



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 14, nº 2 (2013)



ANÁLISE MORFOMÉTRICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS FLUVIAIS COMO INDICADORES DE PROCESSOS EROSIVOS E APORTE DE SEDIMENTOS NO ENTORNO DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA (UHE) CORUMBÁ IV

FLUVIAL MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE CONTRIBUTORS WATERSHEDS AROUND THE RESERVOIR OF THE HYDROELECTRIC POWER PLANT (HPP) CORUMBÁ IV AS INDICATORS OF THE EROSION AND SEDIMENT ACCUMULATION PROCESS

Wagner Santos de Almeida

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro –
Asa Norte – Brasília – DF – CEP 70910-900
E-mail: wagnersa@unb.br / wagnersa_98@yahoo.com

Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro –
Asa Norte – Brasília – DF – CEP 70910-900
E-mail: nmsouza@unb.br

Dirceu Silveira Reis Junior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro –
Asa Norte – Brasília – DF – CEP 70910-900
E-mail: dirceu.reis@gmail.com

José Camapum de Carvalho

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília – Campus Universitário Darcy Ribeiro –
Asa Norte – Brasília – DF – CEP 70910-900
E-mail: camapum@unb.br

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
24/01/2012

Data de Aprovação:
07/08/2013

Palavras-chave:

Processos erosivos; aporte de sedimentos; morfometria fluvial e geoprocessamento.

Keywords:

Erosive processes; fluvial morphometric and geoprocessing.

Resumo

O artigo apresenta os resultados obtidos com a análise morfométrica fluvial, em seus aspectos linear, espacial e hipsométrico, de algumas das bacias hidrográficas contribuintes ao reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV, no Município de Luziânia (GO). O objetivo da pesquisa foi a realização de análise de parâmetros morfométricos fluviais, como subsídio para verificação da propensão de ocorrência de processos erosivos e de aporte de sedimentos em bacias hidrográficas no entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV. Foram utilizadas imagens dos sensores remotos orbital e suborbital, como imagem do satélite *Quick-Bird* e ortofotos obtidas antes do alagamento do reservatório da usina hidrelétrica (UHE) Corumbá IV, bem como modelos numéricos de terreno (MNT), com dados de mapa topográfico e de interferometria de radar da missão *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM-NASA), além da base cartográfica digital e de mapa geológico na escala de 1:250.000. Foram utilizados algoritmos de geoprocessamento inseridos em sistemas de informações geográficas, o sistema ArcGis e o sistema Spring. A

aplicação desses algoritmos resultou na obtenção de indicadores morfométricos lineares, espaciais e hipsométricos das bacias estudadas que permitiram indicar as áreas mais propensas à ocorrência de processos erosivos e de aporte de sedimentos, que são potencializados por interferências antrópicas no uso do seu solo, principalmente pela remoção da cobertura vegetal, que podem vir a reduzir a vida útil do reservatório da UHE em questão.

Abstract

This paper presents a morphometric analysis that includes linear, spatial and hypsometric aspects of some watersheds that contribute to Corumba IV hydroelectric power plant's reservoir, located in the city of Luziania, Goias state. The goal was identify the tendency to erosiveness and sediment delivery in selected watersheds that contribute to the reservoir based upon fluvial morphometric parameters. The study used Quick-Bird satellite's image and ortophotos obtained before the Corumba IV's power plant's reservoir overflow, as well as terrain numerical models (MNT), with topographic map and radar interferometry data from Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM-NASA), along with the digital cartographic base and the geological map in the scale of 1:250.000. Geoprocessing algorithms were used within geographical information systems, ArcGis and Spring systems, to obtain linear, spatial and hypsometrics of the watersheds selected in the study, which provided an indication of prone areas to the occurrence of erosive processes and sediment delivery, usually magnified by human activities, mainly vegetation removal of soil surface, which may reduce the economic life span of the reservoir..

Introdução

As bacias hidrográficas contribuintes a um reservatório em uma usina hidrelétrica (UHE) podem apresentar propensões à formação de processos erosivos que acarretam a deposição de sedimentos e, por sua vez, o assoreamento do reservatório, com diminuição da área do espelho de água e do seu volume como um todo, o que impacta, de forma negativa, o potencial de geração de energia elétrica com consequente redução da vida útil do empreendimento de geração de energia.

Os processos erosivos presentes nessas bacias hidrográficas são influenciados pela morfometria fluvial, pela geologia local e potencializados pela interferência antrópica, entre outros fatores. A morfometria fluvial, associada à geologia local, determina o padrão da rede de drenagem e, naturalmente, a possibilidade determinados cursos d'água possuir maior ou menor energia no transporte de sedimentos em direção ao reservatório. Por sua vez, a influência antrópica no uso do solo potencializa os processos erosivos presentes nas bacias hidrográficas contribuintes, principalmente pela remoção da cobertura vegetal presente nessas bacias para práticas de agricultura mecanizada, de atividades pecuárias e de expansão urbana. Tal cobertura serviria como anteparo natural do solo à precipitação da chuva, o que evitaria a sua desagregação e o carreamento de sedimentos pelos cursos d'água fluviais.

Por meio da utilização de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento, associadas às técnicas de fotointerpretação, é possível efetuar a análise dos indicadores morfométricos das bacias contribuintes do reservatório da usina hidrelétrica, à luz da geologia local, o que permite a obtenção de subsídios para verificação da propensão de ocorrência de processos erosivos e de aporte de sedimentos.

Objetivo

O objetivo deste artigo foi realizar a análise morfométrica em algumas bacias hidrográficas contribuintes ao reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV, como subsídio para verificação da propensão de ocorrência de processos erosivos e de aporte de sedimentos ao seu reservatório.

Área de estudo

O reservatório da usina hidrelétrica (UHE) de Corumbá IV situa-se no curso principal do rio Corumbá, no Município de Luziânia (GO), a cerca de 90 km de Brasília, em uma área do bioma de cerrado.

A área de estudo possui 178 km² e está localizada entre as coordenadas geográficas de 16° 18' e 16° 28' de latitude sul e 48° 13' e 48° 19' de longitude oeste, entre as bacias hidrográficas do ribeirão Sarandi e do córrego Pirapitinga, contribuintes do reservatório da UHE Corumbá IV, localizada no Município de Luziânia (GO). A Figura 1 apresenta um esquema gráfico da área de estudo.

A geologia exerce uma influência considerável na análise morfométrica das bacias hidrográficas. Na área de estudo existem rochas de três grupos geológicos, a saber: o Araxá, o Paranoá e o Canastra. Arcaya (2007) constatou, ao cadastrar os processos erosivos no Distrito Federal, que a maior incidência de processos erosivos lineares, do tipo ravinas e voçorocas, ocorreram principalmente associados aos metarritimitos arenosos e argilosos do grupo Paranoá, aos xistos do grupo Araxá e aos filitos do grupo Canastra. Esses mesmos grupos geológicos ocorrem onde estão localizadas as bacias contribuintes do ribeirão do Sarandi e dos córregos do Pirapitinga e Mandaguai. Nos trabalhos de campo realizados na região, verificou-se que trechos desses cursos

fluviais apresentam, em suas margens, processos de deposição de sedimentos que foram carreados das partes mais elevadas de suas bacias hidrográficas em direção ao reservatório da UHE Corumbá IV.

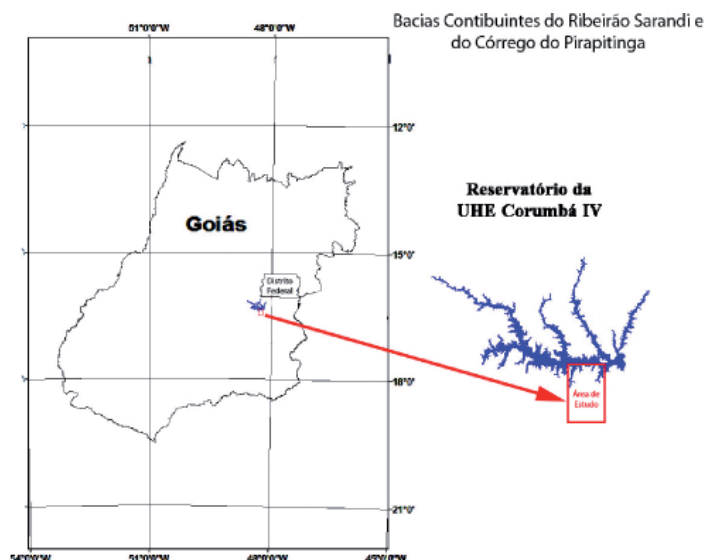


Figura 1 – Área de estudo.

No que tange à sua geomorfologia, a área de estudo apresenta, segundo SIEG (2007), duas unidades geomorfológicas: a) SRAIIA (mfr): Superfície Regional de Aplainamento IIA com cotas entre 900 e 1100m, com dissecação muito fraca, desenvolvida sobre rochas dos grupos geológicos Paranoá e Araxá; b) ZER/IIA(fo) – Zona de Erosão Recuante com dissecação forte, erosionando predominantemente a SRAIIA(mfr).

Com relação à sua pedologia, a área de estudo apresenta, segundo SIEG (2007), sete tipos de solos principais, a saber: a) **Cd1**: Associação de cambissolo distrófico ou álico (Tb); b) **Cd3**: Associação de CAMBISSOLO Tb, de textura média cascalhenta, com SOLOS LITÓLICOS de textura média a muito cascalhenta; c) **LEd1**: Associação de latossolo vermelho-escuro distrófico ou álico; d) **LEd5**: Associação de latossolo vermelho-escuro com latossolo vermelho-amarelo; e) **LVD2**: Associação de latossolo vermelho-amarelo com latossolo petroplíntico; f) **LPd**: Associação de latossolo petroplíntico com latossolo vermelho-amarelo e g) **Rd1**: Associação de solos litólicos, com cambissolo distrófico ou álico (Tb).

Materiais utilizados

Os materiais utilizados na pesquisa foram os necessários para aplicação dos algoritmos de geoprocessamento e de processamento de imagens e envolveram dados de relevo

do terreno, imagens de sensoriamento remoto e mapas temáticos, além do próprio sistema de geoprocessamento em si, descritos a seguir.

Dados de altimetria para produção dos modelos numéricos de terreno (MNT) e dados da geologia, geomorfologia e pedologia

Os dados disponíveis para a produção de modelos numéricos de terreno (MNT) são anteriores ao alagamento do reservatório da UHE Corumbá IV e oriundos das seguintes fontes: a) mapa topográfico Folha SE-22-X “GAMA”, escala 1:100.000, do IBGE; b) dados de interferometria radar obtidos da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), de 1999, com resoluções planimétrica de 90 metros e altimétrica de 15 metros; c) base cartográfica digital na escala de 1:2.000, com curvas de nível espaçadas de 2 metros, do ano de 2003.

Os dados disponíveis sobre a geologia, geomorfologia e pedologia da área de estudo foram obtidos de seus respectivos mapas, disponíveis em SIEG (2007). Esses mapas estavam em formato *shapefile* na escala de 1/250.000, que permitem o seu processamento e análise pelos sistemas de informações geográficas (SIG) ou sistemas de geoprocessamento utilizados na pesquisa em pauta.

Imagens digitais de sensores remotos

Foram utilizadas as seguintes imagens digitais de sensores remotos, orbital e suborbital: a) ortofotos resultantes de um voo aerofotogramétrico de 2003, anterior ao alagamento do reservatório da UHE Corumbá IV, na escala de 1/10.000, com recobrimento de 45% da área de estudo e com 45 cm de resolução espacial; b) imagem do satélite *Quick Bird* de 12/09/2007, com resolução espacial de 2,4 metros no modo multiespectral e 0,6m no modo pancromático, obtida em uma situação de cota mínima do reservatório da UHE Corumbá IV, correspondente ao período de seca na região.

Sistemas de informações geográficas (SIG) e softwares de processamento de imagens

A pesquisa em pauta, nas tarefas de geoprocessamento e de processamento de imagens digitais, utilizou o Sistema de Informações Georeferenciadas (SPRING), em sua versão 5.2, desenvolvido pelo INPE, bem como o Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGis, versão 9.0, desenvolvido pela ESRI.

Métodos aplicados

A metodologia aplicada envolveu a análise morfométrica das bacias contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV, utilizando-se algoritmos de geoprocessamento e de processamento das imagens de sensoriamento remoto.

Análise morfométrica das bacias hidrográficas contribuintes

Delimitação das bacias hidrográficas contribuintes

Com objetivo de se definirem as principais bacias contribuintes na área de estudo, foi utilizada a metodologia para delimitação das bacias hidrográficas constante em ESRI (2004), que utiliza algoritmos de cálculo de fluxo hidrológico a partir do modelo numérico do terreno, gerado a partir dos dados de altimetria do SRTM, cujos passos metodológicos são apresentados na Figura 2 e descritos a seguir.

Delimitação de bacias hidrográficas a partir de MNT

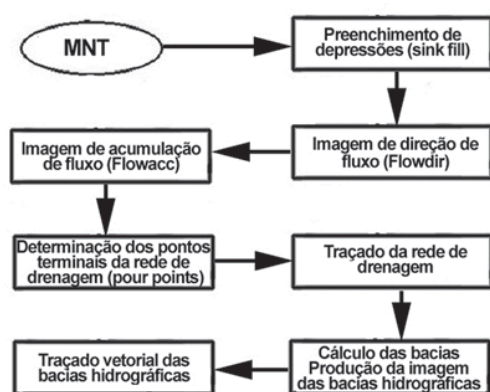


Figura 2 – Passos metodológicos para traçado de bacias hidrográficas a partir de MNT (adaptado de ESRI, 2004).

a) Preenchimento de depressões (*sink fill*): preenchimento na imagem do modelo numérico de terreno (MNT) de valores espúrios altimétricos negativos;

b) Produção da imagem de direção de fluxo hidrológico (*Flowdir*): para cada pixel, calculam-se a declividade, a direção e a quantidade de fluxo hidrológico que se acumulou a montante daquele pixel, obtendo-se os fatores de relevo;

c) Produção da imagem de acumulação de fluxo hidrológico (*Flowacc*): a partir da imagem de direção de fluxo hidrológico, o algoritmo produz uma imagem de acumulação de fluxo;

d) Determinação dos pontos terminais da rede de drenagem: a partir da imagem de acumulação de fluxo hidrológico, o algoritmo determina os pontos principais da rede de drenagem para cada bacia hidrográfica;

e) Traçado da rede de drenagem: a partir dos pontos principais da rede de drenagem, é produzida uma imagem com a rede de drenagem para cada bacia hidrográfica;

f) Traçado das bacias hidrográficas: a partir da imagem de direção de fluxo hidrológico, juntamente com os pontos terminais da rede de drenagem, o algoritmo gera os polígonos que delimitam as bacias hidrográficas, no formato de imagem e/ou vetorial.

Georreferenciamento das imagens de sensores remotos

As bandas multiespectrais da imagem *Quick Bird* foram submetidas ao processo de fusão com a banda pancromática utilizando-se o sistema Spring, conforme metodologia descrita em ALMEIDA *et al* (2009). Em seguida, as imagens foram georreferenciadas utilizando-se o algoritmo de “registro de imagens”, na projeção cartográfica UTM/Gauss, com *datum* horizontal SAD-69 e no meridiano central de 51° Oeste (Zona UTM 22).

Traçado da rede de drenagem

As redes de drenagem das bacias contribuintes na área de estudo foram obtidas por meio de tarefas de digitalização, utilizando os algoritmos de edição vetorial do SPRING, sobre a imagem *Quick Bird* georreferenciada. Foram considerados os métodos de ordenamento fluvial de cursos d’água, propostos por Strahler (1957) e citados por Christofoletti (1980), das principais bacias contribuintes com cursos d’água de ordem superior a 3 (três).

Obtenção dos parâmetros morfométricos das bacias contribuintes

Baseado em Christofoletti (1980), os parâmetros para realização da análise morfométrica das bacias contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV são obtidos diretamente utilizando os algoritmos dos SIG, a partir dos arquivos vetoriais das redes de drenagens. O critério para determinação da hierarquia fluvial define que os canais iniciais sem tributários são os de primeira ordem. A partir da confluência de dois canais de primeira ordem surgem os segmentos de canais de segunda ordem e assim sucessivamente, até se atingirem os canais de ordem maior que serão os principais da bacia hidrográfica contribuinte. A partir da ordem fluvial, executa-se a análise morfométrica linear, depois se seguem as análises morfométricas espacial e hipsométrica.

a) Análise morfométrica linear

Na análise morfométrica linear, são considerados índices ao longo das drenagens, dentre os quais: número de canais (N); ordem da bacia (O); razão de bifurcação (R_b); índice de comprimento médio dos canais (I_{cm}); relação entre o índice de comprimento médio dos canais e a relação de bifurcação (I_{cm}/R_b); comprimento do rio principal (L); extensão do per-

curso superficial (E_{ps}); índice de sinuosidade (I_s) e gradiente dos canais (G_c).

O índice “razão de bifurcação” (R_b) é determinado com base na ordem dos cursos d’água (O) e no número de canais (N), a partir da construção do gráfico $N \times O$, de onde se obtém a reta de correlação:

$$N = a + bO \dots\dots\dots(1),$$

da qual se define a razão de bifurcação:

$$Rb = b = \Delta Nu / \Delta u \dots\dots\dots(2).$$

Quanto maior for o valor de R_b , maior é a sua propensão para ocorrência de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação.

O “índice de comprimento médio” (I_{cm}) é a relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem. Em uma determinada bacia, os comprimentos médios dos canais de cada ordem ordenam-se segundo uma série geométrica direta, cujo primeiro termo é o comprimento médio dos canais de primeira ordem, e a razão é a relação entre os comprimentos médios:

$$I_{cm} = Lm_u / Lm_{u-1} \dots\dots\dots(3),$$

na qual I_{cm} é a relação entre os comprimentos médios dos canais; Lm_u é o comprimento médio dos canais de determinada ordem “ u ”, e Lm_{u-1} é o comprimento médio dos canais de ordem “ $u-1$ ” imediatamente inferior.

A razão entre I_{cm} / R_b é um índice adicional para confirmar a probabilidade de ocorrência de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação, em uma relação inversamente proporcional, ou seja, quanto menor a I_{cm} / R_b , maior será essa probabilidade.

O índice “extensão do percurso fluvial” (E_{ps}), segundo Christofolletti (1980), expressa a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente e atesta o desenvolvimento tanto hidrológico como o fisiográfico de uma bacia hidrográfica correspondente.

O “índice de sinuosidade” (I_s) é dado pela relação entre o comprimento do canal principal da nascente até o enxutório e a distância mais curta, em linha reta, entre esses mesmos pontos. Segundo observam Lana *et al.* (2001), a sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos transportada pelo canal, pela compartimentação litológica, por sua estruturação geológica e por sua declividade. Quanto maior o valor de I_s , mais sinuoso (meandrântico) será o canal fluvial. Valores próximos a 1,0 indicam que o canal tende a ser retilíneo; já os valores superiores a 2,0 sugerem canais sinuosos, e os valores intermediários indicam formas transicionais, regulares e irregulares.

b) Análise morfométrica espacial

Na análise morfométrica espacial, constam medidas planimétricas e lineares, incluindo os seguintes índices: área da bacia (A); comprimento da bacia (L_b); relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia (L_b/A); forma da bacia (F); índice de circularidade (I_c); densidade da drenagem (D_d); coeficiente de manutenção (C_m); densidade hidrográfica (D_h) e razão de textura (R_{tex}).

Para determinação do índice “forma da bacia” (F), o modelo utilizado foi o proposto por Lima (2002), que consiste em traçar uma figura geométrica (círculo, retângulo, triângulo), independentemente da escala, que abranja a bacia como um todo.

O “índice de circularidade” (I_c) é obtido a partir da relação entre a área total da bacia e a área de um círculo de perímetro igual ao da área total da bacia. O valor de (I_c), próximo à unidade, indica que a região estudada tenderá à forma circular. Segundo Schumm (1956) *apud* Lana *et al.* (2001), valores até 0,51 representam níveis de escoamento de baixo a moderado, com pequena contribuição para a concentração de águas, favorecendo o escoamento superficial. Os valores maiores que 0,51 até a unidade expressam níveis moderados a altos de processos de inundação.

O índice “densidade de drenagem” (D_d) é dado pela relação entre comprimento total dos canais de uma bacia e sua área total e caracteriza-se por indicar, segundo Horton (1945), o comportamento hidrológico das rochas quanto à sua permeabilidade e ao condicionamento do escoamento superficial. De acordo com Vilela & Mattos (1975), a densidade de drenagem (D_d) pode variar de 0,5 km/km² para bacias com pouca drenagem a valores acima de 3,5 km/km² para bacias excepcionalmente bem drenadas, ou seja, valores de densidade de drenagem (D_d) baixos apontam para uma alta infiltração, enquanto os altos para um alto escoamento da bacia hidrográfica estudada.

O índice “coeficiente de manutenção” (C_m) é dado pelo inverso da densidade de drenagem (D_d) e, segundo Schumm (1956) *apud* Borsato & Martoni (2004), indica a área de drenagem necessária em quilômetros ou metros quadrados, para sustentar um quilômetro ou metro linear de canal. Conforme afirma Lana *et al.* (2001), os valores de referência para o índice em questão oscilam entre 2 km²/km, para altos índices e 0,3 km²/km para baixos índices de capacidade de manutenção de canais.

O índice “densidade hidrográfica” (D_h), por sua vez, relaciona o número de canais com a área total da bacia. Esse índice, segundo Christofolletti (1980), expressa o comportamento da rede hidrográfica em sua capacidade de gerar novos cursos d’água em função das características pedológicas, geológicas e climáticas da área, o que pode prestar-se a inferências qualitativas quanto à permeabilidade da área de estudo, ao nível do lençol freático e à distribuição da precipitação sobre a bacia hidrográfica.

O índice “razão de textura” (R_{tex}) de uma bacia hidrográfica é dado pela relação entre o número total (NT) de segmentos de rios de 1ª ordem e o respectivo perímetro, em quilômetros, da bacia. Esse índice permite avaliar qualitativamente a capacidade de infiltração da água e o escoamento superficial, além de contribuir, juntamente a outros índices como a densidade de drenagem e a declividade média, segundo Vieira (1991), para uma melhor diferenciação entre os tipos de solo presentes em uma bacia hidrográfica.

c) Análise morfométrica hipsométrica

Na análise morfométrica hipsométrica, procura-se relacionar a bacia de drenagem com faixas altitudes, na qual são estudados os seguintes índices: gradiente de canais (G_c); coeficiente de massividade (C_{mas}); curva hipsométrica; amplitude altimétrica máxima da bacia (ΔH_{max}); altura média da bacia (H_{media}); área da integral hipsométrica (A_{ih}); índice de rugosidade (I_{rug}) e “coeficiente de rugosidade” (C_{rug}).

O índice “gradiente de canais” (G_c) é expresso em porcentagem e pode ser calculado pela relação entre a amplitude altimétrica das cotas a montante e jusante do canal e o comprimento do canal principal. A sua finalidade é não só indicar a declividade dos cursos d’água (HORTON, 1945), como também permitir inferências sobre as diferentes relações entre os níveis de base de uma ou mais bacias e, também, sobre a capacidade de provocar processos erosivos em seus canais.

Para se obter o cálculo do índice “coeficiente de massividade” (C_{mas}), adapta-se a formulação apresentada em Christofolletti (1980) no uso de dados de modelos numéricos de terreno (MNT), na qual se obtém primeiro a altura média da bacia hidrográfica:

$$H_{\text{media}} = \frac{\text{Amplitude altimétrica} \times A_{\text{ih}}}{100} \dots\dots\dots(4),$$

em que:

H_{media} = altura média da bacia hidrográfica, em metros;

A_{ih} = área da integral hipsométrica = área total acumulada por faixa altimétrica da bacia hidrográfica.

Em seguida, tem-se:

$$C_{\text{mas}} = H_{\text{media}} / A \dots\dots\dots(5),$$

em que:

C_{mas} = coeficiente de massividade;

A = área da bacia hidrográfica.

O índice “coeficiente de massividade” (C_{mas}) serve como indicativo do relevo erodido e deve ser analisado em

conjunto com a curva hipsométrica das bacias hidrográficas estudadas. No cálculo do (C_{mas}), quanto menor as áreas das bacias, maiores serão os seus valores e maior será a capacidade de transporte de sedimentos.

A curva hipsométrica tem, segundo Christofolletti (1980), a finalidade de exprimir a maneira pela qual o volume rochoso, situado abaixo da superfície topográfica, está distribuído desde a base até o topo. A pesquisa em pauta efetuou o seu cálculo pela utilização do modelo numérico de terreno (MNT), classificado por faixas de altitude e cálculo da área acumulada por faixas, de acordo a variação altimétrica por bacia hidrográfica.

O “índice de rugosidade” (I_{rug}) é obtido pelo produto entre a amplitude altimétrica e a densidade de drenagem. Esse índice correlaciona as declividades e o comprimento das vertentes com a densidade de drenagem. Segundo os estudos de Strahler (1957), índices de rugosidade altos implicam vertentes íngremes e longas. No entanto, para a adequada avaliação desse índice, é necessário observarem-se conjuntamente os valores da amplitude altimétrica e da densidade de drenagem, tendo em vista a possibilidade de ocorrência de altos índices de rugosidade, tanto em áreas com alta densidade de drenagem e baixa amplitude altimétrica, como em áreas com baixa densidade de drenagem e alta amplitude altimétrica.

Por sua vez, o índice “coeficiente de rugosidade” (C_{rug}) é obtido por meio do produto entre a densidade de drenagem e a declividade média da bacia. A determinação do coeficiente de rugosidade segue as orientações apresentadas por Rocha (1997), perante distribuição de classes com a finalidade de classificar os tipos de uso do solo, bem como avaliar a vazão superficial de propensão à erosão.

Os índices morfométricos relacionados à geologia da área de estudo são o padrão de drenagem e o tipo de vale, úteis para se corroborarem as análises morfométricas citadas.

Como observação final em relação à metodologia aplicada, o cálculo de certos índices não leva em consideração a variedade geomorfológica das bacias hidrográficas, o que, em princípio, não interfere nas informações que são obtidas pela análise morfométrica, em seus aspectos linear, espacial e hipsométrico. Todavia, além da variedade geomorfológica, a geologia local influencia também os valores dos índices morfométricos, os quais podem sofrer variações em uma única bacia hidrográfica. Assim, devem ser ressaltados que as bacias maiores, como a do ribeirão do Sarandi e a do córrego do Pirapitinga, por possuírem ordens de grandeza distintas das outras bacias da área de estudo, podem apresentar condições de transporte de sedimentos peculiares, as quais, para serem verificadas, necessitariam de medições hidrossedimentológicas *in loco* de longo prazo, em cada bacia hidrográfica estudada, o que não se coaduna com o objetivo da pesquisa em pauta.

Identificação de grupos similares de bacias

A análise de agrupamento é uma técnica estatística multivariada, que permite identificar grupos relativamente homogêneos, tendo como base as diferentes características das bacias contribuintes. Esta análise estatística foi aplicada para subsidiar, corroborar e apontar uma tendência nas análises morfométricas dessas bacias. Para realização desta análise estatística foram utilizados os índices mais significativos das análises morfométricas linear, espacial e hipsométrica, que sejam independentes entre si.

A identificação de grupos similares de bacias foi baseada no método de agrupamento “k-means” (McQueen, 1967; Mingoti, 2005), cujo algoritmo identifica a que grupo uma dada bacia pertence levando em consideração, de forma simultânea, a minimização da distância média da bacia em questão em relação ao centróide do mesmo grupo e a maximização da distância média dessa mesma bacia em relação aos centróides dos grupos restantes, utilizando os índices mais significativos das análises morfométricas linear, espacial e hipsométrica. A métrica de distância entre bacias empregada foi a distância euclidiana (d_{lk}), calculada com base nas características das bacias, que foram previamente padronizadas por meio de subtração da média e posterior divisão pelo desvio-padrão, evitando assim que diferenças acentuadas nas escalas das características afetassem os resultados. A distância euclidiana entre as bacias l e k é dada por:

$$d_{lk} = \sqrt{\sum_{i=1}^p (X_{il} - X_{ik})^2} \dots\dots\dots (6),$$

em que X_{il} e X_{ik} são os valores padronizados da característica i das bacias l e k , respectivamente, e p é o número de características empregadas no estudo. O valor padronizado da característica i de uma bacia l é calculado da seguinte forma:

$$X_{il} = \frac{Y_{il} - \bar{Y}_i}{S_i} \dots\dots\dots (7),$$

em que Y_{il} é o valor da característica i na bacia l , \bar{Y}_i e S_i são a média e o desvio-padrão da característica i , calculados com base em todas as bacias da área de estudo.

O algoritmo do método *k-means* baseia-se num valor pré-definido do número de grupos para determinar a melhor alocação das bacias, de forma que é necessário estabelecer uma maneira de identificar o número ótimo de grupos. A definição do número ótimo de grupos foi baseada na métrica s_k , sugerida por Rousseeuw (1987), calculada por:

$$s_k = \frac{b_k - a_k}{\max(a_k, b_k)} \dots\dots\dots (8),$$

em que a_k é a distância euclidiana média entre a bacia k e todas as outras bacias do grupo onde ela se encontra, e b_k é o menor valor entre as distâncias euclidianas médias calculadas entre a bacia k e os grupos restantes.

Observa-se que os limites da métrica se situam entre $-1 \leq s_k \leq 1$; assim, quando uma bacia está localizada de forma equidistante entre dois grupos, ou seja, quando não há uma identificação clara do grupo a que ela pertence, ocorre então que $a_k = b_k$, e s_k assume o valor zero. Por outro lado, quando uma bacia está muito próxima das outras bacias do mesmo grupo e distante das bacias dos grupos restantes, a_k é pequeno e b_k é grande, de modo que s_k se aproxima da unidade. Isto significa que quanto mais próximo s_k está de um (1), maior é a certeza de que aquela bacia pertence ao grupo em questão. Com base nessa lógica, Rousseeuw (1987) sugeriu que o valor médio da métrica s_k de todas as bacias, fosse utilizado para determinar o número ótimo de grupos na análise de agrupamentos. A análise de agrupamento, então, levou em consideração nove (09) índices morfométricos, sendo três lineares (I_{cm} , R_b , E_{ps} , I_s), quatro espaciais (I_c , D_d , D_h , R_{tex}) e dois hipsométricos (C_{mas} e C_{rug}).

Influência antrópica no uso e cobertura do solo na área de estudo

Almeida *et al* (2009) elaboraram mapas geotécnicos de uso e cobertura de solo na área de estudo, como subsídio à aplicação de modelos empíricos de previsão de perda de solo ocasionados por processos erosivos laminares, como o modelo da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Os autores usaram algoritmos de processamento de imagens do sistema de informações geográficas SPRING (item 4.3) e imagem de sensores remotos citadas no item 4.2 para produção dos citados mapas geotécnicos. Os mapas geotécnicos, juntamente com trabalhos de campo na região, possibilitam a verificação da influência antrópica no uso do solo, pois esta potencializa os processos erosivos presentes nas bacias hidrográficas contribuintes, principalmente pela remoção da cobertura da vegetação típica de cerrado nativa presente para práticas de agricultura mecanizada, de atividades pecuárias e de expansão urbana. Tal cobertura que serviria como anteparo natural do solo à precipitação da chuva, ao ser removida, aumenta a desagregação do solo e o carreamento de sedimentos pelos cursos d'água fluviais, dos locais de maior altitude das bacias contribuintes em direção ao reservatório, contribuindo assim para o seu assoreamento.

A cobertura vegetal presente na área de estudo insere-se no bioma cerrado. Os trabalhos de campo efetuados na região

permite confirmar as informações representadas nas cartas geotécnicas, ou seja, a predominância de áreas agrícolas de cultura mecanizada de soja, milho e cana-de-açúcar e de áreas de pastagens. Essas atividades agrícolas para serem implantadas exigiram a execução de ações acentuadas de desmatamento da cobertura vegetal nativa de cerrado; todavia, ainda existem remanescentes de vegetação do tipo “cerradão” (floresta estacional decidual de submontana), de “campo-sujo” (savana arborizada sem floresta de galeria) e da mata ciliar ou de galeria (floresta estacional semidecidual aluvial) que margeiam alguns trechos das redes de drenagens das bacias contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV.

Resultados obtidos

Segue-se a descrição dos resultados obtidos com os métodos aplicados na pesquisa em pauta.

Análise morfométrica linear das bacias contribuintes

Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta permitiram a delimitação das bacias hidrográficas contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV na área de estudo e o traçado das suas respectivas redes de drenagem. As bacias dos três córregos que não possuíam toponímia no mapa topográfico SE-22-X “GAMA” foram denominadas nesta pesquisa por MB (de microbacia) I, MB II e MB III, respectivamente. A Figura 3 apresenta o traçado final das bacias hidrográficas contribuintes e respectivas áreas, a saber: ribeirão do Sarandi e as dos córregos Pirapitinga, Mandaguai, Brejão, Olaria, Capão Rico, MB I, MB II e MB III; a Figura 3 apresenta também o limite do reservatório da UHE Corumbá IV na área de estudo.

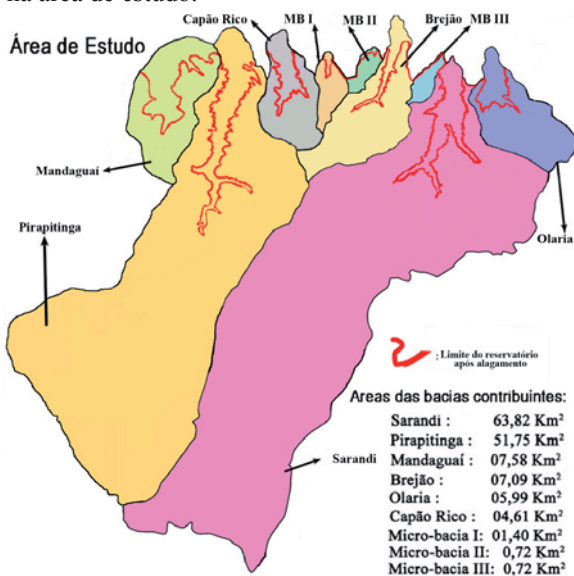


Figura 3 – Bacias hidrográficas contribuintes na área de estudo.

A Figura 6 apresenta, por sua vez, o traçado obtido das redes de drenagens das bacias contribuintes da área de estudo que permitiram a obtenção dos diversos índices da análise morfométrica. A Tabela 1 apresenta os índices obtidos para análise morfométrica linear. Os resultados estão ordenados decrescentemente a partir do número de canais (N), na qual a bacia do ribeirão Sarandi apresenta 604 canais, seguida pela do córrego Pirapitinga com 396 canais e assim sucessivamente, até a do córrego MB III com 36 canais ou segmentos fluviais. Existem quatro tipos de ordens presentes, a saber: 6ª ordem (Sarandi, Pirapitinga, Brejão e Capão Rico), 5ª ordem (Olaria, Mandaguai), 4ª ordem (MB I e MB II) e 3ª ordem (MB III).

Tabela 1 – Parâmetros para análise morfométrica linear das bacias contribuintes da área de estudo.

Nome da bacia	(N)	O	(R _b)	(I _{cm})	(I _{cm} /R _b)	L (km)	E _(ps) (km)	(I _s)
Sarandi	604	6ª	30,23	5,40	0,18	15,97	0,13	1,16
Pirapitinga	396	6ª	18,85	5,35	0,28	15,80	0,13	1,26
Brejão	300	6ª	17,14	4,28	0,25	5,71	0,04	1,10
Olaria	171	5ª	13,01	5,23	0,40	4,90	0,06	1,30
Mandaguai	111	5ª	7,27	4,42	0,61	7,26	0,07	2,64
Capão Rico	96	6ª	4,86	3,03	0,62	4,00	0,06	1,14
MB I	41	4ª	4,40	3,56	0,81	2,56	0,05	1,09
MB II	37	4ª	4,02	3,35	0,83	1,65	0,04	1,10
MB III	36	3ª	8,61	4,41	0,51	1,57	0,05	1,05

Os comprimentos dos canais fluviais permitiram a obtenção dos demais parâmetros envolvidos com a análise linear. O canal com maior comprimento foi o do ribeirão Sarandi com 15,97 km, seguido dos córregos Pirapitinga com 15,80 km, do Mandaguai com 7,26 km; o menor canal fluvial foi o do córrego MB III, com 1,57 km de comprimento.

Os índices “razões de bifurcação” (R_b) do ribeirão Sarandi e dos córregos do Pirapitinga e do Brejão apresentaram os maiores valores: 30,23; 18,85 e 17,14, respectivamente, o que reflete sua maior propensão para ocorrência de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação. Observa-se que as bacias dos córregos MB II, MB I, MB III, do Capão Rico e do Mandaguai, nessa sequência, são as que apresentam menores probabilidades de ocorrência desses tipos de cheias, apesar de a do córrego MB III ter apresentado uma R_b considerável – 8,61 –, o que mostra a propensão desse córrego para sofrer inundação além da planície de sua bacia.

Ao se considerar a relação entre o “índice de comprimento médio e razão de bifurcação” (I_{cm}/R_b), a bacia do córrego MB III apresentou menores valores do que outros córregos mais extensos, tais como os do Capão Rico, Mandaguai, MB I e MB II, o que confirma a maior probabilidade de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação. Entretanto, são os cursos d’água com maior extensão que apresentam as menores relações entre “índice de comprimento médio e razão de bifurcação” (I_{cm}/R_b), como o Sarandi, o Brejão e o Pirapitinga; devido a isso, são os de maior probabilidade de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação.

Observa-se, na Tabela 1, que a bacia do córrego do Mandaguaí, apesar de possuir o terceiro maior comprimento de seu canal principal das bacias estudadas, apresenta uma relação (I_{cm}/R_p) que indica menor probabilidade de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação do que a dos córregos do Olaria e MB III, que possuem o comprimento de seus canais principais menores. Tal fato pode ser explicado pelo fato de a bacia do córrego Mandaguaí se situar sobre a zona de incidência de falhamentos geológicos do grupo Araxá, analisada mais adiante.

Pelos dados apresentados na Tabela 1, os maiores valores do índice “extensão do percurso fluvial” (E_{ps}) foram os das bacias do ribeirão do Sarandi e do córrego do Pirapitinga (0,13), que são maiores do que as demais bacias contribuintes que ficaram abaixo de 0,07. As bacias do ribeirão do Sarandi e do córrego do Pirapitinga possuem, portanto, maior alcance de suas planícies de inundação do que as demais bacias estudadas, durante os períodos de cheia de suas redes de drenagens.

Os dados apresentados na Tabela 1 indicam que o maior valor do índice “índice de sinuosidade” (I_s) foi o da bacia do córrego Mandaguaí de 2,64, que apresenta características de sinuosidade no seu canal principal, influenciado principalmente pela sua geologia e por sua declividade, o que o identifica, na classificação segundo Lana *et al.* (2001), como córrego do tipo divagante. As demais bacias apresentaram valores de (I_s) entre 1,05 e 1,3, classificados como “Muito Retilíneo” (MB I, MB II, MB III, Sarandi, Brejão e Capão Rico) e “Retilíneo” (Pirapitinga e Olaria). Tal fato deve-se à presença das falhas geológicas e da estrutura de dobramento geológica, analisadas mais adiante.

Análise morfométrica espacial das bacias contribuintes

A Tabela 2 apresenta os parâmetros referentes à análise morfométrica espacial das bacias contribuintes da área de estudo.

Tabela 2 – Parâmetros para análise morfométrica espacial das bacias contribuintes da área de estudo.

Bacia	(A) km ²	L _b km	L _b /A - km ³ /km ²	R _{des} NT/km	(F)	(I _c)	D _d km ² /km ²	C _m km ² /km	(D _h)
Sarandi	63,82	16,73	0,26	12,55	R	0,0088	3,73	268,34	9,50
Pirapitinga	51,75	14,89	0,29	10,36	R	0,0113	3,79	263,88	7,65
Mandaguaí	7,58	4,49	0,59	20,28	R	0,0152	7,00	121,30	14,64
Brejão	7,09	5,71	0,75	15,25	R	0,0170	11,64	142,76	42,31
Olaria	5,99	4,17	0,70	9,33	R	0,0103	8,24	85,90	28,54
Capão Rico	4,61	4,15	0,90	10,05	R	0,0161	9,00	111,13	20,82
MB I	1,40	2,45	1,75	7,17	R	0,0129	10,37	94,98	29,28
MB II	0,72	1,59	2,21	8,87	R	0,0132	12,01	83,27	51,38
MB III	0,72	1,80	2,50	8,39	R	0,0125	10,72	93,32	50,00

As áreas (A) das bacias estão ordenadas decrescentemente na Tabela 2. A do ribeirão Sarandi apresentou o maior valor, com 63,82 km², e os córregos MB II e MB III, os menores valores, com 0,72 km². Comparando com os dados apresentados na Tabela 1, observa-se que algumas bacias apresentaram os valores de comprimento da bacia (L_b) menores do que o de seu respectivo comprimento do canal principal (L), tais como os dos córregos do Pirapitinga, do Olaria e do Mandaguaí. Isso se deve a maior sinuosidade desses canais principais, principalmente a do córrego do Mandaguaí, que apresentou o maior valor de (I_s).

As maiores relações entre o comprimento da bacia e sua área (L_b/A) foram as dos córregos MB I (1,75), MB II (2,21) e MB III (2,5), o que aponta para uma maior concentração energética para o transporte de sedimentos em relação às demais bacias contribuintes, potencializada pelo fato de essas bacias possuírem seu formato do tipo retangular, figura geométrica que melhor envolve o formato das bacias estudadas segundo o método citado por Lima (2002).

Segundo os dados apresentados na Tabela 2, todos os valores do “índice de circularidade” (I_c) obtidos para as bacias da área de estudo ficaram abaixo de 0,017, indicando um formato alongado e retangular dessas bacias, o que representa níveis de escoamento de baixo a moderado, com pequena contribuição para a concentração de águas, favorecendo o escoamento superficial. Todavia, a análise do índice (I_c) deve ser feita em conjunto com os demais índices lineares e hipsométricos que podem ser mais preponderantes como indicadores de inundação.

Os maiores valores do índice “densidade de drenagem” (D_d) encontrados para as bacias contribuintes da área de estudo ficaram acima de 3,5 km²/km², variando de 3,73 km²/km² a do ribeirão Sarandi, 3,79 km²/km² a do córrego do Pirapitinga, e até 11,64 km²/km² a do córrego do Brejão. Esses valores indicam que a área de estudo possui uma superfície altamente drenada, com predominância de um escoamento superficial alto, com rochas pouco permeáveis e passíveis de dissecação para a formação de novos canais.

Por sua vez, os valores do índice “coeficiente de manutenção” (C_m) conforme apresentados na Tabela 2, oscilaram entre 0,083 e 0,268 km²/km, o que indica a alta capacidade para formação e manutenção de seus cursos d'água e baixa capacidade de infiltração. As bacias do ribeirão Sarandi e do córrego do Pirapitinga apresentaram os maiores valores de (C_m), influência direta do padrão paralelo de parte de suas redes de drenagem.

Os valores obtidos do índice “densidade hidrográfica” (D_h) indicam certa capacidade para se gerarem novos cursos d’água. As bacias com os menores valores de densidade hidrográfica são, respectivamente, a do córrego do Pirapitinga e a do ribeirão Sarandi com 7,65 canais/km² e 9,50 canais/km², devido ao padrão paralelo de sua rede de drenagem. Os maiores valores do índice “densidade hidrográfica” (D_h) foram dos córregos MB-II e MB-III, 51,38 canais/km² e 50,00 canais/km², respectivamente, o que corrobora maiores relações entre o comprimento da bacia e sua área (L_b/A) obtidas por esses córregos, traduzindo maior capacidade de geração de novos cursos d’água associada à maior energia no transporte de sedimentos.

Segundo os dados apresentados na Tabela 2, o maior valor obtido do índice “razão de textura” (R_{tex}) foi de 15,25 canais por quilômetro (NT/km) para a bacia do córrego do Olaria. Seguiram-se os valores de 12,35 e 10,36 canais por quilômetro (NT/km) para as bacias do ribeirão Sarandi e do córrego do Pirapitinga, que tem, na área de estudo, a maior capacidade de escoamento superficial no transporte de sedimentos, das maiores altitudes em direção ao reservatório da UHE Corumbá IV.

Análise morfométrica hipsométrica das bacias contribuintes

A Figura 4 apresenta os dois modelos numéricos de terreno (MNT) da área de estudo, sua rede de drenagem, bem como o polígono que delimita a bacia hidrográfica do ribeirão Sarandi, obtida pela aplicação da metodologia citada no item 5.1.1. Na parte esquerda da Figura 4, consta a imagem, em níveis de cinza, do MNT utilizando os dados SRTM e, na parte direita, os obtidos com o MNT da base cartográfica com escala de 1:2.000.

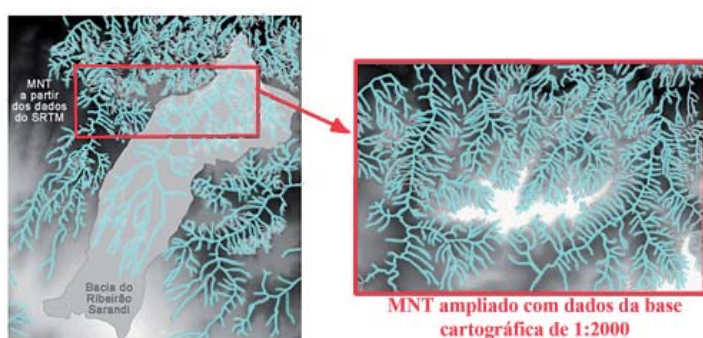


Figura 4 – MNT e rede de drenagem da área de estudo.

Com os dados de altimetria e declividade gerados a partir dos MNT de cada bacia contribuinte, foram obtidos os parâmetros para análise morfométrica hipsométrica, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros para análise morfométrica hipsométrica das bacias contribuintes da área de estudo.

Bacia	G_c %	Altitude máxima e Amplitude da bacia (m)	H_{media} m	C_{mas}	R_{rel} %	L_{arg} m/km	C_{arg} km/km ²
Sarandi	1,95	1101 e 311	954	0,02	1,95	1158,97	0,26
Pirapitinga	1,80	1077 e 284	956	0,02	1,80	1076,25	0,28
Brejão	3,54	993 e 202	897	0,13	3,54	2351,47	1,23
Olaria	3,90	978 e 171	894	0,15	3,90	1574,62	0,96
Mandaguai	1,28	913 e 118	848	0,11	1,28	826,56	0,45
Capão Rico	7,03	1068 e 281	922	0,20	7,03	2528,49	1,18
MB I	6,45	963 e 165	874	0,63	6,45	1737,22	0,84
MB II	6,29	904 e 104	870	1,21	6,29	1248,88	1,12
MB III	7,73	911 e 121	872	1,20	7,73	1296,65	0,90

Observa-se na Tabela 3 que os maiores valores do índice “gradiente de canal” (G_c) encontrados para a área de estudo foram para as menores bacias contribuintes, as dos córregos MB III, Capão Rico, MB I e MB II, com 7,73%, 7,03%, 6,45% e 6,29%, respectivamente. Tal fato deve-se à relação entre uma elevada amplitude de bacia em relação ao menor tamanho dos canais fluviais dessas bacias, indicando, assim, uma elevada capacidade de transporte de sedimentos de suas cabeceiras para o reservatório da UHE Corumbá IV. A bacia do córrego Mandaguai foi a que apresentou o menor valor de (G_c), com 1,28%, consequentemente com menor capacidade de transporte de sedimentos e com maior capacidade sedimentação aluvial, por possuir um comprimento de canal considerável devido ao seu padrão sinuoso.

Observa-se também na Tabela 3 que os maiores valores do índice “coeficiente de massividade” (C_{mas}) foram das bacias dos córregos MB II e MB III, por possuírem a menor área de bacia acompanhada de uma amplitude e altura média de bacia relativamente alta, o que indica potencial elevado de transporte de sedimentos, com consequente elevado potencial erosivo.

A Figura 5 apresenta as curvas hipsométricas das bacias hidrográficas contribuintes na área de estudo, com respectivos volumes rochosos (km³) abaixo da superfície topográfica. As curvas hipsométricas estão apresentadas por ordem decrescente de volume rochoso, calculado a partir dos MNT de cada bacia contribuinte, consequentemente, as bacias com maiores áreas apresentam maiores volumes rochosos (Sarandi, 9,96 km³; Pirapitinga, 8,10 km³ e assim por diante). A mudança de concavidade nas curvas hipsométricas das bacias contribuintes do ribeirão Sarandi e dos córregos do Pirapitinga e do Mandaguai pode ser explicada pela presença das falhas geológicas no contato do grupo Araxá com os grupos Paranoá e Canastra.

Curvas Hipsométricas das Micro-Bacias - Cálculo do Volume

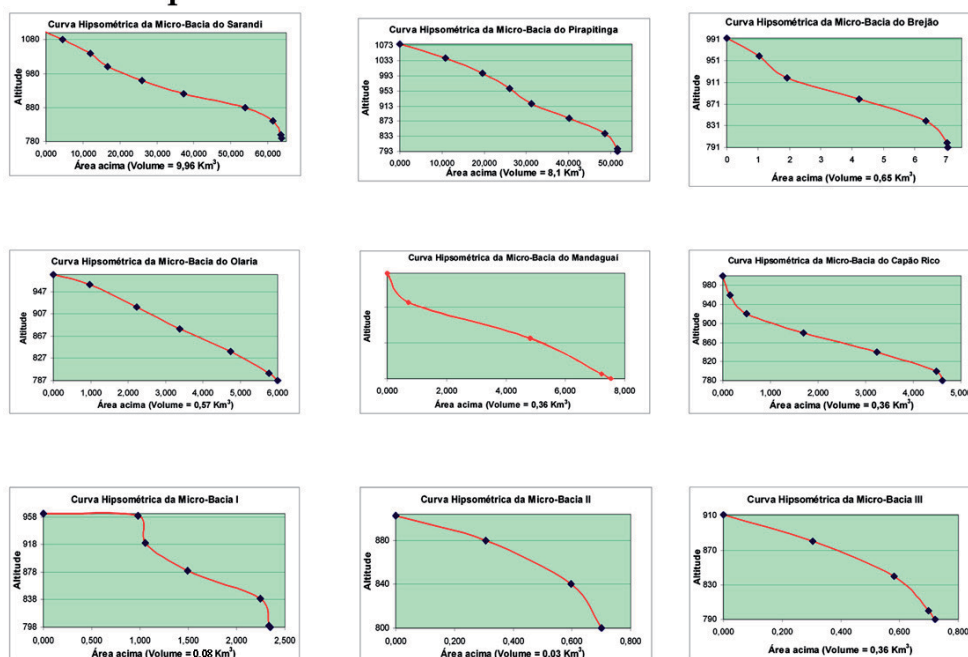


Figura 5 – Curvas hipsométricas e volumes rochosos das bacias contribuintes na área de estudo.

As bacias contribuintes dos córregos MB II e MB III apresentaram a maior convexidade em suas curvas hipsométricas, em consonância, entre as bacias estudadas, com seus maiores valores de “coeficientes de massividade” apresentados na Tabela 3, o que indica maior potencial erosivo em relação às curvas das demais bacias contribuintes na área de estudo.

Conforme os valores apresentados na Tabela 3, o índice “razão de relevo” (R_{rel}) das bacias da área de estudo, expressos em porcentagem à relação entre a amplitude altimétrica e o comprimento de seu canal principal, teve na bacia do córrego MB III o seu maior valor, 7,73%, seguido pelos dos córregos do Pirapitinga e Capão Rico, 7,23% e 7,03%, respectivamente. Assim, essas bacias possuem, de acordo com esse índice, melhor capacidade de escoamento superficial, com conseqüente transporte de sedimentos.

As bacias dos córregos do Mandaguai e do Pirapitinga e a do ribeirão do Sarandi, segundo os valores da Tabela 3, apresentaram os menores valores de “razão de relevo” (R_{rel}): 1,28%; 1,8% e 1,95%, respectivamente. Tal fato deve-se à presença da faixa da falha geológica, representada cartograficamente no mapa geológico da área de estudo (SIEG, 2007) e indicada na Figura 6, característica que separa essas duas bacias em dois padrões de curso d’água distintos, o padrão dendrítico e o padrão retilíneo (paralelo), o que não ocorre com as outras bacias estudadas.

Segundo os dados apresentados na Tabela 3, os maiores valores do “índice de rugosidade” (I_{rug}) obtidos foram os das bacias do Capão Rico (2528,49 m/km) e a do Brejão (2351,47 m/km), que apresentam as vertentes mais íngremes e alongadas. Os menores valores (I_{rug}) obtidos foram os das

bacias do ribeirão Sarandi (1158,97 m/km) e do córrego do Pirapitinga (1076,25 m/km), indicando que a distância entre o interflúvio e os canais é mais reduzida nessas bacias do que nas demais presentes na área de estudo.

Segundo os dados apresentados na Tabela 3, os valores obtidos do índice “coeficiente de rugosidade” (C_{rug}) foram baixos para todas as bacias contribuintes ao reservatório da UHE-Corumbá IV na área de estudo, ou seja, inferiores a 1,23 km/km². Tais valores, de acordo com a classificação presente em Rocha (1997), indicariam, a princípio, o uso do solo adequado apenas para a agricultura de subsistência e familiar, o que não se verificou durante os trabalhos de campo realizados na região, onde existe desmatamento acentuado da vegetação de cerrado em prol das atividades intensas de agricultura mecanizada e de extensas áreas de pecuária.

Os índices da análise morfométrica fluvial não mostram, pela sua própria formulação, as diferenças internas que existem, principalmente, nas maiores bacias como a do ribeirão do Sarandi e do Córrego Pirapitinga. Tais diferenças, a princípio, seriam mascaradas pelo fato de essas bacias possuírem áreas planas de chapadas nas maiores altitudes que são utilizadas na agricultura mecanizada e áreas íngremes de alta intensidade de drenagem utilizadas em atividades pecuárias.

Análise estatística por agrupamentos

Os resultados da análise estatística por agrupamentos, conforme metodologia explicitada no item 5.1.5, são apresentados na Tabela 4. A análise de agrupamento foi executada sobre os valores obtidos de nove (09) índices morfométricos,

sendo três lineares ($I_{cm}/R_b, E_{ps}, I_s$), quatro espaciais (I_c, D_d, D_h, R_{tex}) e dois hipsométricos (C_{mas} e C_{rug}). Os resultados indicam que as bacias devem ser classificadas em três grupos ($K = 3$), pois o valor médio da métrica s_k nesse caso é de 0,70, o maior valor dentro os casos estudados.

Tabela 4 – Resultados obtidos com análise estatística por agrupamentos.

Bacias	K = 2		K = 3		K = 4	
	Grupo	s_k	Grupo	s_k	Grupo	s_k
Sarandi	1	0.42	1	0.65	1	0.62
Pirapitinga	1	0.34	1	0.49	1	0.42
Brejão	2	0.64	2	0.58	2	0.49
Olaria	2	0.63	2	0.62	2	0.57
Capão Rico	2	0.70	2	0.69	2	0.42
MB I	2	0.77	2	0.76	3	0.36
MB II	2	0.78	2	0.75	3	0.72
MB III	2	0.79	2	0.79	3	0.60
Mandaguai	1	0.04	3	1.00	4	1.00
s_k médio		0.57		0.70		0.58

Os resultados da análise estatística por agrupamentos classificaram as bacias do ribeirão Sarandi e do córrego Pirapitinga em um único agrupamento, o Grupo Um, independente do número de grupos considerado. Por sua vez, as bacias dos córregos Brejão, Olaria, Capão Rico, MB I, MB II e MB III foram agrupadas no Grupo Dois, enquanto que a bacia do córrego Mandaguai se mostrou diferente de todas as outras, ficando sozinha no Grupo 3.

Os resultados obtidos com análise estatística por agrupamentos corroboram os apresentados no item seguinte, que apresenta os índices morfométricos das bacias contribuintes, em função de suas redes de drenagens e de sua geologia.

Índices morfométricos das bacias contribuintes, em função de suas redes de drenagens e de sua geologia

De acordo com os valores obtidos dos índices da análise morfométrica e da análise estatística por agrupamentos, as redes de drenagens das bacias hidrográficas contribuintes do reservatório da UHE Corumbá IV possuem características peculiares que exercem influências distintas no transporte de sedimentos que deságuam no reservatório da UHE Corumbá IV.

A Figura 6 apresenta as redes de drenagens das bacias contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV na área de estudo. Observa-se na Figura 6 a presença de uma falha geológica e de um eixo de dobramento estrutural que alteram o padrão das redes de drenagens em algumas das principais bacias contribuintes, a do ribeirão Sarandi e as dos córregos do Pirapitinga e do Mandaguai, localizadas na formação geológica do grupo Araxá. As demais bacias contribuintes presentes na área de estudo, as bacias dos córregos do Capão Rico, do Brejão, do Olaria, do MB I, do MB II e do MB III se situam na formação do grupo geológico Canastra, que também está apresentado na Figura 6.

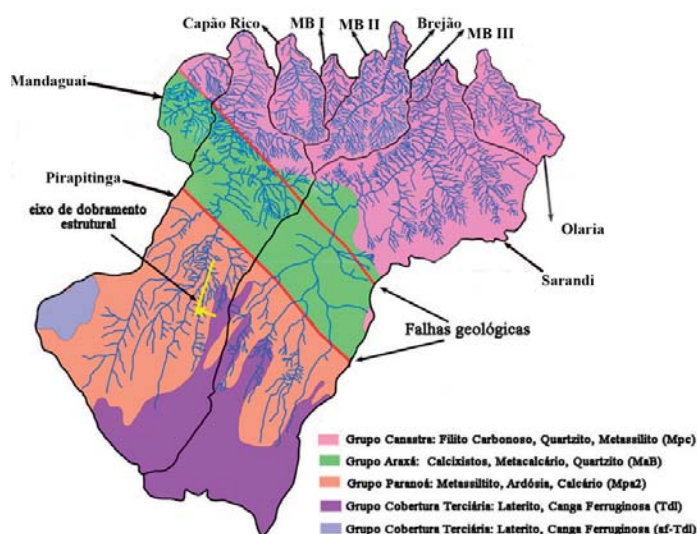


Figura 6 – Redes de drenagem das bacias contribuintes na área de estudo.

Na Figura 6, as redes de drenagem das bacias do ribeirão Sarandi, dos córregos do Pirapitinga e do Mandaguai apresentam dois padrões: ao norte é do tipo dendrítica, com intenso condicionante geológico; aproximadamente no centro dessas bacias e estendendo-se até a sua extremidade sul, o padrão da drenagem apresenta-se como do tipo paralelo, presente em área de vertentes com declividades acentuadas e com controle estrutural, o que motiva a ocorrência do espaçamento regular, quase paralelo, das correntes fluviais. A mudança no padrão de drenagem, de dendrítico para paralelo, nas bacias do ribeirão Sarandi e dos córregos Pirapitinga, conforme observada na Figura 6, deve-se à presença da faixa da falha geológica das rochas do grupo geológico Araxá e do eixo de dobramento estrutural na bacia do córrego do Pirapitinga. O padrão paralelo da rede de drenagem indica um caimento estrutural acentuado do terreno, confirmado pelo modelo numérico do terreno (MNT) da área de estudo e pelos trabalhos de campo.

Por seu turno, conforme observado na Figura 6, o padrão de drenagem das outras bacias contribuintes presentes na área de estudo, as dos córregos do Capão Rico, do Brejão, do Olaria, do MB I, do MB II e do MB III, é do tipo dendrítico, o que expressa uma resistência uniforme à erosão linear.

Tais resultados foram corroborados pela análise estatística por agrupamentos, citada no item anterior, que dividiu as bacias contribuintes em três grupos distintos, a saber: a) Grupo Um: ribeirão Sarandi e córrego Pirapitinga, que apresentam dois padrões distintos de rede de drenagem, o paralelo e o dendrítico; b) Grupo Dois: córregos do Capão Rico, do Brejão, do Olaria, do MB I, do MB II e do MB III, que apresentam o padrão de drenagem dendrítico; e o Grupo

Três: córrego do Mandaguaí, que apesar de apresentar o padrão de drenagem dendrítico, é o único córrego que possui o formato meandrântico devido à presença da falha geológica (vide Figura 6). Conforme já explicitado, os padrões distintos das redes de drenagens nas bacias hidrográficas contribuintes são ocasionados devido à presença da falha geológica e do eixo de dobramento estrutural, e a análise estatística por agrupamentos confirmou essa influência.

A geologia também afeta diretamente o tipo de vale das bacias contribuintes da área de estudo que apresentaram os formatos “U” e “V”, o que, segundo Chistofolletti (1980), atesta a presença de rochas mais facilmente erodíveis, principalmente nos fundos dos vales em formato “V”. À exceção do ribeirão Sarandi, do córrego Pirapitinga e do córrego do Mandaguaí, os demais córregos apresentam fundo de vales em formato “V”, o que confirma a análise morfométrica de possuírem maior energia para processos erosivos e de transporte de sedimentos. O ribeirão Sarandi e o córrego Pirapitinga apresentam os dois formatos de vale em sua extensão: formato “U” nas chapadas planas de maior altitude e formato “V” quando muda o padrão de sua drenagem de paralela para dendrítica, como ocorre em seus trechos médios (sobre o grupo Araxá), onde não se apresentam como encaixados, ao contrário do que ocorre quando o curso fluvial está localizado sobre as rochas dos grupos Paranoá e Canastra. Os vales em formato “U”, caso também do córrego Mandaguaí, por possuírem fundos de vales aplainados indicam que seu respectivo curso d’água fluvial não tem mais energia para erodir e fazer o aporte de sedimentos.

A Tabela 5 sintetiza os parâmetros morfológicos das bacias contribuintes da área de estudo, obtidos pela influência direta de sua geologia.

Tabela 5 – Parâmetros morfométricos obtidos pela influência direta da geologia.

Bacia contribuinte	Padrão da drenagem	Tipo de vale
Sarandi	Dendrítica e Paralela	U e V
Pirapitinga	Dendrítica e Paralela	U e V
Mandaguaí	Dendrítica	U
Brejão	Dendrítica	V
Olaria	Dendrítica	V
Capão Rico	Dendrítica	V
MB I	Dendrítica	V
MB II	Dendrítica	V
MB III	Dendrítica	V

Como observação final em relação à metodologia aplicada, o cálculo de certos índices não leva em consideração a variedade geomorfológica das bacias hidrográficas, o que, em princípio, não interfere nas informações que são obtidas pela análise morfométrica, em seus aspectos linear, espacial e hipsométrico. Todavia, além da variedade geomorfológica, conforme já declarado, a geologia local influencia também os valores dos índices morfométricos, os quais podem sofrer variações em uma única bacia hidrográfica. Assim, devem

ser ressalvados que as bacias maiores, como a do ribeirão do Sarandi e a do córrego do Pirapitinga, por possuírem ordens de grandeza distintas das outras bacias da área de estudo, podem apresentar condições de transporte de sedimentos peculiares, as quais, para serem verificadas, necessitariam de medições hidrossedimentológicas *in loco* de longo prazo, em cada bacia hidrográfica estudada, o que não se coaduna com o objetivo da pesquisa em pauta.

Análise da influência antrópica no uso e cobertura do solo

Os mapas geotécnicos do uso e da cobertura de solo na área de estudo obtidas por Almeida *et al.* (2009) e os trabalhos de campo na região atestam a acentuada influência antrópica sobre o transporte de sedimentos, os quais, em geral, partem das áreas mais elevadas das bacias hidrográficas e são conduzidos por ação da gravidade até o reservatório da UHE Corumbá IV, devido à remoção da cobertura da vegetação nativa de cerrado para dar lugar as áreas de culturas agrícolas mecanizada e de pastagem.

Verificou-se que a área destinada às práticas agrícolas mecanizadas, para as culturas de soja, de milho e de cana-de-açúcar, em larga escala, ocupa o maior espaço físico do uso e da cobertura do solo e localiza-se nas regiões planas de maior altitude. As escarpas e vertentes do relevo, que conectam essas regiões de maior altitude ao reservatório, não possuem mais a cobertura vegetal nativa, não funcionando mais como barreira natural ao fluxo superficial da água da chuva que transporta sedimentos para o reservatório. Por sua vez, as áreas de solo exposto e de queimadas e as estradas abertas em direção ao reservatório tiveram a remoção da totalidade de sua cobertura vegetal. A área de pastagem que se localiza nas escarpas e vertentes também não apresenta mais a cobertura vegetal característica de cerrado.

Assim, as áreas destinadas às práticas agrícolas, as de solo exposto e estradas em geral e as destinadas à pastagem totalizam 89% da área de estudo. Esse elevado percentual da área de estudo, por não apresentar mais sua vegetação nativa, certamente, implicará na redução da capacidade de infiltração e no aumento dos processos de erosão laminar que desagregam o solo, carregado pelas estradas e canais fluviais em direção ao reservatório.

Conclusões

A análise morfométrica das bacias contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV fornece indicativos sobre o aporte de sedimentos e sua influência na gênese de processos erosivos laminares e lineares; todavia, não se baseia em um único índice fluvial. Assim, é necessário que essa análise considere seus aspectos linear, espacial e hipsométrico e, também, a influência da geologia local. Os resultados obtidos com a pesquisa em pauta atestaram que o emprego das técnicas de geoprocessamento permitiu

a determinação dos índices presentes para elaboração da análise morfométrica, nos aspectos citados, das bacias hidrográficas da área de estudo.

A análise morfométrica linear indicou que o ribeirão Sarandi e os córregos do Pirapitinga e do Brejão possuem maior propensão para ocorrência de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação, por apresentarem os maiores valores de “razões de bifurcação” (R_b). As demais bacias contribuintes apresentam menores probabilidades de ocorrência desses tipos de cheias, exceto a do córrego MB III, que mostra sua propensão a ter inundação além da planície de sua bacia. Por sua vez, a bacia do córrego do Mandaguaí apresenta menor probabilidade de cheias que ultrapassem os limites de sua planície de inundação do que a dos córregos do Olaria e MB III, devido ao seu formato sinuoso, classificada como divagante. Tal formato advém do fato de esta bacia hidrográfica estar localizada em uma área de intenso fraturamento dos filitos do grupo canastra.

A análise morfométrica espacial indicou que os córregos MB I, MB II e MB III, por possuírem as maiores relações entre o comprimento da bacia e sua área (L_b/A), apresentam maior concentração energética de transporte de sedimentos do que as demais bacias hidrográficas estudadas, a despeito de apresentarem os menores comprimentos lineares de seus canais fluviais. Por sua vez, as outras bacias contribuintes da área de estudo possuem formato alongado e retangular, o que acarreta uma tendência de maiores distâncias para o transporte fluvial dos sedimentos, além de baixa propensão à ocorrência de inundações.

A análise morfométrica espacial também indicou que, pelos valores elevados do índice “densidade de drenagem” (D_d) para todas as bacias hidrográficas contribuintes, a área de estudo possui uma superfície altamente drenada, com predominância de um escoamento superficial alto, com rochas pouco permeáveis e passíveis de dissecação. Os valores do índice “coeficiente de manutenção” (C_m) indicaram alta capacidade para formação e manutenção de seus cursos d’água e baixa capacidade de infiltração. As bacias do ribeirão Sarandi e do córrego do Pirapitinga foram as que apresentaram os maiores valores de (C_m), influência direta do padrão paralelo de parte de suas redes de drenagem.

Os valores obtidos do índice “densidade hidrográfica” (D_h) indicaram, na análise morfométrica espacial das bacias hidrográficas contribuintes, certa capacidade para gerar novos cursos d’água. Os valores de “razão de textura” (R_{tex}) indicaram que as bacias do ribeirão Sarandi e do córrego do Pirapitinga possuem a maior capacidade de escoamento superficial no transporte de sedimentos, das maiores altitudes em direção ao reservatório da UHE Corumbá IV.

Os valores obtidos do índice “gradiente de canal” (G_c) indicaram que, na análise morfométrica hipsométrica, as menores bacias, as dos córregos MB III, Capão Rico, MB I e MB II, nesta ordem, são as que possuem a mais elevada capacidade de transporte de sedimentos de suas cabeceiras

para o reservatório da UHE Corumbá IV, com conseqüente maior probabilidade de ocorrência de processos erosivos do que as demais bacias contribuintes. A do córrego do Mandaguaí, por sua vez, foi a que apresentou menor capacidade de transporte de sedimentos e maior capacidade sedimentação aluvial, coerente com a sua forma sinuosa.

A análise morfométrica hipsométrica dos coeficientes de massividade (C_{mas}) e das razões de relevo (R_{rel}) indicou que a bacia do córrego MB III, seguida pelas dos córregos do Pirapitinga e do Capão Rico, apresentaram melhor capacidade de escoamento superficial, com conseqüente transporte de sedimentos, o que indica um elevado potencial erosivo. Por sua vez, os valores do “índice de rugosidade” (I_{rug}) indicaram que as bacias hidrográficas dos córregos Capão Rico e Brejão são as que apresentam as vertentes mais íngremes e alongadas; ao contrário das bacias do ribeirão Sarandi e do córrego do Pirapitinga, que apresentam vertentes mais suaves, o que caracteriza a distância entre o interflúvio e os canais mais reduzida nessas bacias do que nas demais presentes na área de estudo.

A análise morfométrica hipsométrica indicou também, por meio do índice “coeficiente de rugosidade” (C_{rug}), o qual apresentou valores muito baixos para todas as bacias contribuintes ao reservatório da UHE-Corumbá IV, que o uso do solo adequado na área de estudo deveria se ater apenas à agricultura de subsistência e familiar, o que não acontece na realidade, pois apresenta desmatamento acentuado da vegetação de cerrado em prol da agricultura mecanizada intensa nas áreas planas de maior altitude, nas áreas planas intermediárias e nas áreas de maior declividade onde se concentram atividades de pecuária, na área de estudo.

Algumas das curvas hipsométricas das bacias contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV apresentaram mudanças de concavidade, como as do ribeirão Sarandi e dos córregos do Pirapitinga e do Mandaguaí. Essas mudanças ocorrem devido às alterações bruscas das condições geológicas associadas aos falhamentos, que fazem os trechos das redes de drenagens dessas bacias sejam mais vulneráveis aos processos erosivos lineares.

A análise estatística por agrupamentos, ao classificar as bacias hidrográficas em três grupos distintos, concordou com a influência da geologia local sobre as redes de drenagens das bacias contribuintes estudadas. A mudança no padrão de drenagem, de dendrítico para paralelo, nas bacias do ribeirão Sarandi e dos córregos do Pirapitinga e do Mandaguaí ocorre devido à presença da faixa da falha geológica das rochas do grupo geológico Araxá e do eixo de dobramento estrutural na bacia do córrego do Pirapitinga. O padrão paralelo indica certo caimento estrutural, confirmado durante os trabalhos de campo. O padrão das redes de drenagens das demais bacias presentes na área de estudo, dos córregos do Capão Rico, Brejão, Olaria, MB I, MB II e MB III, são todas do padrão dendrítico, que se desenvolve sobre rochas de resistência uniforme em estruturas horizontais.

A geologia contribuiu também para que as bacias hidrográficas contribuintes ao reservatório da UHE Corumbá IV apresentassem preferencialmente o formato “V”, com rochas mais facilmente erodíveis. As bacias do Sarandi e Pirapitinga apresentaram formato “U” em seus trechos de menor declividade e “V” nos demais trechos. O córrego Mandaguaí apresentou o formato de seu vale do tipo “U” em toda sua extensão. Novamente, a análise estatística por agrupamentos, ao classificar as bacias hidrográficas em três grupos distintos, concordou com a influência da geologia local no formato das bacias estudadas.

Em suma, a análise morfométrica das bacias contribuintes, em seus aspectos linear, espacial e hipsométrica, juntamente com a geologia local, por si só e de forma natural, contribuem para ocorrência de processos erosivos. Entretanto, a área de estudo apresenta intensas atividades antrópicas no uso do solo que, certamente, vão potencializar bastante o aumento desses processos erosivos. A remoção da cobertura vegetal, constatada pelos mapas geotécnicos de uso e cobertura do solo produzidos por Almeida *et al* (2009) e visitas ao campo, na área de estudo, foi considerável, retirando de forma artificial a proteção natural que a vegetação nativa proporcionaria contra a geração e o transporte de sedimentos, principalmente nos meses das estações chuvosas com os altos índices de precipitação. Essa remoção da vegetação nativa torna-se mais crítica porque a área de estudo apresenta altas declividades próximas ao reservatório da UHE Corumbá IV, com diferença altimétrica de cerca de 150 metros entre suas partes mais altas e as margens do reservatório.

Conforme constatado pela pesquisa em pauta, o cálculo de índices presentes em uma análise morfométrica, em seus aspectos linear, espacial e hipsométrico, é fortemente influenciado pela geologia local e confirmado pela análise estatística por agrupamento. As variantes geológicas existentes na área de estudo, em que alguns canais fluviais chegam a atravessar três grupos geológicos distintos, principalmente nas bacias de maior extensão, podem apresentar variações de seus índices morfométricos. Para futuros trabalhos de pesquisas, sugere-se a verificação da validade de aplicação desses índices obedecendo a uma compartimentação geológica mais restrita, relacionado à análise morfométrica fluvial para trechos onde houvesse fraturas e grupos geológicos distintos, e não estendendo os valores obtidos para toda extensão da bacia, com base apenas em critérios geomorfológicos.

Os resultados obtidos com a análise morfométrica permitem concluir que, apesar de haver apenas nove anos de operação do empreendimento da UHE Corumbá IV, as bacias contribuintes ao seu reservatório poderão vir a sofrer processos erosivos intensos, com conseqüente perda considerável de solo em seu entorno carregada pela rede de drenagem das bacias contribuintes, causando, assim, o seu assoreamento pelo aporte de sedimentos. Se não forem tomadas ações necessárias, acontecerá à diminuição da vida útil desse empreendimento de geração de energia elétrica.

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, W.S.; SOUZA, N.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Produção de mapas de zonas homólogas de relevo e de uso do solo, a partir de dados de modelos numéricos de terreno e de imagem *Quick Bird*, como passos intermediários em um diagnóstico da susceptibilidade à erosão, no entorno da usina hidrelétrica Corumbá IV (GO). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, RN. Anais. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p. 5563-5570.
- ARCAYA, S.G.C. Avaliação dos fatores condicionantes dos processos erosivos no Distrito Federal. 2007. 181 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2007.
- BORSATO, F.H.; MARTONI, A.M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, Maringá, v. 26, n. 2, p. 273-285, 2004.
- CHISTOFOLETTI, A. Geomorfologia; A Análise de Bacias Hidrográficas, 2. ed., São Paulo: Editora Edgard Blucher. 1980. 198p.
- ESRI. Geoprocessing in Arc Gis 9.0. Redlands, CA, US: ESRI. 2004, 374 p.
- HORTON, R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. New York: *Geological Society of American Bulletin*, v. 56, p. 807-813, 1945.
- LANA, C. E.; ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG - Brasil. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 54, n. 2, p. 121-126, 2001.
- LIMA, M.I.C. Manual de análise de drenagem e seu significado geomorfológico e geológico. Belém, PA: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002, 179 p.
- MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 5. 1967, Berkeley, CA. Proceedings. Berkeley, Ca: Le Cam and J. Neyman, editors, University of California Press, 1967. p. 281-297.
- MINGOTI, S.A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora Universidade Federal de Minas Gerais. 2005. 295p.
- ROCHA, J. S. M. Manual de projetos ambientais. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997, 423 p.
- ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis. New York: *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v.20, p. 53-65, 1987.
- SCHOWENGERDT, R.A. Techniques for image processing and classification in Remote Sensing. Orlando: Academic Press, US. 1983. 248 p.
- SIEG. Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás. Mapas em formato *shapefile*. Disponível em: <www.sieg.go.gov.br>. Acesso em: 10 jul. 2007.
- STRAHLER, A. N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 8, n. 6, p. 913-920, 1957.
- VIEIRA, T.C.G. Fotointerpretação de índices de drenagem e relevo na diferenciação de solos do município de Lavras-MG. 1991. 76p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), ESAL, Lavras. 1991.
- VILELLA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGraw-Hill. 1975. 245p.