipos de rocha e do manto de intemperismo (Suguio, 1990). Strahler (1957) também enfatiza o fluxo de água e a movimento gravitacional de massa, como fatores importantes na modelagem das formas terrestres.



As bacias podem ser hierarquizadas de acordo com a quantidade de ramificações existentes. A escolha do início da contagem pode ser da foz à nascente ou das nascentes à foz. Uma das hierarquias mais utilizadas em estudos hidrológicos é a de Strahler. Essa classificação se baseia no ordenamento dos canais de acordo com suas confluências, sendo que o ordenamento é crescente seguindo das nascentes até o exultório. De acordo com essa classificação, a junção dos canais de mesma ordem dá origem a um canal de ordem superior, enquanto no encontro de um canal com outro de ordem superior, mantêm-se a ordem do canal de maior hierarquia. A ordem do canal corresponde à ordem da bacia. De acordo com a posição do exultório e da escala da rede hidrográfica, é possível dividir as bacias em sub-bacias. A ordem dos canais é dada segundo uma hierarquia. Um dos métodos de hierarquização mais utilizados atualmente, e que foi utilizado neste trabalho, é o de Strahler (1957). Nesse modelo, o início do canal é de ordem um. Quando dois canais de ordem diferente se juntam a jusante, permanece a ordem do canal de maior hierarquia. Quando dois canais de ordem igual juntam-se, a ordem do caminho a jusante é aumentado em 1 (**Figura 2**).

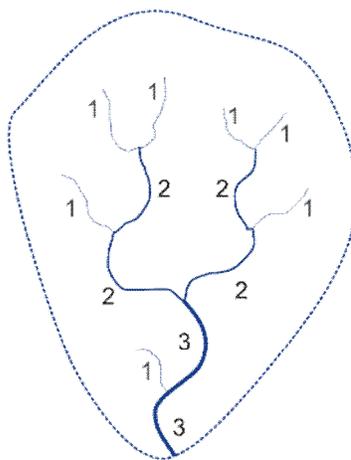


Figura 2 - Hierarquia dos canais pelo método de Strahler.

Organizar os canais por hierarquia é uma forma prática de lidar com grandes extensões de área, permitindo análises comparativas. Os números de ordem são diretamente proporcionais à dimensão relativa das bacias, tamanho do canal e descarga (Strahler, 1957). Por ser o número de ordem adimensional, duas bacias de escala linear diferentes podem ser comparadas e equacionadas, respeitando os pontos correspondentes de sua geometria tendo por base o número de ordem (Strahler, 1957). A proposição de Strahler é a mais utilizada, em função do seu caráter descritivo e do seu relacionamento com as leis da composição da drenagem (Christofolletti, 1980).



Os canais de maior ordem, em geral, possuem área de captação direta de água. Marsh (1998) chama essas áreas de "*nonbasins*" ou não bacias (**Figura 3**), definidas como terras que drenam água diretamente para bacias de maior ordem, sem antes fluir pelos canais à montante. Porém, todas as bacias, independente da ordem, possuem captação direta de água.

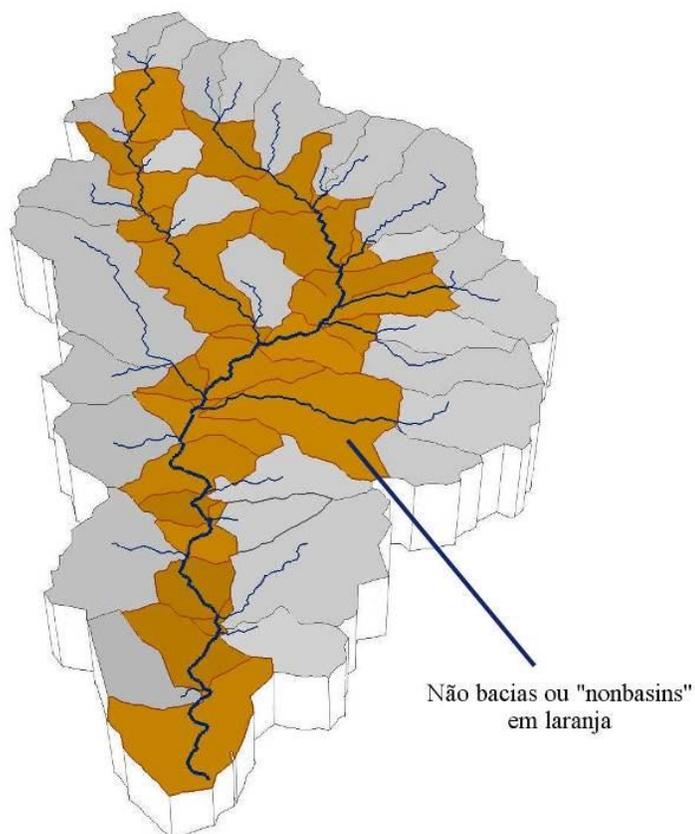


Figura 3 - Área das não bacias, ou "*nonbasins*", selecionada em laranja.

Oliveira (2008) cita o termo “fragmento de bacias”, para se referir a essas bacias, que não são as de primeira ordem. Para esse autor, os fragmentos são uma extensão ou parte das bacias à montante, de maior ordem. No entanto, é necessário definir qual é o método de hierarquização utilizado. Um fragmento de bacia, pela hierarquia de Strahler (1952), seria um fragmento de uma bacia de maior ordem cuja área é maior que aquela delimitada pelos métodos de Scheidegger (1965) e Shreve (1967), conforme mostrado na **Figura 4**.

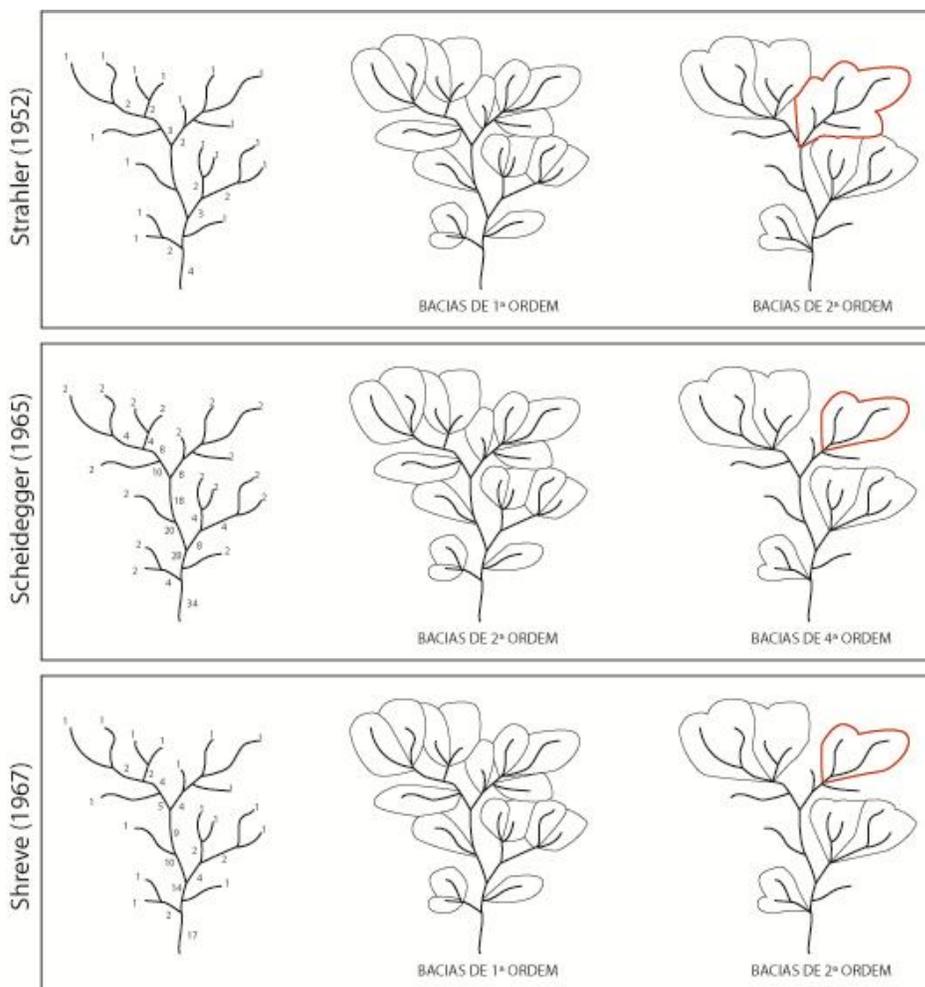


Figura 4 – Comparação entre bacias de várias ordens, pelos métodos de Strahler (1952), Scheidegger (1965) e Shreve (1967), mostrando pequenas diferenças de delimitação das bacias de ordem superior entre os métodos de Strahler, Scheidegger e Shreve.

Os trabalhos que utilizam as bacias em sua continuidade costumam se basear na classificação de Strahler, com bacias de 1ª ordem. Portanto, fragmentos de bacia é um termo adequado no caso deste estudo, mas possui limitações de uso quando se comparam as bacias de ordem superior, entre os métodos apresentados. A diferença entre o método de Scheidegger (1965) e Shreve (1967) não é perceptível, porém, quando comparado ao método hierárquico de Strahler (1952), possui diferença de área.

2.2. Geomorfometria em bacias hidrográficas.

A primeira definição para geomorfometria, ou morfometria, foi dada por Von Humboldt, em 1849, que foi descrita como a caracterização das formas terrestres, a partir da



descrição quantitativa das formas, e por medições da constituição física da Terra (Dikau et al., 1995). Chorley et al. (1957), define como o estudo que trata da geometria da superfície terrestre, entendendo que se trata de uma sub-disciplina da geomorfologia. Um conceito mais moderno foi dado por Pike et al. (2009), que define geomorfometria como a análise quantitativa da superfície terrestre.

Em geomorfometria, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são a principal fonte de informações. Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) representam, na forma de matriz, as variações do terreno, em uma grade regular. Todavia a acuidade com que o MDE representa a superfície depende do tamanho do *GRID* utilizado (Goodchild et al., 1993). Outra forma de representação do MDE é através do *TIN*, que são redes triangulares irregulares. O MDE pode ser obtido através de cartas topográficas, aparelhos restituídos, ortofotos, sensores multiespectrais e também por sensores de radar (Guimarães, 2000). A partir desses modelos digitais é possível extrair parâmetros e objetos. Os parâmetros se referem a uma superfície contínua de dados, como os parâmetros de declividade e de aspecto. Os objetos se referem a dados discretos, como por exemplo, uma rede hidrográfica.

A drenagem e suas respectivas bacias podem ser extraídas de um MDE a partir de técnicas baseadas em operações de vizinhança, onde os cálculos e as decisões são feitas para uma célula, com base nos valores das oito células que estão espacialmente adjacentes (Douglas, 1986). Contudo, esses modelos podem apresentar erros (ou artefatos) gerados ainda durante a aquisição dos dados, tais como picos e depressões artificiais. Essas depressões podem ser planificadas utilizando técnicas de preenchimento, no qual a célula é elevada até o valor da menor célula ao seu redor (**Figura 5**) (Janson e Domingue, 1988).

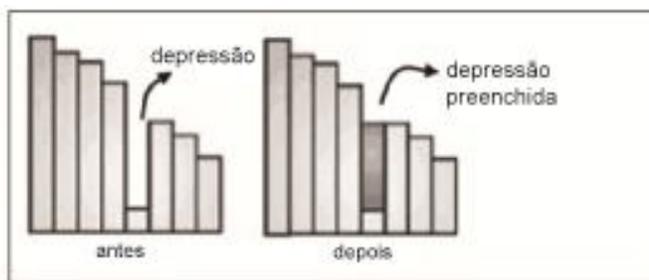


Figura 5 - Correção de pequenas depressões por meio da execução da função “fill sinks” (Fonte: adaptado de Sobrinho et al., 2010).

Outro problema recorrente em MDE é a inadequada consistência hidrológica. A maioria dos algoritmos utilizados para interpolar dados de elevação não considera os canais de



drenagem. Hutchinson (1988, 1989), desenvolveu o algoritmo ANUDEM para resolver essa questão. Esse algoritmo considera os dados vetoriais de redes hidrográficas e massas d'água na modelagem de uma superfície hidrologicamente correta, utilizando a técnica interativa de interpolação por diferenças finitas. O modelo hidrologicamente correto apresenta maior adequação com os estudos hidrológicos e geomorfométricos, no qual a direção de fluxo e a área de contribuição são parâmetros básicos.

Moore et al. (1991) denominam os atributos derivados diretamente de dados topográficos de atributos primários. A relação desses atributos primários com os estudos hidrológicos é relacionada conforme mostra a **Tabela 1**.

Tabela 1- Atributos primários de topografia (adaptado de Moore et al., 1991)

Atributo	Definição	Significância hidrológica
Altitude	Elevação	Clima, vegetação, energia (potencial)
Altura à montante	Área média da altura à montante	Energia (potencial)
Aspecto	Azimute da declividade	Irradiação solar
Declividade	Gradiente	Escoamento superficial e subsuperficial, velocidade e taxa de corrida
Declividade à montante	Declividade média à montante	Velocidade de corrida
Declividade (Dispersão)	Declividade média da área de dispersão	Taxa de infiltração no solo
Declividade (Captação)	Declividade média dentro da bacia	Tempo de concentração
Área à montante	Declividade média dentro da bacia Área de captação acima das linhas de contorno	Taxa de corrida estacionária e volume carreado
Área de dispersão	Área a jusante de linhas de contorno	Taxa de infiltração no solo
Área de captação	Área drenada para o exultório	Volume (corrida de massa)
Área de captação específica	Área à montante, por unidade de largura do contorno	Taxa de corrida estacionária e volume carreado
Comprimento do canal	Máxima distância do fluxo de água em relação a um ponto da bacia	Taxas de erosão, sedimentação e tempo de concentração
Comprimento à montante	Comprimento médio do fluxo em relação a um ponto na bacia	Aceleração do fluxo, taxas de erosão
Comprimento (dispersão)	Distância de um ponto na bacia ao exultório	Drenagem no solo (impedância)
Comprimento de captação	Distância do ponto mais elevado até o exultório	Atenuação do fluxo superficial
Curvatura (perfil)	Curvatura do perfil de declividade	Aceleração do fluxo, erosão/taxa de deposição



Curvatura (plana)	Curvatura do contorno	Fluxo convergente/ divergente, conteúdo de água no solo.
-------------------	-----------------------	--

Estes diferentes atributos de terreno podem ser facilmente extraídos a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Dentre os atributos apresentados, Moore et al. (1991) aponta a declividade como o parâmetro mais importante e mais utilizado em pesquisas que envolvem análises hidrográficas. Além da declividade, Bolongaro-Crevenna et al. (2005) também citam o aspecto, que se refere à orientação das vertentes, como elemento-chave em estudos da superfície.

Para Leopold et al. (1964) a bacia é a unidade geomórfica fundamental, sendo portanto, a base dos estudos ambientais. Strahler (1957) expõe que, em outros estudos analisados, bacias em diferentes localizações, em que a massa das rochas é homogênea (considerando a média dos valores), o comportamento geométrico tende a ser similar. Hack (1975), estudando o Vale Shenandoah, percebeu que a geometria das bacias hidrográficas, quando examinadas quantitativamente, estava estreitamente relacionada com os tipos de rocha e o potencial das forças de denudação. No entanto, os cálculos que envolvem área e perímetro de bacias não podem ser feitos com precisão completa dada a dimensão fractal, em diferentes escalas, dos limites associados a feições naturais (Breyer e Snow, 1992).

2.3. Análise multivariada de dados e a Análise de Grupos (*Clusters*).

A análise multivariada de dados consiste em um conjunto de métodos estatísticos para o tratamento de uma grande série de dados, ou que considere a análise de duas ou mais variáveis simultaneamente (Hair et al., 2006). O princípio básico da análise multivariada é que uma análise de dados separados pode não ser tão significativa quanto a análise do conjunto de dados. Analisar uma grande quantidade de dados já não é uma tarefa tão difícil, porque com o avanço atual de técnicas computacionais é possível extrair informações de maneira rápida e eficiente.

A estatística multivariada pode ser dividida em duas técnicas básicas, uma exploratória de simplificação, que se baseiam na independência entre as variáveis, e outra de inferências estatísticas, que se baseiam na dependência das variáveis (Mingoti, 2005). No primeiro grupo podemos enumerar a análise de principais componentes, análise fatorial, análise de correlações canônicas, análise de grupos, análise discriminante e análise de correspondência. No segundo grupo temos os métodos de estimação de parâmetros, testes de hipóteses, análise



de variância, covariância e regressão. Os métodos multivariados possuem grande relevância para simplificação da informação, agrupamento de elementos semelhantes e avaliação da dependência entre as variáveis.

Os dois princípios básicos das técnicas de análise multivariada são: reduzir as dimensões dos dados e analisá-los pela proximidade geométrica (Pereira, 2004). Considerando um espaço de duas ou mais dimensões, é possível traçar uma reta entre dois pontos, que representa a distância entre eles. O conhecimento das distâncias entre dados é essencial em análises de agrupamento. Nessa técnica as distâncias entre os objetos são calculadas, dentro do espaço multiplano, com todas as medidas realizadas (variáveis) e, em seguida, são realizados os agrupamentos (Pereira, 2004). Quanto mais próximos estão os objetos em estudo, mais fácil é agrupá-los. Para agrupar objetos semelhantes selecionam-se, através de técnicas estatísticas, centros de referência. Quanto mais próximo ao centro, maior a probabilidade de uma variável pertencer a determinado grupo. Entre os métodos mais conhecidos para determinação de distâncias estão: (1) distância Euclidiana; (2) distância de Mahalanobis; e (3) distância de Minkowsky. A diferença básica entre a métrica Euclidiana e a de Minkowsky é que o último é menos sensível à presença de valores discrepantes (Mingoti, 2005).

Os métodos de análise de grupos podem ser divididos em hierárquicos e não-hierárquicos. Os métodos hierárquicos são, em geral, utilizados para determinar os possíveis grupos. Esses métodos consistem em uma sequência de agrupamentos ou sucessivas operações que agregam ou desagregam os elementos. A representação dos grupos, em métodos hierárquicos, é feita a partir de diagramas bi-dimensionais, mais conhecidos como dendograma ou diagrama de árvore.

As técnicas não-hierárquicas, ou de particionamento, agregam os valores em K grupos, sendo que a quantidade de K é definida pelo pesquisador. Os grupos são definidos com base nos requisitos de coesão interna e isolamento (Mingoti, 2005). Nesse método, a variável estatística é uma combinação linear de variáveis com pesos determinados (Hair et al., 2006). Os pesos são determinados pela técnica empregada e o resultado corresponde ao conjunto de variáveis que melhor responde ao objetivo escolhido.

Entre os métodos mais usados de análise não-hierárquica de grupos está o K-médias (*K-mean*) e as redes neurais artificiais aplicadas à análise de grupos, como a dos mapas auto-organizáveis de Kohonen.



2.4. Os mapas auto-organizáveis de Kohonen e a análise de grupos.

O mapa auto-organizável de Kohonen faz parte das técnicas desenvolvidas no âmbito das redes neurais artificiais. A inspiração para o desenvolvimento dessas redes veio das neurociências. Na década de 40, Pitts e McCulloch (1943) procuraram descobrir como o cérebro produzia padrões complexos a partir da conexão entre as células de organismos inteligentes e como utilizar esse conhecimento no desenvolvimento de processos eletrônicos. No entanto, esse modelo ainda não era capaz de se adaptar ao aprendizado.

O funcionamento básico do neurônio pode ser definido por como os sinais são processados em suas partes constituintes (**Figura 6**). Cada dendrito capta os estímulos recebidos do meio e o transmite para o corpo, onde são processados. Após atingir o limite (limiar de disparo), o corpo do neurônio dispara um novo impulso que percorre o axônio e, através das sinapses que são intermediadas pelos neurotransmissores, atinge outras células nervosas vizinhas. Os estímulos ou sinais que chegam ao axônio são conhecidos como impulsos nervosos ou potenciais de ação, que serão processados como informação.

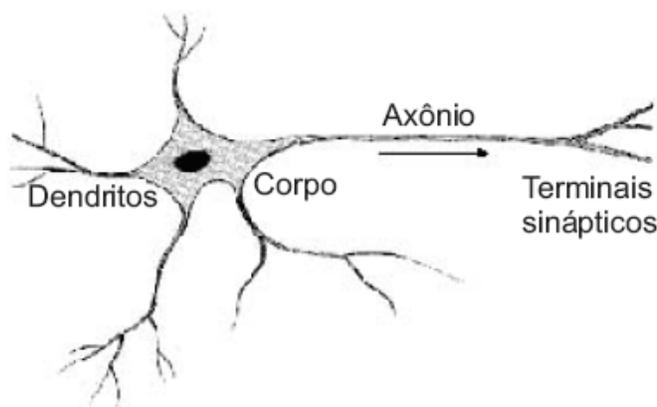


Figura 6 - Representação simplificada de um neurônio (Fonte: Ferneda, 2006).

A ideia sobre neurônios artificiais foi aprimorada por Rosenblatt (1958), com a criação do modelo *perceptron* e por Widrow e Hoff (1960), com o modelo *adaline*. O modelo *perceptron* apresentou um novo algoritmo de aprendizagem, que adapta os pesos internos do neurônio, resolvendo problemas de classificação linear. Esse conhecimento gerou grande entusiasmo na comunidade acadêmica, que acreditava ser possível levar esse conhecimento em direção a criação da inteligência artificial. Após severas críticas ao modelo (Minsky e



Papert, 1969), as redes neurais artificiais foram deixadas de lado, com exceção dos trabalhos de Fukushima, Grossberg, Hopfield e Kohonen.

De forma análoga ao modelo de funcionamento dos neurônios, as redes neurais artificiais utilizam duas componentes: uma de entrada (*input*) e uma de saída (*output*) (**Figura 7**). As duas saídas possíveis são “pulso” e “não-pulso” e as duas entradas poderiam ser excitatórias ou inibitórias (Kovács, 2006). Esse modelo (**Figura 7**) apresenta n conexões de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n), com seus respectivos pesos, ou parâmetros da rede, que representam a memória da rede (p_1, p_2, \dots, p_n). O cálculo dos sinais de entrada é dado por Σ , que acumula os sinais de entrada e prepara o disparo - caso o valor do sinal recebido seja maior do que o valor de soma - em direção a φ , que corresponde à função de ativação limite do sinal de ativação y , cujo valor é fixo (Ferneda, 2006).

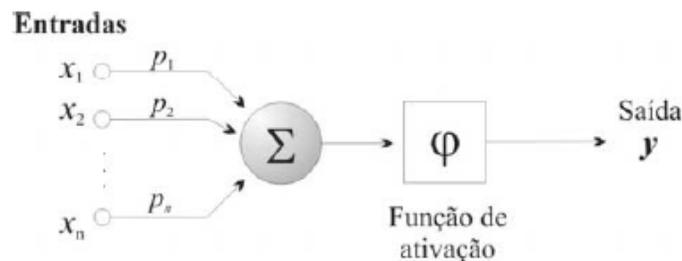


Figura 7 - Modelo matemático de um neurônio (Fonte: Ferneda, 2006).

Assim como o cérebro humano possui um período ótimo de aprendizagem, os neurônios artificiais também. Os neurônios artificiais podem ser treinados de forma a conduzir o processo a atingir as melhores respostas à aprendizagem. Cada treinamento possui suas regras e os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões dados. Aos diferentes tipos de aprendizado damos o nome de “algoritmo de aprendizado”.

A aprendizagem dos neurônios pode ser classificada de acordo com a maneira como a rede se relaciona com seu ambiente, ou seja, supervisionada ou não-supervisionada. Na aprendizagem supervisionada o valor desejado é dado ainda na etapa de treinamento como um padrão de entrada. Nesse tipo de aprendizagem, a rede mede as diferenças em relação ao comportamento de referência, e então corrige os pesos de maneira a reduzir este erro. A classificação não-supervisionada é mais utilizada quando não se dispõe de valores *a priori*. O objetivo do classificador é descobrir a correlação entre os valores de treino. Na aprendizagem



não-supervisionada, os pesos da rede são modificados em função de critérios do próprio modelo.

Entre o modelo das K-médias e os mapas auto-organizáveis de Kohonen, existem diversas similaridades, como o uso de distâncias métricas e a geração dos pontos de partida. A principal diferença entre esses dois modelos reside na capacidade de aprendizagem competitiva das redes de Kohonen.

O modelo de Kohonen permite algumas adaptações, portanto que se respeite os seguintes critérios: 1. o da determinação do número de *clusters*; 2. o da geração dos pontos de partida de cada *cluster*; 3. o das distâncias métricas entre um ponto e o centro; e 4. o do cálculo dos novos pontos centrais. Respeitando os critérios descritos, é possível modificar o SOM de Kohonen. Duas modificações muito utilizadas envolvem a constante de aprendizagem η . Na primeira, um valor η diferente é usado para o aglomerado vencedor e um valor ligeiramente inferior a η é usado para os aglomerados adjacentes. Isso faz com que o prêmio ser maior para no interior do *cluster* do que nos *clusters* adjacentes. Uma segunda variação desse algoritmo envolve a aceleração da convergência do algoritmo, com uma consequente deterioração gradual do valor de η após cada iteração (Wedding, 2009).

2.5. Os parâmetros morfométricos

Os parâmetros morfométricos podem ser extraídos tanto de Modelos Digitais de Elevação, quanto de dados vetoriais. Os parâmetros associados à área das bacias são: perímetro e índice de circularidade. Os que se relacionam a medida dos canais são o índice de sinuosidade e a densidade de drenagem (que também pode ser associada à área da bacia). Os parâmetros associados à topografia são: altimetria, curvatura, declividade, área de contribuição e direção de fluxo.

2.5.1. Amplitude Topográfica

Consiste na diferença da elevação entre altitude topográfica máxima (M) em relação à mínima (m), representado por:

$$AT = M - m \quad (2)$$

A maior limitação ao uso desse parâmetro foi dada por Evans (1972), que percebeu um declínio na correlação entre amplitude e declividade à medida que se aumentava a área de



estudo. No entanto, as análises de correlação feitas nesse estudo mostram uma boa correlação entre altimetria e declividade, como será visto mais a frente.

2.5.2. Curvatura

É calculado com base em um polinômio de quarta ordem a partir de uma grade de 3x3, representado pela equação polinomial (3):

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I. \quad (3)$$

A curvatura está relacionada à diferenciação quantitativa das áreas côncavas e convexas.

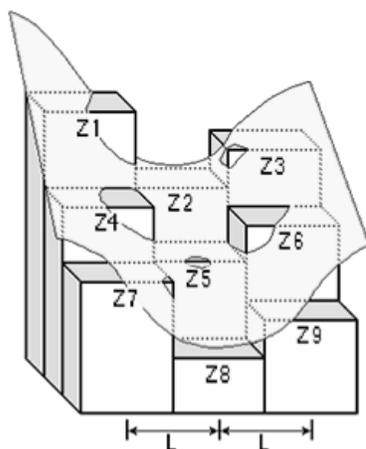


Figura 8 - Relação entre os coeficientes do polinômio e os nove valores de elevação (ESRI, 2007).

2.5.3. Direção de fluxo

O cálculo da direção de fluxo pelo método D8 se baseia em uma grade de 3x3, de acordo com os oito vizinhos próximos, adjacentes ou diagonais. O fluxo direcional é calculado de cada célula para a célula mais íngreme de seus vizinhos próximos (O'Callaghan e Mark, 1984). O problema desse método decorre da discretização de apenas uma entre as oito direções possíveis (Tarboton, 1997).

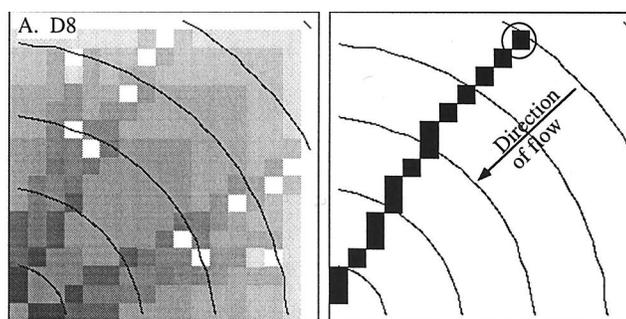


Figura 9 - Representação do modelo de direção de fluxo, pelo método D8, com o gradiente de elevação representado pelas linhas de contorno, analisando a influência de um *pixel* à montante (extraído de Tarboton, 1997).

O cálculo de direção de fluxo pelo método D-Infinito atribui um sentido de fluxo baseado na encosta mais íngreme de uma faceta triangular, a partir de uma grade 3x3, para calcular a influência dos oito vizinhos próximos no fluxo a jusante. A área a montante é calculada não de acordo com os pontos cardeais, como no modelo D8, mas sim pela distribuição proporcional do fluxo de um *pixel* entre os dois *pixels* a jusante, considerando a proximidade do *pixel* ao ângulo do fluxo (Tarboton, 1997).

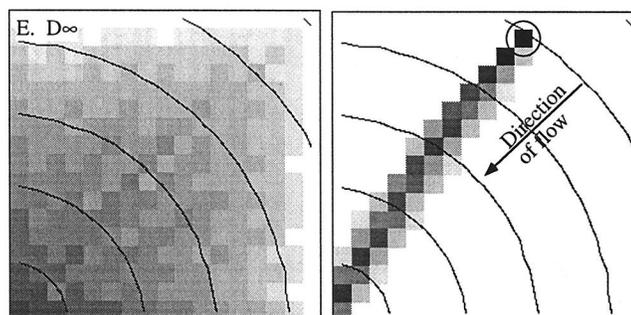


Figura 10 - Representação do modelo de direção de fluxo, pelo método D-Infinito, com o gradiente de elevação representada pelas linhas de contorno, analisando a influência de um *pixel* à montante (extraído de Tarboton, 1997).

2.5.4. Acumulação de fluxo

Contém o número de células a montante que fluem para um determinado ponto ou célula à jusante. É calculada com base nos oito vizinhos possíveis.

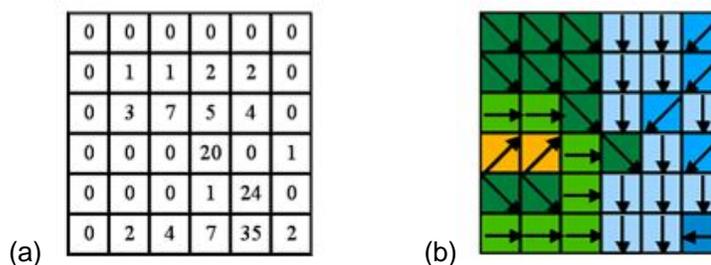


Figura 11- (a) Número de células que fluem por cada célula e (b) a representação vetorial do caminho do fluxo (ESRI, 2007).

O cálculo de acumulação de fluxo representa o total de chuva que flui por cada célula, considerando que não há perdas por interceptação, evapotranspiração, ou perdas no subsolo (ESRI, 2007).

2.5.5. Declividade

É calculado a partir da taxa máxima de variação dos valores de uma célula para seus vizinhos, a partir de uma grade de 3x3 (Burrough e McDonell, 1998).

2.5.6. Área

Corresponde a área drenada pelo sistema fluvial, cujo limite é dado pelos divisores topográficos. Esse parâmetro é básico em diversos cálculos em bacias.

A área da bacia é um dos principais fatores determinantes do escoamento superficial e da produção de sedimentos (Strahler, 1957).

2.5.7. Perímetro

É o comprimento da linha imaginária ao redor das bacias. Esse parâmetro possui como fator limitador sua dependência com relação à escala (Roche, 1963);

2.5.8. Índice de Circularidade

É a razão entre a área da bacia (A) e a área de um círculo com o mesmo perímetro da bacia (P) (Miller, 1953), representado por:

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4)$$

Esse índice varia de 1 a 0. Em bacias com maior circularidade, os valores que são maiores que 0,51 mostram uma tendência da bacia à inundação. Em bacias mais alongadas,



com valores menores que 0,5, a tendência à inundação é menor, favorecendo o escoamento (Müller, 1953; Schumm, 1956).

2.5.9. Índice de sinuosidade

Esse índice é usado para relacionar o comprimento do canal à distância vetorial entre dois pontos extremos do canal de drenagem (Schumm, 1963). A sinuosidade do canal está relacionada à carga de sedimentos, à litologia, à estruturação geológica e à declividade dos canais (Lana et al., 2001). O comprimento do canal principal é simbolizado por L e o comprimento vetorial do canal principal é simbolizado por L_v . Valores entre 1 e 1,5 indicam canais sinuosos. Acima de 1,5 o canal já é considerado muito sinuoso, apresentando meandros. Além disso, a sinuosidade possui correlação com a declividade e pode ser usado para diferenciar rios perenes, intermitentes e efêmeros (Restrepo e Waisanen, 2004).

$$I_s = L/L_v \quad (5)$$

2.5.10. Densidade de drenagem

Esse parâmetro foi definido por Horton (1945) e é definido pelo comprimento total (L_t) dos canais dividido pela área da bacia (A). Corresponde à capacidade da água de infiltrar no terreno. Além disso, esse parâmetro também se relaciona com descarga média nos canais, à precipitação anual e a quantidade de sedimentos produzidos (Mark, 19750).

$$D_d = L_t/A \quad (6)$$

2.6. A classificação de bacias hidrográficas

Os mapas, em geral, possuem a capacidade de sintetizar um mundo complexo, multidimensional e dinâmico em uma superfície plana (Tufte, 1990). Eles representam uma realidade simplificada, seja de forma artística ou técnica. O objetivo de qualquer mapeamento é sintetizar a realidade, para torná-la mais inteligível, isso pode ser feito a partir de técnicas de classificação dos atributos naturais. O mapeamento é especialmente usado quando se trata de tornar mais racional o uso dos recursos e frequentemente é utilizada em projetos de zoneamento urbano e ambiental, impacto ambiental e levantamentos de aptidão do terreno.

Os primeiros mapas a representar a superfície, com bases científicas, foram editados na década de 50, na Polônia e estavam vinculados ao planejamento econômico (Florenzano, 2008). Esses se baseavam em descrições de campo e eram representados, principalmente, na



forma de diagramas de blocos (Gustavsson, 2005). As informações levantadas nos mapeamentos realizados na década de 50 serviram para auxiliar o planejamento do Estado, além de ser uma importante fonte de informações para a engenharia. A preocupação principal dos geomorfólogos desse período era descrever a superfície com o máximo de detalhes, o que levou a produção de mapas demasiadamente complexos.

A partir do final da década de 50, início da década de 60, ocorre um avanço técnico acelerado impulsionado pela utilização do aerolevanteamento, que por sua vez ganhou força com a introdução de novos sistemas de aerotransporte, ainda durante a 2ª Guerra Mundial. Essa técnica se tornou a principal em estudos geomorfológicos. Posteriormente, devido à corrida espacial, surgiram os sistemas de sensoriamento remoto, que possibilitaram o estudo de áreas de difícil acesso, aumentando o volume de informações geomorfológicas. A aquisição de imagens por radar, por exemplo, abriu novas possibilidades para os estudos quantitativos. No mesmo período, surge a escola da geografia quantitativa (*New Geography*), que se aproxima da lógica científica do positivismo. Essa nova escola influenciou a moderna pesquisa de mapeamentos, que se deu em torno de cinco conceitos básicos: morfologia, morfometria, morfogênese, morfocronologia e morfodinâmica (Hayden, 1986). A ênfase passa a ser na técnica empregada, sendo a análise espacial e a geoestatística ferramentas de uso corriqueiro entre os pesquisadores dessa escola. Vários conceitos, utilizados na estatística, na matemática e na informática passam a ser comuns na ciência geomorfológica, como o conceito de autocorrelação espacial, que expressa a relação entre variáveis próximas e o conceito de processo estacionário, na qual as relações são medidas de acordo com a distância entre as variáveis (Câmara et al., 2001).

Mais recentemente, as técnicas de classificação de imagens de satélite supervisionadas e não-supervisionadas passaram a ser utilizadas em estudos ambientais. Entre os métodos mais recentes, podemos citar a Classificações Orientadas ao Objeto (COO), que combinam diversos elementos de imagens, como forma, textura, área, escala e os relacionamentos dos objetos, o que permite a análise do *pixel* em seu contexto e não isoladamente. A maior limitação da COO é sua dependência com o conhecimento do pesquisador em relação a sua área de estudo (Bittencourt, 2006). Outras técnicas de mapeamento incluem a classificação dos parâmetros morfométricos (Dikau et al., 1995), aplicação de filtros (Sulebak et al., 1997), análise de clusters e análise multivariada (Adediran et al., 2004).



3. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em seis partes: (1) tratamento do produto *Hydrosheds* do SRTM; (2) delimitação automatizada de bacias; (3) cálculo dos atributos morfométricos; (4) classificação das bacias hidrográficas a partir do método adaptado de mapas auto-organizáveis de Kohonen, (5) classificação das bacias hidrográficas a partir do método de K-médias e (6) análise comparativa das classificações e dos atributos morfométricos.

3.1. Tratamento do produto *Hydrosheds* do SRTM

O SRTM (Space Shuttle Topographic Mission) é um radar InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), a bordo do ônibus espacial Endeavour, lançado em Fevereiro de 2000. Esse ônibus transportava dois radares de abertura sintética, um sistema de banda C (5,6 cm; C RADAR) e um sistema de banda X (3,1 cm; X-RADAR) (Farr et al., 2007).

Os dados topográficos foram adquiridos a partir de um único voo que abrangeu 80% da superfície da terra em apenas 11 dias, entre as latitudes 60 ° N e 57 ° S e, como produto, foram gerados modelos tridimensionais de alta qualidade e com duas resoluções espaciais de 1 arc sec (30 metros) e 3 arc sec (90 metros) com datum WGS84 horizontal e datum vertical WGS84/EGM96, cuja precisão vertical é da ordem de 5 metros (Smith e Sandwell, 2003). O sistema de aquisição de dados contínuo desse radar (dia e noite, e com cobertura de nuvens) garantiu a obtenção de dados homogêneos em todo o globo, tornando o SRTM uma ferramenta importante para estudos da superfície terrestre (Van Zyl, 2001; Rabus et al., 2003; Smith e Sandwell, 2003).

O objetivo do *Hydrosheds* (SRTM versão 4.1) é fornecer informações hidrográficas em formato consistente e abrangente. O método usado para gerar esse produto combina as vantagens dos subprodutos SRTM-3 e do DTED-1 (Digital Terrain Elevation Data). Originalmente, os dados do SRTM-3 não representam corretamente as linhas costeiras e as superfícies de água, como em lagos, rios de maior porte e deltas. Porém, os dados do DTED-1 foram especificamente corrigidos para atenuar esses problemas. Com esses dois produtos combinados é possível reduzir os ruídos de alta frequência, comuns em dados de radar. No entanto, comparando-se o *Hydrosheds* com os dados SRTM originais, percebe-se uma significativa diferença na elevação. Isso se deve aos ajustes realizados para eliminar os artefatos criados após a sobreposição das duas grades (Lehner et al., 2006). Os dados originais do SRTM apresentam áreas com “vazio de dados” (*no-data*), principalmente em regiões com corpos d’água de maior extensão. Esse efeito negativo também ocorre em áreas montanhosas,



onde os efeitos de sombra do radar são mais pronunciados. A ausência de dados confiáveis em Modelos Digitais de Elevação é um sério problema para geração de modelos hidrológicos, porém, dois modelos de preenchimento de “vazios” foram implementado no *Hydrosheds* com a finalidade de eliminar esse erro e criar uma superfície contínua: (a) o algoritmo desenvolvido por Jarvis (2004), que cria uma superfície suavizada por interpolação; e (b) um algoritmo específico para o *Hydrosheds* que realiza uma Análise Interativa de Vizinhaça. O primeiro cria uma superfície interpolada suavizada, enquanto o segundo realiza uma Análise Interativa de Vizinhaça para resolver os problemas de falta de dados em áreas baixas e/ou planas. Além disso, foi feita uma identificação visual das possíveis depressões artificiais, que posteriormente foram convertidas em *no-data* (Lehner et al., 2006).

Os dados do modelo *Hydrosheds* foram baixados do sítio da *U.S Geological Service* (<http://hydrosheds.cr.usgs.gov/>), com resolução de 450m, juntamente com os vetores de drenagem e com a direção de fluxo ajustada. Devido ao propósito do presente estudo, que é realizar uma análise regional, foi adotado os dados de 450m.

3.2. Delimitação das bacias

As bacias foram extraídas de forma automática utilizando-se o algoritmo *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models – Taudem* (Tarboton, 2005). Neste algoritmo utilizou-se como dado de entrada o modelo *Hydrosheds* de 450m, com a imposição dos canais de drenagem, com rebaixamento de 100 metros. Essa drenagem vetorial é fornecida pelo próprio modelo (*Hydrosheds*). A partir desse atributo, o *Taudem* calcula os demais atributos necessários para delimitação das bacias, como os mapas de direção de fluxo (D-Infinito e D8), declividade, área de contribuição (a partir dos métodos D-infinito e D8) e um novo MDE, com preenchimento de pequenas depressões. O preenchimento artificial não afeta os canais de drenagem rebaixados. Esses mapas servirão de base para o processamento da rede de drenagem e das bacias.

O *Taudem* gera uma delimitação automática da drenagem. Com base nessa rede vetorial gerada pelo *Taudem* são geradas três grades (*rasters*): (1) uma para o maior comprimento de fluxo pelo método da direção de fluxo D8, (2) uma grade com o comprimento total de todos os fluxos e (3) uma grade com a ordem dos canais pelo sistema hierárquico de Strahler.

Para gerar as bacias, o *Taudem* utiliza o MDE, seus derivados e a rede drenagem, em *raster*, com a hierarquia de Strahler. Primeiramente, é aplicado um filtro sobre o modelo de terreno, para suavizar a superfície e em seguida é calculada a curvatura (Douglas e Peuke,



1975). Para dar conexão entre as áreas resultantes, o *Taudem* utiliza o mapa de área de contribuição. Os limites da bacia são calculados de acordo com a fórmula AS^y , sendo que A é a área de captação e S a inclinação pelo método D-infinito. Montgomery e Dietrich (1992) sugeriram que o expoente y seja igual a 2, e esse é o padrão usado pelo *Taudem*. Quando não previamente direcionado, esse algoritmo cria, automaticamente, uma rede de drenagem pelo método de Strahler.

No entanto, o modelo não gera a separação das bacias que correspondem aos canais sem ordem definida (**Figura 12.a**). Para resolver esse problema, foi realizada a separação dessas bacias tendo como base os canais de drenagem (**Figura 12.b**). Essa divisão se deve às limitações de escala do dado original. Com esse procedimento foi possível adensar o número de bacias, o que permitiu agrupar mais bacias e individualizar mais unidades, de acordo com a homogeneidade das áreas.

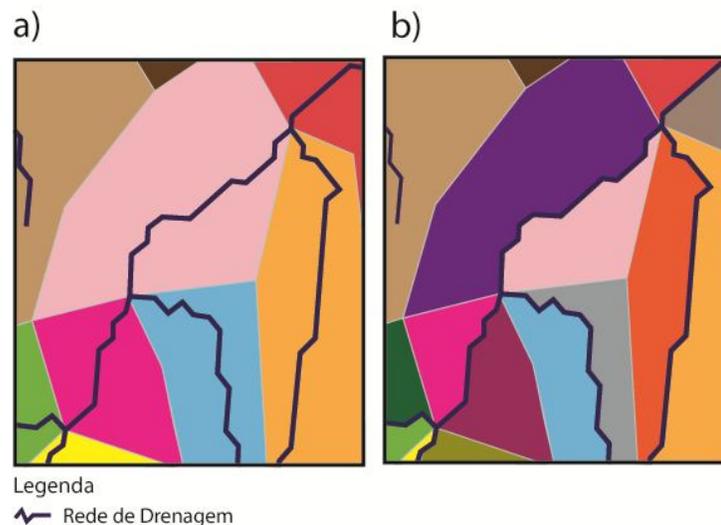


Figura 12 - Exemplo da delimitação das bacias pelo *hydrotools* sem a divisão das bacias (a), e com a divisão das bacias (b).

3.3. Cálculo dos atributos morfométricos das bacias hidrográficas

No presente estudo foi utilizado o parâmetro linear de sinuosidade e densidade de drenagem; os parâmetros zonais de área, perímetro e índice de circularidade e os parâmetros hipsométricos de altimetria (máxima e mínima), declividade, aspecto, área de contribuição, direção de fluxo e curvatura. Esses parâmetros foram normalizados pela amplitude dos dados. A normalização é uma etapa importante, pois possibilita que dados de dimensão ou amplitude distintos possam ser comparados.



Os parâmetros extraídos dos mapas de elevação, juntamente com seus derivados, foram feitos com base na área das sub-bacias utilizando-se o módulo *Zonal Statistics*, do ArcGIS. O índice de circularidade e a densidade de drenagem foram calculados com base nos dados vetoriais de bacias e da rede de drenagem. Os atributos relativos à área e perímetro foram calculados a partir do módulo X-Tools do ArcGIS. A sinuosidade foi calculada no ArcGIS, com base na expressão disponibilizada pela Michigan Tech (2011).

3.4. Classificação das bacias hidrográficas a partir do método das K-médias.

O método de *K-mean*, ou K-médias executa uma análise interativa, alternando processos de adaptação. Ele executa uma abordagem chamada algoritmo EM, onde E correspondem às expectativas e M corresponde a aproximação com o *cluster* mais próximo. Suas possíveis aplicações incluem métodos para agrupamento por similaridade, previsões não-lineares, distribuição multivariada aproximada e testes não-paramétricos (MacQueen, 1967). Cada ponto de uma tabela, que contém todos os atributos morfométricos normalizados, é relacionado a um centróide. A distância entre os pontos e o centróide é calculada a partir do método Euclidiano. A classificação se dá, justamente, pela aglomeração de pontos ao centróide mais próximo. É possível entrar com o número de centróides, ou seja, de classes que se deseja. Cada ponto corresponde somente a um centróide, se tratando, portanto de um sistema *hard clustering*. O programa utilizado para aplicar essa estatística foi o JMP (versão 7), da SAS Institute. O algoritmo do K-médias apresenta as seguintes etapas (Bação et al., 2005):

- 1) O valor pré-definido K corresponde ao número de centróides. O número de padrões de treinamento é dado por n . A sequência de padrões de treinamento é dada por x_1, x_2, \dots, x_n . P corresponde ao conjunto de K centróides $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ extraídos de X . η é a taxa de treinamento, inicializada com m valor dentro de $]0, 1[$.
- 2) O processo é repetido para $i=1$, para n .
- 3) Encontra-se o centróide $\mu_j \in P$, próximos a x_i .
- 4) Atualiza-se μ_j adicionando $\Delta\mu_j = \eta(x_i - \mu_j)$
- 5) O valor de η é diminuído até atingir 0.

O método K-médias utiliza o quadrado da distância euclidiana (d^2) entre os centróides e o dado, considerando um espaço R^n , onde x são as coordenadas dos vetores de entrada e μ é a média do grupo.



$$R^n \rightarrow d_i = \sqrt{(x_1 - \mu_{i1})^2 + (x_2 - \mu_{i2})^2 + \dots + (x_n - \mu_{in})^2} = \quad (7)$$

$$d_i^2 = \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_{ij})^2 \quad (8)$$

3.5. Classificação das bacias hidrográficas a partir do método adaptado de mapas auto-organizáveis de Kohonen

Os Mapas Auto-Organizáveis – *Self-Organized Maps* (SOM) se baseiam em um sistema de aprendizado competitivo, que extrai características de um conjunto de dados de treinamento. É também um modelo não-supervisionado onde os padrões são buscados dentro dos dados de entrada. Para este trabalho foi utilizado o programa JMP (versão 7), da SAS Institute. Este programa utiliza uma versão adaptada do modelo de Kohonen.

Os neurônios se organizam em duas camadas (input e output). Esses neurônios, que tem conexão com todos os elementos dos vetores de entrada, competem entre si, em resposta a um estímulo. A partir de um conjunto de pesos iniciais, que são definidos aleatoriamente, o algoritmo de treinamento do SOM realiza uma auto-organização destes neurônios de forma que os mesmos passem a representar características do conjunto de treinamento (Kohonen e Mäkisara, 1989; Kohonen 1982). Os neurônios agrupam-se, de forma topologicamente organizada - de camada simples, unidimensional ou bidimensional - em grupos que correspondem a uma classe, conforme pré-definição. No entanto, o SOM apresenta como desvantagem uma imprecisão na definição de fronteiras entre os *clusters* (Labiod et al., 2010).

O cálculo desses grupos foi realizado no programa JMP, da SAS Institute. O algoritmo utilizado pelo SAS, assim como o K-médias, utiliza a distância euclidiana entre os centros. O algoritmo utilizado é uma versão mais simples do SOM, que poderia ser chamado algoritmo em lote usando uma suavização local-linear ponderada. O objetivo de um SOM não é só formar *clusters*, mas formá-los sobre uma grade de *clusters*, tal que os pontos que são mais próximos uns dos outros, na grade do SOM, estejam também perto um do outro no espaço multivariado. O algoritmo que descreve o processamento feito pelo SAS é:

- 1) No primeiro passo é feita uma análise das principais componentes para capturar as duas direções onde a variação de dados é maior. A seleção das sementes, que forneçam uma boa cobertura do espaço multidimensional, nessa etapa é fundamental.



- 2) O programa então estabelece uma grade nesse espaço das componentes principais, com distância de 2.5 (desvio padrão) das bordas até o meio, em cada direção. As sementes são formadas trazendo de volta essa grade ao espaço original das variáveis.
- 3) Os clusters são atribuídos pelo método das K-médias, em que cada ponto é associado ao *cluster* mais próximo.
- 4) O valor de K é estimado para cada cluster, como no método das k-médias. O programa então utiliza esses valores para criar uma regressão ponderada. A função ponderada usa uma função ‘kernel’, que atribui pesos aos clusters cujos centróides serão estimados. Nesse, os centróides mais distantes recebem menores pesos. Os novos clusters serão valores previstos ainda durante a regressão.
- 5) Essas interações se processarão até atingir a convergência.

O SOM utiliza a análise de principais componentes (APC). O APC é um método multivariado utilizado para analisar o arranjo entre variáveis correlatas, além disso, esse método reduz a dimensão dos dados, realizando um agrupamento preliminar. A APC transforma um vetor $x \in \mathbb{R}^m$ em outro $y \in \mathbb{R}^n$ ($n \leq m$), em que x é projetado nas n direções de maior variância, ao qual denominamos as componentes principais.

Arcoverde et al. (2011), utiliza os mapas auto-organizáveis para identificação de áreas prioritárias para recuperação florestal, tendo como base as sub-bacias do trecho paulista da Unidade de Gerenciamento de Recursos do Rio Paraíba do Sul. Raju e Kumar (2011) também utilizam as redes neurais de Kohonen para classificar e descrever o comportamento morfométrico de bacias com base nos parâmetros de densidade de drenagem, relação de bifurcação, frequência, comprimento do fluxo superficial, fator de forma, relação de alongamento, circularidade, compacidade, relação de textura, e conclui que os resultados foram adequados para determinar cinco grupos básicos de bacias.

3.6. Análise comparativa das classificações e dos atributos morfométricos

Nesta etapa é realizada uma análise comparativa entre os métodos de classificação e dos atributos morfométricos com o propósito de compartimentar o relevo. A escolha da melhor classificação, para cada método estatístico utilizado, é feita comparando-se as classificações com os mapas de altimetria, declividade, curvatura, direção de fluxo e área de contribuição. O conjunto de atributos é escolhido com base nos critérios de continuidade espacial e compatibilização com a escala de trabalho (1:1.000.000).



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

O MDE do *Hydrosheds* apresenta-se adequado para o presente estudo, contendo a consistência hidrológica do modelo de elevação e o preenchimento de algumas regiões com *no-data*, o que diminui a necessidade de pré-processamentos. Os únicos processamentos operados nessa fase foram o preenchimento de depressões remanescentes e a mudança da Projeção Geográfica (WGS-84) para a Projeção Cônica Conforme de Lambert. A Projeção Conforme de Lambert é utilizada em mapeamentos de grande extensão. A distorção, em área, desse sistema de projeção é maior quanto mais afastada do paralelo de referência. Com esse tipo de projeção é possível aferir informações de área e perímetro na escala métrica.

A resolução do *Hydrosheds* utilizada nesse trabalho foi de 450m (15 arc-segundos). Os dados são originalmente captados com 3 arc-segundos, no entanto o *Hydrosheds* foi reinterpolado para 15 arc-segundos com o objetivo de facilitar o processamento da rede de drenagem. Nas **Figuras 13 e 14** é apresentada uma breve avaliação do modelo.

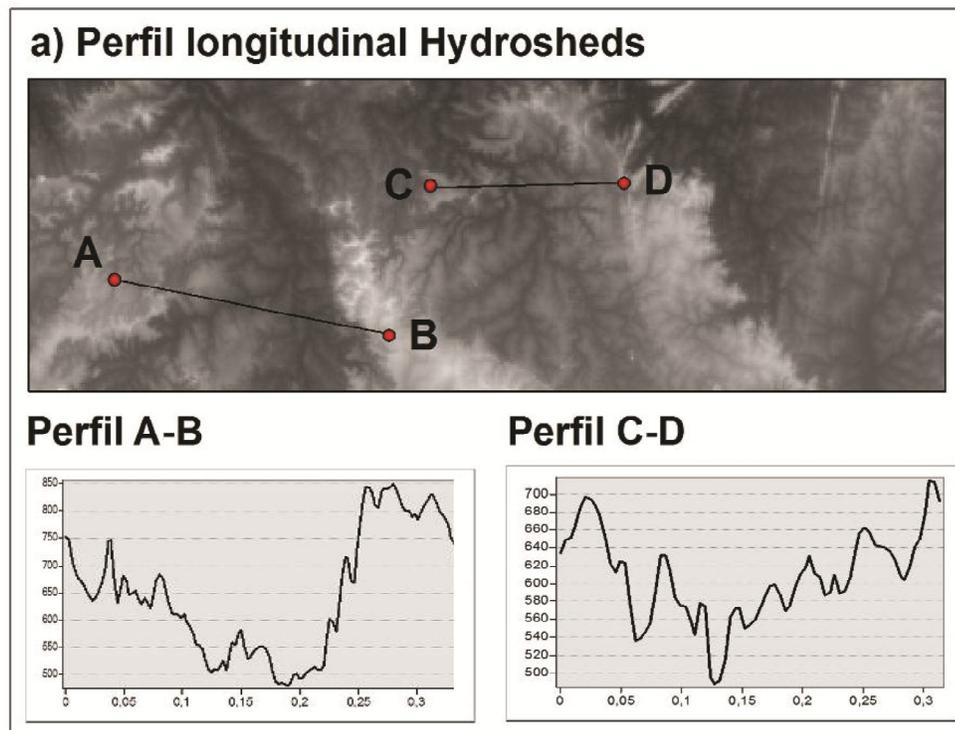


Figura 13 - Perfil topográfico longitudinal A-B e C-D.

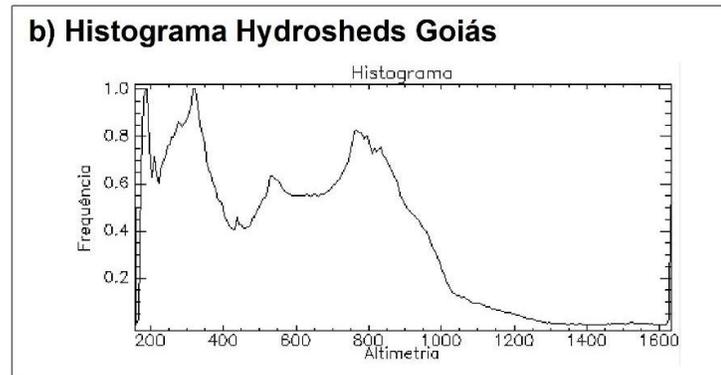


Figura 14 - Histograma de frequência dos valores de altimetria do modelo *Hydrosheds*.

Analisando os dois perfis topográficos (**Figura 13**), é possível perceber que as feições de picos e vales foram bem delineadas. Esse modelo já vem disponível com a consistência hidrológica e o preenchimento de algumas regiões com *no-data*, o que diminui a necessidade de pré-processamentos. Ainda, o modelo reinterpolado para 450m já possui uma suavização inerente ao processo.

Com relação ao histograma de frequência (**Figura 14**) dos valores de elevação dentro dos limites do Goiás, é possível perceber uma maior concentração entre as cotas de 190 e 1000m. Essas regiões de menor altitude estão relacionadas às Superfícies Regionais de Aplainamento conforme classificação de GOIÁS (2005), que ocupam as maiores áreas. As zonas de maior altitude relacionam-se às Zonas de Erosão Recuante e aos Morros e Colinas, que ocupam menores áreas (GOIÁS, 2005). Com base no *Hydrosheds* de 450m, foram gerados os mapas derivados apresentados abaixo :

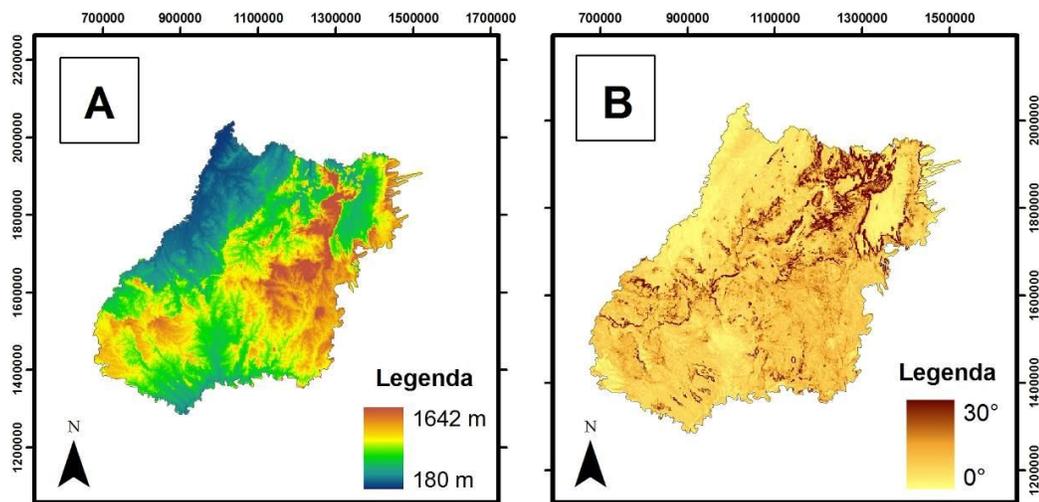


Figura 15 - Mapas morfométrico de altimetria (a) e declividade (b).

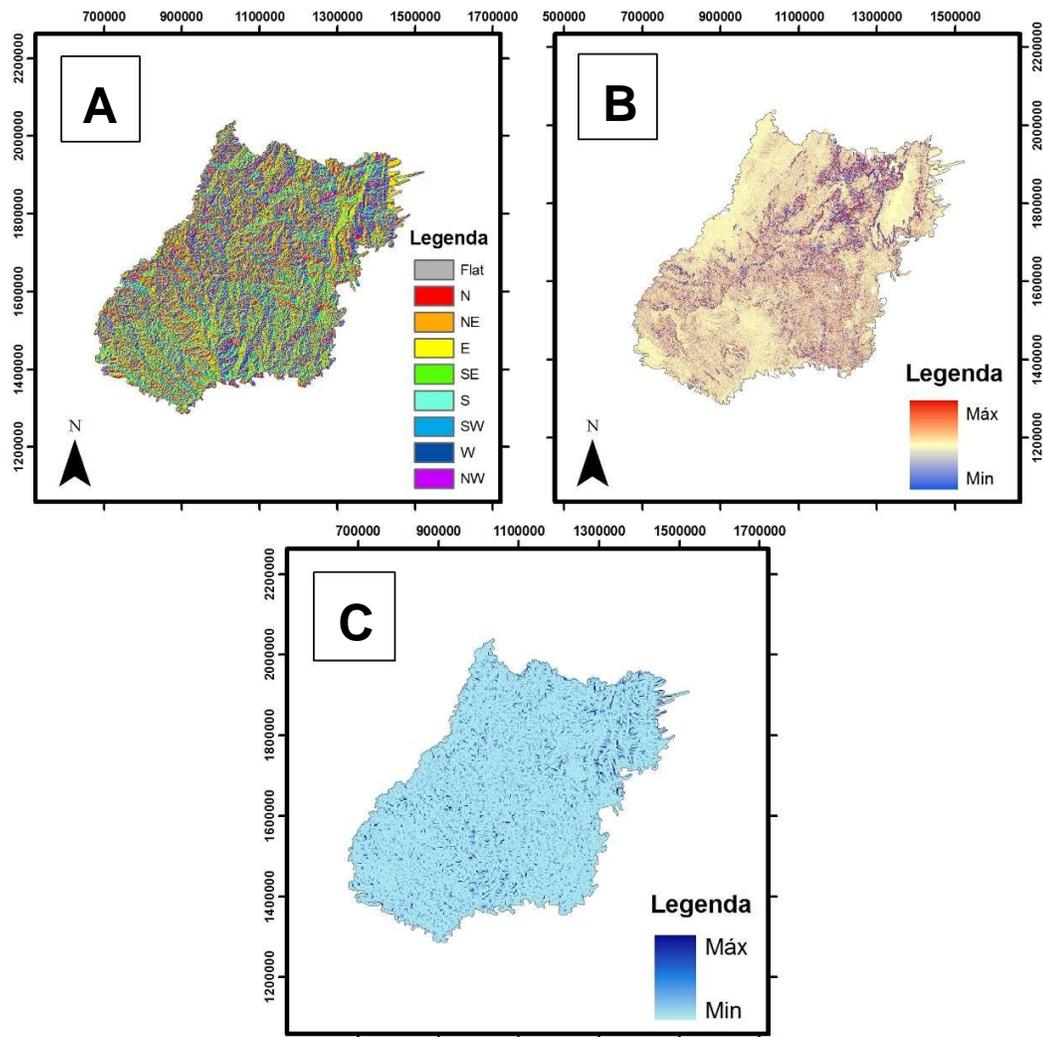


Figura 16 - Mapas morfométrico de aspecto (a), curvatura (b) e área de contribuição (c).

O Goiás possui uma amplitude topográfica de 1462m, sendo a maior cota, conforme o modelo utilizado, de 1642m, e menor cota, 180m (**Figura 15.a**). A declividade varia até 30°, sendo que, as maiores declividades são identificáveis à nordeste do estado, próximas ao Vale do Paranã, ou Vão do Paranã (**Figura 15.b**). Quanto ao aspecto, predominam as feições voltadas para o norte, sudeste e leste (**Figura 16.a**). A curvatura é maior, principalmente, nas regiões limítrofes entre as áreas de maior e menor altitude, com exceção da área a sudeste, de baixa altitude, mas com uma grande concentração de áreas com curvaturas próximas ao máximo (**Figura 16.b**). O mapa de área de contribuição tende a apresentar menor variação espacial, sendo que as áreas com maior acumulação encontram-se nos vales.



Com base na altimetria e nos mapas derivados foram geradas 6930 bacias hidrográficas, a partir do conjunto de algoritmos do *Taudem* (Tarboton, 1997), extraídas automaticamente (**Figura 17**).

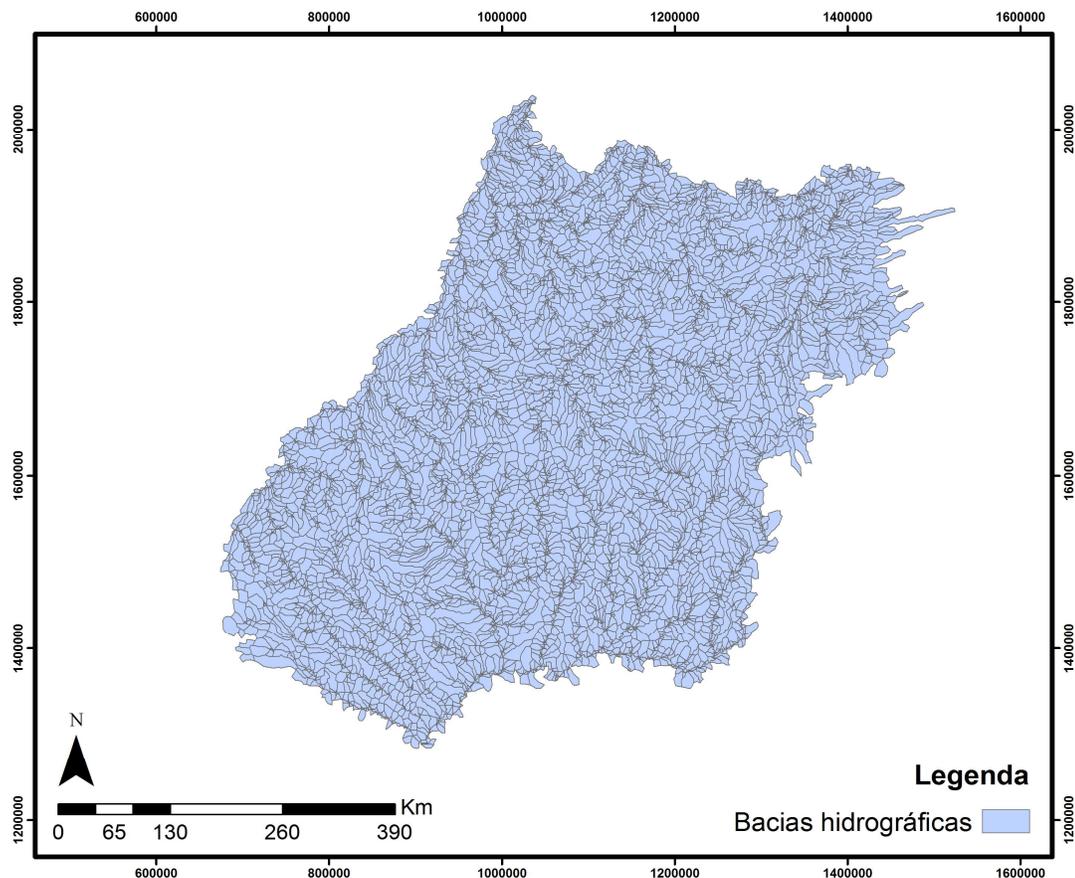


Figura 17 - Bacias hidrográficas do estado de Goiás, com incisão dos canais de drenagem.

Após a incisão da drenagem, dividindo as bacias, houve um adensamento da quantidade de bacias. Esse adensamento modificou o histograma de distribuição das bacias hidrográficas por área. Antes da divisão (**Figura 18**), o histograma apresentava maior dispersão de bacias entre as classes de área de 0 a 300 Km². Observando o segundo histograma (**Figura 19**), é possível perceber uma maior concentração de bacias entre as classes de 0 a 150 Km², por razões lógicas. O adensamento modificou a área da bacia e, conseqüentemente, as medidas morfométricas que tem como base a área. Esse procedimento não altera o funcionamento do sistema físico da bacia. As bacias divididas continuam a ser caracterizadas pela área drenada que chega ao canal. Além disso, essa divisão respeita o gradiente topográfico. A diferença, em



relação às bacias de primeira ordem, é que seus limites são definidos tanto pelo divisor topográfico, quanto pelo canal de drenagem.

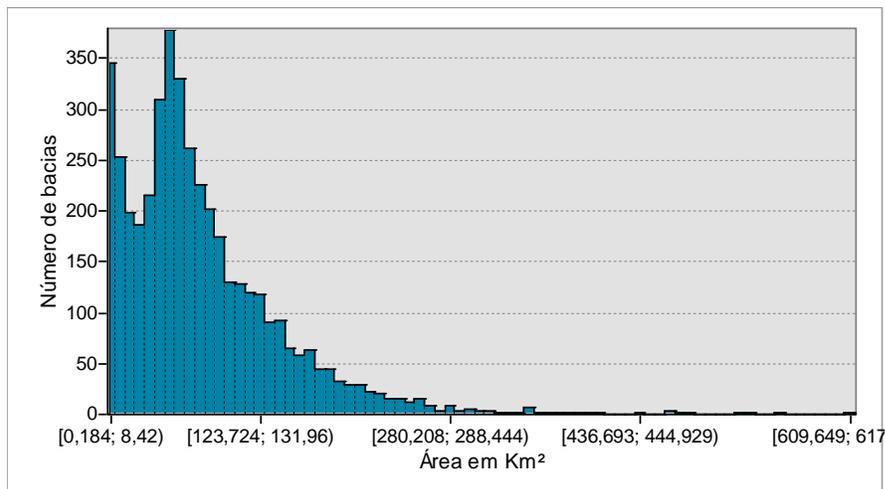


Figura 18 - Histograma da quantidade de bacias por área antes da incisão da rede de drenagem.

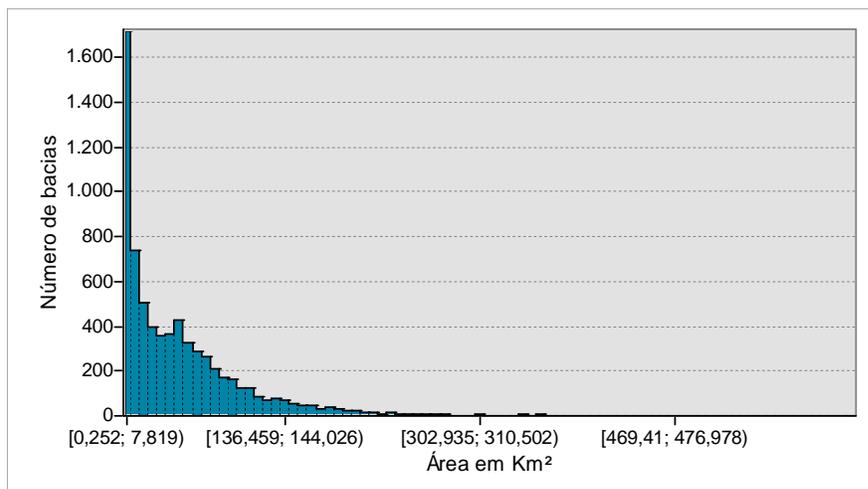


Figura 19 - Histograma da quantidade de bacias por área depois da incisão da rede de drenagem.

Os parâmetros escolhidos têm como base o conhecimento acumulado com os trabalhos de Oliveira et al. (2007), Sodré et al. (2007) e Menke et al. (2008). O cáculo e a jun o dos parâmetros aos polígonos de bacias foi feito utilizando o módulo *ZonalStatistics* do ArcGIS. A princípio, consideraram-se os parâmetros de altimetria (amplitude, desvio padrão, média, máxima e mínima), declividade (média, máxima e mínima), curvatura (média, máxima e mínima), aspecto (médio, máximo e mínimo), área de contribui o (média, máxima e



mínima), direção de fluxo (média, máxima e mínima), área, perímetro, índice de circularidade, índice de sinuosidade média e densidade de drenagem, que foram relacionados em uma matriz de dispersão, conforme apresentado nas **Figuras 20 e 21**.

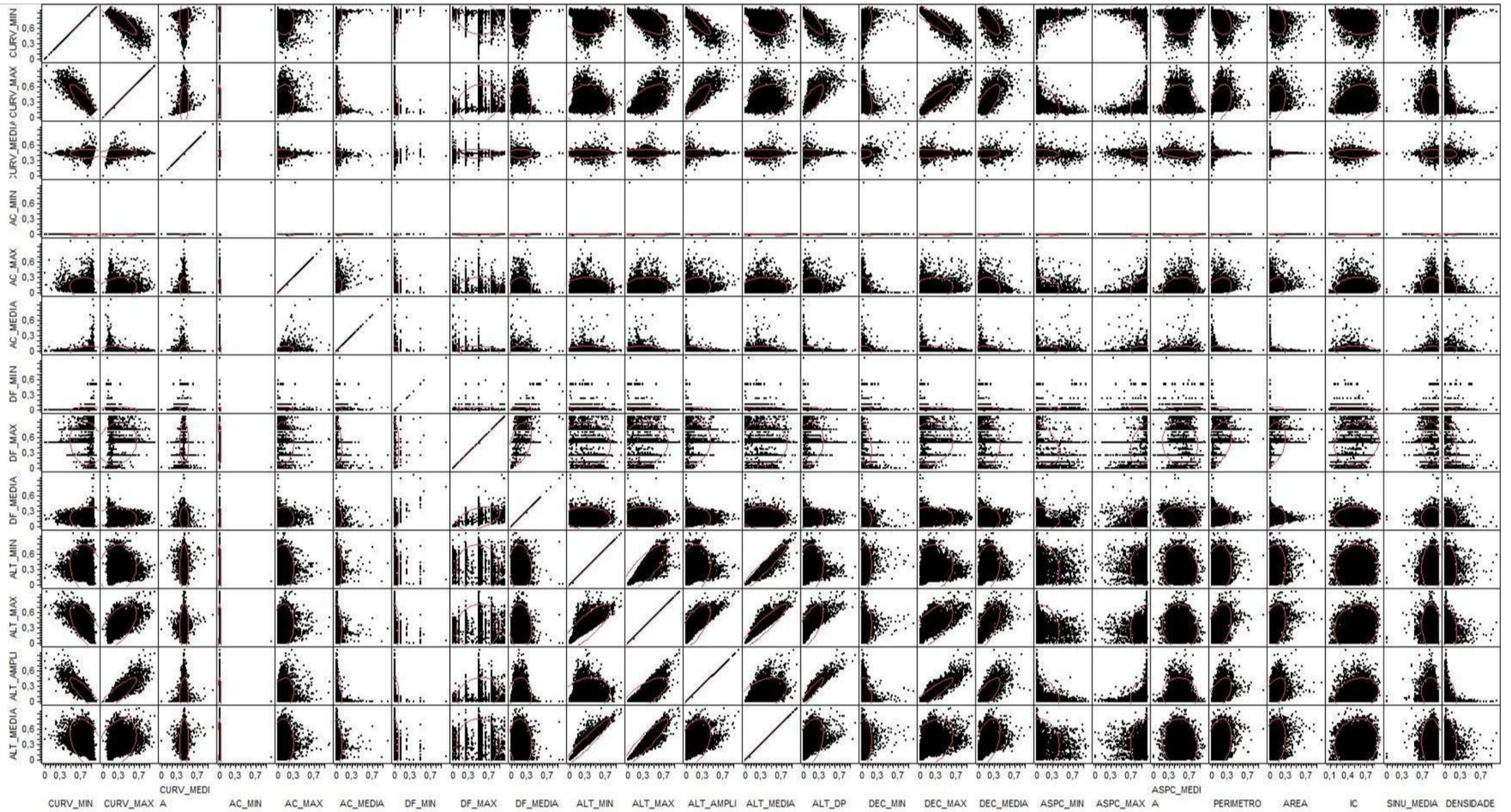


Figura 20 – Matriz de dispersão dos parâmetros morfométricos, parte 1.

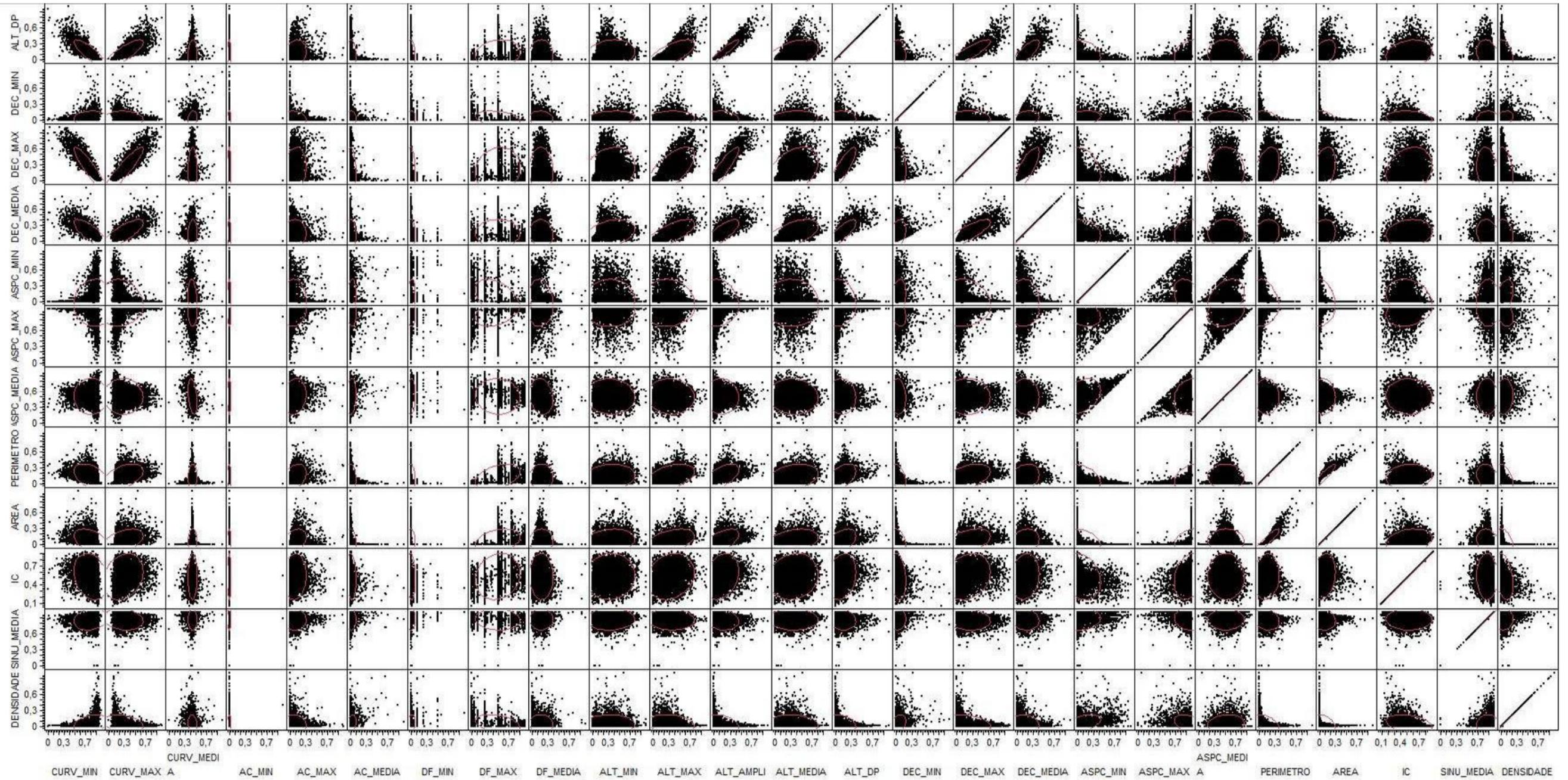


Figura 21 – Matriz de dispersão dos parâmetros morfométricos, parte 2.



O diagrama de dispersão de dado evidencia o grau de correlação entre as variáveis. Nesse diagrama, o padrão dos pontos representa a relação entre as variáveis.

Yevjevich et al. (1972), estudando a correlação entre variáveis morfométricas em bacias hidrográficas para caracterizar a tendência a inundação, concluiu que as maiores correlações, de fato, são encontradas nas variáveis que representam a mesma propriedade física de uma bacia. Analisando as **Figuras 20 e 21**, é possível perceber a correlação entre altimetria, curvatura e declividade. Outros parâmetros correlatos são área e perímetro. Todavia, alguns dados apresentaram uma relação não-linear, como nos gráficos de densidade de drenagem comparado com a amplitude altimétrica, desvio-padrão da altimetria, curvatura mínima e máxima, perímetro e área. O mesmo padrão também é identificável entre a área de contribuição média, altimetria e os parâmetros derivados. Na maioria dos dados a dispersão é elevada e em alguns é possível perceber uma maior concentração de dados dentro da elipse de referência, como nos casos do índice de circularidade com o aspecto médio e altimetria média com aspecto médio. O dado de área de contribuição mínima foi retirado da análise por apresentar apenas valores zero. A área de contribuição máxima também foi retirada, pois corresponde ao parâmetro área da bacia, tornando seu uso redundante.

A distribuição espacial dos parâmetros escolhidos é mostrada nas **Figuras 22, 23, 24 e 25**. É possível perceber uma tendência ao agrupamento de dados espacialmente contínuos pelos parâmetros de altimetria, declividade e curvatura. A maioria dos estudos que utilizam a morfometria como base considera a elevação, a declividade e o aspecto como elementos-chave para compreensão das unidades geomorfológicas (Bolongaro-Crevenna et al., 2005). Os parâmetros de altimetria e declividade também foram básicos no estudo de compartimentação geomorfológica da bacia do Rio Paranã, utilizando a técnica de árvore de decisão (Hermuche et al., 2003).

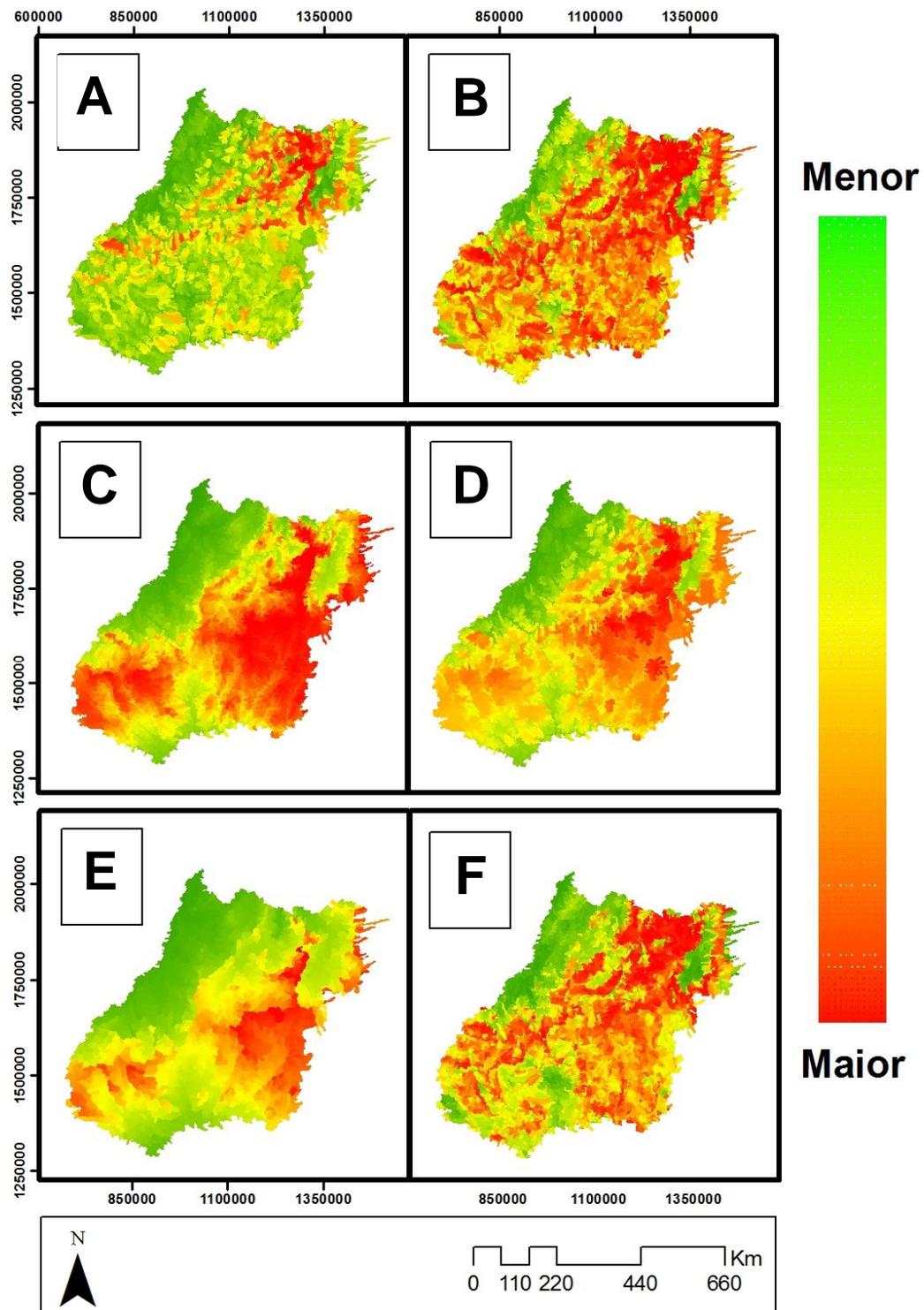


Figura 22 - Estatísticas zonais de amplitude altimétrica (a), desvio padrão da altimetria (b), altimetria média (c), altimetria máxima (d), altimetria mínima (e) e declividade média (f).

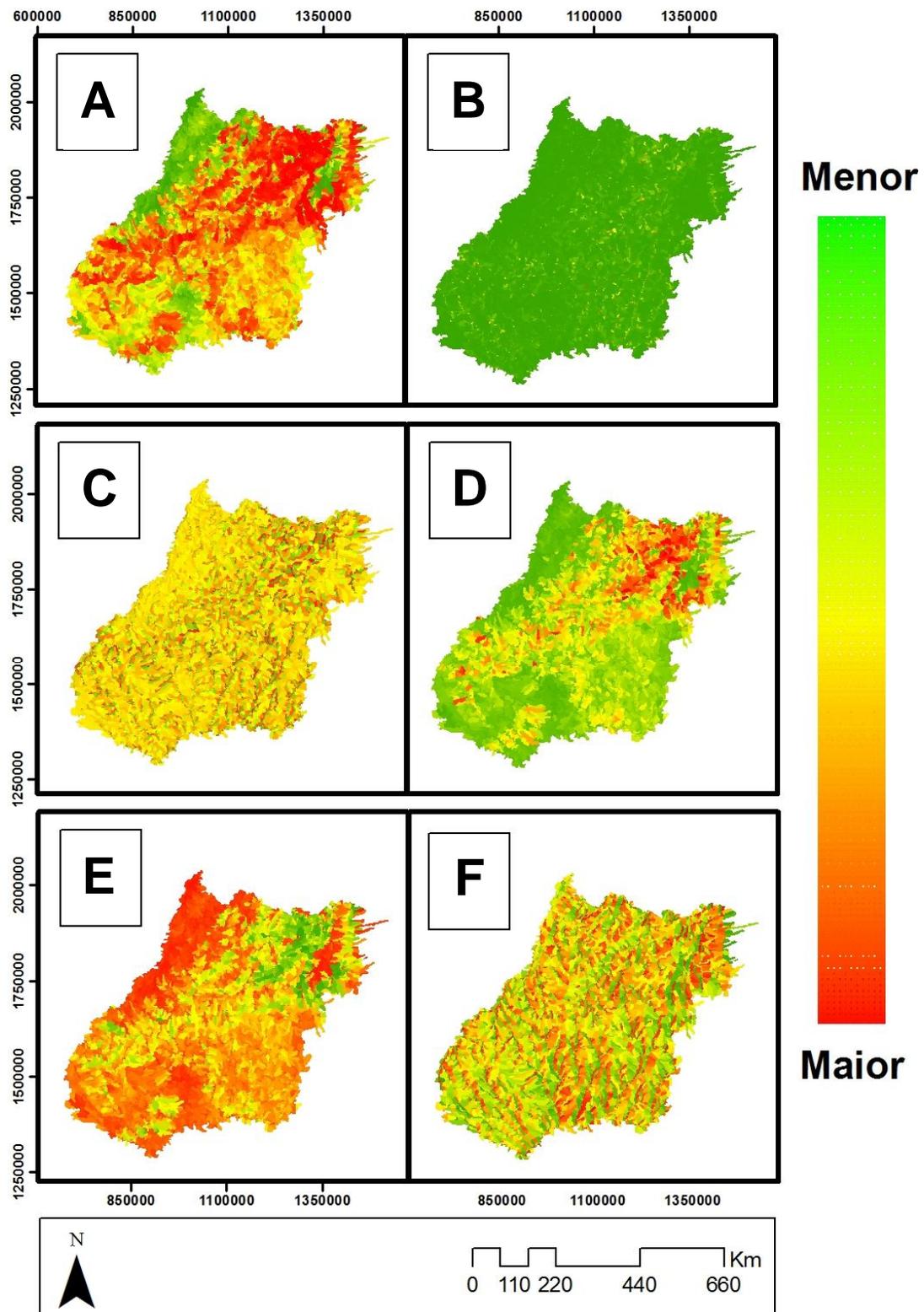


Figura 23 - Estatísticas zonais de declividade máxima (a), declividade mínima (b), curvatura média (c), curvatura máxima (d), curvatura mínima (e) e aspecto médio (f).

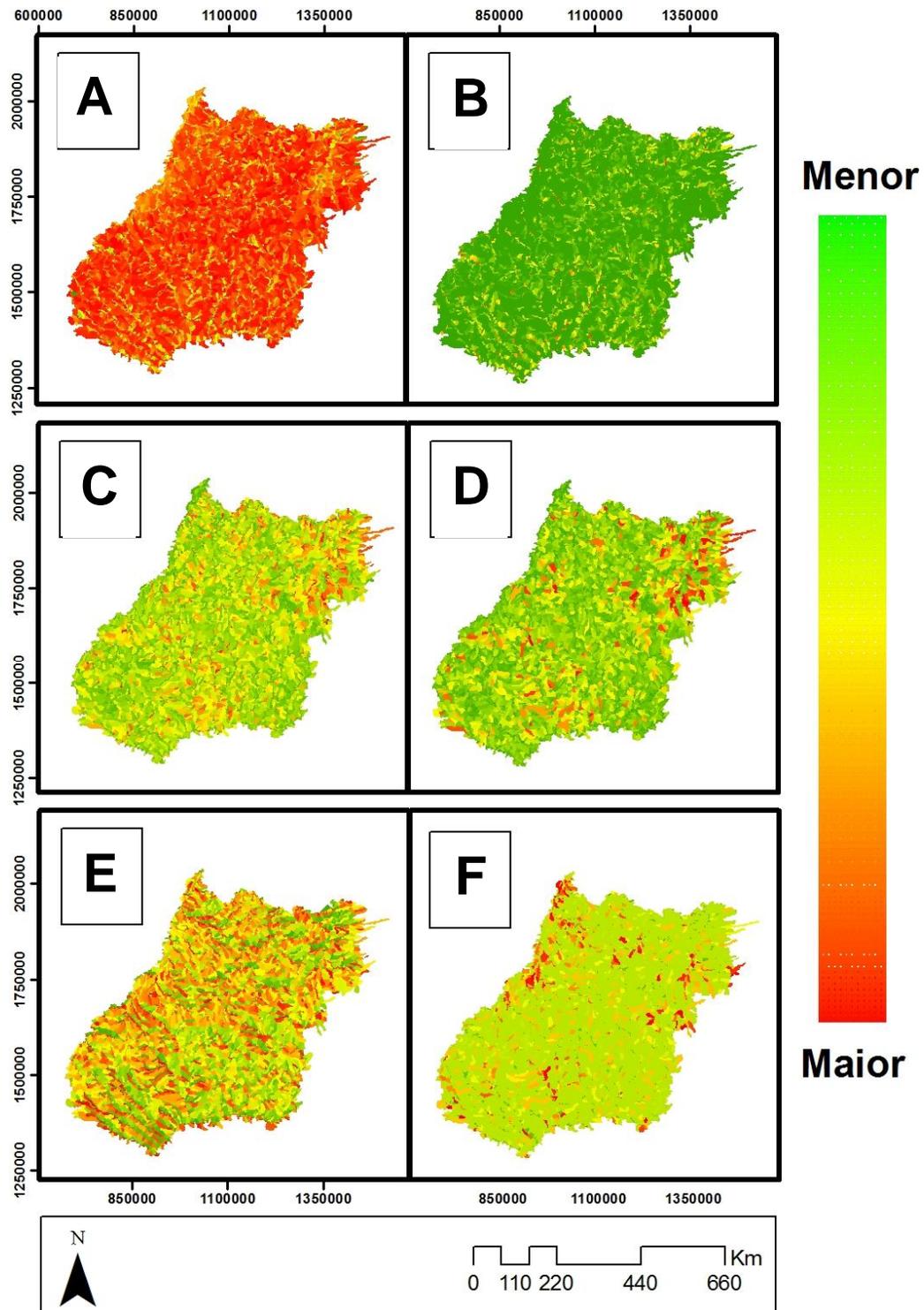


Figura 24 - Estatísticas zonais de aspecto máxima (a), aspecto mínima (b), área de contribuição média (c), área de contribuição máxima (d), direção de fluxo média (e) e direção de fluxo máxima (f).

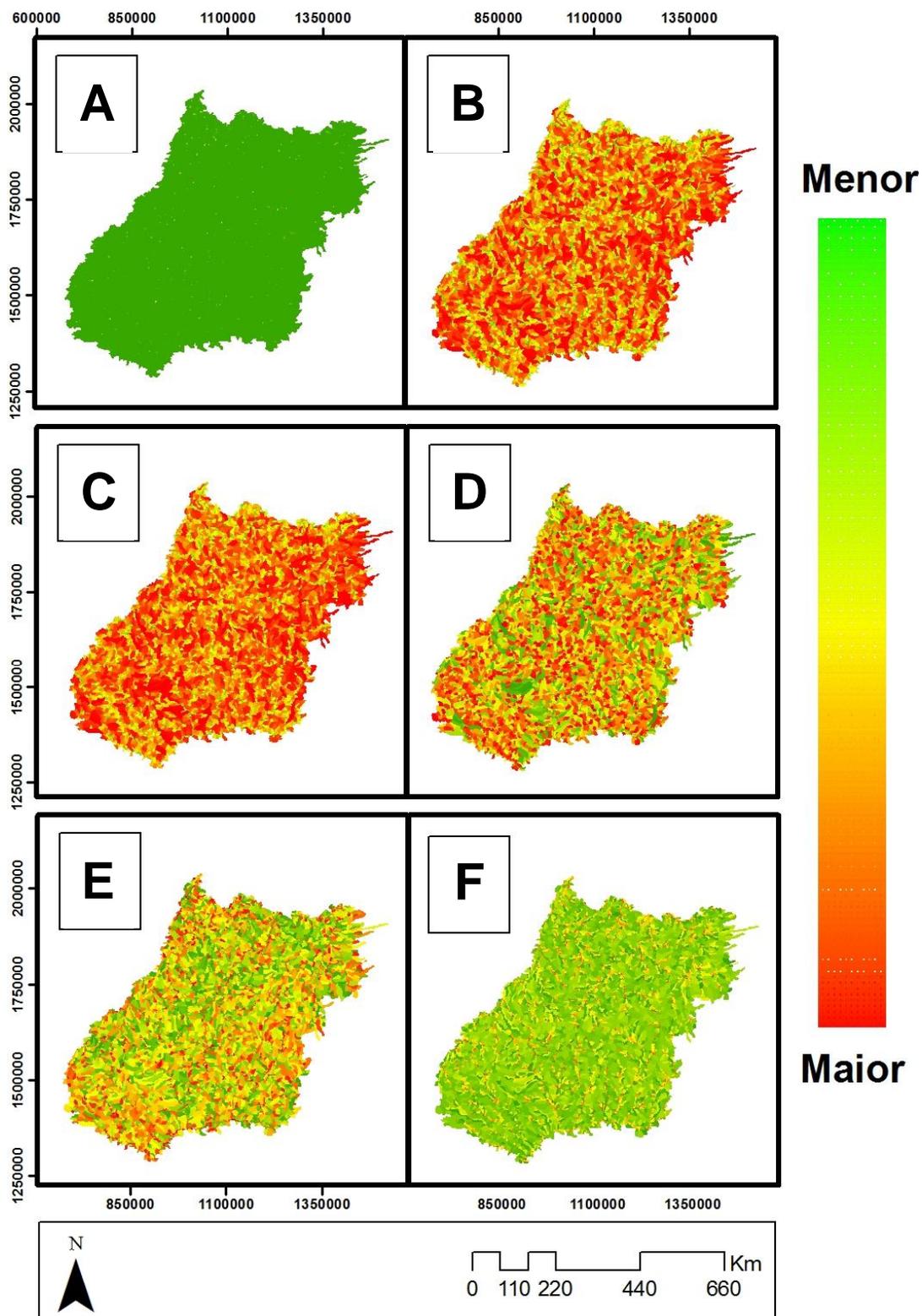


Figura 25 - Estatísticas zonais de direção de fluxo mínima (a), área (b), perímetro (c), índice de circularidade (d), índice de sinuosidade média (e) e densidade de drenagem (f).



O emprego da técnica de análise de grupos permitiu agrupar bacias com semelhanças morfométricas. Os resultados correspondem aos testes feitos com o emprego dos classificadores K-médias e mapas auto-organizáveis de Kohonen. Foram testados os parâmetros: área, perímetro, índice de circularidade, sinuosidade média, densidade de drenagem, área de contribuição (menos mínima), direção de fluxo, altimetria, aspecto, curvatura e declividade. Os testes realizados são apresentados nas figuras em anexo a este trabalho.

Analisando os resultados, foi selecionada a melhor classificação pelo método de Kohonen (SOM) (**Figura 26.a**) e a melhor classificação pelo método das K-médias (**Figura 26.b**). Ambas as classificações utilizam apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição e direção de fluxo. Essas classificações foram escolhidas como as melhores por apresentar baixa dispersão das classes e por, visualmente, apresentarem relação com os mapas morfométricos de altimetria, curvatura, declividade, direção de fluxo e área de contribuição.

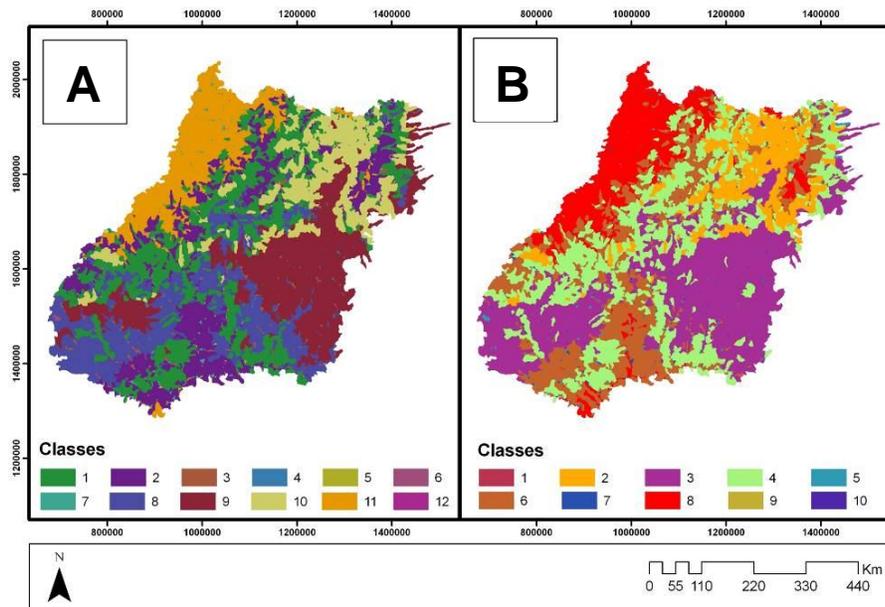


Figura 26 - Melhor classificação das bacias, pelo método das K-médias (a) e pelo método adaptado dos mapas auto-organizáveis de Kohonen (b).

Esses resultados apresentaram uma boa continuidade das classes, em que é possível distinguir as estruturas, as depressões e as vertentes. A classe 11 da **Figura 26.a** e a classe 8 da **Figura 26.b** estão relacionadas à depressão, apresentando menores elevações, baixa curvatura e baixa declividade. Já a classe 9 da **Figura 26.a** e a classe 3 da **Figura 26.b** estão



relacionadas às áreas com maior elevação, declividade e curvatura média. Tanto a classe 10 (**Figura 26.a**) quanto a classe 2 (**Figura 26.b**), se distinguem por apresentar as maiores declividades mapeadas, com valores maiores de elevação e com os maiores valores de área de contribuição. No entanto, foi necessário reduzir o número de classes, visto que nem todas são representativas. A **Figura 26.a** possui 12 classes, mas após o reagrupamento, ficou com 4 classes. Nem todas as classes possuem relevância ou mesmo continuidade espacial. Essas classes excedentes foram agrupadas a outras mais representativas, partindo-se do critério de proximidade espacial com a classe de agrupamento. A **Figura 26.b** possui 10 classes, mas após o reagrupamento, foi reduzida para 4 classes. O reagrupamento é apresentado nas **Figuras 27 e 28**.

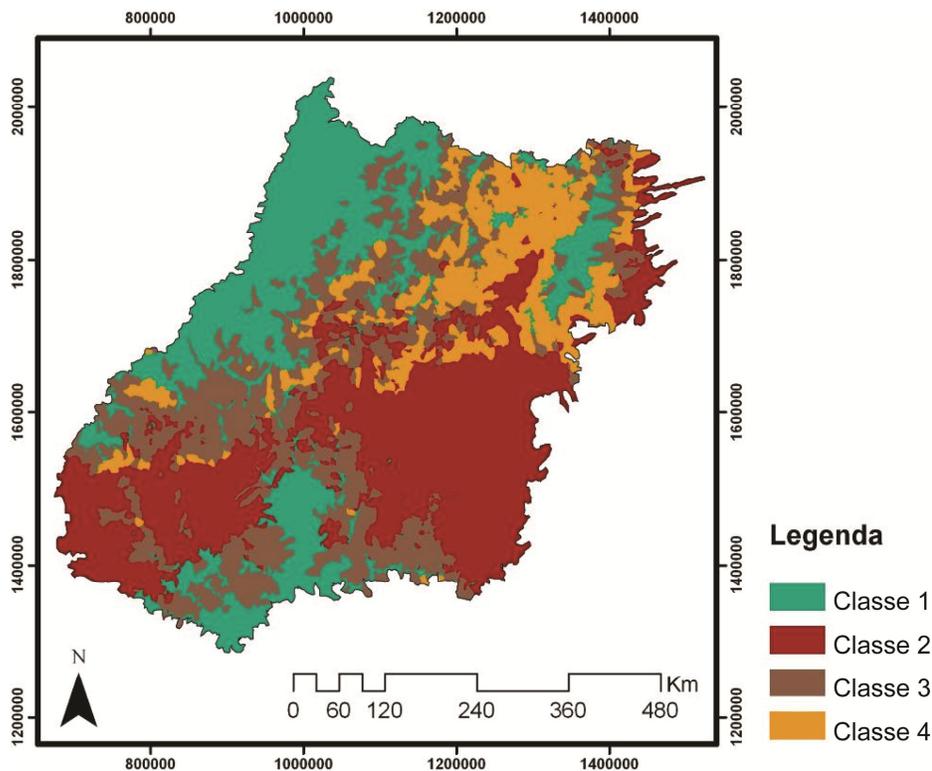


Figura 27 – Classificação após o reagrupamento das classes encontradas pelo método das K-médias.

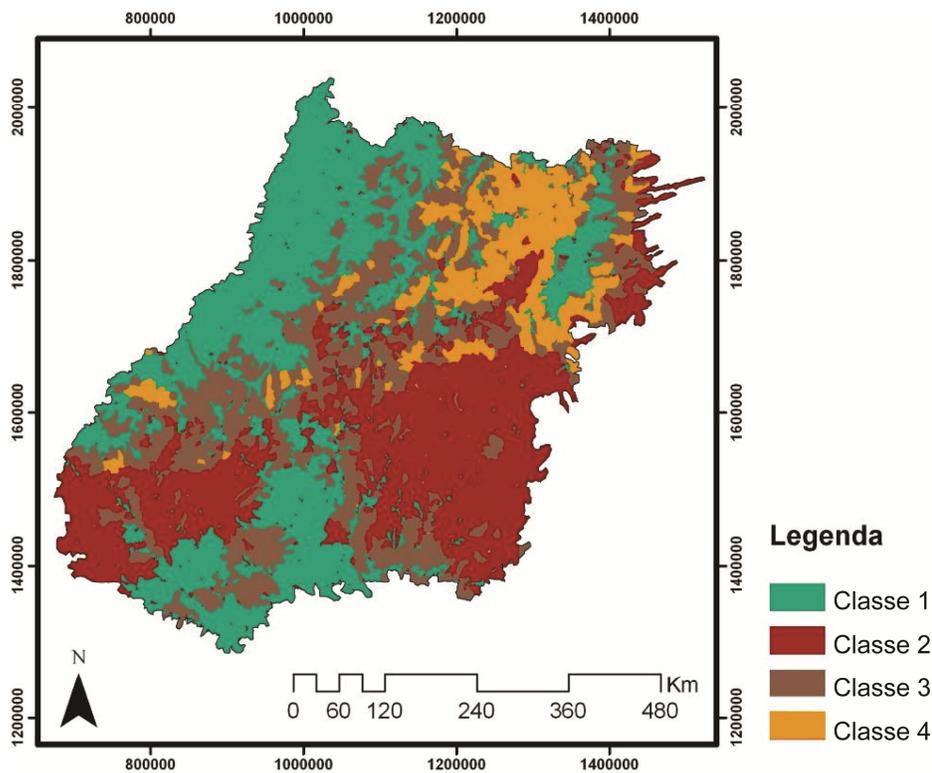


Figura 28 – Classificação após o reagrupamento das classes encontradas pelo método adaptado dos mapas auto-organizáveis de Kohonen.

Foram identificadas quatro classes morfométricas: classe 1; classe 2; classe 3; classe 4.

A **classe 1** correspondem à áreas de Depressão dos altos rios Tocantins/ Araguaia e também engloba a depressão formada pela bacia do Paraná. Essa classe possui baixa variação topográfica, além de possuir as menores cotas de elevação do estado. Predominam os processos de deposição aluvial e as baixas declividades.

A **classe 2** engloba o Planalto Central Goiano, o Planalto dos Guimarães e os Planaltos da bacia sedimentar do Paraná. Essa classe possui elevações médias e altas, com topos suavemente aplainados, em que é possível identificar diferentes ordens de grandeza e aprofundamento da drenagem. As cotas de elevação e a declividade variam de altas para médias.

A **classe 3** corresponde às superfícies de transição entre as áreas com altimetria maior e as depressões, com menor altimetria. A declividade dessa área é de média para alta, sendo que a elevação é intermediária. Nessas áreas, o grau de entalhamento do relevo é alto, gerando, em algumas áreas, porções de morros e colinas.



A **classe 4** se caracteriza pelas altas declividades e as maiores curvaturas do estado. O entalhamento dos talwegues é baixo. Nessa área as cotas de elevação são altas. Próximo ao contato com o Vão do Paranã, surgem rompimentos abruptos do relevo, formando algumas chapadas.



5. CONCLUSÃO

O modelo *Hydrosheds* mostrou-se adequado em estudos morfométricos, produzindo bons resultados para classificação das bacias. Apesar da baixa resolução da imagem, foi possível delimitar bacias com um bom aproveitamento dos dados, em escalas menores do que 1:1.000.000. Dessa forma, em estudos futuros, será possível ampliar a análise para o Brasil, tendo em vista a disponibilidade e a qualidade dos dados. Além disso, esse modelo já vem com consistência hidrológica, o que facilita estudos em grandes áreas.

Em geral, os trabalhos que utilizam bacias hidrográficas como base, não costumam utilizar esse dado de forma contínua. Na maioria dos trabalhos pesquisados, os autores utilizavam apenas o limite de uma bacia, com hierarquia bem definida. Ao ampliar essa análise para uma área maior, utilizando várias bacias de diferentes ordens, surgiu um problema conceitual. O que alguns autores chamam de "não-bacias", não tem sentido considerando uma perspectiva sistêmica na conceituação de bacias. Esses polígonos, que correspondem aos canais que não são de primeira ordem, não podem ser considerados "não-bacias", pois, em se tratando de captação de água que flui para um único ponto - exultório-, essas bacias também desempenham o mesmo papel das bacias de primeira ordem, tornando imprópria a negação. Por outro lado, chamar esses polígonos de "fragmentos" também não é adequado, visto que, sendo a bacia um sistema, não existe um fragmento de sistema. O que foi perceptível nesse trabalho é que a discussão sobre o assunto ainda é incipiente.

Com a aplicação dos métodos estatísticos de Kohonen e das K-médias foi possível individualizar diversas classes morfométricas. O parâmetro que mais influenciou o resultado final, pelos dois métodos, foi o de altimetria. Em segundo lugar, os mapas de declividade, curvatura e aspecto, que permitiram diferenciar feições de transição topográfica. O mapa de área de contribuição foi especialmente importante por discernir feições de vale. No entanto, os parâmetros de área, perímetro, índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, apesar da contribuição para o entendimento da dinâmica morfológica da bacia, não permitiram gerar classificações com continuidade espacial. Em parte isso é explicado pela escala de trabalho, que limitou a definição detalhada das bacias de primeira ordem pelo método *Taudem*. Por outro lado, esses parâmetros estão relacionados aos derivados da altimetria, por isso não compromete o resultado alcançado. Um estudo mais específico, testando esses parâmetros em diferentes escalas, numa mesma área, poderia fornecer informações mais precisas.



A morfometria é amplamente utilizada para definir unidades ambientais. Nesse escopo, os métodos empregados permitiram a definição de classes de bacias, tendo como base a área encerrada pelo sistema das bacias hidrográficas. Ambos os métodos podem ser estendidos aos estudos de compartimentação geomorfológica, qualidade das águas, entre outros estudos ambientais que visam o agrupamento de atributos com base em atributos morfométricos.

Uma limitação, em relação aos modelos estatísticos utilizados, diz respeito a determinação dos centros, ou seja, da quantidade de *clusters* a serem processados. Tanto o modelo das K-médias, quanto o modelo adaptado de Kohonen presumem que o pesquisador já tenha noção da quantidade de clusters que sua análise requer, no entanto, nem sempre é possível prever a quantidade de centros que seja mais representativo.



REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

- AB´SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**, IG-USP, n. 18, São Paulo, 1969.
- ADEDIRAN, A. O.; PARCHARIDIS, I., POSCOLIERI, M. e PAVLOPOULOS, K. Computer-assisted discrimination of morphological units on northcentral Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients, **Geomorphology** n.58, p. 357-370, 2004.
- ARCOVERDE, G. F. B.; ALMEIDA, C. M.; XIMENES, A. C.; MAEDA, E. E.; ARAUJO, L. S. A. Identificação de áreas prioritárias para recuperação florestal com o uso de rede neural de mapas auto-organizáveis. **Bol. Ciênc. Geod.**, vol.17, n.3, p. 379-400, 2011.
- ARGENTO, M. S. F. Mapeamento geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 472p, 2005.
- BAÇÃO, F., LOBO, V., PAINHO, M. Self-organizing Maps as Substitutes for K-Means Clustering. In: V.S. SUNDERAM, G. VAN ALBADA, P. SLOOT, J. J. DONGARRA (org.). **International Conference on Computational Science**, 2005. Lecture Notes in Computer Science, v. 3516, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 476-483, 2005.
- BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. Florianópolis/SC: Editora da UFSC, 371p, 2006.
- BOLONGARO-CREVENNA, A. TORRES-RODRÍGUEZ, V., SORANI, V., FRAME, D., ARTURO, M. ORTIZ, A. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State -Mexico. **Geomorphology**, n.67, p.407-422, 2005.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Parte das Folhas SC.23 Rio São Francisco e SC.24 Aracaju; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Volume I, 1973
- BREYER, S. P.; SNOW, R. S. Drainage basin perimeters: a fractal significance. **Geomorphology**, n.5, p. 43-157, 1992.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.
- CALVO, J. F.; PALAZÓN, J. A.; ESTEVE, M. A.; SUÁREZ, M. L.; TORRES, A.; VIDAL-ABARCA, M. R.; RAMÍREZ-DIAS, L. The Use of Multivariate Analysis for the Ecological Characterization of Landscape: the Mula River Watershed, South-east Spain. **Journal of Environmental Management**, v.34, p.297-308, 1990.
- CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A.M.V. (Org.). Fundamentos Epistemológicos da Ciência da Geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à**



Ciência da Geoinformação. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 2001.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. MARTINS, E. S. GUIMARÃES, R. F. CARVALHO, A. P. F. Compartimentação geomorfológica do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros baseada em técnicas de geoprocessamento. **Boletim de Pesquisa da Embrapa Cerrados**. Planaltina- DF: v. 19, p.9-19, 2001.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.I.]: 2005. Disponível em:

<<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 22 de Fev de 2012.

CHORLEY, R. J., MAIM, D. E. C., POGORZELSKI, H. A. A new standard for measuring drainage basin shape. **American Journal of Science**, v.255, p. 138-141, 1957.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1980, 2a. ed. 188p.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (org.). 6. ed. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 472p, 2005.

CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. 2005. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 25 de Jul de 2011.

DIKAU, R. BRABB, E. E., MARK, R. K., PIKE, R. J. Morphometric landform analysis of New Mexico. **Zeitschrift für geomorphologie**, N. F., Suppl.-Bd., n.101, p.109-126, 1995.

DOUGLAS, D. H. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model: **Cartographica**, v. 23, n. 4, p. 29-61, 1986.

DOUGLAS, D. H., PEUKER, T. K. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Comput. Graphics Image Process**, n.4, p.375-387, 1975.

ESRI (2007). ArcGIS desktop help. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>>. Último acesso em: 17 de abr. 2011.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (ed.). **Spatial Analysis in Geomorphology**, London: Methuen & Co. Ltd., p. 17-90, 1972.

FARR, T. G., M. KOBRICK. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. EOS Trans. **AGU**, v.81, p. 583-585, 2000.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.;



KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. **Review of Geophysics**, v.45, RG, 2004.

FERNEDA, E. Redes neurais e sua aplicação em sistemas de recuperação de informação. **Ciências da Informação**, v.35, n.1, p. 25-30, 2006.

FLINT, R. F. **Glacial and quaternary geology**. New York: John Wiley and Sons, 892p, 1971.

FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GOIÁS (Estado). Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. **Mapa Geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório Final**. Goiânia,. 81 p., 2005.

GOODCHILD, M.F. PARKS, B.O. STEYAERT, L.T. **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993.

GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: adequação e calibração em duas bacias de drenagem**. Tese de Doutorado - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000.

GUSTAVSSON, M. **Development of a Detailed Geomorphological Mapping System and GIS Geodatabase in Sweden**. Licentiate Thesis in Uppsala Universitet of Sweden, Sweden. 2005.

GUTH, P.L. Morphometry of drainage basins: a global snapshot from the Shuttle Radar Topography Mission. **Hydrology and Earth System Sciences**, n.15, p. 2091-2099, 2011.

HACK, J.T. Dynamic equilibrium and landscape evolution. in: MELHORN, W.N.; FLEMAL, R.C. (ed.). **Theories of Landform Evolution**. Boston: Allen and Unwin, p. 87-102, 1975.

HAIR, J. F., ANDERSON, R. E. TATHAM, R. L., BLACK, W. C. **Análise Multivariada de Dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HAYDEN, R. S. Geomorphological mapping. In: SHORT, N. M.; BLAIR, Jr., R W. (Ed.). **Geomorphology from space: a global overview of regional landforms**. Washington, DC: NASA, 1986.

HERMUCHE, P. M.; ANDRADE, A. C.; GUIMARÃES, R. F.; LEAL, L. R.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, É. S. Compartimentação geomorfológica em escala regional da bacia do Rio Paranã. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10. Brasil - Rio de Janeiro. Anais. UFRJ. **Anais...** Rio de Janeiro, p. 11, 2003.



- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Soc. American Bulletin**, v.3, n.56, 1945.
- HUTCHINSON, M.F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: **THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING**. Sydney. **Proceedings...** August 17-19, International Geographical Union, Columbus, Ohio. 1988, p. 117-133.
- J. B. MacQueen. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. In: **5-TH BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY**, **Proceedings...**, Berkeley, University of California Press, v.1, p.281-297, 1967.
- JARVIS, A., RUBIANO, J., NELSON, A., FARROW, A., MULLIGAN, M. Practical Use of SRTM Data in the Tropics: Comparisons with Digital Elevation Models Generated from Cartographic Data. 198. **International Center for Tropical Agriculture**, Cali, Colombia. 2004.
- JENSON S. K. AND J. O. DOMINGUE. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.11, p.1593–1600, 1988.
- KOHONEN, T. **Self Organization and Associative Memory**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1989.
- KOHONEN, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. **Biological Cybernetics**, v. 43, p. 59-69, 1982.
- KOVÁCS, Z. L. **Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 4ª ed., 2006.
- LABIOD, L.; GROZAVU, N.; BENNANI, Y. Relational topological clustering. In: **THE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (IJCNN)**, 2010. **Proceedings...** [S.l.], p. 1- 8, 2010.
- LANA, C.L.; ALVES, J.M. de P.; CASTRO, P de T.A. Análise morfométrica da bacia do rio Tanque, MG-Brasil. **Rev. Escola de Minas**, Ouro Preto, v.54, n.2, 2001.
- LANGBEIN, W. B. Geometry of river channels. **J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.**, v. 90(HY2), p. 301–312, 1964.
- LANGBEIN, W. B.; ISERI, T. K. General Introduction and Hydrologic Definitions. *Science in Your Watershed*. 1995. Disponível em: <http://water.usgs.gov/wsc/glossary>. Último acesso: 11 de maio de 2012.
- LANGBEIN, W. B.; LEOPOLD, L. B. Quasi-equilibrium states in channel morphology,



American Journal of Science, v.262, p.782–794, 1964.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. **HYDROSHEDS**. Technical Documentation, v.1, Appendix to HYDROSHED data, 2006.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data. *Eos Trans, AGU*, v.89, n.10, 2008.

LEOPOLD, L. B.; LANGBEIN, W.B. The Concept of Entropy in Landscape Evolution. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 500-A, 20p. 1962.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Fluvial process in **Geomorphology**. San Francisco: Freeman, 1964.

MARK, D. M. Geomorphometric Parameters: A Review and Evaluation. **Geografiska Annaler**, Series A - Physical Geography, v. 57, n. 3/4, p. 165-177, 1975.

MARSH, W.M. **Landscape Planning: Environmental Applications**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 3 ed., 1998.

MARTINS, E. S. REATTO, A. CARVALHO JR., O. A. GUIMARÃES, R. F. Evolução geomorfológica do Distrito Federal. **Documentos**, n.122. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2004.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, v.5, p. 115-133, 1943.

SILVA, T. M. Geomorfologia do estado do Rio de Janeiro: distribuição espacial das feições morfológicas e contexto evolutivo. In: Bicalho, A. M. S. M., GOMES, P. C. C. (org.). **Questões metodológicas e novas temáticas na pesquisa geográfica**. Editora Publit, p. 308, 2009.

MENKE, A. B. ; GUIMARÃES, R. F. ; OLIVEIRA, S. N. ; GOMES, R. A. T. ; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de . Compartimentação Geomorfológica Preliminar do Rio Ipanema (AL/PE) Utilizando Análise Multivariada em Bacias Hidrográficas de 1ª Ordem.. In: Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte. **Anais...**, p. 1-10, 2008.

MICHIGAN TECH. Calculating Stream Sinuosity in ArcView GIS and ArcMap. 2011. Disponível em: <<http://forest.mtu.edu/faculty/hyslop/gis/sinuosity.html>>. Acesso em: 22 de Fev de 2012.

MILLER, V. C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. **Technical report**, 3, New York: Office of Naval Research, Department of Geology, Columbia University, 1953.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Minas Gerais: Editora UFMG, 2007.



- MINSKY, M.; PAPERT S. **Perceptrons**, Cambridge - MA: The MIT Press, 1969.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. **Science**, v. 255, p. 826-830, 1992.
- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B. & LADSON, A.R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p.3-30, 1991.
- MORRIS, D. G.; HEERDEGEN, R. G. Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications. **Geomorphology**, v. 1, p.131-141, 1988.
- NASCIMENTO, M. A. L. Geomorfologia do estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**. Goiânia: UFG, v.12, n.1, 1991.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage network from digital elevation data. **Comput Vision Graphics Image Process**, v.28, p.328-344, 1984.
- OLIVEIRA S.N.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. SILVA, T.M., GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S.; GUIMARÃES, R.F.; SILVA, N.C. Delimitação automática de bacias de drenagens e análise multivariada de atributos morfométricos usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n.1, p.3-21, 2007.
- OLIVEIRA, S. N. **Metodologia para delimitação e análise multivariada de atributos morfométricos de bacia de drenagem usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, UNB, Brasília. 2008.
- PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos: Estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais**. 3 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2004.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: A brief guidd. in: HENGL, T.; REUTER, H. I. (ed.). **Geomorphometry: concepts, software, applications, Developments in Soil Science Series**. Elsevier, p. 1–30, 2009.
- PIKE, R. J.; THELIN, G. P. Cartographic analysis of U.S. topography from digital data., In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER-ASSISTED CARTOGRAPHY, AutoCarto 9, Baltimore, v.1, p. 631-640, 1989.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, R.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, p.241-262, 2003.
- RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. K. Classification of microwatersheds based on morphological characteristics. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 5, n. 1, p.101-109, 2011.



- RAUX, J.; COPARD, Y; LAIGNEL, B.; FOURNIER, M.; MASSEÏ, N. Classification of worldwide drainage basins through the multivariate analysis of variables controlling their hydrosedimentary response. **Global and Planetary Change**. v. 76, n. 3/4, p. 117–127, 2011.
- RESTREPO, M.; WAISANEN, P. Strategies for Stream Classification Using GIS. Proceedings of the Twenty-Fourth. **Annual ESRI User Conference**. San Diego, CA. 2004.
- ROCHE, M. **Hydrologie de surface**. Paris: Gauthier-Villars and ORSTOM, 430 p, 1963.
- ROSENBLATT, F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**, vol. 65, p. 386-408, 1958.
- SAMIZAVA, T. M.; KAIDA, R. H.; IMAI, N. N.; NUNES, J. O. R. SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no município de Presidente Prudente - SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, p. 43-55, 2008.
- SCHEIDEGGER, A. E. The algebra of stream-order numbers. U.S Geol. Survey. **Prof. Pap.**, 525-B, p. B187-B189, 1965.
- SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, n. 67, p. 597-646, 1956.
- SCHUMM, S.A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. **Geological Society of America Bulletin**. v. 74, n. 9, p. 1089-1100, 1963.
- SELBY, M.J. **Earth's Changing Surface: An Introduction to Geomorphology**. Oxford: Clarendon Press, 607p, 1985.
- SEPLAN-GO. **Bacias Hidrográficas**, 2003. Disponível em: <http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/anuario/2003/SITUACAOFISICA/tabela11.htm>. Último acesso: 20 de Fev de 2012.
- SHREVE, R. Infinite topologically random channel networks. **Journal of Geology**, v.75, p.178–186, 1967.
- SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D. Análise espaço-temporal do potencial hídrico climático do Estado de Goiás. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Org.). **Sistemas de Informações Geográficas: aplicações na agricultura**. 2ª ed. Brasília: Embrapa, p. 273-309, 1998.
- SMITH, B.; SANDWELL, D. Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. **Geophysical Research Letters**, Washington, v.30, n.9, p.1-4, 2003.
- SODRÉ, R. CARVALHO JUNIOR, O. A., MACHADO, W. P., OLIVEIRA, S. N., GOMES, R. A. T., GUIMARÃES, R. F., CARVALHO, A. P. F., MARTINS, E. S. Classificação de bacias de drenagem do Alto Jequitai (Minas Gerais) a partir da análise de principais componentes e análise de grupos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n.2, p.73-86, 2007.



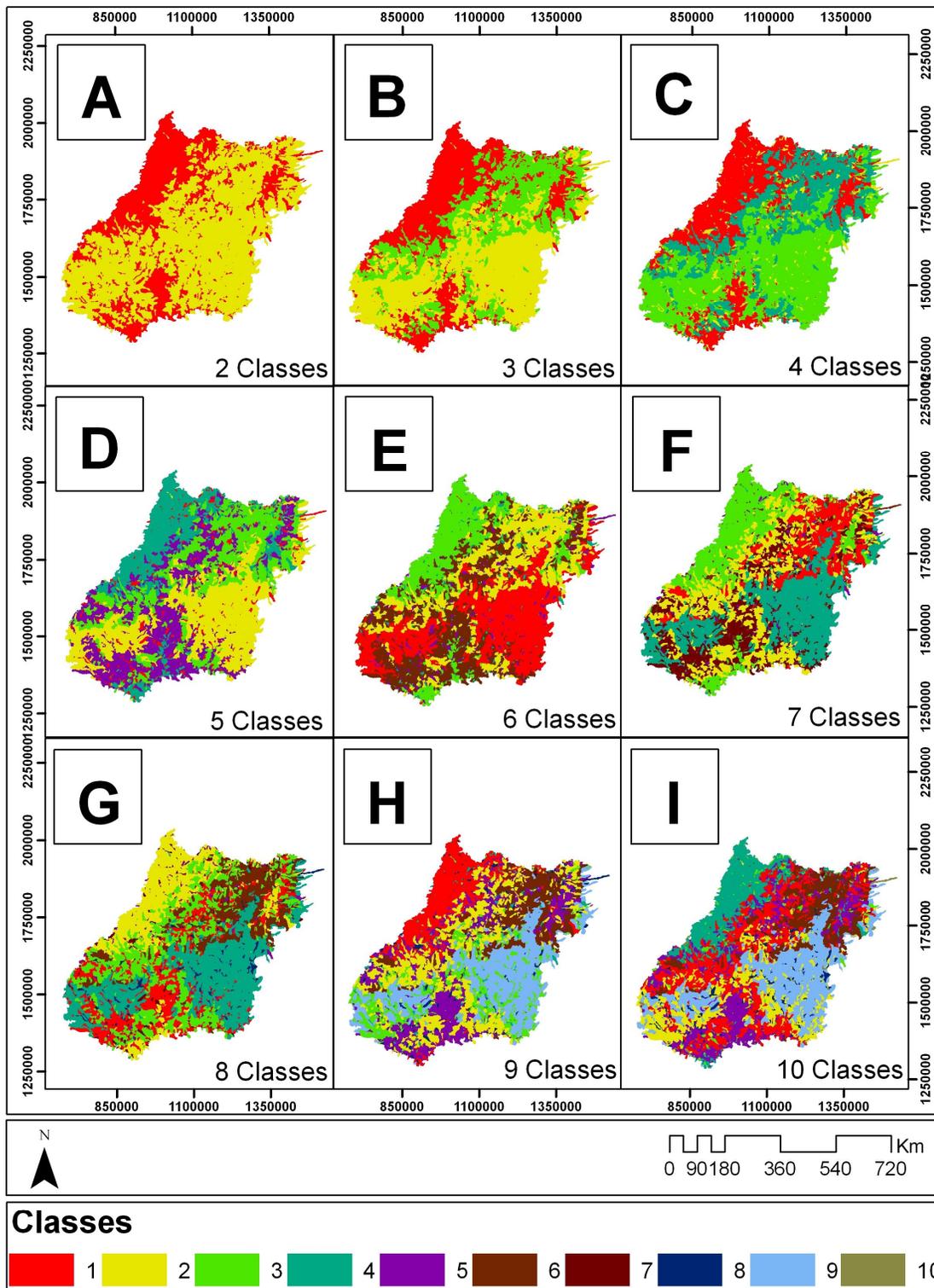
- SOUZA, C. R. G. Flood risk assessment in coastal drainage basins through a multivariate analysis within a GIS-based model. **Journal of Coastal Research**, SI. 56. Proceedings of the 10th International Coastal Symposium, p. 900-904. Lisboa, Portugal. 2009.
- STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. Amer. Geophys. Union**, v. 38: p. 913-920, 1957.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. **Ambientes fluviais**. 2ª Ed. Florianópolis. Ed. UFSC. 183p, 1990.
- SULEBAK, J. R. ETZELMULLER, B., SOLLID, J. L. Landscape regionalization by automatic classification of landform elements. **Norsk Geogr. Tidsskr.**, v.51, p.35-45, 1997.
- TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v.33, n.2, p.309-319, 1997.
- TARBOTON, D. G. **Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)**, 2005. Disponível em: <<http://hydrology.neng.usu.edu/taudem/>>. Acesso em: 05 de mai de 2008.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, 952p, 1993.
- TUFTE, E. R. **Envisioning Information**. Graphics Press, 1a ed., 1990, 126 p.
- VAN ZYL, J.J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v.48, p.559-565, 2001.
- WEDDING, D. K. Extending the Data Mining Software Packages SAS Enterprise Miner and SPSS Clementine to Handle Fuzzy Cluster Membership: Implementation with Examples. **Thesis**. Department of Mathematical Sciences. New Britain, Connecticut, 2009.
- WIDROW, B.; HOFF, M. E. **Adaptive switching circuits**. WESCON Convention Record, New York, 1960.
- YEVJEVICH, V.; DYHR-NIELSEN, M.; SCHULZ, E. F. An application of multi-variate analysis in hydrology. **Environmental Resources Center**. Fort Collins, Colorado: Completion Report Series, n. 35, 1972.
- ZĂVOIANU, I. **Morphometry of drainage basins**. New York: Elsevier Scie. Publisher, 1985.



ANEXOS

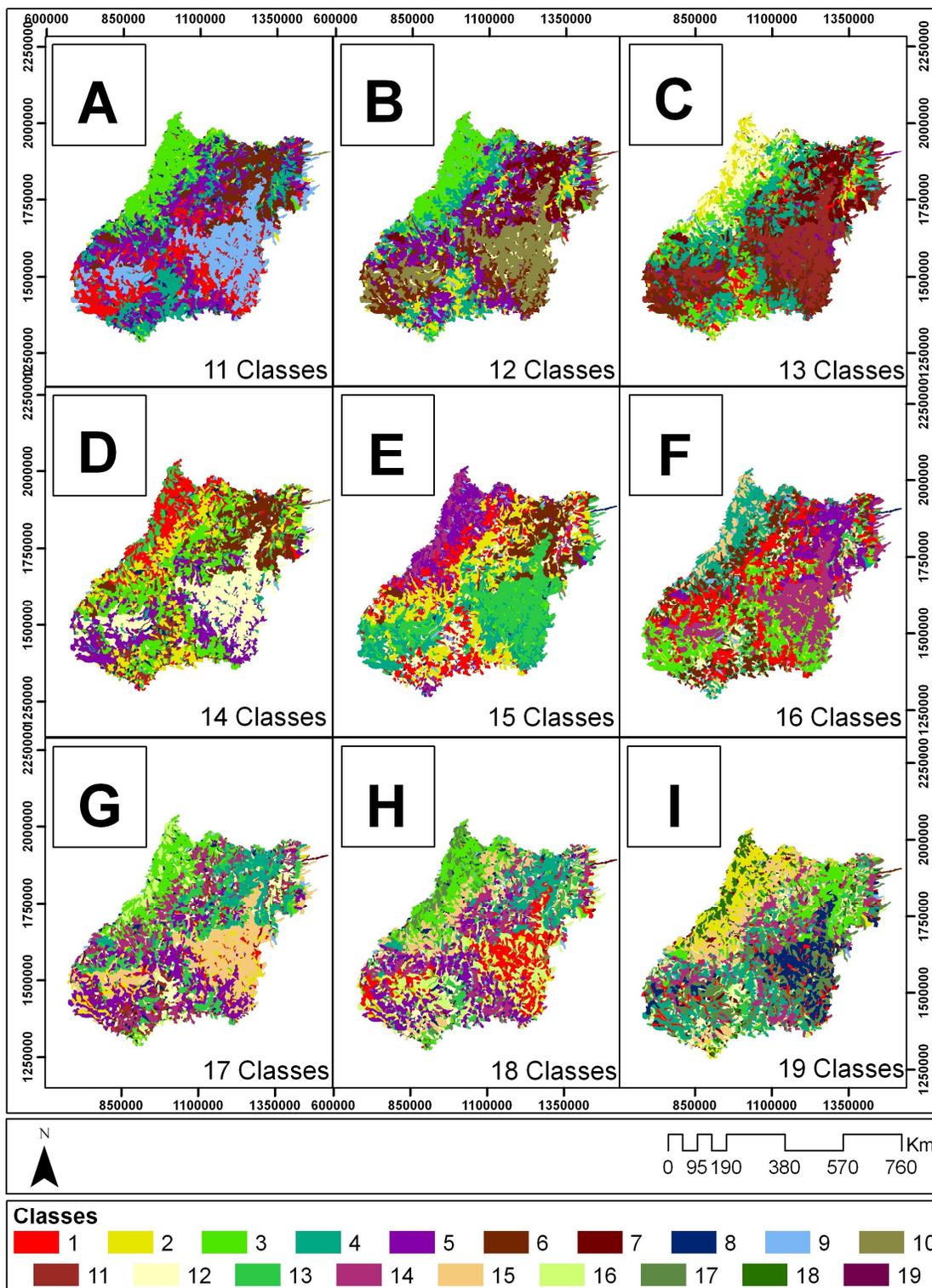


Anexo 1- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos a área de contribuição mínima, pelo método das K-médias, com 2 classes (a), 3 classes (b), 4 classes (c), 5 classes (d), 6 classes (e), 7 classes (f), 8 classes (g), 9 classes (h) e 10 classes (i).



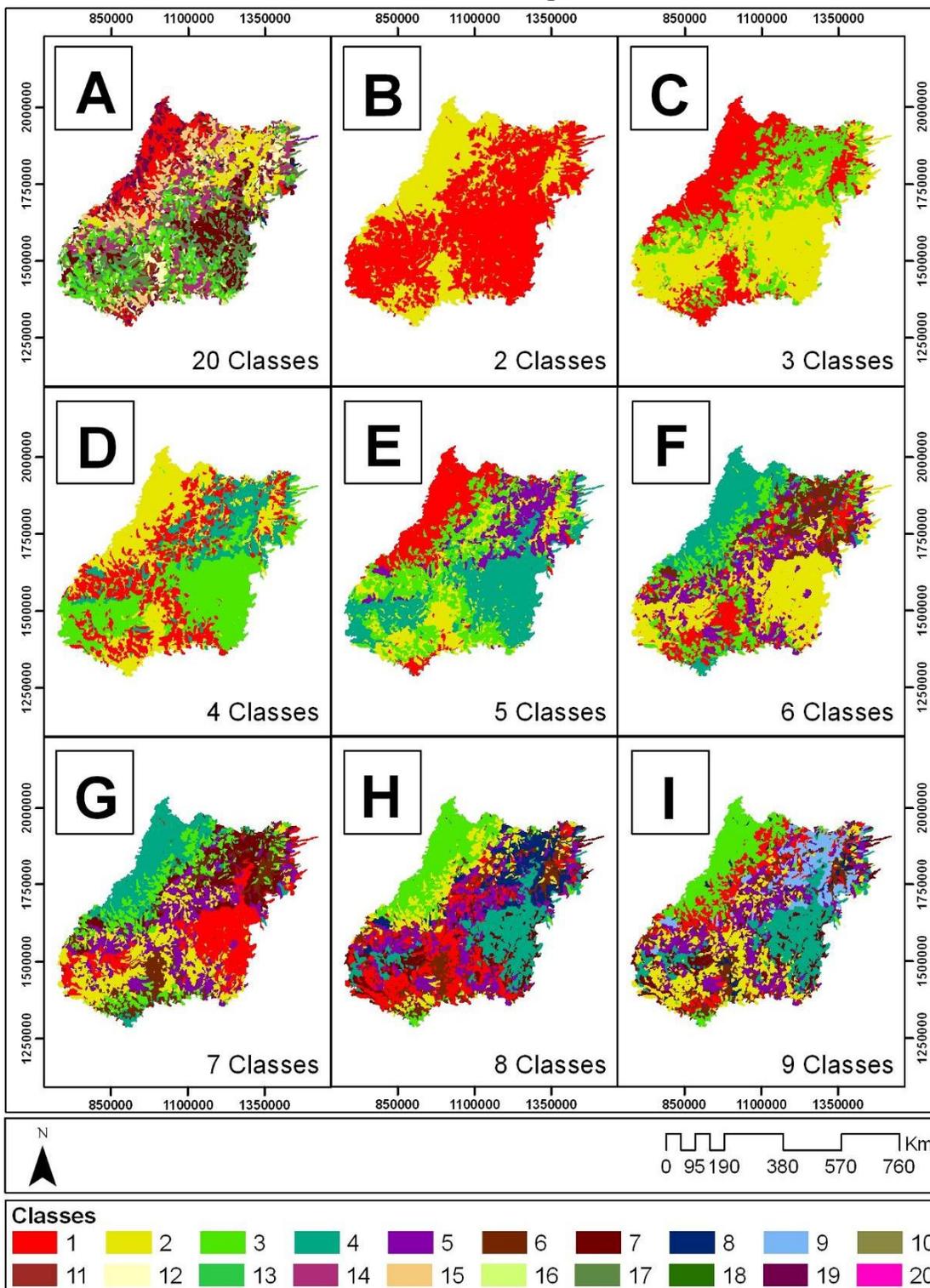


Anexo 2- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos a área de contribuição mínima, pelo método das K-médias, com 11 classes (a), 12 classes (b), 13 classes (c), 14 classes (d), 15 classes (e), 16 classes (f), 17 classes (g), 18 classes (h) e 19 classes (i).



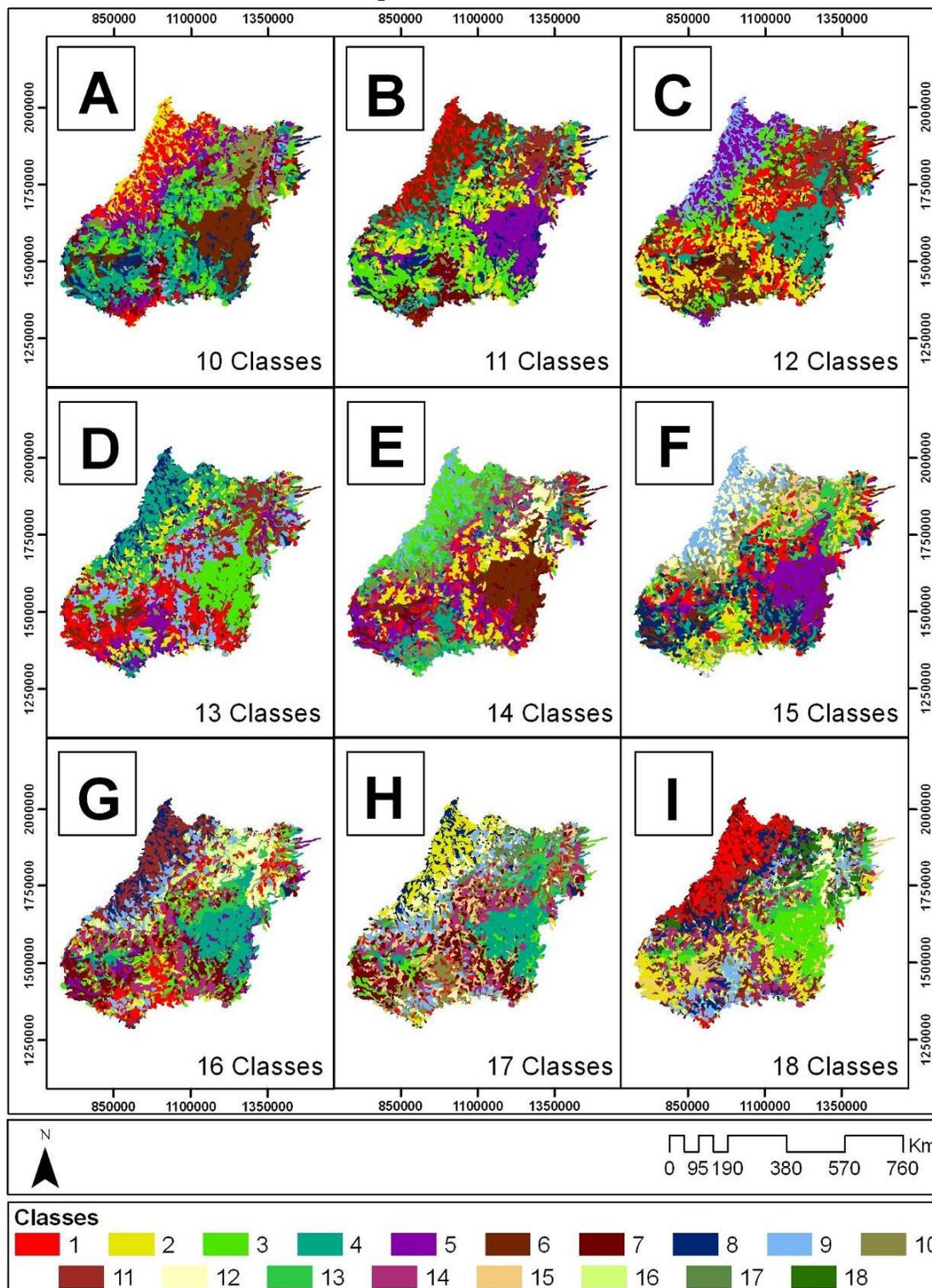


Anexo 3- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos a área de contribuição mínima, pelo método das K-médias, com 20 classes (a). Classificação utilizando apenas os parâmetros de curvatura (máx. e mín.), área de contribuição (média), altimetria (média, desvio padrão, amplitude, máx. e mín.), declividade (máx. e mín.), índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método das K-médias, com 2 classes (b), 3 classes (c), 4 classes (d), 5 classes (e), 6 classes (f), 7 classes (g), 8 classes (h) e 9 classes (i).



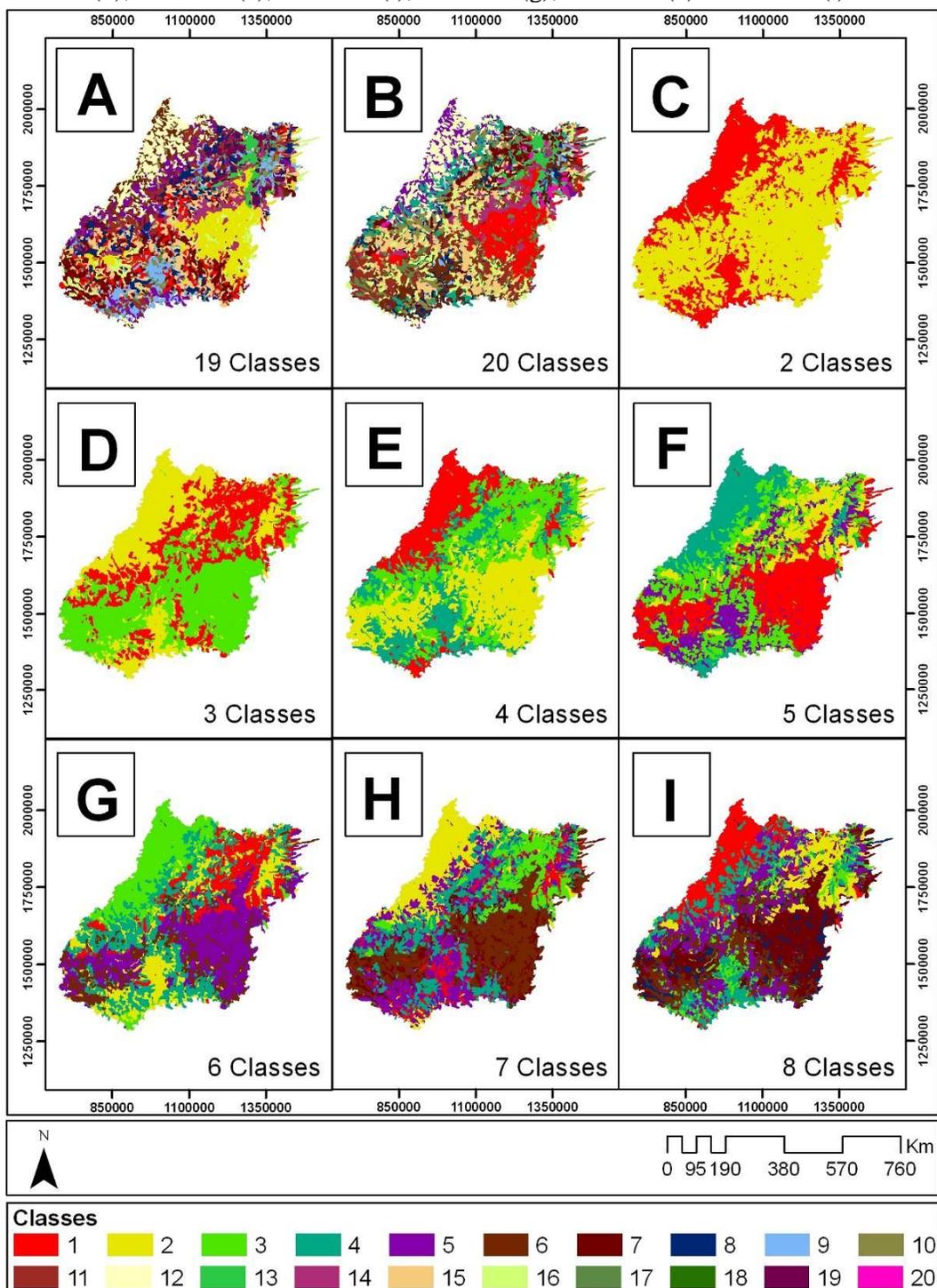


Anexo 4- Classificação utilizando apenas os parâmetros de curvatura (máx. e mín.), área de contribuição (média), altimetria (média, desvio padrão, amplitude, máx. e mín.), declividade (máx. e mín.), índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método das K-médias, com 10 classes (a), 11 classes (b), 12 classes (c), 13 classes (d), 14 classes (e), 15 classes (f), 16 classes (g), 17 classes (h) e 18 classes (i).



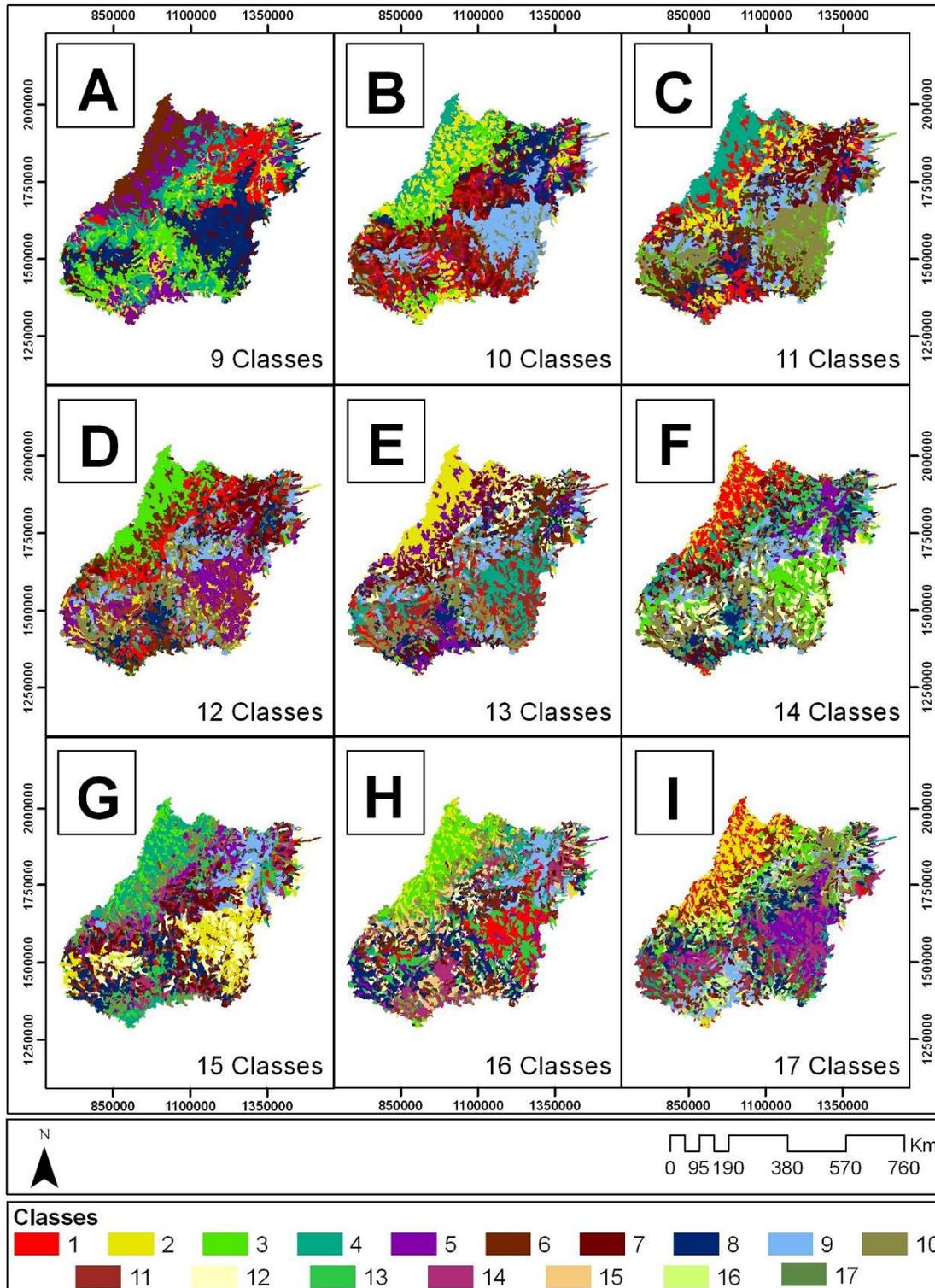


Anexo 5- Classificação utilizando apenas os parâmetros de curvatura (máx. e mín.), área de contribuição (média), altimetria (média, desvio padrão, amplitude, máx. e mín.), declividade (máx. e mín.), índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método das K-médias, com 19 classes (a), 20 classes (b). Classificação utilizando todos os parâmetros, menos área de contribuição mínima, direção de fluxo e aspecto, com 2 classes (c), 3 classes (d), 4 classes (e), 5 classes (f), 6 classes (g), 7 classes (h) e 8 classes (i).



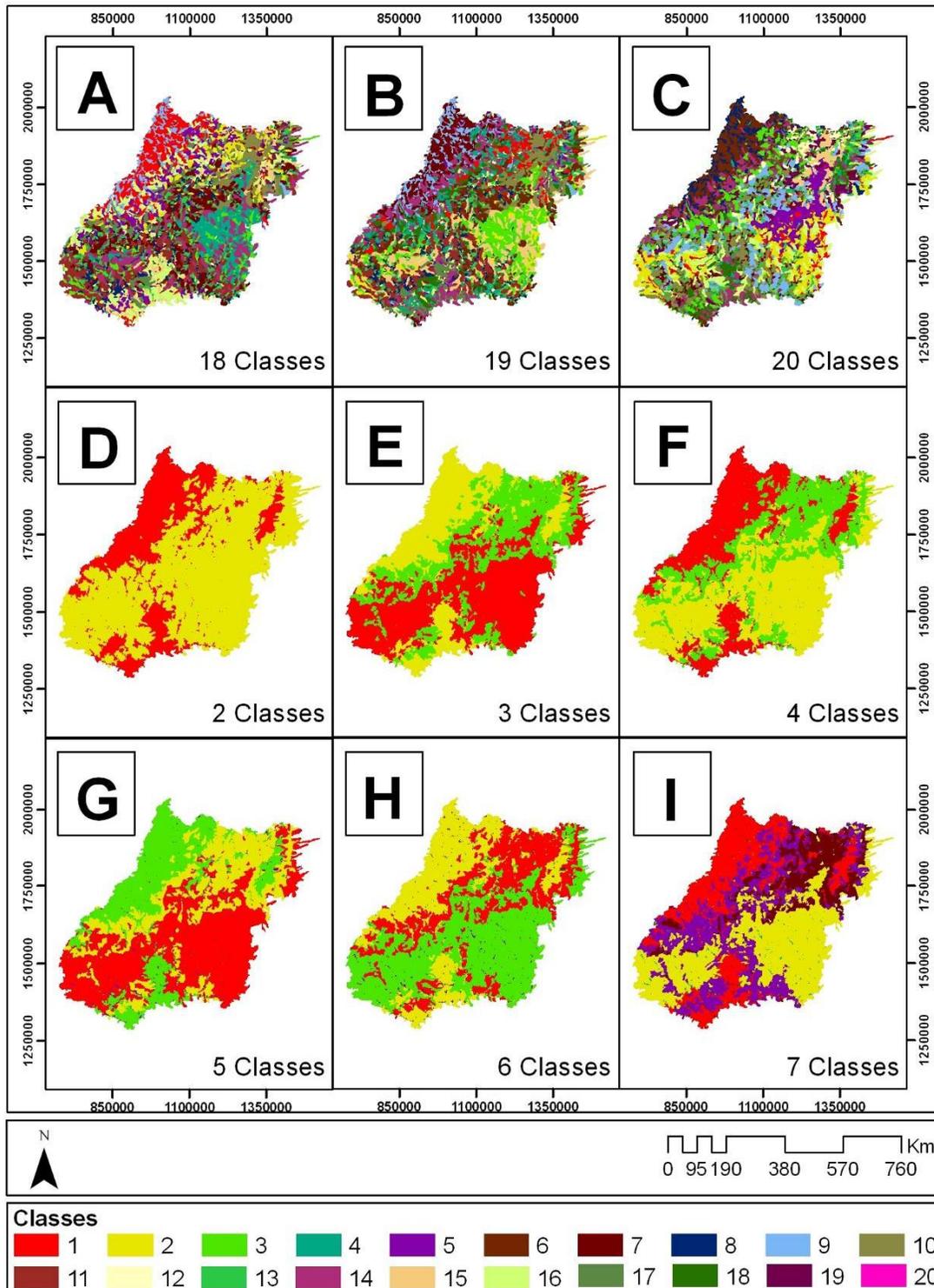


Anexo 6- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos área de contribuição mínima, direção de fluxo e aspecto, pelo método das K-médias, com 9 classes (a), 10 classes (b), 11 classes (c), 12 classes (d), 13 classes (e), 14 classes (f), 15 classes (g), 16 classes (h) e 17 classes (i).



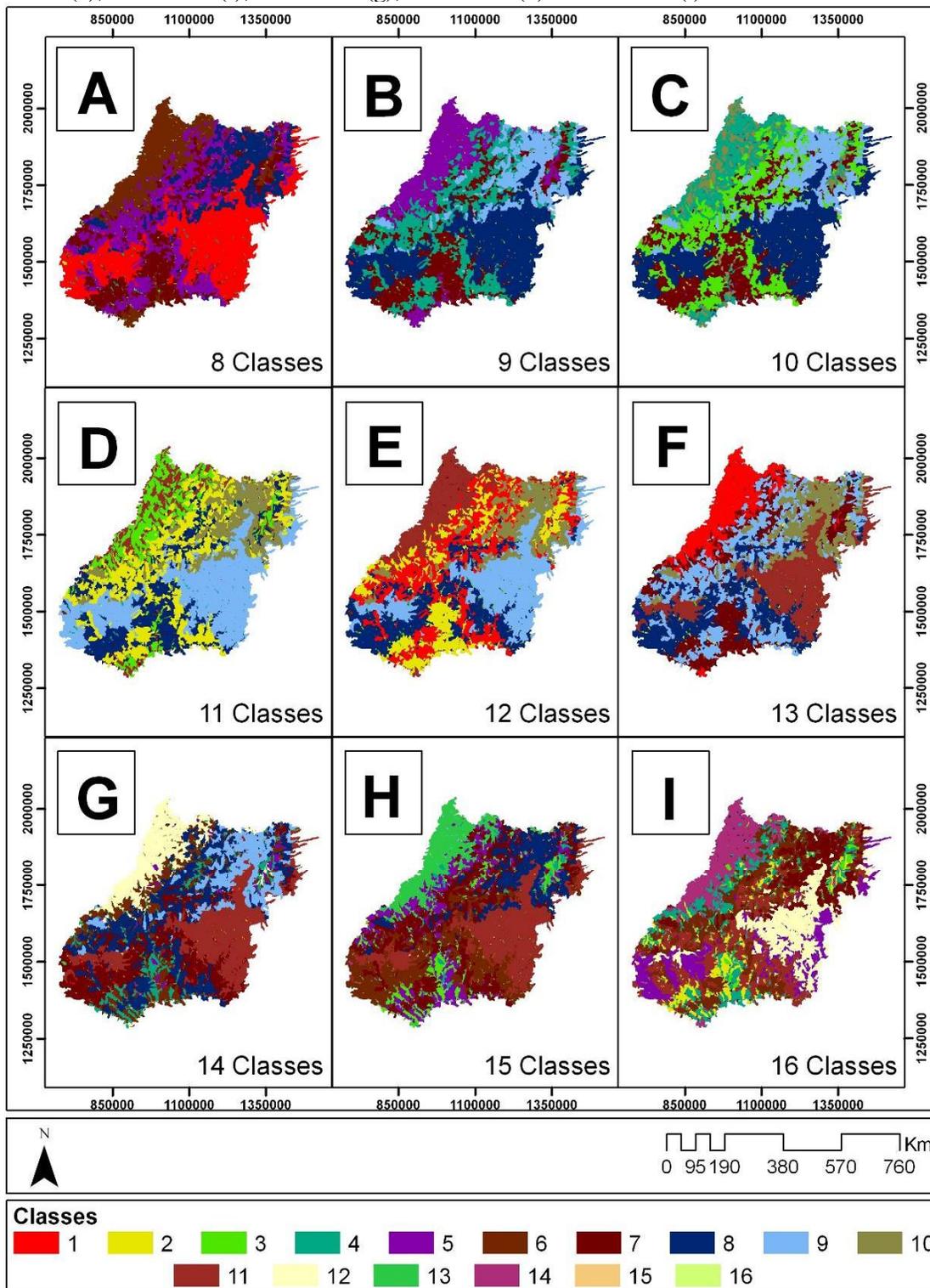


Anexo 7- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos área de contribuição mínima, direção de fluxo e aspecto, pelo método das K-médias, com 18 classes (a), 19 classes (b), 20 classes (c). Classificação utilizando os apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição (menos o mínimo e o máximo) e direção de fluxo, pelo método das K-médias, com 2 classes (d), 3 classes (e), 4 classes (f), 5 classes (g), 6 classes (h) e 7 classes (i).



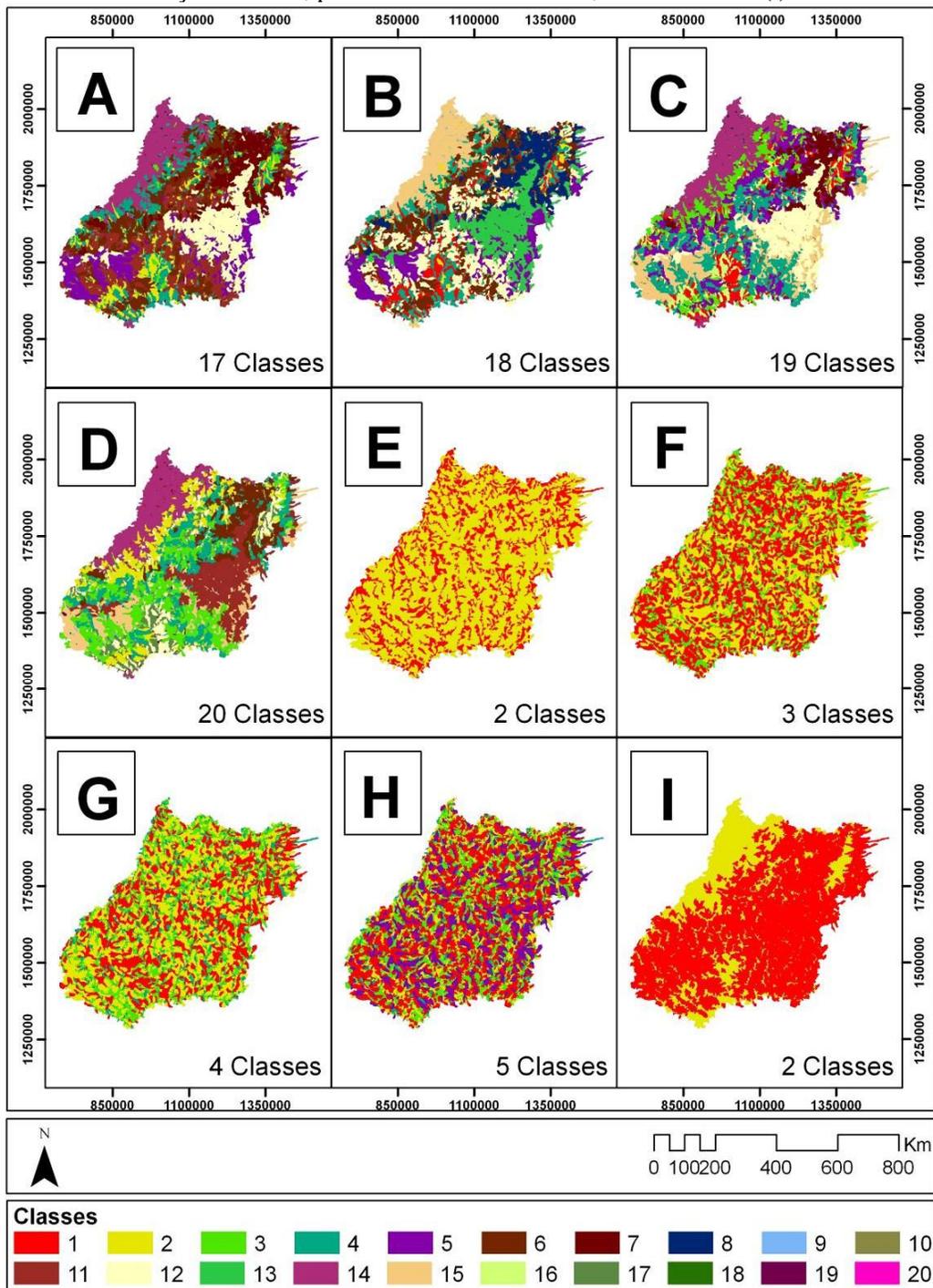


Anexo 8- Classificação utilizando os apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição (menos o mínimo e o máximo) e direção de fluxo, pelo método das K-médias, com 8 classes (a), 9 classes (b), 10 classes (c), 11 classes (d), 12 classes (e), 13 classes (f), 14 classes (g), 15 classes (h) e 16 classes (i).



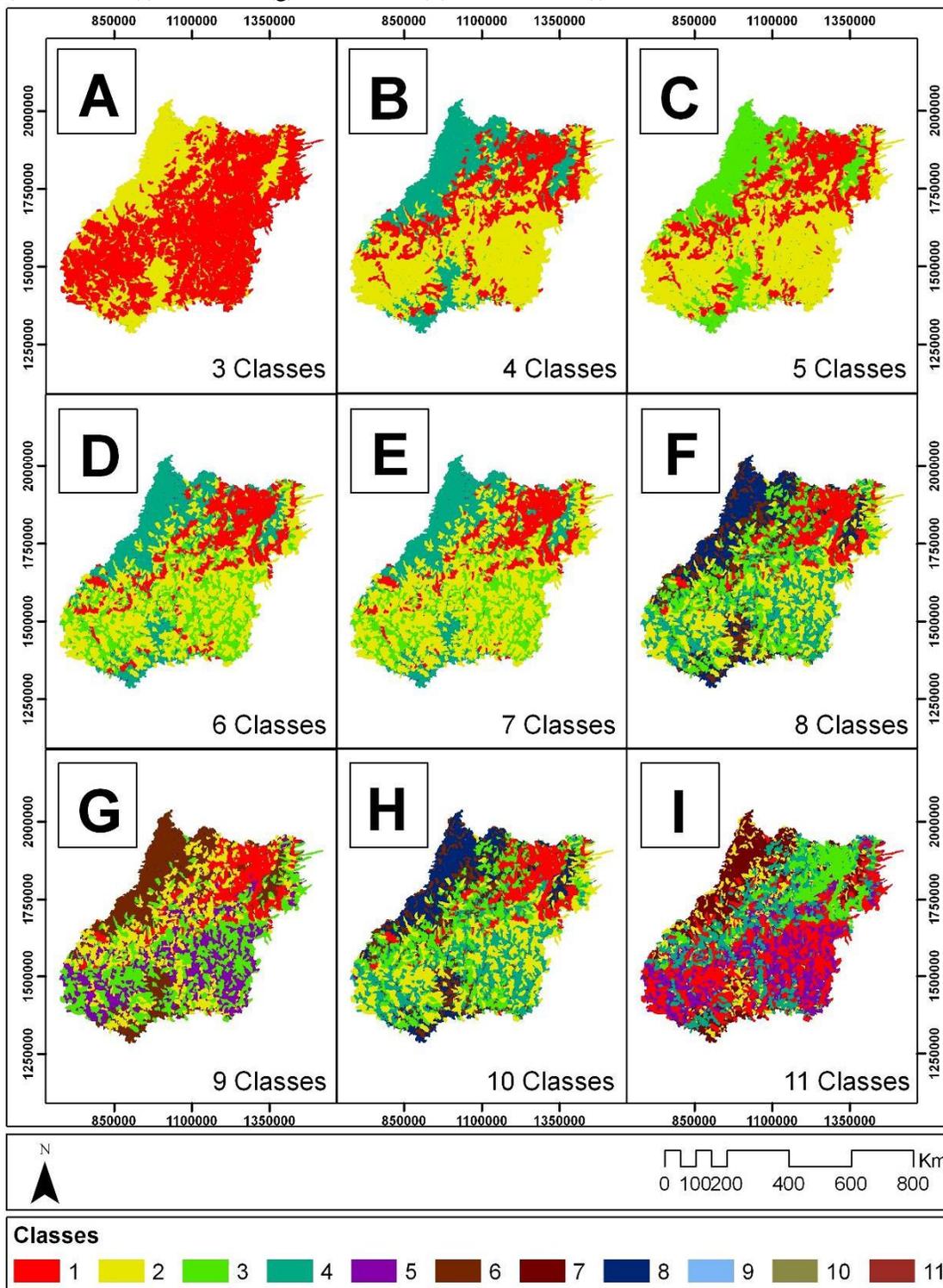


Anexo 9- Classificação utilizando apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição (menos o mínimo e o máximo) e direção de fluxo, pelo método das K-médias, com 17 classes (a), 18 classes (b), 19 classes (c) e 20 classes (d). Classificação utilizando apenas os parâmetros de área, perímetro, índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método das K-médias, com 2 classes (e), 3 classes (f), 4 classes (g) e 5 classes (h). Classificação utilizando todos os parâmetros, menos área de contribuição mínima, pelo método de Kohonen, com 2 classes (i).



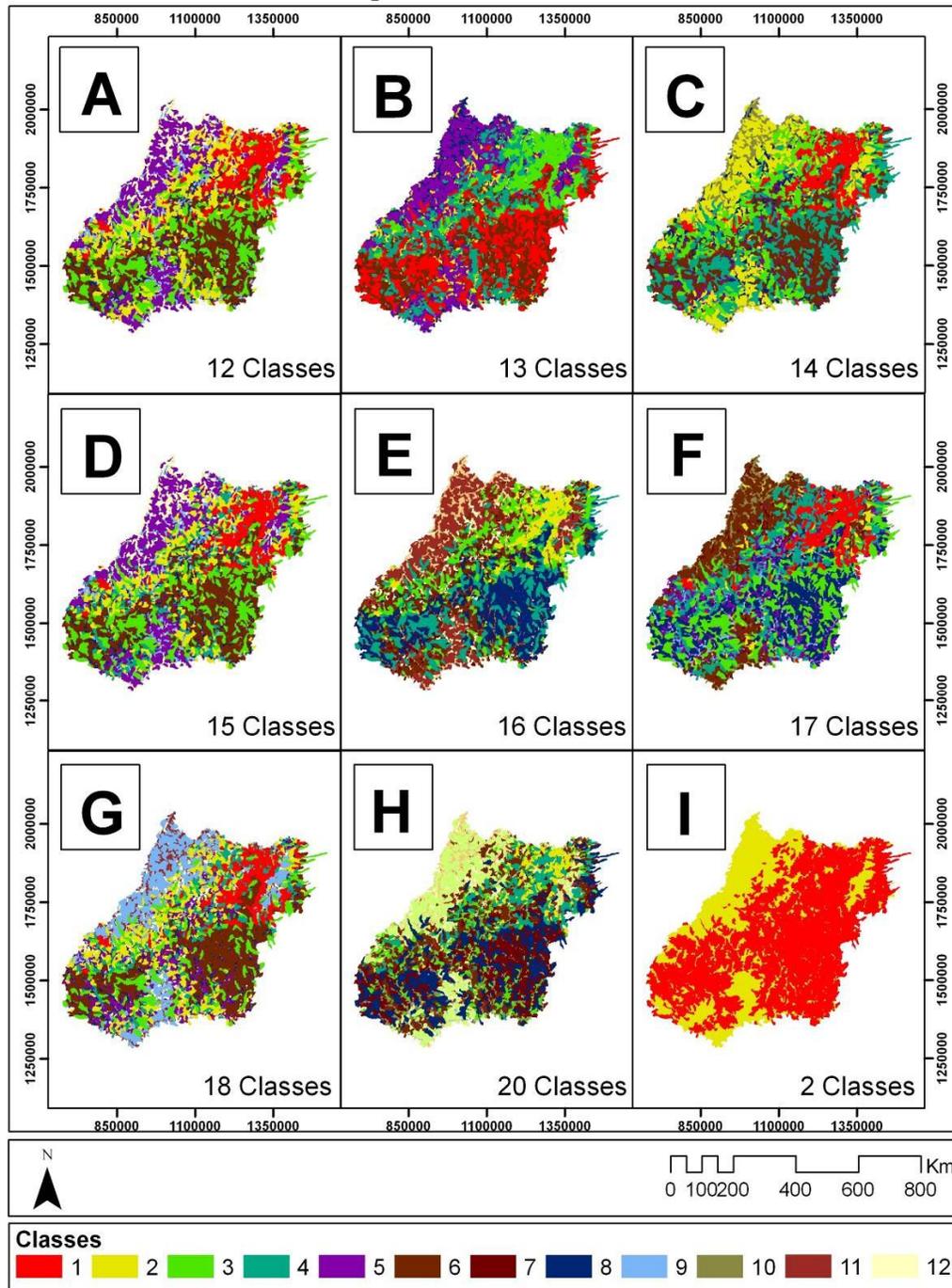


Anexo 10- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos área de contribuição mínima, pelo método de Kohonen, com 3 classes (a), 4 classes (b), 5 classes (c), 6 classes (d), 7 classes (e), 8 classes (f), 9 classes (g), 10 classes (h) e 11 classes (i).



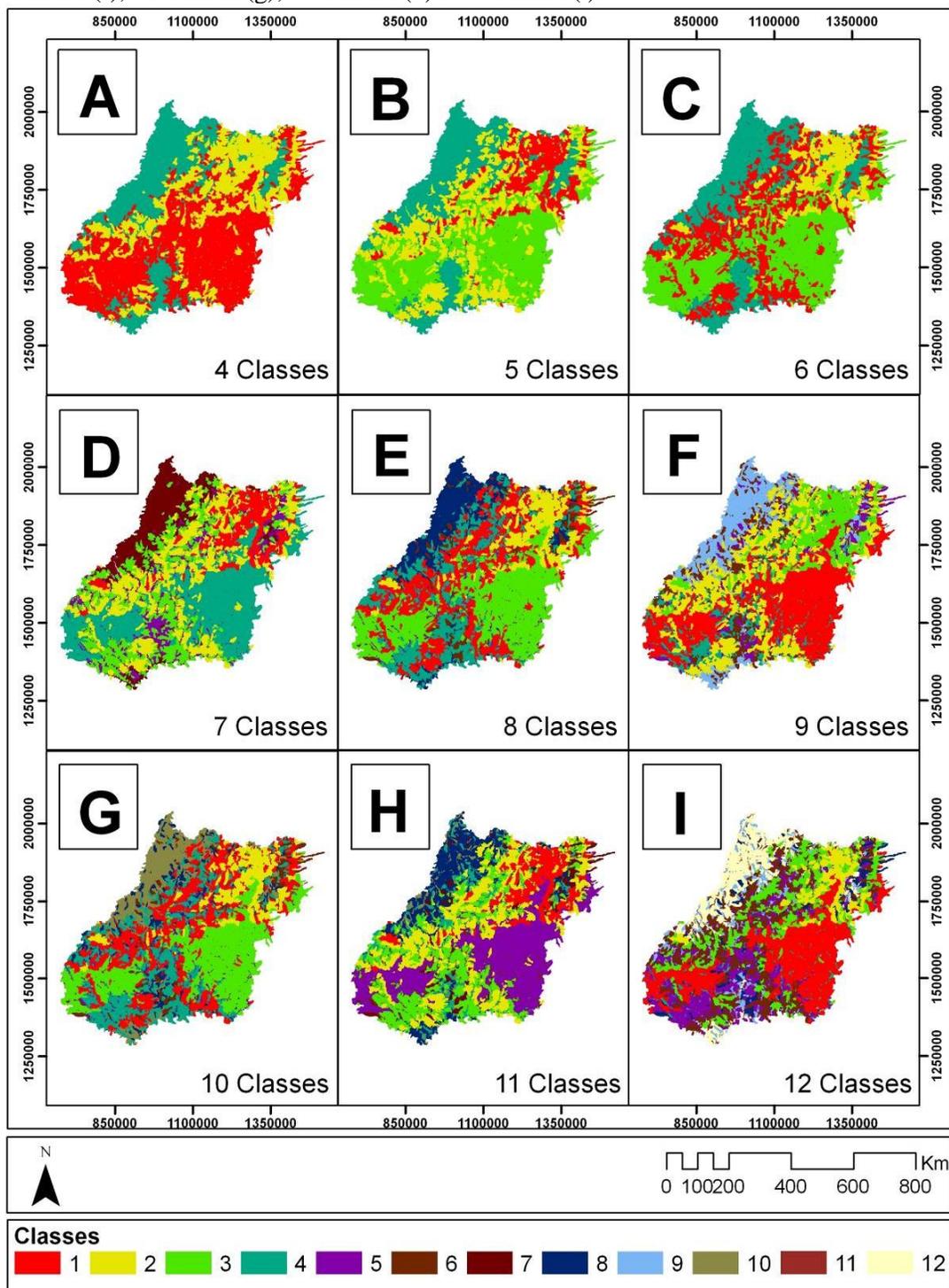


Anexo 11- Classificação utilizando todos os parâmetros, menos área de contribuição mínima, pelo método de Kohonen, com 12 classes (a), 13 classes (b), 14 classes (c), 15 classes (d), 16 classes (e), 17 classes (f), 18 classes (g) e 20 classes. Classificação utilizando apenas os parâmetros de curvatura (máx. e mín.), área de contribuição (média), altimetria (média, desvio padrão, amplitude, máx. e mín.), declividade (máx. e mín.), índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, método de Kohonen, com 2 classes (i).



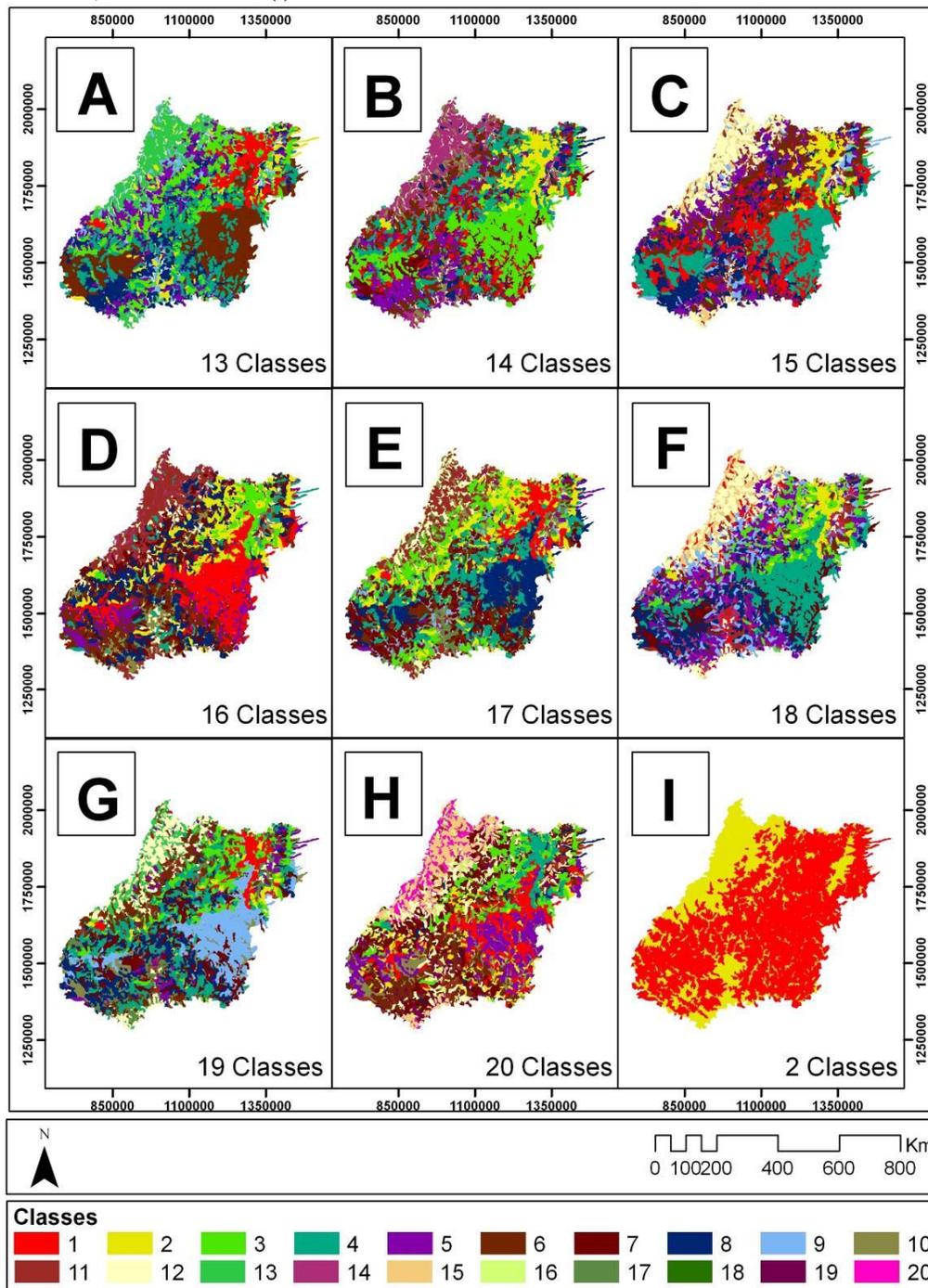


Anexo 12- Classificação utilizando apenas os parâmetros de curvatura (máx. e mín.), área de contribuição (média), altimetria (média, desvio padrão, amplitude, máx. e mín.), declividade (máx. e mín.), índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, método de Kohonen, com 4 classes (a), 5 classes (b), 6 classes (c), 7 classes (d), 8 classes (e), 9 classes (f), 10 classes (g), 11 classes (h) e 12 classes (i).



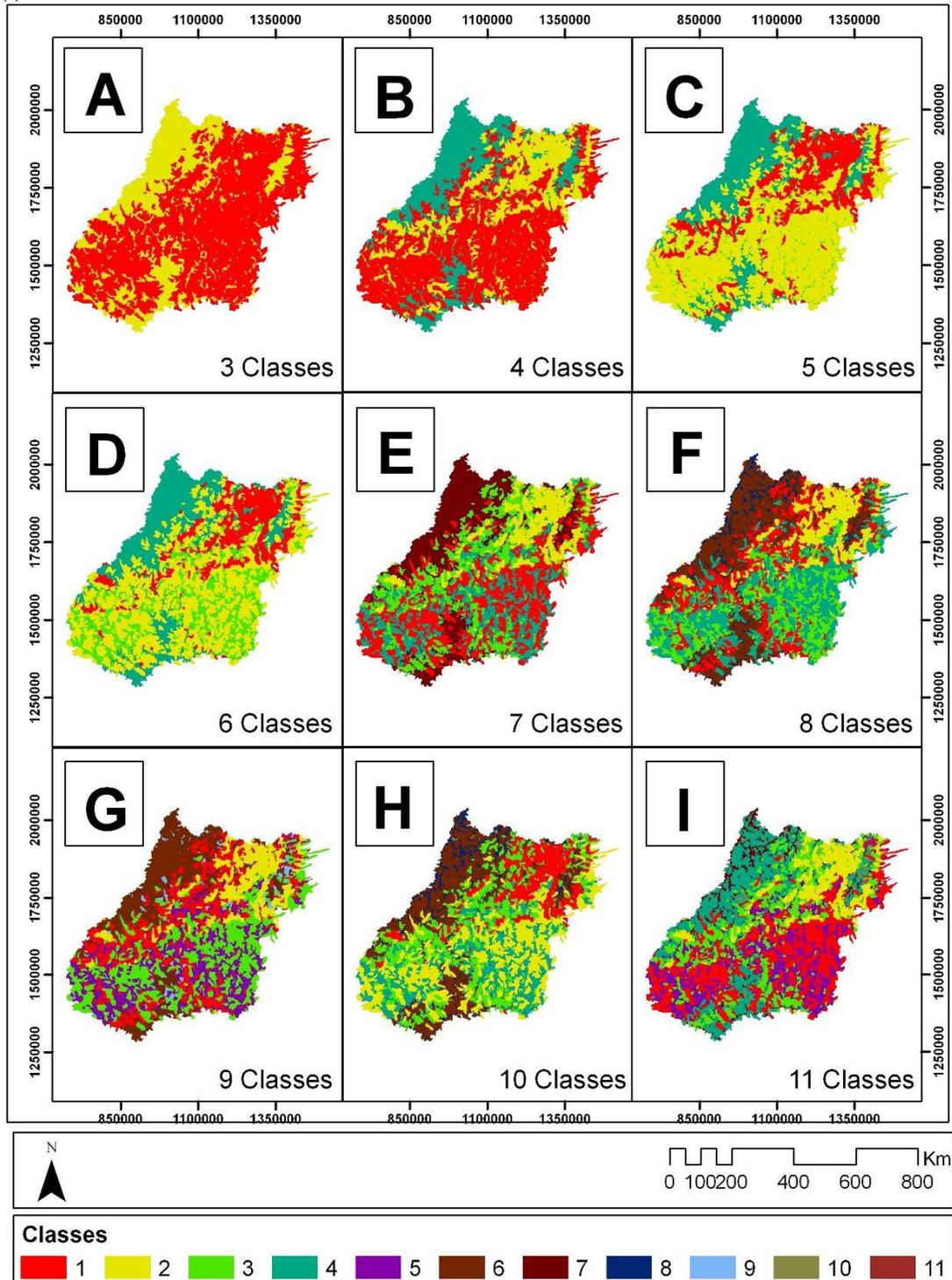


Anexo 13- Classificação utilizando apenas os parâmetros de curvatura (máx. e mín.), área de contribuição (média), altimetria (média, desvio padrão, amplitude, máx. e mín.), declividade (máx. e mín.), índice de circularidade, índice de sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método de Kohonen, com 13 classes (a), 14 classes (b), 15 classes (c), 16 classes (d), 17 classes (e), 18 classes (f), 19 classes (g) e 20 classes (h). Classificação utilizando todos os parâmetros menos área de contribuição mínima, direção de fluxo e aspecto, pelo método de Kohonen, com 2 classes (i).



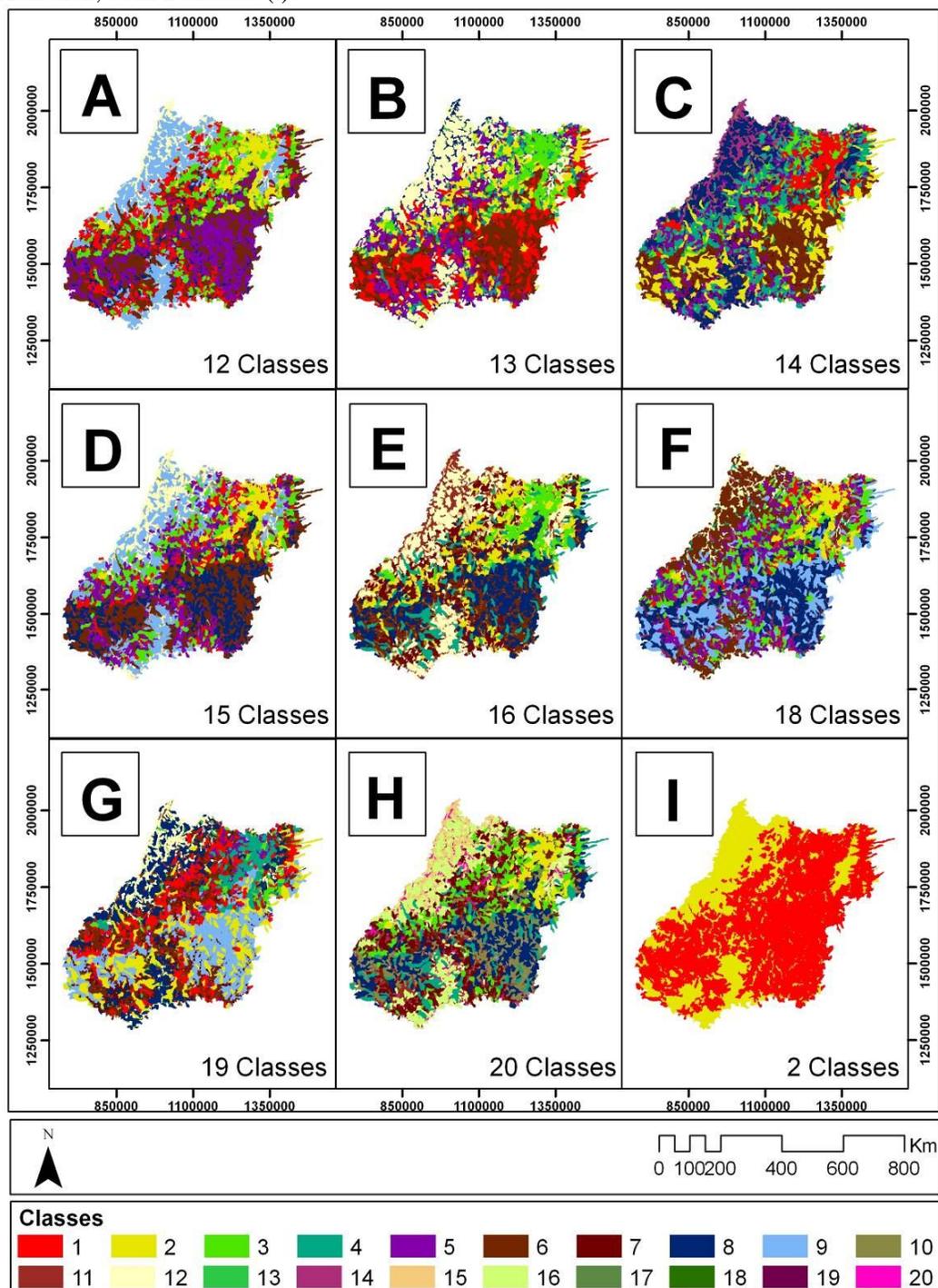


Anexo 14- Classificação utilizando todos os parâmetros menos área de contribuição mínima, direção de fluxo e aspecto, pelo método de Kohonen, com 3 classes (a), 4 classes (b), 5 classes (c), 6 classes (d), 7 classes (e), 8 classes (f), 9 classes (g), 10 classes (h) e 11 classes (i).



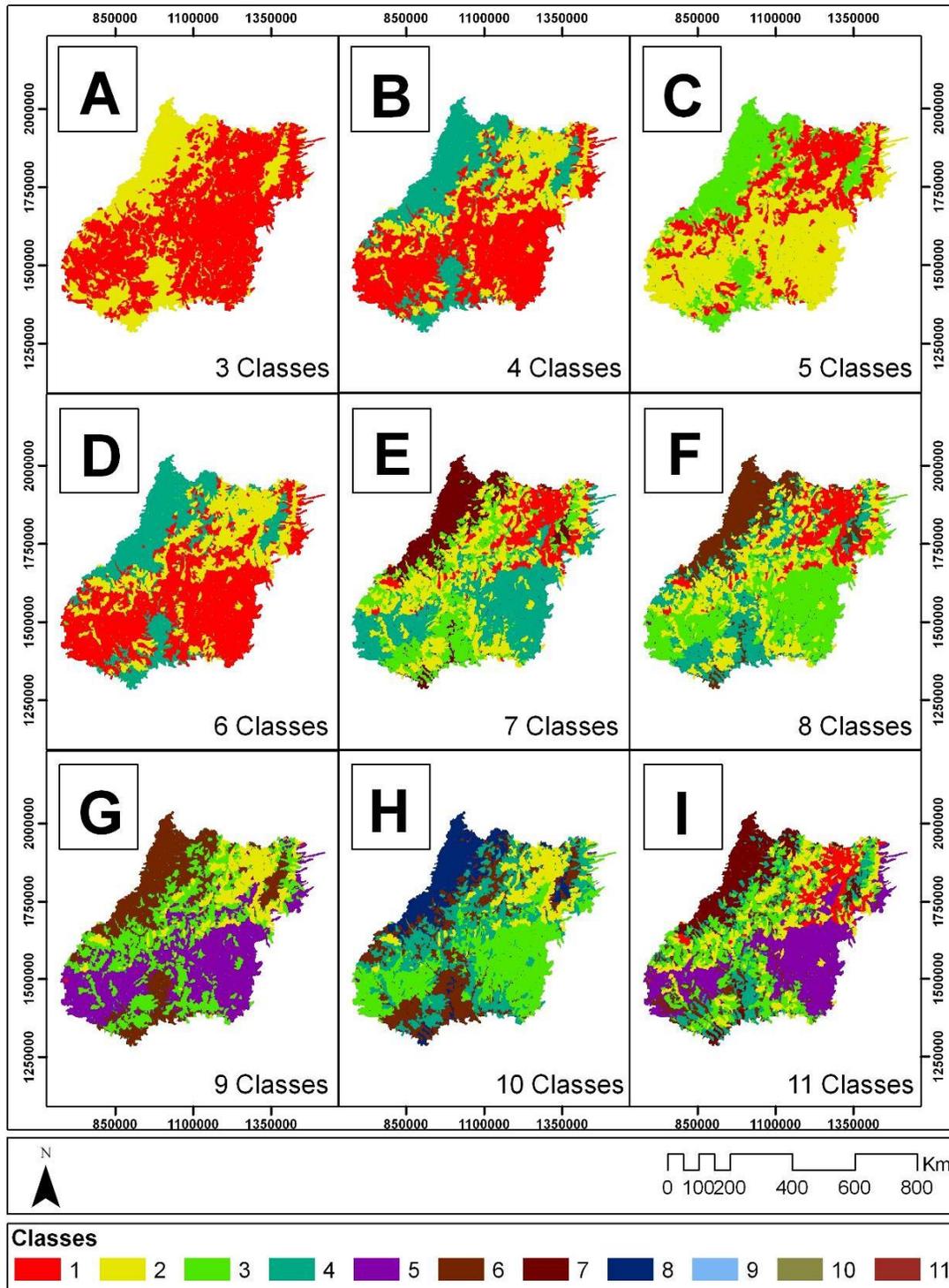


Anexo 15- Classificação utilizando todos os parâmetros menos área de contribuição mínima, direção de fluxo e aspecto, pelo método de Kohonen, com 12 classes (a), 13 classes (b), 14 classes (c), 15 classes (d), 16 classes (e), 18 classes (f), 19 classes (g), e 20 classes (h). Classificação utilizando apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição (menos o mínimo e o máximo) e direção de fluxo, pelo método de Kohonen, com 2 classes (i).



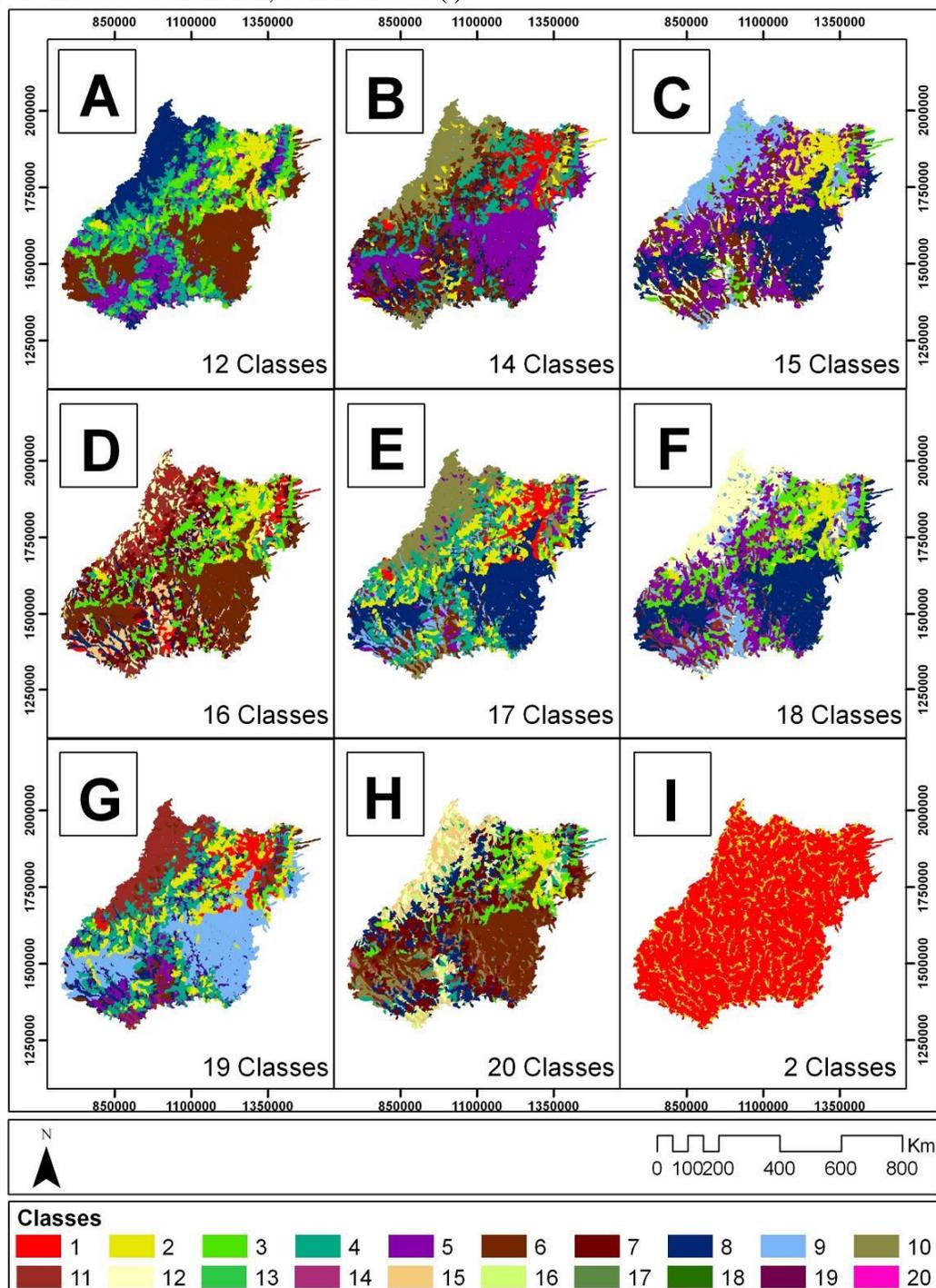


Anexo 16- Classificação utilizando apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição (menos o mínimo e o máximo) e direção de fluxo, pelo método de Kohonen, com 3 classes (a), 4 classes (b), 5 classes (c), 6 classes (d), 7 classes (e), 8 classes (f), 9 classes (g), 10 classes (h) e 11 classes (i).





Anexo 17- Classificação utilizando apenas os parâmetros de altimetria, declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição (menos o mínimo e o máximo) e direção de fluxo, pelo método de Kohonen, com 12 classes (a), 14 classes (b), 15 classes (c), 16 classes (d), 17 classes (e), 18 classes (f), 19 classes (g) e 20 classes (h). Classificação utilizando os parâmetros de área, perímetro, índice de circularidade, sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método de Kohonen, com 2 classes (i).





Anexo 18- Classificação utilizando os parâmetros de área, perímetro, índice de circularidade, sinuosidade e densidade de drenagem, pelo método de Kohonen, com 3 classes (a), 4 classes (b), 5 classes (c), 6 classes (d), 7 classes (e), 8 classes (f), 9 classes (g), 10 classes (h) e 11 classes (i).

