

APLICAÇÃO DAS LEIS DE HORTON NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO QUATRO, ALTO RIO URUGUAI, SUL DO BRASIL

Vitor Hugo Rosa Biffi¹, Matheus Vinícius dos Santos², Paulo Miguel de Bodas Terassi³

¹Doutorando em Geografia, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá - PR. Bolsista CNPq. vhogorosabiffi@gmail.com

²Mestrando em Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Francisco Beltrão/PR. Bolsista CAPES. matheusvini.geo@gmail.com²

³Doutor em Geografia, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo/SP. pmbterassi@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo aplicar as leis de Horton na bacia de drenagem do rio Quatro, sendo elas: 1) lei do número de canais, 2) lei do comprimento dos canais, 3) lei da declividade dos canais e 4) lei da área da bacia hidrográfica. Para isso, foram realizados modelos de regressão linear simples e teste de hipótese ANOVA e, além disso, aplicou-se o Teste de Duncans na segunda e terceira lei de Horton para avaliar as diferenças entre as médias por pares de médias dos níveis hierárquicos da drenagem. Sobre a primeira lei de Horton, foi verificado que a bacia hidrográfica está parcialmente de acordo, obtendo valores de R^2 ajustado de 0,9742 e 0,05 para o teste ANOVA. No que se refere à segunda lei de Horton, foi verificado que a bacia hidrográfica não está de acordo com a lei, pois ainda que os valores de comprimento de canal tendem a aumentar, não é de proporção geométrica. A mesma situação foi averiguada na terceira lei de Horton, pois ainda que tenha a tendência da diminuição da declividade conforme o aumento da ordem, esta não foi constatada de maneira geométrica. Por fim, foi verificado que a bacia hidrográfica se apresenta de acordo com a quarta lei de Horton, apresentando o valor de R^2 de 0,9799 e análise de variância do modelo da regressão linear rejeita hipótese nula. Os dados obtidos foram comparados aos trabalhos paleohidrológicos e litoestruturais da área de estudo, buscando elucidar os condicionantes para as diferenças da organização da rede de drenagem em relação as leis de Horton. Com base nessa análise, é possível que as diferenças litológicas e paleohidrológicas sejam fatores determinantes na organização dos canais, sobretudo no comprimento e declividade.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia fluvial; Rio Uruguai; Volta Grande.

1 INTRODUÇÃO

O Planalto Dissecado do rio Uruguai é uma unidade geomorfológica localizada na região sul do Brasil, ocupando a faixa limítrofe dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Essa unidade é caracterizada por apresentar relevos fortemente dissecados, produto da erosão fluvial do sistema hidrográfico do rio Uruguai sobre o Planalto dos Campos Gerais. A dissecção ocorre, destacadamente, em rochas da Província Ígnea do Paraná, cujos aspectos litológicos e estruturais são considerados fundamentais na organização do relevo e da rede de drenagem local (COSTA; BUSS; ROSA, 2018).

A influência do controle lito-estrutural na rede de drenagem do planalto dissecado do rio Uruguai foi inicialmente determinada para os tributários do leste da bacia hidrográfica. Tais cursos fluviais seguem as orientações das principais linhas estruturais da Bacia Sedimentar do Paraná, perpendiculares entre si: NE-SO e NO-SE. Assim, os canais apresentam profundo grau de entalhamento, com ocorrência de meandros encaixados adaptados ao sistema de fraturas dos derrames do Grupo Serra Geral (COSTA; BUSS; ROSA, 2018; JUSTUS; MACHADO; FRANCO, 1986).

A relação entre a estrutura geológica e a composição da rede de drenagem foi avaliado por inúmeros autores, incluindo os trabalhos clássicos de Horton (1945) e Hack (1957) que definem, matematicamente, as leis do sistema de drenagem e condições de equilíbrio dos sistemas fluviais, respectivamente. As leis, definidas por modelos empíricos, são fundamentais na caracterização dos sistemas de drenagem sob diversas condições geológicas e climáticas, uma vez que estão diretamente associadas aos elementos da geometria hidráulica (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 2020).

Dentre as principais abordagens quantitativas na análise da rede de drenagem, as leis de Horton podem ser entendidas como fundamentais à Geomorfologia, pois são capazes de ser balizadoras à compreensão da dissecação do relevo e da estrutura da paisagem. Índices fluviomorfológicos derivados das leis de Horton foram consolidados nas décadas de 80 e 90, tanto para análise dos canais fluviais (classe linear) quanto bacias hidrográficas (classe zonal) e são comumente utilizados na análise morfométrica em bacias individuais ou no comparativo de bacias hidrográficas, direcionados tanto para estudos teóricos quanto em aplicações ambientais (CHEREM *et al.*, 2020).

Embora se reconheça o papel do controle lito-estrutural no oeste da bacia do rio Uruguai, pouco se sabe a respeito desse controle para as demais áreas da bacia. Além disso, ainda não foram reconhecidos como os canais fluviais respondem ao controle lito-estrutural no vale do rio Uruguai, sobretudo na área da Volta Grande, onde ocorre uma ampla variabilidade litológica e morfológica dos derrames basálticos do Grupo Serra Geral. É nesse contexto que se insere o presente trabalho, cujo objetivo principal é aplicar as leis de Horton na hidrográfia do rio Quatro, buscando contribuir no estudo da evolução do sistema de drenagem da paisagem local.

2 ÁREA DE ESTUDO

A bacia de drenagem do rio Quatro está localizada na margem direita do rio Uruguai, no trecho localmente denominado como Volta Grande. A área da Volta Grande corresponde a um meandro estrutural do alto curso do rio Uruguai com cerca de 200 km² de área (Figura 1). Engloba os municípios de Palmitos, São Carlos e Águas de Chapecó em Santa Catarina e Alpestre no Rio Grande do Sul.

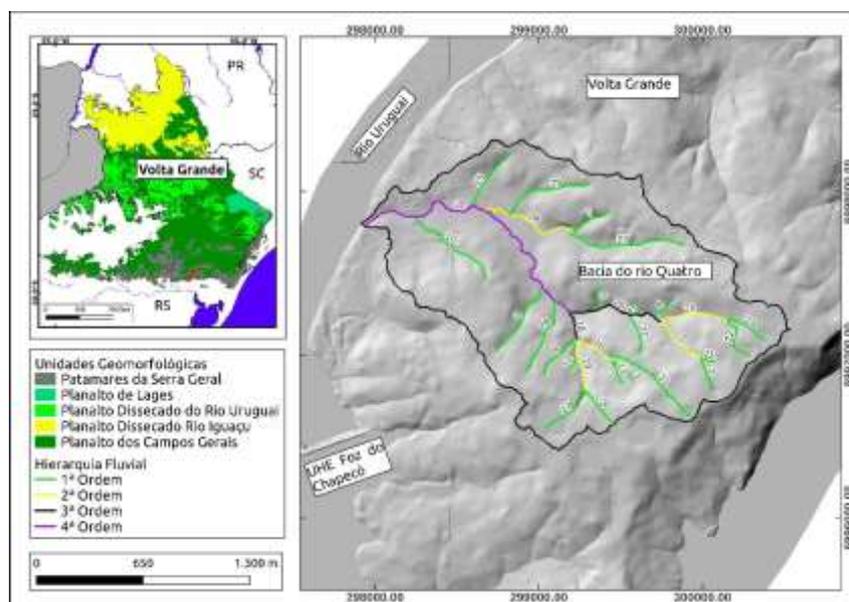


Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do rio Quatro.

Fonte: Autores (2021).

A área de estudo se insere no Planalto Dissecado do Rio Uruguai, onde o relevo apresenta modelados de dissecação diferencial, dispostos em colinas alongadas e vales profundos, com desníveis acentuados entre os divisores e fundos de vale, que variam de 190 a 260 m. Os interflúvios são estreitos, com topo plano a levemente convexo, rompidos por encostas de forte declividade, interrompidas ao longo do declive por degraus que configuram patamares (COSTA; BUSS; ROSA, 2018; JUSTUS; MACHADO; FRANCO, 1986).

Na área da Volta Grande, foram mapeadas ao menos 5 sequências de derrames, com contato definido tanto do tipo I quando do tipo II (BIFFI, 2021), embora se reconheça a possibilidade de ocorrência de até 11 derrames individualizados por feições de interação vulcano-sedimentares com base nos mapeamentos disponíveis na literatura. Nesse último caso, trata-se de derrames de difícil individualização em campo, uma vez que as feições de interação vulcano-sedimentares ocorrem em lentes descontínuas lateralmente (DIAS; PARISI, 2007). Os derrames tipo I e tipo II ocorreriam interdigitados, sendo correspondentes tanto as fácies geoquímicas quanto às formações litoestratigráficas Paranapanema e Pitanga (DIAS; PARISI, 2007). Dessa forma, derrames tipo I foram posteriormente interpretados como derrames tipo *pahohoe* tabular, enquanto os derrames II seriam correspondentes a derrames *rubbly pahohoe* (BIFFI, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os parâmetros morfométricos da bacia de drenagem selecionada foram obtidos por meio de diferentes produtos cartográficos. As bases cartográficas foram obtidas junto ao Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC), disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) de Santa Catarina. Nesse sistema, foi obtido o arquivo vetorial da rede de drenagem em escala 1:25.000, ao qual foi determinada a hierarquia fluvial com base na classificação de Strahler (1952). No mesmo sistema, também foram obtidos os arquivos raster referentes ao MDE SIGSC, com resolução espacial de 0,39 m. O MDE foi utilizado para a delimitação das bacias hidrográficas. Todos os processamentos de manipulação dos dados vetoriais e arquivos raster foram efetuados no Software SAGA versão 7.0.

Após a aquisição da base cartográfica, os dados referentes ao comprimento dos canais, declividade dos canais e área das bacias de drenagem foram determinados no software Qgis 3.20, utilizando-se dos algoritmos contidos no módulo GRASS. Os dados foram extraídos em formato CSV e compilados em *scripts* no ambiente R Studio, aos quais foram computados os parâmetros de estatística descritiva.

Para verificar se a rede de drenagem atende às leis de Horton (1945), foram utilizados os modelos de regressão linear simples, enquanto o teste de hipótese foi determinado por meio da análise de variância (ANOVA), tanto para o modelo de regressão quanto para todo o conjunto de dados (BUSSAB; MORETTIN, 2017). No caso das 2ª e 3ª Leis de Horton, aplicou-se o Teste de Duncans para avaliar as diferenças entre as médias por pares de média dos níveis hierárquicos da rede de drenagem. Todos os cálculos estatísticos foram determinados no ambiente R studio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira lei de Horton, definida como Lei do número de canais (HORTON, 1945), determina que o número de canais de diferentes ordens em uma dada bacia hidrográfica tende a se aproximar de uma série geométrica inversa, a qual inicia-se com um único segmento que progride conforme a razão de bifurcação. A primeira lei de Horton é comumente utilizada com base no critério de classificação hierárquica de Strahler (1952).

Na área da Volta Grande, na bacia de drenagem do rio Quatro, foram mensurados vinte e quatro canais de primeira ordem, seis canais de segunda ordem, dois canais de primeira ordem e um canal de quarta ordem, este último definindo o nível hierárquico da bacia de drenagem (Tabela 1). Com base no gráfico semi-logarítmico, verificou-se que a bacia está parcialmente de acordo com a Primeira Lei de Horton, onde há a redução do número de canais com o aumento da hierarquia fluvial. O valor r^2 ajustado de 0,9742 sugere uma alta confiabilidade da regressão (Figura 2). Por sua vez, os dados obtidos pela

análise de variância (ANOVA) da regressão linear, o valor p foi inferior a 0,05 também indica que de fato a frequência dos canais estão diretamente associadas à hierarquia fluvial, aceitando-se o modelo da regressão.

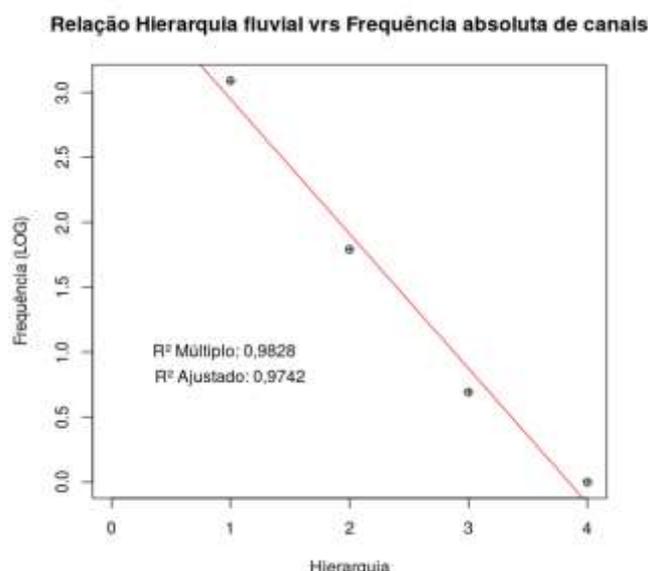


Figura 2: Regressão linear Hierarquia fluvial (Strahler) vs Frequência absoluta.
Fonte: Autores (2021).

Tabela 1: Dados estatísticos da regressão linear e ANOVA da frequência absoluta dos canais.

Regressão linear					
	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr	
Intercepto	3,98692	0,26544	15,02	0,00440	
Hierarquia	1,03717	0,09693	-10,70	0,00862	
ANOVA - MODELO DE REGRESSÃO					
	Graus de liberdade	Varição (Soma dos quadrados)	Quadrado médio	valor F	Pr (>F)
Hierarquia	1	5,3786	5,3786	114,5	0,008621
resíduos	2	0,0939	0,0470		

Fonte: Autores (2021).

A segunda lei de Horton (1945), definida como lei do comprimento dos canais, define que o comprimento médio dos canais de ordens diferentes tende a se aproximar de uma progressão geométrica direta, a qual o primeiro segmento é o comprimento médio dos canais de primeira ordem. Em outras palavras, a segunda lei de Horton determina que o comprimento médio dos canais tende a aumentar geometricamente com o aumento da hierarquia fluvial. No caso analisado, com base na análise da estatística descritiva, verificou-se que a média do comprimento dos canais tende a aumentar com o aumento da hierarquia fluvial, destacando-se, principalmente os maiores valores obtidos pela média e

pela mediana. Além disso, observou-se um elevado desvio padrão, com significativa diferença da máxima para os valores medianos (Tabela 2).

Tabela 2: Estatística descritiva do comprimento médio dos canais.

Comprimento dos canais (metros)								
Hierarquia	N	Mínimo	1ºQuartil	Mediana	Média	3ºQuartil	Máximo	Desv pad
1ª Ordem	22	61,46	169,06	269,69	320,58	458,34	735,85	195,1481
2ª Ordem	6	28,94	249,72	346,21	335,18	405,83	646,47	205,6646
3ª Ordem	2	182,5	-	-	391,2	-	599,8	295,0899
4ª Ordem	1	-	-	1822	-	-	-	-

Fonte: Autores (2021).

Entretanto, com base na análise do boxplot, verifica-se que a distância entre os quartis não aumenta geometricamente com o aumento da hierarquia fluvial, mesmo com o aumento da mediana e do desvio padrão. Da mesma forma, observou-se a redução do comprimento médio entre os canais de primeira e segunda ordem e, nesse caso, não estaria de acordo com a segunda Lei de Horton (Figura 3A).

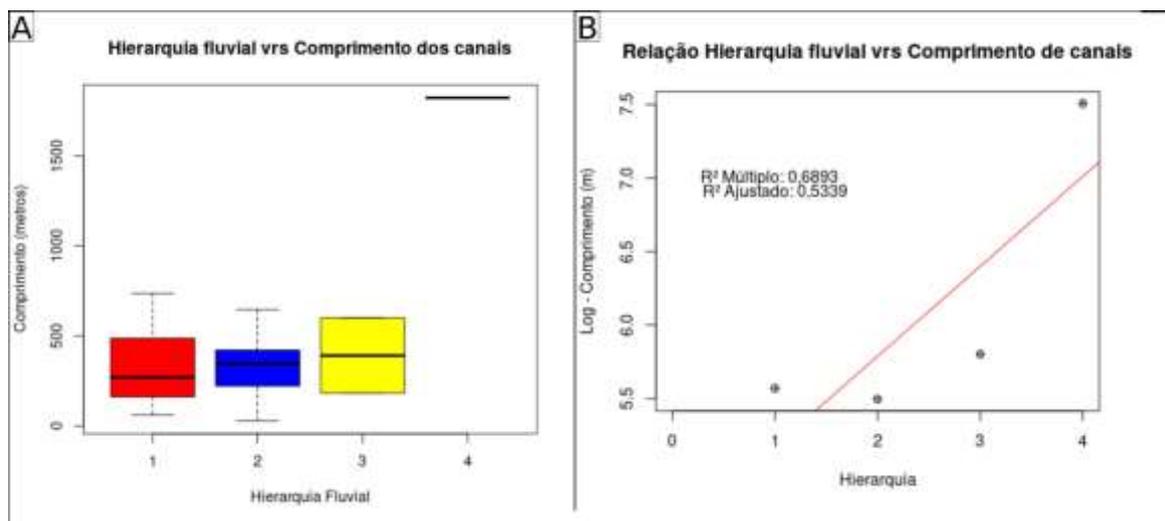


Figura 3: A) Boxplot referente ao comprimento dos canais por nível hierárquico. B) Representação gráfica do modelo de regressão entre a hierarquia fluvial e o comprimento médio dos canais.

Fonte: Autores (2021).

Ao aplicar o modelo de regressão linear com os valores do comprimento médio em logaritmo (Figura 3B, Tabela 3), verifica-se o valor de r^2 ajustado em 0,5339 com valor $p > 0,05$ para a variável preditora. A análise de variância do modelo de regressão linear atesta para hipótese nula, rejeitando a regressão do modelo. Nesse caso, entende-se que a rede de drenagem da bacia Quatro não está de acordo com a segunda lei de Horton.

Por outro lado, com base nos dados da análise de variância para todo o conjunto de dados, verifica-se que o valor p é inferior a 0,05 para determinados pares de média e, portanto, registra-se que há diferenças significativas entre as médias dos comprimentos dos canais em determinados níveis hierárquicos. Essa relação fica mais clara com o teste de Duncan, em que a rejeição da hipótese nula foi identificada ao associar canais de 4 ordem com os demais canais (tabela 4). Assim, foi observado que não há diferença

significativa entre as médias para os canais de 1ª e 2ª ordem, 3ª e 1ª ordem e 3ª e 2ª ordem, enquanto os demais pares apresentam diferença entre as médias e o seu comprimento cresce exponencialmente com o aumento da hierarquia fluvial.

Tabela 3: Dados estatísticos da regressão linear e ANOVA do comprimento dos canais.

Regressão linear				
	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
Intercepto	4,5640	0,7957	5,736	0,0291
Hierarquia	0,6120	0,2905	2,106	0,1698

ANOVA DO MODELO DE REGRESSÃO					
	Graus de liberdade	Varição (Soma dos quadrados)	Quadrado médio	F value	Pr(>F)
Hierarquia	1	1,87256	1,87256	4,4366	0,1698
Resíduos	2	0,84414	0,42207		

Fonte: Autores (2021).

Tabela 4: Dados estatísticos da ANOVA e teste Duncan do comprimento dos canais.

ANOVA					
	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Pr(>F)
Hierarquia	3	2169815	723272	17,78	1.43e-06
Resíduos	29	1098306	40678		

Teste post-huc Duncan				
Hierarquia	Diferença	Menor intervalo de confiança	Maior intervalo de confiança	Valor p
2-1	14,60461	-175,9912	205,2004	0,8762
3-1	70,63110	-250,4785	391,7407	0,6594
4-1	1501,7226	1043,3354	1960,1099	1.5e-07
3-2	56,02649	-281,8637	393,9167	0,7363
4-2	1487,11806	1017,4972	1956,7389	3,6e-07
4-3	1431,0915	924,2562	1937,9269	3,7e-06

Fonte: Autores (2021).

A terceira lei de Horton é apresentada como a lei da declividade dos canais, a qual define uma relação entre a declividade do canal e sua ordem, como sugerida na lei de Playfair (HORTON, 1945). A declividade de um canal progride de forma geométrica inversa

aos canais de ordem superior e sua razão é expressa pela relação entre os gradientes dos canais.

No caso analisado, com base na análise da estatística descritiva, verificou-se que o logaritmo natural da média da declividade dos canais tende a diminuir com o aumento da hierarquia fluvial (Tabela 5). Porém, assim como observado no caso do comprimento dos canais, com base na análise do boxplot, verificou-se que a mediana da declividade e o primeiro quartil dos canais de segunda ordem não diminuem geometricamente com o aumento da hierarquia fluvial (Figura 4A) e, nesse caso, não estaria de acordo com a terceira Lei de Horton. Além disso, ainda com base na análise dos boxplots, foram identificados dois outliers para os canais de segunda ordem que não foram identificados com base no desvio padrão (canais identificados com os códigos 14 e 28 da figura 1).

Tabela 5: Estatística descritiva da declividade dos canais

Declividade dos canais (metros/metros)							
Hierarquia	Mín	1ºQuart	Median.	Média	3ºQuartil	Máximo	Desv. Pad
1ª Ordem	0,0630	0,1092	0,14996	0,1555	0,19039	0,29071	0,060899
2ª Ordem	0,0259	0,14993	0,15100	0,1382	0,15849	0,19118	0,0572267
3ª Ordem	0,0759	0,0762	0,07650	0,0765	0,07675	0,07700	0,0007162
4ª Ordem	0.0196						

Fonte: Autores (2021).

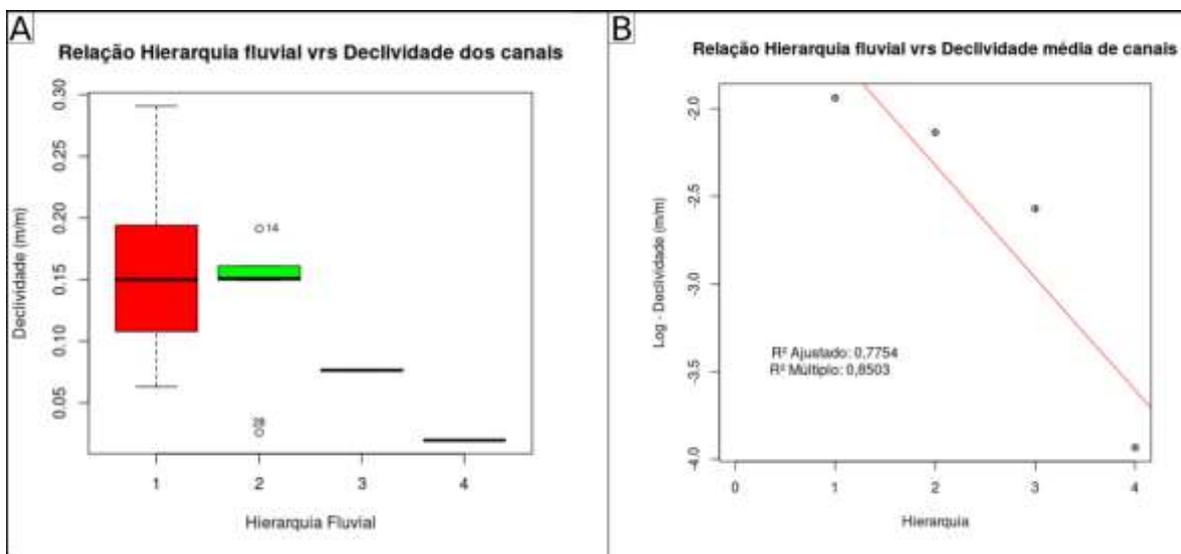


Figura 4: A) Boxplot referente a declividade dos canais por nível hierárquico. B) Representação gráfica do modelo de regressão entre a hierarquia fluvial e a declividade média dos canais

Fonte: Autores (2021).

Ainda no caso da declividade, com base no modelo da regressão linear contendo as declividades em logaritmo, verificou-se que há a redução das declividades com o aumento da hierarquia fluvial (Figura 4B). Entretanto, embora o coeficiente de correlação ajustado R^2 seja de 0,7754, a análise de variância do modelo de regressão linear atesta para hipótese nula, rejeitando a regressão do modelo. Da mesma forma, os resíduos não exibem distribuição normal, também indicando a ausência de correlação do modelo.

Tabela 6: Dados estatísticos da regressão linear e ANOVA do comprimento dos canais.

Regressão linear				
	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
Intercepto	-1,0397	0,5215	-1,994	0,1844
Hierarquia	-0,6417	0,1904	-3,370	0,0779

ANOVA DO MODELO DE REGRESSÃO					
	Graus de liberdade	Varição (Soma dos quadrados)	Quadrado médio	Valor F	Pr(>F)
Hierarquia	1	2,05921	2,05921	11,357	0,0779
Resíduos	2	0,36264	0,18132		

Fonte: Autores (2021).

Com base na análise de variância de todo o conjunto de dados, verificou-se que não há diferença significativa entre as médias da declividade. Assim como no caso do comprimento dos canais, o valor p esteve próximo ao valor α utilizado de 0,05. Nesse caso, com base no teste Duncan, verificou-se também que há diferença entre os pares de canais de 4ª e 1ª ordem e entre canais 4ª e 2ª ordem (Tabela 7).

Tabela 7: Dados estatísticos da ANOVA e teste Duncan para a declividade dos canais.

ANOVA					
	Graus de liberdade	Varição (Soma dos quadrados)	Quadrado médio	Valor F	Pr(>F)
Hierarquia	3	0.02765	0.009218	2.64	0.0697
Resíduos	27	0.09426	0.003491		

Teste post-huc Duncan				
Hierarquia	Diferença	Menor intervalo de confiança	Maior intervalo de confiança	Valor p
2-1	-0,01723507	-0,07307084	0,03860071	0,5318
3-1	-0,07902660	-0,17309689	0,01504369	0,0973
4-1	-0,13592133	-0,27020765	-0,00163502	0,0474
3-2	-0,06179153	-0,16077778	0,03719471	0,2111
4-2	-0,11868627	-0,25626351	0,01889097	0,0889
4-3	-0,05689474	-0,20537411	0,09158463	0,4386

Fonte: Autores (2021).

A quarta lei de Horton (1945) é retratada como lei da área da bacia hidrográfica, a qual a área média, a partir de uma bacia hidrográfica com determinada ordem de canal, tende a aumentar geometricamente até bacias hidrográficas com canais de ordem maior.

Nesse caso, o primeiro segmento é a área média de uma bacia hidrográfica de primeira ordem e a razão é o aumento da área. No caso analisado neste trabalho, com base na análise dos dados estatísticos descritivos (Tabela 8), verifica-se que o comprimento médio da bacia aumenta com o aumento da hierarquia fluvial. Porém, observa-se um elevado desvio padrão entre os valores analisados. Com base na análise do boxplot (Figura 7), verifica-se a ocorrência de pelo menos dois *outliers* nos canais de 1ª e 2ª ordem hierárquica, onde a área da bacia é superior à do conjunto amostral.

Tabela 8: Estatística descritiva da área das bacias hidrográficas

Hierarquia	Mínimo	1ºQuartil	Median	Média	3ºQuartil	Máximo	Desv. Pad.
1ª Ordem	13100	26303	39779	72198	93794	323863	71117.38
2ª Ordem	173300	189575	191625	286714	211850	667219	213148.7
3ª Ordem	452675	524688	596700	572198	631960	667219	109350.66
4ª Ordem	2749320						

Fonte: Autores (2021).

Ainda no caso da relação entre área da bacia de drenagem e a hierarquia fluvial, com base no modelo da regressão linear contendo a média das áreas das bacias em logaritmo, verificou-se que há a aumento da área das bacias com o aumento da hierarquia fluvial. O coeficiente de correlação ajustado R^2 para a regressão é 0,9799 e a análise de variância do modelo de regressão linear rejeita hipótese nula, aceitando o modelo de regressão.

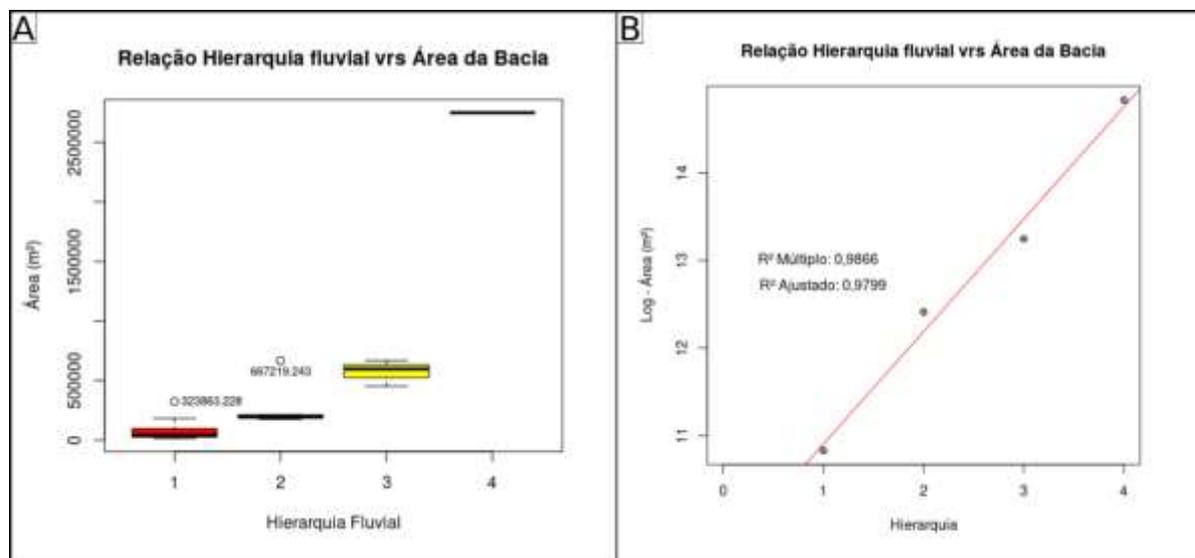


Figura 5: A) Boxplot da relação entre a hierarquia fluvial e a área das bacias de drenagem. B) Gráfico de correlação entre a hierarquia fluvial e área das bacias de drenagens.

Fonte: Autores (2021).

Tabela 9: Dados estatísticos da regressão linear e ANOVA do comprimento dos canais.

Regressão linear					
		Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr(> t)
Intercepto		9.6228	0.2895	33.24	0.000904
Hierarquia		1.2822	0.1057	12.13	0.006728
ANOVA DO MODELO DE REGRESSÃO					
	Graus de liberdade	variação (Soma dos quadrados)	Quadrado médio	F value	Pr(>F)
Hierarquia	1	8.219	8.2196	147.13	0.006728
Resíduos	2	0.1117	0.0559		

Fonte: Autores (2021).

Com base nos dados obtidos para a bacia hidrográfica do rio Quatro, verificou-se que o sistema de drenagem se encontra apenas de acordo com a Primeira e Quarta lei de Horton. Assim, ao comparar a rede de drenagem com os modelos clássicos de evolução da rede de drenagem contidos em Horton (1945) e Melton (1958), é possível que a rede de drenagem da área representa diferentes estágios evolutivos em relação a sua bacia de drenagem.

Para Horton (1945), o sistema de drenagem evolui por dois mecanismos principais: 1) quando o potencial de erosão excede a resistência à erosão, um novo canal se formará ou um antigo será estendido e 2) A ocorrência de gradação cruzada (micropirataria) entre sulcos é aleatória.

Com relação a gradação cruzada aleatória em bacias de drenagem, sobretudo as bacias de primeira ordem, esse aspecto pode ser limitado por condicionantes litoestruturais (LEOPOLD *et al.*, 2020). No caso dos canais de leito rochoso que ocorrem sobre as litologias vulcânicas da Província Ígnea do Paraná, a drenagem evolui preferencialmente sobre as falhas e fraturas presentes no substrato, pois constituem zonas de fraqueza frente ao fluxo hídrico (LIMA, 2009). No caso analisado neste trabalho, o comprimento dos canais, independente da hierarquia fluvial, pode ser dependente das estruturas geológicas e não exclusivamente de condicionantes hidrológicos. Assim, o comprimento dos canais analisados, sobretudo os canais de primeira ordem que apresentam elevado desvio padrão, não estariam de acordo com a 2ª lei de Horton, uma vez que a sua configuração estaria correlacionada às estruturas litológicas presentes na área.

Além dos aspectos litoestruturais, a interação dos processos morfogenéticos de encosta com o vale e a dinâmica climática ao longo do tempo são fundamentais no desenvolvimento da rede de drenagem (LEOPOLD *et al.*, 2020). Assim, os processos responsáveis pela expansão e retração da rede de drenagem estão vinculados à magnitude dos fenômenos hidrológicos e o seu potencial de erosão ao longo do tempo geológico. No caso do sul da área da Volta Grande, as sucessivas variações climáticas do Holoceno promoveram momentos com maior ou menor umidade (SANTOS, 2018). Assim, levando em consideração no modelo de Melton (1958) de evolução da rede de drenagem, em nos momentos de maior umidade do Holoceno Inferior, os canais teriam se expandido da foz para montante, enquanto em períodos mais secos (Holoceno Médio) a drenagem tende a recuar e abandonar os canais próximo aos seus divisores. Uma bacia com vários canais de

primeira ordem conectados aos de maior ordem indica uma drenagem pouco evoluída, pois não houve tempo para se reconectar aos canais à montante.

Já em relação a declividade dos canais, foram verificados um alto desvio padrão nos canais de 1ª ordem e, pelo menos, 2 *outliers* na declividade dos canais de 2ª ordem. Encostas com alta declividade, geralmente associado aos derrames maciços, implicaria em canais com maior declividade, especialmente em canais de menor ordem hierárquica, cuja potência a erosão é menor em relação aos canais de maior ordem hierárquica. Já os canais com menores declividades (canal 28 e canais de 4ª ordem) apresentam baixas declividades e drenam áreas com vales de fundo plano, cuja origem ainda é pouco compreendida. Desta forma, essa diferença da declividade dos canais estaria associada ao relevo da bacia de drenagem.

Por fim, a relação entre a área da bacia de drenagem e a hierarquia fluvial encontrou-se em conformidade com a 4ª Lei de Horton. Por outro lado, foram identificados 2 *outliers* em bacias de 1ª e 2ª ordem no flanco direito da bacia do rio Quatro. De fato, nesse trecho, o número de canais é menor em relação ao flanco esquerdo da bacia de drenagem, predominando canais de 1ª e 2ª ordem, podendo estar associado a resistência litológica (derrames tipo II) deste trecho da bacia ou a outro fator morfoestrutural, ainda desconhecido.

4 CONCLUSÕES

O alto curso do rio Uruguai, localizado na região sul do Brasil, está inserida sobre o planalto dissecado do rio Uruguai. A origem, dinâmica e evolução dessa unidade geomorfológica ainda é uma questão em aberto. Trabalhos clássicos indicam que a litologia e a rede de drenagem tiveram papel fundamental na evolução da estrutura do relevo, enquanto trabalhos estratigráficos sugerem uma importante dinâmica paleoclimática e hidrológica, que pode também ter contribuído na avaliação da rede de drenagem.

A aplicação das leis de Horton associada aos testes estatísticos permitiram verificar que na bacia hidrográfica do rio Quatro, situado na área da Volta Grande, o sistema de drenagem se encontra apenas de acordo com a Primeira e Quarta lei de Horton. Assim, é possível que a organização da rede de drenagem da área, sobretudo a alta diferença do comprimento dos canais, está associada às diferenças a resistência a erosão do substrato geológico em decorrência da diferença estrutural dos derrames. Da mesma forma, a declividade dos canais está associada às diferenças litológicas e ao comprimento das encostas e dos vales, que proporcionam maior ou menor gradiente aos canais. Já em relação a área da bacia de drenagem, verificou-se a ocorrência de pontos extremos, embora ainda não seja claro quais são os seus condicionantes.

REFERÊNCIAS

BIFFI, V. H. R. **Geologia, Geomorfologia e Geoarqueologia da Volta Grande, alto curso do rio Uruguai, sul do Brasil**. 2021. Relatório de Qualificação (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

CHEREM, LUÍS F. S.; FARIA, S. D.; ZANCOPE, M. H. C.; SORDI, M. V.; NUNES, E.; ROSA, L. E. Análise morfométrica de bacia hidrográficas. *In*: Antônio Pereira Magalhães Júnior; Luiz Fernando de-Paula Barros. (org.). **Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais**. 1ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020, v. 1, p. 175-215

COSTA, R. C. R. D.; BUSS, M. D.; ROSA, R. de O. Geomorfologia. In: SEPLAN/FIBGE (org.). **FOLHA SG. 22 Curitiba, parte da folha SG. 21 Asunción e folha SG. 23 Iguapé: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.** 2a ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. p. 351–442.

DIAS, Adalberto de A.; PARISI, Giovani N. **Programa Geologia do Brasil, Projeto Geologia para Apoio aos Arranjos Produtivos de Gemas do Rio Grande do Sul, RS; Frederico Westphalen, folha SG.22-Y-C-II.** 1. ed. Porto Alegre: CPRM-Geological Survey of Brazil, 2007.

HACK, John Tilton. **Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland.** US Government Printing Office, 1957

HORTON, Robert E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

JUSTUS, J. O.; MACHADO, M. L. A.; FRANCO, M. S. M. Geomorfologia. In: SEPLAN/FIBGE (org.). **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.** 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. p. 313–404.

LEOPOLD, Luna B. *et al.* **Fluvial processes in geomorphology.** Courier Dover Publications, 2020.

LIMA, A. G. **Controle geológico e hidráulico na morfologia do perfil longitudinal em rio sobre rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral no Estado do Paraná.** Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 220, 2009.

MELTON, Mark A. Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E4 phase space. **The journal of geology**, v. 66, n. 1, p. 35-54, 1958.

MORETTIN, Pedro Alberto; BUSSAB, Wilton Oliveira. **Estatística básica.** Saraiva Educação SA, 2017.

SANTOS, M. C. P. **Geoarqueologia da área da Volta Grande do Alto Rio Uruguai, Sul do Brasil: morfoestratigrafia, geocronologia e sequência arqueológica da Foz do rio Chapecó.** 2018. Tese (Doutorado em Quaternário e Pré-história), Università degli Studi di Ferrara UNIFE - Muséum national d'Histoire naturelle - MNHN, Ferrara, 2018.

STRAHLER, Arthur N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological society of America bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.