



Análise estatística dos parâmetros geomorfométricos do relevo em bacias hidrográficas de primeira ordem perenes e intermitentes no oeste paranaense

Statistical analysis of the geomorphometric parameters of the relief in perennial and temporary first-order river basins in western Paraná

Otacílio Lopes de Souza da Paz* , Tony Vinicius Moreira Sampaio 

Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

E-mail: tonsampaio@ufpr.br

*E-mail para correspondência: otacilio.paz@gmail.com

Recebido (Received): 01/09/2020

Aceito (Accepted): 05/03/2021

Resumo: Mapeamentos da rede de drenagem podem ser obtidos pela fotointerpretação ou extração automática, a partir de modelos digitais de elevação (MDE), sendo que ambos apresentam inconsistências. Visando solucionar esta problemática, surgem propostas que exploram técnicas de regressão estatística, árvores de decisão ou redes neurais para automatizar o mapeamento da rede de drenagem. Com foco no relevo, objetiva-se comparar parâmetros geomorfométricos entre bacias de primeira ordem com rio perene e com rio intermitente. A área de estudo abrange a folha topográfica Medianeira, código MI 2832-4, parcialmente inserida nos municípios de Medianeira, São Miguel do Iguaçu e Serranópolis do Iguaçu, localizados no oeste do Paraná, região sul do Brasil. Foram validadas em campo as bacias de primeira ordem e realizados levantamentos com aeronaves remotamente pilotadas visando gerar MDE. A partir dos MDE, extraiu-se: área, perímetro, volume e índice de vazão, acumulação de fluxo (D8), declividade, plano de curvatura, perfil de curvatura, índice de concentração de rugosidade e índice topográfico de umidade. Aplicaram-se testes estatísticos de hipóteses calibrados com intervalo de 95% e 99% de confiança, para verificar se existem diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros geomorfométricos entre os grupos de bacias de primeira ordem. Os parâmetros de área, índice de concentração de rugosidade, plano de curvatura, índice topográfico de umidade e índice de vazão foram os mais sensíveis para diferenciar bacias de primeira ordem perenes e intermitentes. Os resultados obtidos a partir da análise dos parâmetros podem contribuir com o desenvolvimento de métodos para mapeamento automatizado da rede de drenagem.

Palavras chave: Análise digital do relevo; Correlação espacial; Estatística inferencial; Aeronaves Remotamente Pilotadas.

Abstract: Drainage network mapping can be obtained by photointerpretation or automatic extraction from digital elevation models (DEM), so that both methods there are inconsistencies. For solve this problem, proposals explore statistical regression techniques, decision trees or neural networks to automate the mapping of the drainage network. In this paper the objective is to compare geomorphometric parameters between first-order basins with perennial and intermittent rivers. The study area covers the Medianeira topographic sheet, code MI 2832-4, in the municipalities of Medianeira, São Miguel do Iguaçu and Serranópolis do Iguaçu, Paraná state, southern region of Brazil. The first-order basins were validated in the field and imaging with remotely piloted aircraft was made to generate DEM. From the DEM, it was extracted: area, perimeter, volume and void index, accumulation of flow (D8), slope, curvature plane, curvature profile, roughness concentration index and topographic wetness index. Statistical tests of calibrated hypotheses with 95% and 99% confidence intervals were applied to verify if there are statistically significant differences in the geomorphometric parameters between the first order basin groups. Area, roughness concentration index, curvature plane, topographic wetness index and void index were the most sensitive to differentiate perennial and intermittent first-order basins. The results obtained from the analysis of the parameters can contribute to development of methods for automated mapping of the drainage network.

Keywords: Digital relief analysis; Spatial correlation; Inferential statistics; Remotely Piloted Aircraft.

1. Introdução

A representação espacial da rede de drenagem é utilizada em estudos ambientais, pesquisas científicas ou relatórios técnicos. Essa informação cartográfica subsidia análises como demarcação de terras, estudos de evolução do relevo, propagação de poluentes, monitoramento ambiental, entre outros temas. A maior parte dos mapeamentos da rede de drenagem do Brasil estão em cartas topográficas elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) ou pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG) (SAMPAIO, 2008). Até a década de 1990, predominava a restituição aerofotogramétrica como técnica de mapeamento da rede de drenagem. A partir dos anos 2000, cresceram as propostas de aplicações de modelos digitais de elevação (MDE) com algoritmos de análise hidrológica no mapeamento automatizado da rede de drenagem.

No entanto, autores como Chorley e Dale (1972), Band (1993), Sampaio (2008), Bueno, (2016) e Sousa e Sampaio (2018) afirmam que os produtos cartográficos resultantes dos métodos citados apresentam inconsistências, o que pode dificultar ou mesmo inviabilizar a aplicação destes mapeamentos em pesquisas científicas ou tomadas de decisão. Visando solucionar este problema, surgem propostas que exploram técnicas de regressão estatística, árvores de decisão ou redes neurais para automatizar o mapeamento da rede de drenagem (SAMPAIO, 2008; BANON, 2013; BUENO, 2016). Estas propostas utilizam elementos fisiográficos como relevo, embasamento rochoso, tipos de solos, volume precipitado, dentre outros, para extrair a rede de drenagem. Para tanto, se faz necessário conhecer a relação quantitativa entre a rede de drenagem e os elementos fisiográficos, servindo como parâmetro para calibração dos modelos de extração.

Tais propostas estão em consonância com trabalhos que discutem a espacialização e a evolução da rede de drenagem, que apontam para a influência de fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos e climáticos (CHRISTOFOLETTI, 1980; MONTGOMERY; DIETRICH, 1989; CUNHA; GUERRA, 1995; SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014a; SANGIREDDY *et al.*, 2016). No entanto, a relação apontada por estes autores é qualitativa, não sendo fornecidos parâmetros quantitativos. Portanto, visando gerar mapas da rede de drenagem com maior acurácia (temática e completude) a partir de novas propostas de extração automática, são necessários estudos preliminares que quantifiquem a relação entre a rede de drenagem e elementos fisiográficos.

Observando os mapeamentos da rede de drenagem, Sampaio (2008), Bueno, (2016) e Sousa e Sampaio (2018) indicam que as inconsistências encontradas estão principalmente atreladas a erros de omissão (rios não mapeados) ou comissão (rios mapeados e não encontrados em campo) nos rios de primeira ordem (da nascente até a primeira bifurcação). Com foco na geomorfologia e visando uma investigação quantitativa sobre sua relação com bacias e rios de primeira ordem, podem-se aplicar técnicas de análise digital do relevo a partir de MDE. Diversos trabalhos abordaram o potencial da parametrização de atributos geomorfométricos do relevo extraídos de MDE, como declividade, curvatura, índices, entre outros (SAMPAIO, 2008; MARION; MELLO FILHO; SILVA, 2010; SILVEIRA *et al.*, 2012; SILVA; OKA-FIORI; SILVEIRA, 2017).

Ao analisar quantitativamente o papel dos parâmetros geomorfométricos do relevo com a existência de rio perene ou rio intermitente, pode-se subsidiar a aplicação de técnicas de regressão estatística, árvores de decisão ou redes neurais para automatizar a extração da rede de drenagem e/ou classificar rios de primeira ordem em perenes ou intermitentes. Assim, levanta-se o seguinte questionamento: existem diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros geomorfométricos do relevo entre bacias de primeira ordem com rio perene e com rio intermitente? Objetiva-se analisar e comparar parâmetros geomorfométricos do relevo extraídos de MDE de alta resolução espacial entre bacias de primeira ordem com rio perene e bacias de primeira ordem com rio intermitente.

2. Metodologia

Para tal análise, foi selecionado a área abrangida pela folha topográfica Medianeira, código MI 2832-4 e SG-21-X-D-III-4, da articulação 1:50.000. A área está inserida parcialmente nos municípios de Medianeira, São Miguel do Iguaçu, Matelândia e Serranópolis do Iguaçu, todos no Paraná (**Figura 1**). O acesso à área se dá pelas rodovias BR 277, PR 495 e PR 497, através das cidades de Medianeira, São Miguel do Iguaçu e Serranópolis do Iguaçu. Ao sul da área de estudo, localiza-se parte do Parque Nacional do Iguaçu e rio Iguaçu. A análise estatística dos parâmetros geomorfométricos entre bacias de primeira ordem perenes e intermitentes foi dividida em quatro etapas: levantamento de campo, geração de MDE e extração de parâmetros geomorfométricos e aplicação de testes estatísticos.

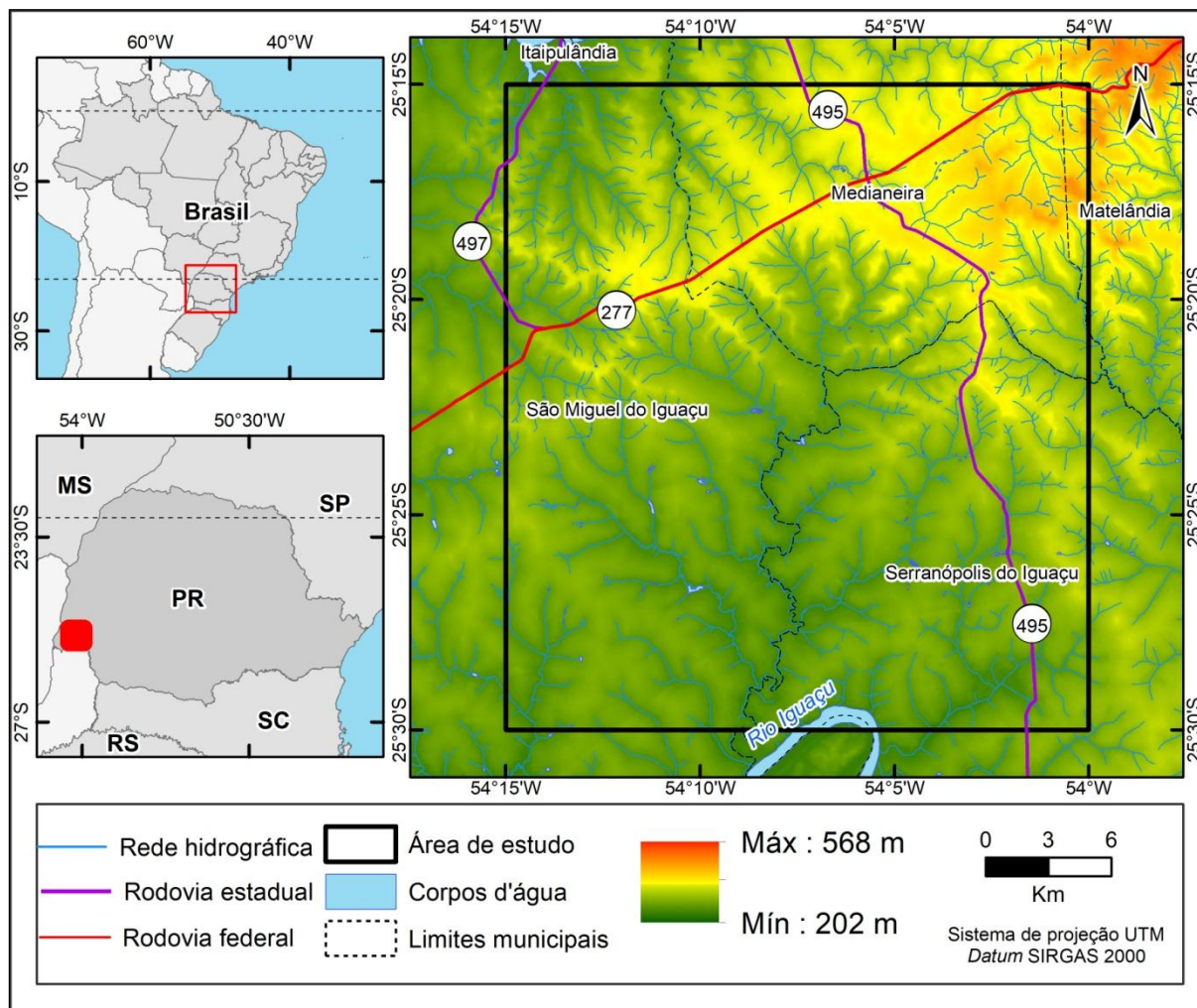


Figura 1: Localização da área de estudo. Elaboração: Autores (2020).

2.1 Levantamentos de campo

Foram realizado trabalho de campo com intuito de validar bacias de primeira de ordem (BPO) perenes e intermitentes, bem como realizar levantamentos com aeronaves remotamente pilotadas (RPA) com vistas a geração de MDE de alta resolução espacial.

As BPO para validação em campo foram selecionadas com base na folha topográfica 1:50.000 e com auxílio de imagens do acervo Google Earth e do acervo Bing Imagens, de diversas datas consultadas pelo plugin OpenLayers no software QGIS 2.18.19. Foram visitados, em campo, apenas canais de primeira ordem com interceptação de acessos viários (rodovias, ruas, estradas vicinais, entre outros) o mais próximo possível de sua foz.

Durante o trabalho de campo, realizado no mês de agosto de 2018, os canais de primeira ordem foram encontrados com auxílio do aplicativo OruxMaps. Ao visitar os canais de primeira ordem, se o rio apresentasse vazão, este era registrado como BPO perene. Se fosse encontrado apenas o canal de drenagem seco, este era marcado como BPO intermitente.

2.2 Geração de modelos digitais de elevação

Foram utilizadas duas aeronaves remotamente pilotadas (RPA): modelos Phantom 3 Advanced e Phantom 4 Pro. Ambos os aparelhos foram cedidos pelo Laboratório de Análise de Padrões Espaciais (LAPE), vinculado ao departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná. Os imageamentos foram realizados com base nos limites das BPO identificadas a partir da folha topográfica 1:50.000, acrescido buffer de 10 metros para evitar efeito de borda.

Os planos de voo foram elaborados no aplicativo Pixel4Dcapture. Os parâmetros de voo definidos foram: 70% de recobrimento lateral e velocidade de 10 m/s. As imagens coletadas foram processadas no Agisoft PhotoScan 1.2.4. Seguiu-se rotina de processamento sugerida pelo software, envolvendo alinhamento das

imagens, extração da nuvem de pontos e geração de modelo digital de superfície (MDS – terreno + elementos de superfície) e ortofotos. As etapas foram processadas na qualidade média (médium).

Deve-se salientar que não foram utilizados pontos de controle durante o processamento das imagens coletadas pela RPA. Os modelos gerados nesta pesquisa apresentam altitudes geométricas, baseadas no elipsoide, e não ortométricas, baseadas no modelo geoidal. Ou seja, os modelos apresentam informações de coordenadas e altitudes registradas pela RPA no momento do voo. Por isso, não é possível denominar tais modelos como modelo digital do terreno (MDT). Assim, adota-se a nomenclatura MDE para se referir aos modelos gerados nesta pesquisa. Segundo Pike *et al.* (2009), MDE se refere a um modelo composto por pontos no espaço cartesiano com valores de elevação.

Para geração do MDE, a nuvem de pontos foi filtrada manualmente, visando retirar pontos em vegetação, edificações, torres de energia ou carros. A partir da nuvem de pontos filtrada, foram utilizadas técnicas do pacote geostatístico do ArcGIS 10.1 para interpolação da nuvem de pontos e geração do MDE. A análise do histograma permitiu verificar se há tendência de normalidade na distribuição dos dados, observando se a média e mediana são próximas. Também foi consultado o gráfico Normal QQPlot, onde verificaram-se indícios de distribuição normal no conjunto de dados uma vez que os valores orbitam em torno do eixo.

Antes da interpolação foram analisadas as nuvens de pontos nos gráficos boxplot e nos polígonos de Voronoi visando identificar outliers globais e locais, respectivamente. Os pontos outliers identificados foram retirados do processo de interpolação. Também foram analisados nos polígonos de Voronoi se os dados apresentavam dependência espacial das amostras.

Foi utilizada a krigagem simples para interpolar as nuvens de pontos. O tamanho do passo (leg size) foi definido com base na distância média entre os pontos. O número de passos foi definido dividindo a maior extensão da bacia pelo tamanho do passo. O modelo geostatístico utilizado foi o Gaussiano, sendo o alcance (major range) e o partial sill calibrados até que o modelo apresentasse melhor “encaixe” no semivariograma (**Figura 2**). Os raios de busca foram definidos com base na distância do primeiro valor negativo do variograma, em função de que a partir deste ponto a covariância é negativa, ou seja, não é mais representativo e o espaço não descreve mais o fenômeno.

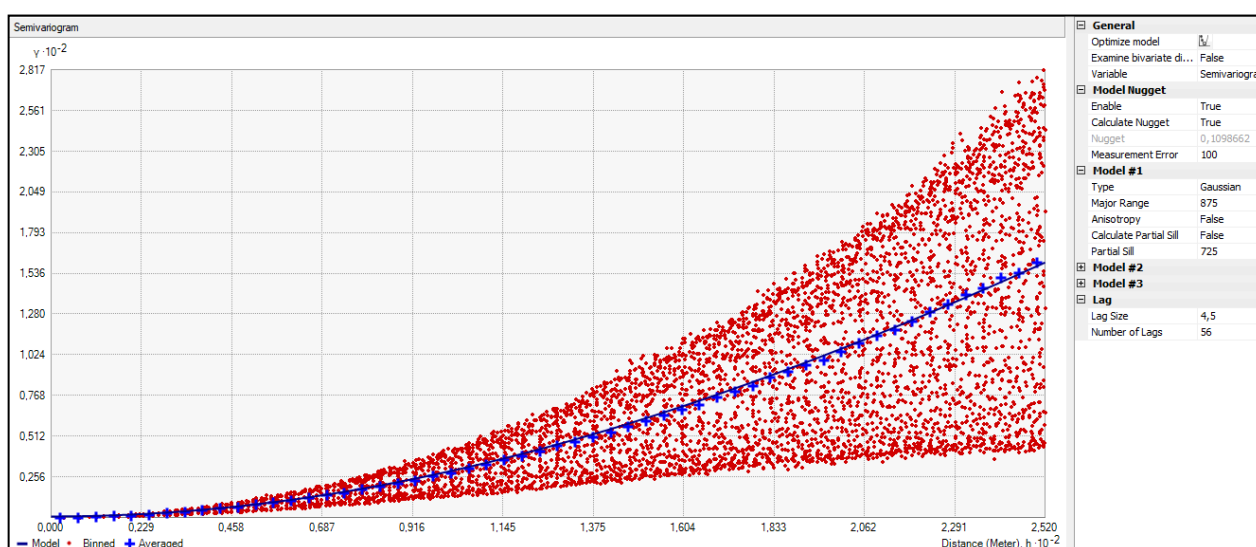


Figura 2: Exemplo de aplicação da krigagem simples. Elaboração: Autores (2020).

Após a interpolação, os MDEs foram exportados com resolução espacial de 1 metro, sendo os limites das bacias de primeira ordem refeitos e, a partir destes, extraídos os parâmetros geomorfométricos para análise. Foram calculados a área, perímetro, volume e índice de vazio, acumulação de fluxo, declividade, plano de curvatura, perfil de curvatura, índice de concentração de rugosidade e índice topográfico de umidade.

Área e perímetro foram calculados no software QGIS 2.18.19 através da calculadora de campo. O volume e índice de vazio, desenvolvido por Sampaio (2021), objetiva mensurar o volume de material retirado da bacia de primeira ordem por processos de denudação (**Figura 3**). Para o cálculo, consideram-se as cotas dos divisores de água interpoladas pelo método triangular irregular network (TIN), formando uma “tampa” na bacia. Pela ferramenta cut fill do ArcGIS 10.1, é mensurado em m³ o volume entre a “tampa” e o MDE da bacia. Volume de vazio é o valor bruto extraído e índice de vazio é o volume bruto normalizado pela área da bacia.

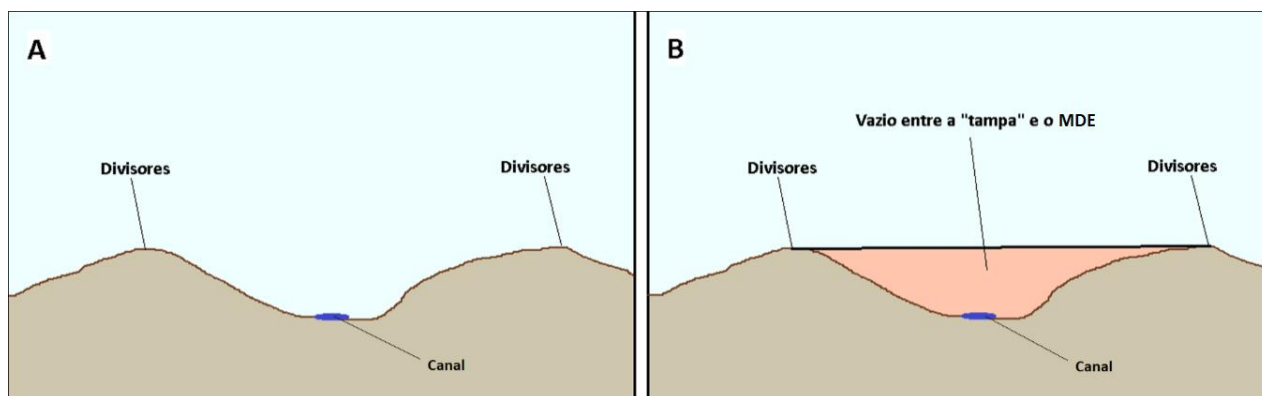


Figura 3: Concepção do parâmetro volume e índice de vazio. A: MDE da bacia de primeira ordem. B: MDE da bacia de primeira ordem com a “tampa”. A subtração de uma pela outra gera o volume de vazio. Elaboração: Autores (2020).

Os demais parâmetros geomorfométricos foram calculados por algoritmos que envolvem análise de vizinhança, sendo definida uma janela móvel 3x3 pixels em estrutura grid. A declividade foi calculada a partir das variáveis direcionais de Horn (1981), executada no software QGIS 2.18.19 na ferramenta slope (declividade). O plano e perfil de curvatura foram calculados a partir das variáveis direcionais de Zevenbergen e Thorne (1987), pela ferramenta curvature (curvatura) no software QGIS 2.18.19.

A acumulação de fluxo foi calculada pelo algoritmo D8 na ferramenta FlowDirection do software QGIS 2.18.19. O Índice Topográfico de Umidade (ITU) representa área de saturação superficial de acordo com a topografia, sendo gerado pela acumulação de fluxo dividido pela tangente da declividade (MOORE *et al.*, 1993). O Índice de Concentração de Rugosidade quantifica o grau de rugosidade do relevo. Este parâmetro é gerado através da aplicação do estimador de densidade Kernel em uma nuvem de pontos da declividade em porcentagem da área de interesse, seguindo a proposta de Sampaio; Augustin (2014b). Após extrair os parâmetros geomorfométricos que envolvem análise de vizinhança, foi aplicada a ferramenta zonal statistics do QGIS 2.18.19 para calcular os valores mínimos, máximo, médio, bem como desvio padrão, amplitude, variância e mediana de cada parâmetro extraído.

2.3 Análise estatística dos parâmetros geomorfométricos

Para comparar os parâmetros geomorfométricos entre as bacias de primeira ordem perenes e intermitentes, foram utilizados o teste t independente e o teste Kruskal-Wallis, executados no software SPSS. A síntese dos testes estatísticos é apresentada na **Figura 4**.

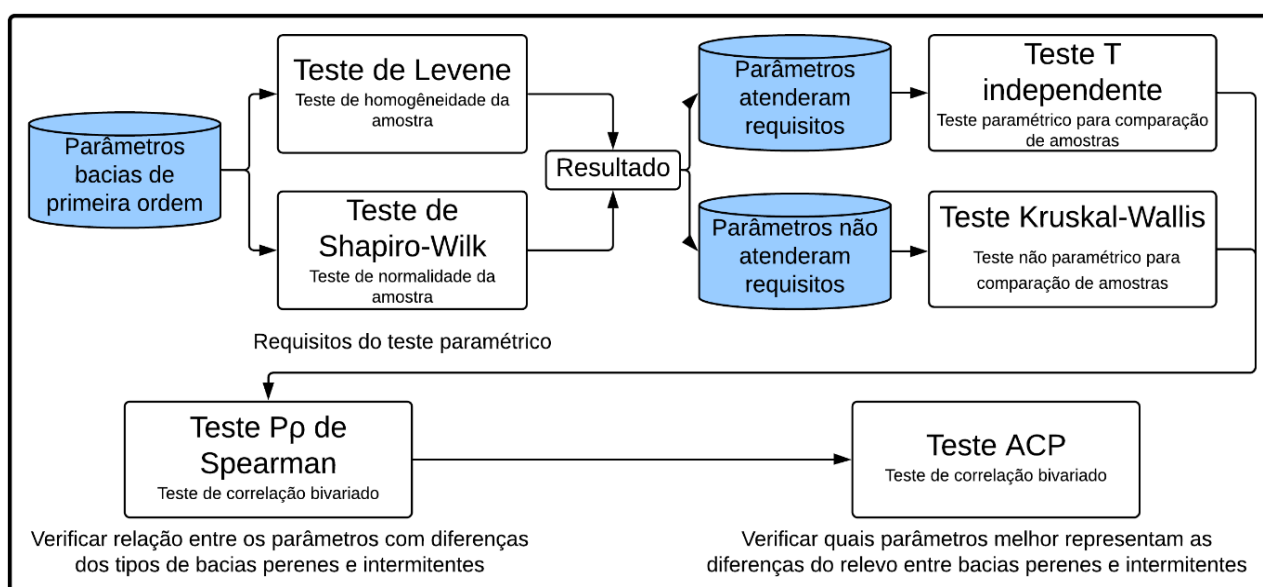


Figura 4: Síntese dos testes estatísticos aplicados. Elaboração: Autores (2020).

Foi separado para cada BPO amostral os valores de área, perímetro, volume de vazio e valores de mínima, máxima, média, desvio padrão, amplitude, variância e mediana dos demais parâmetros geomorfométricos selecionados. Os dados foram extraídos dos arquivos em formato shapefile e das matrizes no QGIS 2.18.19., convertidos para o formato xls (software Microsoft office excel) e importados nos softwares SPSS e Past 3.22.

Após compilar as medidas dos parâmetros geomorfométricos de todas as bacias amostrais (perenes e intermitentes), foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk para verificar se as amostras provêm de uma população Normal ou não. Também foi aplicado o teste de Levene para verificação da homogeneidade das amostras. A significância destes testes foi atribuída em 95%.

O teste t independente foi escolhido por permitir a comparação das médias entre os parâmetros geomorfométricos das BPO perenes e intermitentes. O teste t independente é um teste paramétrico, exigindo a normalidade e homogeneidade das amostras. A equação do teste t independente e as hipóteses testadas para intervalos de confiança em 95% e 99% são apresentadas no quadro 1. Caso houvesse parâmetros geomorfométricos que não atendessem os pré-requisitos do teste t independente, estes seriam submetidos ao teste não paramétrico Kruskal-Wallis (MCKIGHT; NAJAB, 2010). Os testes não paramétricos são indicados quando não atendem os pré-requisitos e/ou em amostras pequenas (inferior a 30).

Com a identificação dos parâmetros geomorfométricos, foi aplicado um teste de correlação bivariado. Foi utilizado o teste de correlação não paramétrico P_{ρ} (Rô) Spearman. Este teste contribuiu para identificação de parâmetros geomorfométricos com alta correlação entre si. Após a identificação de diferenças nos parâmetros geomorfométricos entre as BPO amostrais e os testes de correlação, foi aplicado o teste de análise de componentes principais (ACP) ou Principal Components Analysis (PCA) (EVERITT; DUNN, 2001). Esta análise foi aplicada no software Past com o objetivo de diminuir o número de variáveis por meio de agrupamento, gerando componentes principais que melhor descrevem a variância dentro de grupos de bacias amostrais.

3. Resultados e discussão

Foram validadas em campo 32 BPO, sendo 16 perenes e 16 intermitentes. Nestas bacias foram realizados aerolevantamentos com RPA, gerado os MDEs e extraídos parâmetros geomorfométricos. Exemplos de canais de primeira ordem perenes e intermitentes visitados em campo são apresentados na **Figura 5**. A espacialização das bacias amostras está apresentada na **Figura 6**. Por meio dos parâmetros geomorfométricos extraídos e cálculos de mínima, máxima, média, desvio padrão, amplitude, variância e mediana destes, foram obtidas 53 variáveis para análise estatística para cada BPO.

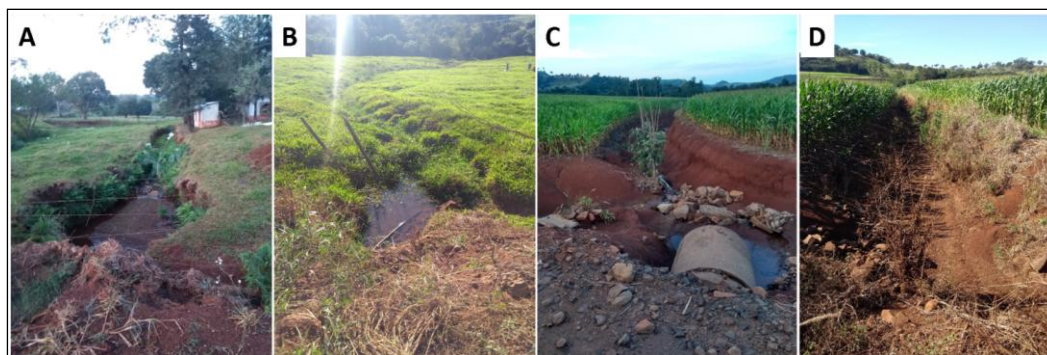


Figura 5: Canais de BPO com rios perenes amostrados (A e B). Coordenada: A - 25°20'4.75"S - 54° 7'14.34"O. B - 25°15'8.66"S - 54° 8'56.54"O. Canais de BPO com rios intermitentes amostrados (C e D). Coordenada: C - 25°20'49.91"S - 54° 7'7.73"O. D - 25°15'3.92"S - 54°10'54.26"O. Elaboração: Autores (2020).

Para aplicação do teste t independente, foi analisado se as variáveis das bacias amostrais apresentam distribuição normal e homogeneidade de variância. 9 variáveis não atenderam aos dois pré-requisitos do teste t independente, sendo: área, perímetro, mínimo e mediana do plano de curvatura, desvio padrão, amplitude e variância da acumulação de fluxo, volume de vazio e variância do ICR. O não cumprimento dos requisitos do teste paramétrico compromete a interpretação dos resultados, sendo necessária aplicação de um teste não paramétrico para validação, no caso no teste Kruskal-Wallis.

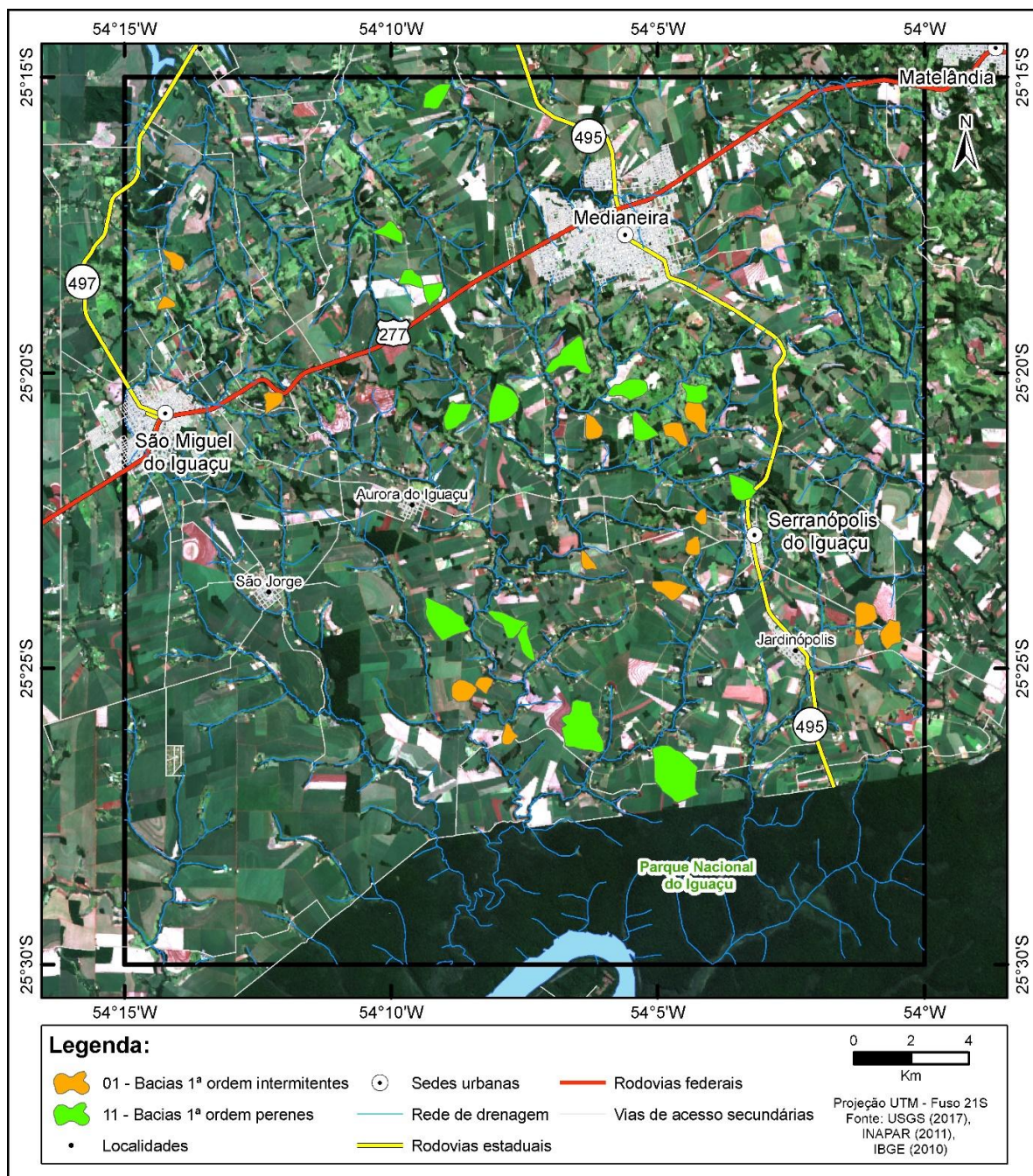


Figura 6: BPO perenes e intermitentes onde foram realizados aerolevantamentos com as RPA. Elaboração: Autores (2020).

No teste t independente de significância estatística de 95%, 15 variáveis apresentaram diferenças estatisticamente significativas nas médias entre as BPO perenes e intermitentes. Com significância estatística em 99%, as mesmas 15 variáveis apresentam diferenças estatisticamente significativas nas médias (**Tabela 1**). Os parâmetros de área, perímetro, amplitude da altimetria, máximo, média, desvio padrão e variância da acumulação de fluxo, máximo e amplitude do ITU, volume e índice de vazio e desvio padrão, amplitude e variância do ICR apresentaram maiores valores nas BPO perenes do que nas BPO intermitentes.

Com a aplicação do teste Kruskal-Wallis de amostras independentes, foram identificadas 15 variáveis com diferenças estatisticamente significativas (95% de confiança) entre as BPO perenes e intermitentes. Variáveis que não atenderam os pressupostos do teste t independente, tais como área, perímetro, volume de vazio, índice de vazio e medidas do ICR, apresentam diferenças entre as médias das BPO perenes e intermitentes na aplicação do teste de Kruskal-Wallis (95% de confiança). Na aplicação do teste de Kruskal-Wallis com intervalo de confiança em 99%, amplitude da altimetria, amplitude do ITU e índice de vazio deixaram de apresentar diferenças estatisticamente significativas nas médias entre as BPO perenes e intermitentes.

Tabela 1: Parâmetros geomorfométricos com diferenças estatisticamente significativas (99% de intervalo de confiança) entre as BPO perenes e intermitentes pela aplicação do teste t independente. Elaboração: Autores (2020).

Teste-t para Igualdade de Médias							
	Teste de levene***	t	df	Sig.*	Diferença média	99%**	
						Inferior	Superior
AREA	não assumidas	-3,23	17,03	0,005	37,82	3,88	114,76
PERIMETRO	não assumidas	-4,35	21,32	0,000	1,19	0,42	1,97
Alt_range	assumidas	-2,62	30,00	0,001	22,97	-1,16	47,09
Plan_min	não assumidas	2,12	23,45	0,005	-0,97	-2,27	0,32
ACF_max	não assumidas	-3,04	16,00	0,008	340123,94	13748,37	666499,50
ACF_mean	assumidas	-4,22	30,00	0,000	926,60	322,26	1530,94
ACF_std	não assumidas	-3,86	20,05	0,001	7729,72	2040,38	13419,06
ACF_var	não assumidas	-2,81	15,73	0,001	180723189,23	-7545741,23	368992119,69
ITU_max	assumidas	-2,84	30,00	0,008	2,39	0,08	4,70
ITU_range	assumidas	-2,69	30,00	0,001	2,89	-0,07	5,84
Vol_vazio	não assumidas	-3,19	18,45	0,005	3098620,33	306895,73	5890344,92
Ind_Vazio	assumidas	-2,37	30,00	0,002	2,51	-0,41	5,43
ICR_std	assumidas	-4,11	30,00	0,000	0,62	0,21	1,04
ICR_range	assumidas	-3,62	30,00	0,001	2,34	0,56	4,13
ICR_var	não assumidas	-3,25	16,95	0,005	1,15	0,13	2,18

* (2 extremidades) - **Intervalo de Confiança da Diferença - *** Variâncias iguais

Os parâmetros geomorfométricos com diferenças significativas entre as BPO amostrais estão sintetizados no **Tabela 2**. Considerando o nível de significância em 95%, o teste t independente e o teste Kruskal-Wallis de amostras independentes indicaram os mesmos 15 parâmetros geomorfométricos com diferenças significativas entre o grupo das bacias de primeira perenes e o grupo das BPO intermitentes.

Tabela 2: Parâmetros geomorfométricos com diferenças significativas entre as bacias amostrais pelos testes estatísticos aplicados. Kruskal-Wallis considerando a significância estatística em 95%. Elaboração: Autores (2020).

VARIÁVEIS COM DIFERENÇA ENTRE BPO PERENES E INTERMITENTES	
Teste t independente e Teste Kruskal-Wallis	
1. Área	9. Máximo do índice topográfico de umidade
2. Perímetro	10. Amplitude do índice topográfico de umidade
3. Amplitude da altimetria	11. Volume de vazio
4. Mínimo do plano de curvatura*	12. Índice de vazio
5. Máximo da acumulação de fluxo	13. Desvio padrão do índice de concentração de rugosidade
6. Média da acumulação de fluxo	14. Amplitude do índice de concentração de rugosidade
7. Desvio padrão da acumulação de fluxo	15. Variância do índice de concentração de rugosidade
8. Variância da acumulação de fluxo	

Para mensurar as relações entre variáveis com diferenças estatísticas, foi aplicado o teste de correlação Pp de Spearman (**Tabela 3**). Foi verificado que a área, o perímetro e o volume de vazio apresentam forte correlação positiva entre si. Ou seja, à medida que a área aumenta, tanto o perímetro como o volume de vazio também aumentam. A relação da área da bacia com o perímetro já foi relatada em estudos anteriores (SAMPAIO, 2008; PAZ, 2015; BUENO, 2016).

Tabela 3: Resultado da correlação Pp de Spearman nos parâmetros geomorfométricos identificados. Cor verde representa as correlações positivas. Cor vermelha representa as correlações negativas. Elaboração: Autores (2020).

Correlação ρ de Spearman															
	AREA	PERIMETRO	Alt_range	Plan_min	ACF_max	ACF_mean	ACF_std	ACF_var	ITU_max	ITU_range	Vol_vazio	Ind_Vazio	ICR_std	ICR_range	ICR_var
AREA		0,959	0,496	-0,657	0,804	0,859	0,865	0,865	0,576	0,615	0,808	0,621	0,727	0,687	0,727
PERIMETRO	0,959		0,515	-0,552	0,78	0,911	0,868	0,868	0,598	0,613	0,787	0,592	0,768	0,717	0,768
Alt_range	0,496	0,515		-0,299	0,516	0,576	0,575	0,575	0,387	0,603	0,677	0,687	0,784	0,821	0,784
Plan_min	-0,66	-0,552	-0,299		-0,522	-0,537	-0,594	-0,594	-0,341	-0,486	-0,556	-0,449	-0,333	-0,302	-0,333
ACF_max	0,804	0,78	0,516	-0,522		0,853	0,92	0,92	0,831	0,819	0,862	0,728	0,731	0,708	0,731
ACF_mean	0,859	0,911	0,576	-0,537	0,853		0,955	0,955	0,75	0,769	0,873	0,716	0,76	0,734	0,76
ACF_std	0,865	0,868	0,575	-0,594	0,92	0,955		0,953	0,772	0,8	0,944	0,822	0,752	0,746	0,752
ACF_range	0,804	0,78	0,516	-0,522	0,953	0,853	0,92	0,92	0,831	0,819	0,862	0,728	0,731	0,708	0,731
ACF_var	0,865	0,868	0,575	-0,594	0,92	0,955	0,953		0,772	0,8	0,944	0,822	0,752	0,746	0,752
ITU_max	0,576	0,598	0,387	-0,341	0,831	0,75	0,772	0,772		0,88	0,724	0,61	0,608	0,629	0,608
ITU_range	0,615	0,613	0,603	-0,486	0,819	0,769	0,8	0,8	0,88		0,791	0,718	0,645	0,676	0,645
Vol_vazio	0,808	0,787	0,677	-0,556	0,862	0,873	0,944	0,944	0,724	0,791		0,93	0,754	0,772	0,754
Ind_Vazio	0,621	0,592	0,687	-0,449	0,728	0,716	0,822	0,822	0,61	0,718	0,93		0,646	0,705	0,646
ICR_std	0,727	0,768	0,784	-0,333	0,731	0,76	0,752	0,752	0,608	0,645	0,754	0,646		0,978	0,958
ICR_range	0,687	0,717	0,821	-0,302	0,708	0,734	0,746	0,746	0,629	0,676	0,772	0,705	0,978		0,978
ICR_var	0,727	0,768	0,784	-0,333	0,731	0,76	0,752	0,752	0,608	0,645	0,754	0,646	0,958	0,978	

** A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).
 * A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).

À medida que a área da bacia de primeira ordem aumenta, as medidas de acumulação de fluxo (máximo, média, desvio padrão e variância) também aumentam. Isso pode ser explicado pela relação da área com a quantidade de pixels computada na acumulação de fluxo. Acumulação de fluxo, do ITU e do ICR também apresentaram alta correlação positiva entre si. O mínimo do plano de curvatura apresentou correlação negativa com todas as outras variáveis, apresentando maiores valores negativos para área, perímetro e medidas da acumulação de fluxo.

Estes grupos de variáveis com alta correlação entre si ficam evidentes quando se aplica a ACP. A **Figura 7** ilustra a dispersão das variáveis nos dois primeiros componentes identificados na ACP aplicada no grupo das bacias amostrais. Variáveis como as medidas da acumulação de fluxo se apresentam sobrepostas no gráfico de dispersão. A síntese dos componentes principais é apresentada na **Figura 8**.

O primeiro componente principal identificado (explica aproximadamente 66% da variância total) está relacionado com as dimensões das BPO amostrais, envolvendo área, perímetro, volume de vazio e medidas de acumulação de fluxo. O segundo componente principal apresenta maior influência das variáveis relacionadas a altimetria e ICR das bacias amostrais (explicando aproximadamente 18% da variância total).

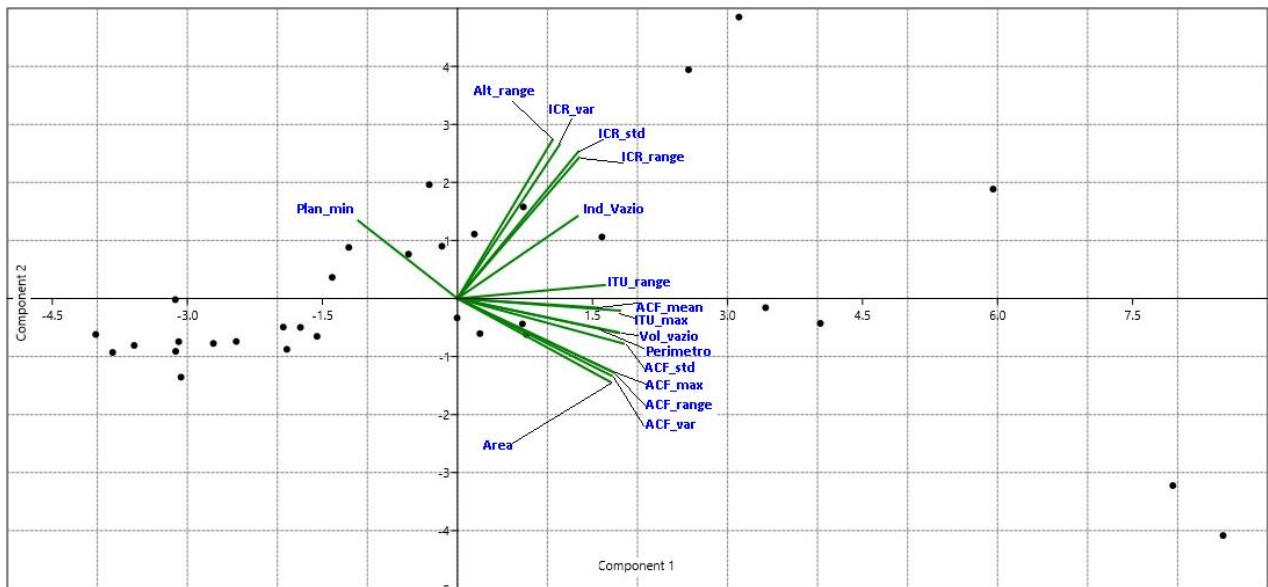


Figura 7: Gráfico de dispersão dos dois primeiros grupos gerado pela aplicação da ACP nas variáveis das BPO amostrais. Elaboração: Autores (2020).

Componentes principais									
Variáveis	1	Variáveis	2	Variáveis	3	Variáveis	4	Variáveis	5
	Cargas		Cargas		Cargas		Cargas		Cargas
AREA	0,957	ICR_std	0,756	Plan_min	0,594	ITU_max	0,543	Ind_Vazio	0,431
ACF_mean	0,943	ICR_var	0,701			ITU_range	0,464		
Vol_vazio	0,93	ICR_range	0,658						
PERIMETRO	0,928	Alt_range	0,632						
ACF_max	0,892								
ACF_std	0,88								
ACF_var	0,87								
Variância total explicada									
	Componente	Total	% de variância	% cumulativa					
	1	9,889	65,926	65,926					
	2	2,769	18,463	84,389					
	3	0,798	5,318	89,708					
	4	0,643	4,284	93,992					
	5	0,442	2,946	96,938					
Matriz de componente a									
Método de Extração: análise de Componente Principal.									
a 5 componentes extraídos.									

Figura 8: Componentes principais gerados pela aplicação da ACP nas variáveis das BPO amostrais. Elaboração: Autores (2020).

O terceiro componente principal demonstra influência dos valores mínimos do plano de curvatura (explicando aproximadamente 5% da variância total). O quarto componente principal teve maior influência das medidas do ITU (explicando aproximadamente 4% da variância total). O último componente principal teve maior influência do índice de vazio (explicando aproximadamente 3% da variância total).

As primeiras variáveis de cada componente principal foram aplicadas na ACP. A **Figura 9** mostra que o desvio padrão do ICR, índice de vazio, máximo do ITU e área são variáveis mais relacionadas com as bacias amostrais perenes e mínimo do plano de curvatura está mais relacionado com as bacias amostrais intermitentes.

O ICR já foi citado na literatura como parâmetro com papel na diferenciação das BPO perenes e intermitentes, como na bacia hidrográfica do rio Benevente no Espírito Santo (SAMPAIO, 2008) e na bacia Hidrográfica do Rio Mutum-Paraná em Rondônia (BUENO, 2016). O estudo de Banon (2013), que analisou a relação da morfometria do relevo com a rede de drenagem no Estado do Amazonas, também identificou a acumulação de fluxo como parâmetro geomorfométrico importante para ocorrência e mapeamento ou não de rio de primeira ordem perene (início da rede de drenagem), embora não realizasse validação de campo.

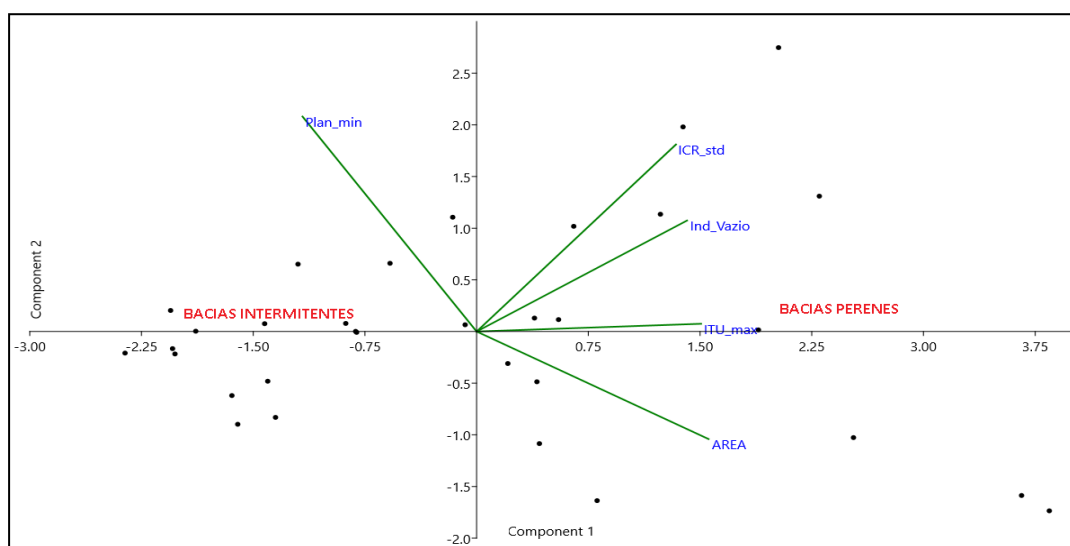


Figura 9: Gráfico de dispersão dos dois primeiros grupos gerado pela aplicação da ACP nas variáveis das BPO intermitentes. Elaboração: Autores (2020).

Neste trabalho, foram identificados o plano de curvatura e ITU como parâmetros geomorfométricos diferentes em BPO perenes e intermitentes. O índice de volume de vazio, embora apresentasse diferenças significativas entre os grupos de bacias amostrais, apresentando a menor variância explicada (aproximadamente 3%).

4. Conclusões

Visando subsidiar uma alternativa para o mapeamento da rede drenagem, foi analisado se existem diferenças estatisticamente significativas nos parâmetros geomorfométricos entre bacias de primeira ordem perenes e intermitentes. Foi verificado que os parâmetros de área, índice de concentração de rugosidade, plano de curvatura, índice topográfico de umidade e índice de vazio foram os mais sensíveis para diferenciar bacias de primeira ordem perenes e intermitentes.

Destaca-se o emprego de RPA para geração de MDE com alto nível de detalhamento, que se caracteriza como procedimento com custo inferior em comparação com procedimentos como aerolevantamentos LIDAR e RADAR. Salienta-se a necessidade de avaliação da qualidade altimétrica dos MDE gerados por esta técnica.

Embora tenham sido identificadas diferenças geomorfométricas do relevo entre bacias de primeira ordem perenes e intermitentes, são necessárias pesquisas mais aprofundadas visando incorporar os resultados aqui obtidos em propostas com regressão estatística, árvores de decisão ou redes neurais para automatizar o mapeamento da rede de drenagem.

Notas

Este artigo é parte da dissertação de mestrado do primeiro autor, intitulada **Diferenças geomorfométricas do relevo em bacias hidrográficas de primeira ordem perene e intermitente**, desenvolvida sob orientação do segundo autor e defendida em 2019, no Programa de Pós-graduação em Geografia da UFPR. Agradecimento à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor. Agradecimento ao CNPq pela verba disponibilizada no projeto de pesquisa “Mapeamento da rede de drenagem: avaliação da acurácia da representação cartográfica da rede de drenagem no estado do Paraná” no processo n.º 421960/2016-7.

Referências

AGRESTI, A.; FINLAY, B. **Métodos estatísticos para as ciências sociais**. Porto Alegre: Penso Editora, 2012.

BAND, L. E. Extraction of channel networks and topographic parameters from digital elevation data. **Channel network hydrology**, p. 13–42, 1993. Disponível em: <http://solim.geography.wisc.edu/axing/teaching/geog579/lectures/references/Beven_Kirkby_ch02_Band.PDF>.

BANON, L. C. **Árvores de decisão aplicadas à extração automática de redes de drenagem**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Departamento de Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/12.04.03.56/doc/publicacao.pdf>>.

BUENO, L. F. **Inteligência artificial aplicada à melhoria da acurácia do mapeamento de redes de drenagem**. 2016. 148 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/44459>>.

CHORLEY, R. J.; DALE, P. F. Cartographic problems in stream channel delineation. **Cartography**, v. 7, n. 4, p. 150–162, 1972. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00690805.1972.10437698>>.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

- CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos. **Rio de Janeiro: Bertrand Brasil**, 1995.
- EVERITT, B. S.; DUNN, G. Principal components analysis. **Applied Multivariate Data Analysis, Second Edition**, p. 48–73, 2001.
- MARION, F. A.; MELLO FILHO, J. A.; SILVA, J. L. S. Análise da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas por geoprocessamento no campus da UFSM–RS. **Terr@ Plural**, v. 4, n. 1, p. 65–76, 2010. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br/index.php/tp/article/view/1132>>.
- MCKIGHT, P. E.; NAJAB, J. Kruskal-Wallis Test. **Corsini encyclopedia of psychology**, 2010. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470479216.corpsy0491>>.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **Source areas, drainage density, and channel initiation** *Water Resources Research*, 1989. Disponível em: <http://geomorphology.sese.asu.edu/Papers/Montgomery-Dietrich_DrainageDensity_WRR1989.pdf>.
- MOORE, I. D. ; GESSLER, P. E. ; NIELSEN, G. A. ; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 2, p. 443–452, 1993. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>>.
- PAZ, O. L. S. **Relação do litotipo e do relevo com a dimensão das bacias de drenagem de primeira ordem e com a ocorrência de nascentes**. 2015. 98 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: A brief guide. *In*: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009. vol. 33, p. 3–30. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9).
- ROGERSON, P. A. **Métodos estatísticos para Geografia: um guia para o estudante**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2012.
- SAMPAIO, T. V. M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente - ES**. 2008. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- SAMPAIO, T. V. M. Volume e Índice de Vazio em bacias hidrográficas de primeira ordem. **No prelô**, 2021.
- SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Variáveis auxiliares para o mapeamento da rede de drenagem : correlação espacial entre nascentes , unidades de relevo e litotipos na bacia hidrográfica do rio. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, v. 18, n. 2014, p. 624–634, 2014a. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/90071>>.
- SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 1–14, 2014b. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/376>>.
- SANGIREDDY, H.; CAROTHERSA, R. A.; STARK, C. P.; PASSALACQUAA, P. Controls of climate, topography, vegetation, and lithology on drainage density extracted from high resolution topography data. **Journal of hydrology**, v. 537, p. 271–282, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416300968>>.
- SILVA, J. M. F.; OKA-FIORI, C.; SILVEIRA, C. T. Geomorfometria: uma Análise de Conceitos, Métodos e Aplicações em Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 2, p. 558–583, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234008/27453>>.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO EMPREGADA NO MAPEAMENTO DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS. **Geografar**, v. 7, p. 43–68, 2012. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/26709>>.

SOUSA, M. S.; SAMPAIO, T. V. M. Influência da acurácia de completude na delimitação de áreas de preservação permanente. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 35, 2018. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/13245>>.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).