

Meio Ambiente, Paisagem e Qualidade ambiental

Distribuição espacial e propriedades morfológicas de depressões fechadas e cabeceiras de drenagem na Bacia Hidrográfica do Rio Guassupi, Rio Grande do Sul, Brasil

Spatial distribution and morphological properties of closed depressions and drainage headwaters in the Guassupi River Basin, Rio Grande do Sul, Brazil

Vinicius Duarte Guareschi^I , Andrea Valli Nummer^{II} , Anderson Augusto Volpato Scoti^{III} 

^I Colégio Militar de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

^{II} Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

^{III} Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

RESUMO

O Planalto das Araucárias no Rio Grande do Sul registra uma variedade de feições geomorfológicas que se apresentam na paisagem como concavidades fechadas e circulares, outras rasas, quase fechadas, com formato arredondado ou alongado, algumas mostrando ramificações, outras mais extensas e entalhadas com forma circular em anfiteatro. O objetivo do trabalho é identificar e mapear as depressões fechadas e as cabeceiras, bem como averiguar a sua relação com a declividade, hipsometria, litologia e lineamentos morfoestruturais. A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Guassupi, no Planalto das Araucárias no Rio Grande do Sul, em rochas vulcânicas básicas e ácidas da formação Serra Geral. O mapeamento das depressões fechadas e cabeceiras de drenagem e a extração dos lineamentos morfoestruturais foram realizados através do banco de imagens de satélite do *Basemap*. As feições foram classificadas em quatro categorias de acordo com a suas propriedades morfológicas: Depressões Fechadas, localizadas nas porções mais planas do terreno em altitudes superiores a 400 metros. As Cabeceiras em Divisor estão localizadas próximas dos divisores d'água em altitudes superiores a 490 m e declividades de suas vertentes acima de 5%, presentes no domínio das rochas ácidas. Já as Concavidades Rasas ocupam o domínio das rochas ácidas em cotas altimétricas superiores a 400 m nas porções planas do topo do Planalto. As Depressões em Fundo de Vale constituem-se em grandes áreas deprimidas com fundo plano situadas sobre as rochas ácidas. Constatou-se que as feições se desenvolvem principalmente nos cruzamentos entre os grupos de lineamentos de direção SE e NE e são mais presentes nas rochas ácidas da Fácies Caxias.

Palavras-chave: Cabeceiras de drenagem; controle estrutural; depressões fechadas; Planalto das Araucárias

ABSTRACT

The Planalto das Araucárias in Rio Grande do Sul, records a variety of geomorphological features that appear in the landscape as closed and circular concavities, others are shallow and almost closed with a rounded or elongated shape, some showing branches, others are more extensive and notched with a circular amphitheater-like shape. The aim of this paper is to identify and map closed depressions and headwaters, as well as to investigate their relationship with slope, hypsometry, lithology and morphostructural lineaments. The study area comprises the Guassupi river basin on the Southern Plateau of Rio Grande do Sul, in basic volcanic rocks belonging to the Fácies Gramado and the acidic Fácies Caxias of the Serra Geral formation. The mapping of closed depressions and drainage headwaters and extraction of morphostructural lineaments were performed using Basemap satellite imagery. The features were classified into four categories according to their morphological properties: Closed Depressions, located in the flatter portions of the terrain at altitudes greater than 400 meters. The Divider Headwaters Drainages are located near the water dividers at altitudes above 490 m and the inclination of their slopes is above 5%. They are present in the acidic rocks domain. The Shallow Hollows, on the other hand, occupy the acidic rocks domain at altitudes higher than 400 m in the flat portions of the top of the plateau. The Bottom Valley Depressions are large flat-bottom depressed areas on acidic rocks. It was found that these features develop mainly at the intersections between the lineament groups of SE and NE direction and are more present in the acidic rocks of Fácies Caxias.

Keywords: Drainage headwaters; structural control; closed depressions; Planalto das Araucárias

1 INTRODUÇÃO

O Planalto das Araucárias no Rio Grande do Sul registra uma série de processos geomorfológicos que resultam na formação de um número notável de feições circulares ou semicirculares formando uma área deprimida topograficamente que abriga um núcleo de umidade. Essas feições assumem uma variedade muito ampla de morfologias, apresentando-se no ambiente como concavidades fechadas e circulares, outras rasas quase fechadas, com formato arredondado ou alongado, algumas mostrando ramificações, outras mais extensas e entalhadas com forma circular em anfiteatro.

Essa assembleia de morfologias exibe-se como depressões circulares fechadas, localizadas nas porções mais planas do terreno, junto aos divisores, ou constitui-se nas cabeceiras de drenagem, formando as áreas de nascentes.

Depressões fechadas são proto-vaes que apresentam ausência de um canal de saída de fluxos d' água superficiais (XAVIER; COELHO NETTO, 2008). Segundo os autores, essas feições têm sido frequentemente descritas na literatura, porém ainda existem poucos estudos que explicam a sua origem. Tradicionalmente, são registradas depressões fechadas em relevos cársticos devido à dissolução da rocha calcária, gerando as feições conhecidas como dolinas, uvalas e poljés.

Atualmente, muitas pesquisas vêm reconhecendo que as depressões fechadas estão presentes em diversas litologias. Tal constatação deriva da demonstração de que rochas ricas em sílica também podem sofrer processos de dissolução e as formas resultantes assemelham-se muito a do carste tradicional (PILÓ 2000).

A circulação da água ao longo das zonas de fraqueza, como falhas e fraturas, promovem o alargamento dos condutos e a remoção interna de materiais, causando o colapso da superfície do terreno e originando essas feições.

Autores como Felizola; Boulet (1994), Castro; Coelho Netto (2002), Coelho Netto (2003) e Uagoda et al. (2009) relacionam a ocorrência de depressões fechadas com a abertura de vaes de cabeceira sob forte controle estrutural. Assim, as depressões fechadas tenderiam à coalescência e à formação de depressões compostas, que, dependendo das condições geológicas, geomorfológicas e climáticas, poderiam evoluir para originar as cabeceiras de drenagem. Os autores atribuem fundamental importância para os processos de denudação química na formação dessas feições, argumentando que somente processos de natureza física, como a remoção superficial de material, não poderiam originar tais formas.

No Planalto das Araucárias no Rio Grande do Sul, Maciel Filho, Cabral e Spinelli (1993), Gontan e Maciel Filho (1998), Gontan (2002) e Maciel Filho et al. (2013) atribuem a origem dessas depressões topográficas a fatores tectônicos, como falhas e fraturas, e ao intemperismo químico dos vitrófiros.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é espacializar a ocorrência das depressões fechadas e das cabeceiras de drenagem, apresentar as suas

A bacia hidrográfica do Rio Guassupi insere-se na Unidade Planalto dos Campos Gerais, na porção oeste dessa unidade, onde se concentram as menores cotas altimétricas, em torno de 500 metros (JUSTUS; MACHADO; FRANCO, 1986).

A Unidade Planalto dos Campos Gerais é recoberta por rochas ácidas e básicas da Formação Serra Geral. De acordo com CPRM (2008), a Formação foi dividida em Fácies de acordo com as suas características geoquímicas e afinidades de campo. Dessa forma, na bacia do Rio Guassupi, são registradas as Fácies Caxias e Gramado. A primeira é caracterizada por derrames de composição intermediária a ácida, composta por riolitos a riodacitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (tipo carijó), forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxos e autobrechas freqüentes, vesículas preenchidas predominantemente por calcedônias e ágata, fonte de mineralização da região.

A Fácies Gramado apresenta derrames básicos granulares finos a médio, melanocráticos cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita, estruturas de fluxo e *pahoehoe*, sendo comuns, intercalações com os arenitos Botucatu (CPRM 2008).

As rochas vulcânicas ácidas constituem a sequência mantenedora da topografia, resultando em uma morfologia fracamente ondulada, com coxilhas de formas tabulares, refletindo a disposição estrutural em camadas que mergulham suavemente para oeste (GONTAN e MACIEL FILHO, 1998).

De acordo com Rossato (2011), o clima da área de estudo é Subtropical Úmido, com variação longitudinal das temperaturas. Os sistemas polares exercem menor influência, destacando-se a maior influência dos sistemas conjugados com o efeito do relevo devido à escarpa e aos vales da borda do Planalto, com a continentalidade e a maritimidade. A temperatura média anual varia entre 17° C e 20° C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 11°C e 14°C e a média do mês mais quente, entre 23° e 26°C.

A precipitação concentra-se entre 1700-1800 mm ao ano, com total de 100-120 dias de chuvas por ano. A precipitação mensal é em torno de 135 -155 mm na maior parte dos meses do ano, mas, nos meses mais secos, pode cair para 75 -135 mm (meses de julho e agosto).

3 METODOLOGIA

O mapeamento das feições foi realizado com base no banco de imagens de satélite do *Basemap* do software *ArcGis 10*. A vetorização das feições foi feita diretamente sobre a imagem de satélite no monitor do computador e consistiu em delimitar as feições pelo traçado de seus perímetros. Posteriormente, o arquivo foi exportado para o *ArcGis 10*, módulo *ArcMap*, para a extração dos valores de área e índice de circularidade. Ao final da tarefa, chegou-se ao total de 3855 feições delimitadas na bacia do rio Guassupi.

Os atributos topográficos foram gerados a partir de imagem do radar orbital da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução de 30 metros. Para a execução do mapa hipsométrico, adotou-se um intervalo de classes (195-278 m, 278 – 362 m, 362 – 446 m, 446 – 529, >529 m) que refletiu bem o comportamento do relevo dada a amplitude da área, que é de 334 metros.

As classes de declividade foram estabelecidas a partir do conhecimento prévio da distribuição das feições na bacia hidrográfica e adaptando os parâmetros do IPT (1981). Os limites de declividade assumiram os seguintes valores: 0-5%; 5-12%; 12-30%; 30-45%; >45%. Essa classificação ofereceu um grau de detalhamento bastante satisfatório em vista dos objetivos propostos.

Pela análise visual das propriedades morfológicas, como distribuição na bacia hidrográfica, tamanho, entalhamento da concavidade, abertas ou fechadas, e circulares ou alongadas (PAISANI, PONTELLI E GEREMIA, 2006; MORAIS; SORIANO, 2017), as feições foram separadas em quatro conjuntos que melhor resumem as suas características fisionômicas e morfológicas recebendo uma denominação.

As feições que pertencem ao primeiro conjunto foram denominadas de Depressões Fechadas, devido à posição ocupada no terreno e à inexistência de um canal hidrográfico visível nas imagens de satélite que drenasse a água da depressão para a jusante. No segundo conjunto, estão inseridas as Cabeceiras em Divisor, dada a sua relação direta com o ponto de origem das drenagens. O terceiro conjunto foi denominado de Concavidades Rasas, em razão da aparência de um curso d'água bastante raso que essa feição apresenta na paisagem. O último conjunto compreende as áreas rebaixadas, que foram denominadas de Depressão em Fundo de Vale, pela grande amplitude das vertentes e pelo fundo chato apresentado pela feição.

Partindo do pressuposto de que as feições se desenvolvem associadas aos lineamentos morfoestruturais (falhas e fraturas), foi adotada uma rotina de trabalho voltada para a extração dos lineamentos estruturais do tipo 2 (STRIEDER; AMARO, 1997). Os lineamentos do tipo 2 são estruturas retilíneas ou levemente curvilíneas com localização espacial bem definida, apresentando orientação azimutal e comprimento. A extração dos lineamentos seguiu a metodologia proposta por (STRIEDER; AMARO, 1997), realizada a partir do banco de imagens de satélite do *Basemap*.

Ao final do processo de extração, obteve-se um total de 3851 lineamentos estruturais para a bacia do rio Guassupi. Determinou-se que os lineamentos seriam classificados em 11 grupos, que são: N-S; NNE; NE1; NE2; NE3; NE4; NE5; E-W; ESE; SE; SSE.

Com as informações referentes aos azimutes de cada lineamento, foi gerado o diagrama de rosetas no *software Stereonet 8*, que permite verificar as orientações predominantes dos lineamentos na bacia hidrográfica.

Para determinar quais grupos de lineamentos exercem maior influência no estabelecimento das feições, foi executada uma tarefa posterior, que consistiu na extração da direção dos eixos principais de cada feição, traçado diretamente sobre o perímetro das formas geomorfológicas. Destaca-se que a direção do eixo

principal é representada pelo sentido de maior alongamento da feição. Posteriormente à extração, os eixos foram enquadrados nos grupos de lineamentos já pré-estabelecidos, conforme citado anteriormente.

Dessa forma, foi possível comparar as direções dos lineamentos com as orientações dos eixos principais das feições, procurando estabelecer uma relação entre ambos.

Para verificar a distribuição das feições nos diferentes compartimentos litológicos da bacia hidrográfica, adotou-se, como base, o mapeamento geológico realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), em escala 1:750.000 para o estado do Rio Grande do Sul. De acordo com esse mapeamento, na bacia do Rio Guassupi, são encontrados a Fácies Caxias, com características ácidas, e a Fácies Gramado, com características básicas, pertencentes à formação Serra Geral.

A definição do *Pitting Index* foi utilizada com a finalidade de estimar em qual litologia, se nas rochas ácidas ou básicas, as feições são mais presentes. O cálculo para esse índice consiste na relação entre a área total estudada e a soma das áreas individuais das feições (MORAIS; SORIANO, 2017), o qual foi obtido pela seguinte fórmula: $P_{index} = A/a$.

Onde:

A= Área total da bacia hidrográfica e;

a = soma das áreas de cada uma das feições.

Juntamente com o *Pitting Index*, foram determinadas as áreas das feições para verificar em qual litologia as formas apresentam maior desenvolvimento.

Outro índice aplicado que permite verificar o desenvolvimento e a evolução das feições é o Índice de Circularidade. A metodologia utilizada para determinar esse índice estabelece que quanto mais próximo de 1,0 for o índice de circularidade, mais próxima de um círculo perfeito será a feição. Esse índice expressa o controle

das estruturas geológicas (lineamentos) sobre a forma das feições (PAISANI, PONTELLI E GEREMIA, 2006; MORAIS; SORIANO, 2017).

A equação para determinar o índice é: $IC = A \setminus A_c$.

Onde IC = índice de circularidade;

A = área da cabeceira de drenagem e;

A_c = área de um círculo com mesmo perímetro da cabeceira de drenagem.

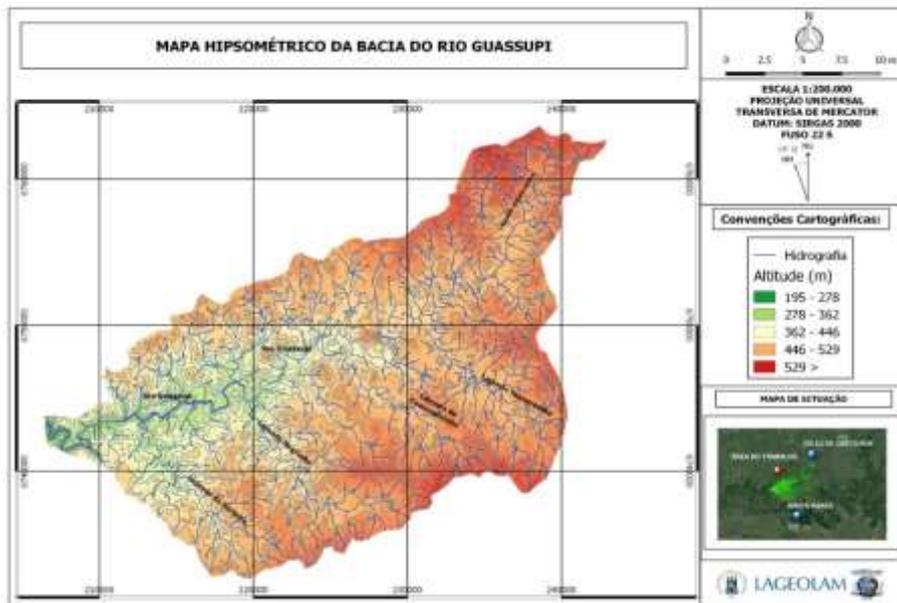
O índice de circularidade das feições foi calculado diretamente no Software *ArcGis 10*.

4 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DAS FEIÇÕES

O relevo desempenha um papel de extrema importância na distribuição espacial e nas propriedades morfológicas das depressões fechadas e cabeceiras de drenagem. As maiores altitudes estão concentradas nas bordas sul, norte, leste e nordeste da bacia, estendendo-se até o centro, acompanhando os divisores das sub-bacias dos rios Lajeado Amancupara, Taquarembó, Guassupizinho e Lajeado Negrinho. Essas elevações mais acentuadas estão relacionadas à distribuição das rochas ácidas na bacia hidrográfica com cotas acima de 400 metros.

No médio curso do rio Guassupi, as altitudes estão abaixo de 400 metros (figura 02), justamente onde tem início a sequência de derrames básicos. Nessa porção da bacia, os vales são largos e muito entalhados, com a presença de relevos residuais atestando a intensidade dos processos denudacionais.

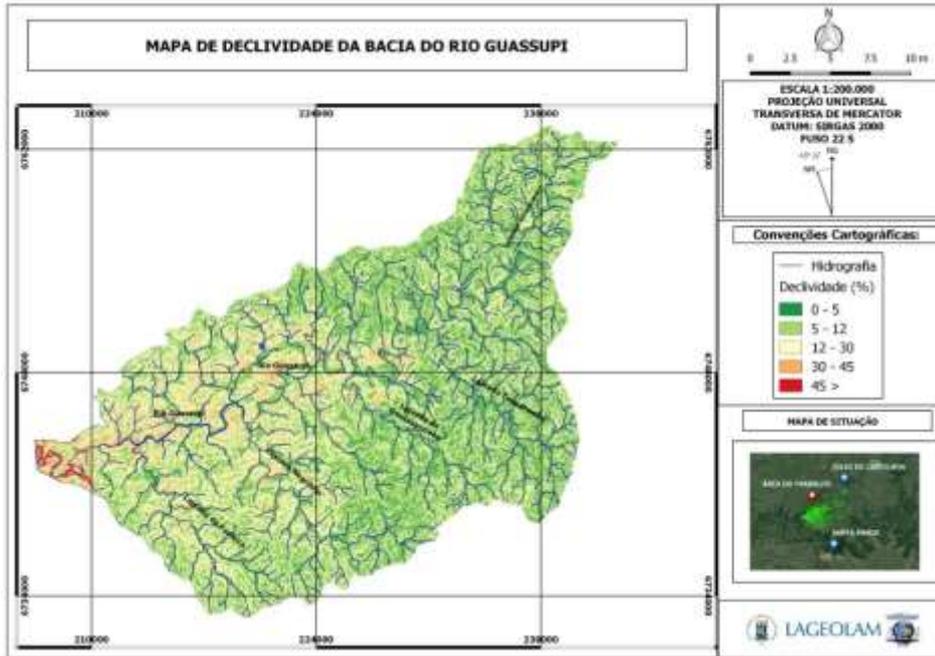
Figura 02 – Mapa Hipsométrico do Rio Guassupi.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As declividades (figura 03) distribuem-se de maneira semelhante à hipsometria, ou seja, no domínio das rochas ácidas, o terreno mostra menores inclinações. Nas bordas sul, leste e nordeste da bacia, as declividades são pouco significativas, caracterizando um relevo suavemente ondulado. A situação inverte com relação ao domínio das rochas básicas, em que as declividades são bastante acentuadas, principalmente na transição entre as litologias, próximo do vale do rio Guassupi.

Figura 03 – Mapa de declividade do Rio Guassupi.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As declividades juntamente com a altimetria determinam as porções do terreno onde as feições estão presentes, bem como as suas propriedades morfológicas, sendo fundamentais para a classificação das feições como será apresentado a seguir. Embora as feições apresentem um grau de heterogeneidade elevado com relação às propriedades morfológicas, é possível classificá-las em diferentes grupos, conforme as características observadas em campo e em imagens de satélite (figura 04).

Figura 04- Visualização das Depressões Fechadas, Cabeceiras em Divisor, Concavidades Raras e Depressões em Fundo de Vale.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O primeiro conjunto de feições identificadas na bacia refere-se às áreas que apresentam topografia rebaixada em relação ao entorno. Foram denominadas de Depressões Fechadas, exibem formato circular ou elíptico e são desconectadas da rede de drenagem, estando situadas em divisores que apresentam topos planos. A maioria dessas feições apresenta um pequeno espelho d'água no interior, sendo raros os casos que armazenam grandes volumes de água.

As depressões fechadas (figura 05) estão distribuídas em toda a bacia hidrográfica, porém apresentam maiores concentrações na faixa de altitude superior a 400 metros. Localizam-se em divisores planos com declividades inferiores a 5%. Essas depressões apresentam bordas suaves, geralmente são circulares a alongadas, normalmente apresentam uma vegetação rasteira com bromélias do tipo caraguatás que ocupam a borda da feição.

Figura 05 - Depressão Fechada localizada próxima ao divisor de água.



Fonte: Acervo particular dos autores (Janeiro de 2017).

O segundo conjunto foi denominado de Cabeceiras em Divisor (figura 06), compreende as feições que estão localizadas próximas aos divisores, com altitudes superiores a 490 metros, apresentando formas mais ou menos circulares, algumas rasas, outras profundas, com a grande maioria mostrando declividade elevada, acima de 5%. Essas feições estão diretamente conectadas aos cursos d'água, constituindo-se em cabeceiras de drenagem, que, devido às altitudes onde estão estabelecidas, originam as nascentes dos principais tributários do rio Guassupi.

Figura 06 - Cabeceira de drenagem próxima ao divisor e conectada a rede de drenagem.



Fonte: Acervo particular dos autores (Janeiro de 2014).

Outro conjunto de feições identificadas na bacia é as Concavidades Rasas, que têm aparência de diversos semicírculos encadeados, apresentando, na maioria dos casos, pequena declividade em suas vertentes, estendendo-se na paisagem por dezenas a centenas de metros de extensão até desembocar em um curso d'água com maior envergadura. Apresentam grande extensão longitudinal encaixada em um pequeno canal hidrográfico levemente rebaixado em relação a seus divisores.

Estão situadas em cotas altimétricas superiores a 400 metros com declividade das vertentes inferior a 5% (figura 07). Essas concavidades apresentam formato arredondado, ou alongado, com ramificações que se prolongam em direção aos divisores, formando micro canais de drenagem.

Figura 07 - Concavidade Rasa na porção do topo do Planalto.



Fonte: Acervo particular dos autores (Janeiro de 2014).

Por último, são registradas as Depressões em Fundo de Vale, grandes áreas rebaixadas, com vales largos, apresentando vertentes que circundam a feição, conferindo forma de anfiteatro. Geralmente apresentam comprimento com centenas de metros de extensão e largura média em torno de 100 metros. Caracterizam-se por distribuírem-se em duas faixas distintas de altitude. A primeira situada em cotas entre 420 - 440 metros e a segunda, no intervalo entre 390-400 metros. Em ambas as faixas de altitude, a declividade das vertentes é superior a 5% (figura 08).

Figura 08 - Depressão em Fundo de Vale formando uma grande área rebaixada.



Fonte: Acervo particular dos autores (Janeiro de 2014).

É comum a ocorrência de micro depressões no interior da feição maior, que funcionam como pontos de infiltração vertical de água, conferindo solos hidromórficos e proporcionando característica de banhado a essas áreas.

5 O CONTROLE ESTRUTURAL E A LITOLOGIA

Para verificar a associação das feições com o controle estrutural, foi realizada a extração dos lineamentos morfoestruturais da bacia do Rio Guassupi, a partir do banco de imagens de satélite do *Basemap*.

O grupo NE (27,5 – 77,5°) foi dividido em cinco subgrupos devido à grande dispersão de dados das estruturas nesse quadrante. Quando se analisou o total de lineamentos da área de estudo, constatou-se que 32,7% dos lineamentos pertencem ao grupo NE. Entre os subgrupos NE, destaca-se o NE2 com direção de 35°-52,5° que concentra 42,3% dos lineamentos do grupo. Já o grupo SE, com azimute de 117,5°-152,5°, apresenta o maior número de lineamentos, 23,2% do total da bacia (tabela 01).

Tabela 01 - Orientação e percentual de cada grupo de lineamentos na bacia hidrográfica do Rio Guassupi.

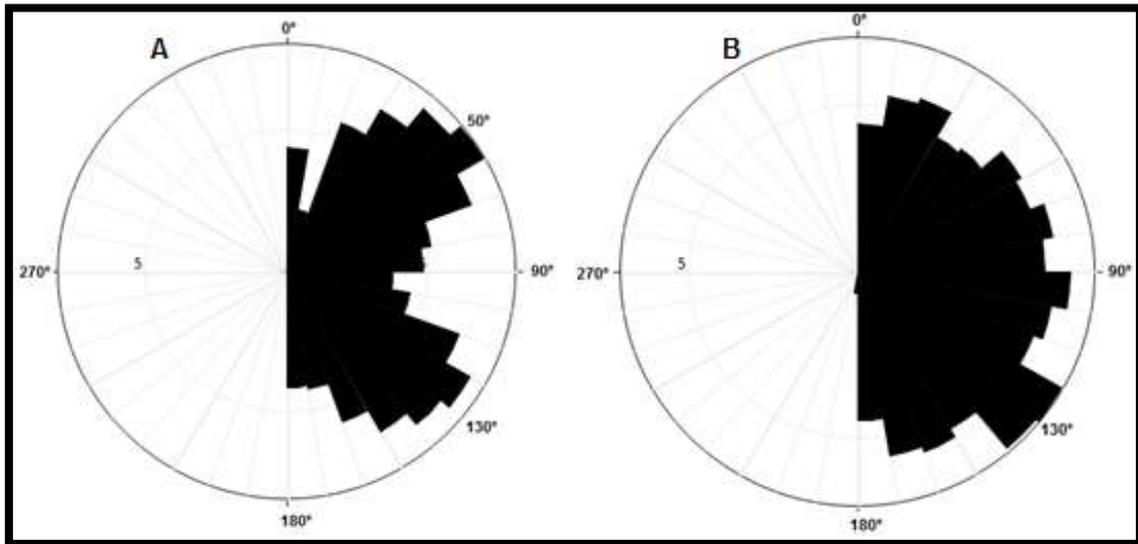
Grupos	Direção	% do total
N-S	350° - 10° 170° - 190°	9,6
NNE	10° - 27,5°	9,8
NE1	27,5° - 35°	4,3
NE2	35° - 52,5°	13,6
NE3	52,5° - 63,7°	7,8
NE4	63,7° - 71,2°	4,1
NE5	71,2° - 77,5°	2,3
E-W	77,5° - 105°	9,7
ESE	105° - 117,5°	5,9
SE	117,5° - 52,5°	23,2
SSE	152,5° - 170°	9,3

Fonte: Organização dos autores.

As estruturas com orientações NE-SO e NW-SE originam os vales mais largos e profundos na bacia hidrográfica, principalmente em cotas altimétricas inferiores a 400 metros, o que coincide com o médio curso do rio Guassupi e seus principais tributários. Conforme (ZALÁN et al. 1990), estas estruturas são as mais antigas da Bacia Sedimentar do Paraná, sendo originadas a partir da reativação de zonas de fraqueza ativas durante o Fanerózoico. Por serem estruturas muito antigas, esses lineamentos vêm submetendo o relevo a um período mais longo de dissecação, fato que se reflete na morfometria dos vales. Essas constatações são observadas em campo e através da análise dos dados quantitativos, principalmente, ligados a rede hidrográfica.

Para verificar a relação entre as cabeceiras de drenagem e os lineamentos foram extraídas as direções dos eixos principais das feições (figura 09). Após a extração, os eixos foram enquadrados nos grupos de lineamentos previamente definidos, como mostra a Tabela 01. A Figura 09 apresenta os diagramas de rosetas dos lineamentos e dos eixos principais das cabeceiras de drenagem.

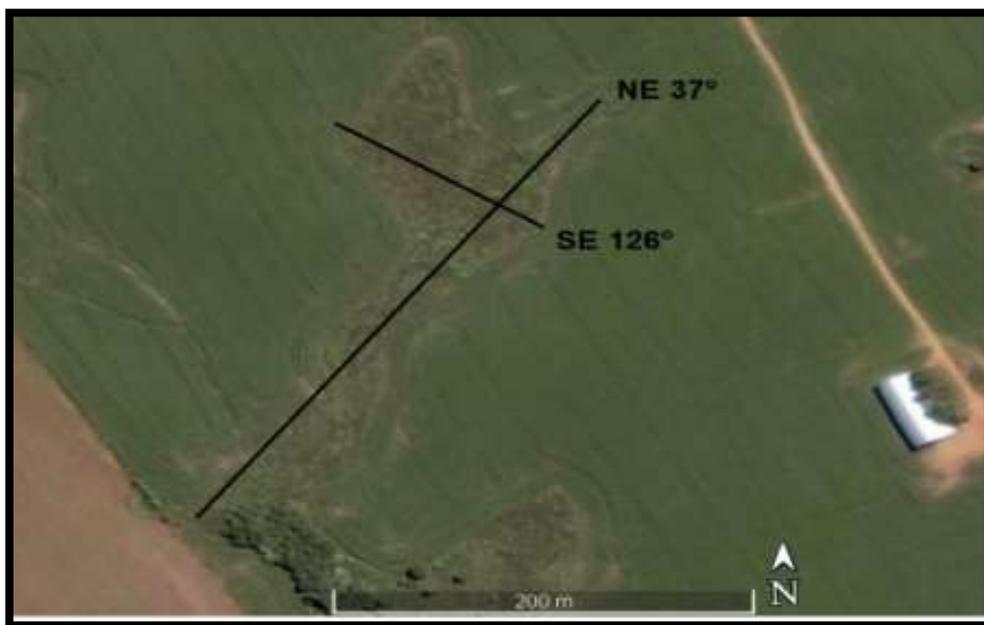
Figura 09 - Orientação dos lineamentos (A) e direção dos eixos principais das cabeceiras de drenagem (B).



Fonte: Elaborado pelos autores.

As estruturas de direção NE (27,5-77,5°) (figura 10), quando analisadas no conjunto, representam o grupo de maior correlação com as feições, condicionando a orientação de 25,7% do total das cabeceiras e depressões fechadas na bacia. Posteriormente, destacam-se os lineamentos de direção SE (117,5-152,5°), responsáveis pela orientação de 22,7% do total das cabeceiras.

Figura 10 - Imagem de satélite mostrando o par de fraturas pertencentes aos grupos NE2 e SE.



Fonte: Google Earth Pro. Organização dos autores.

Para verificar a influência da litologia na distribuição das feições, foi realizada a plotagem destas sobre o mapa litológico da bacia. Os derrames básicos ocupam a porção centro-oeste da bacia, onde se insere o vale do rio Guassupi, com o predomínio de vales largos e entalhados. Já os derrames ácidos estendem-se em cotas altimétricas acima de 400 metros ocupando a maior parte da bacia.

Foi contabilizado um total de 2702 cabeceiras (Cabeceiras em Divisor, Concavidades Rasas e Depressões em Fundo de Vale) na Fácies Caxias em uma área de 397 km², o que resulta em uma densidade de 6,80 cabeceiras/km². Na Fácies Gramado, foi registrada a ocorrência de 919 cabeceiras distribuídas em uma superfície de 192 km², resultando em uma densidade de 4,78 cabeceiras por Km².

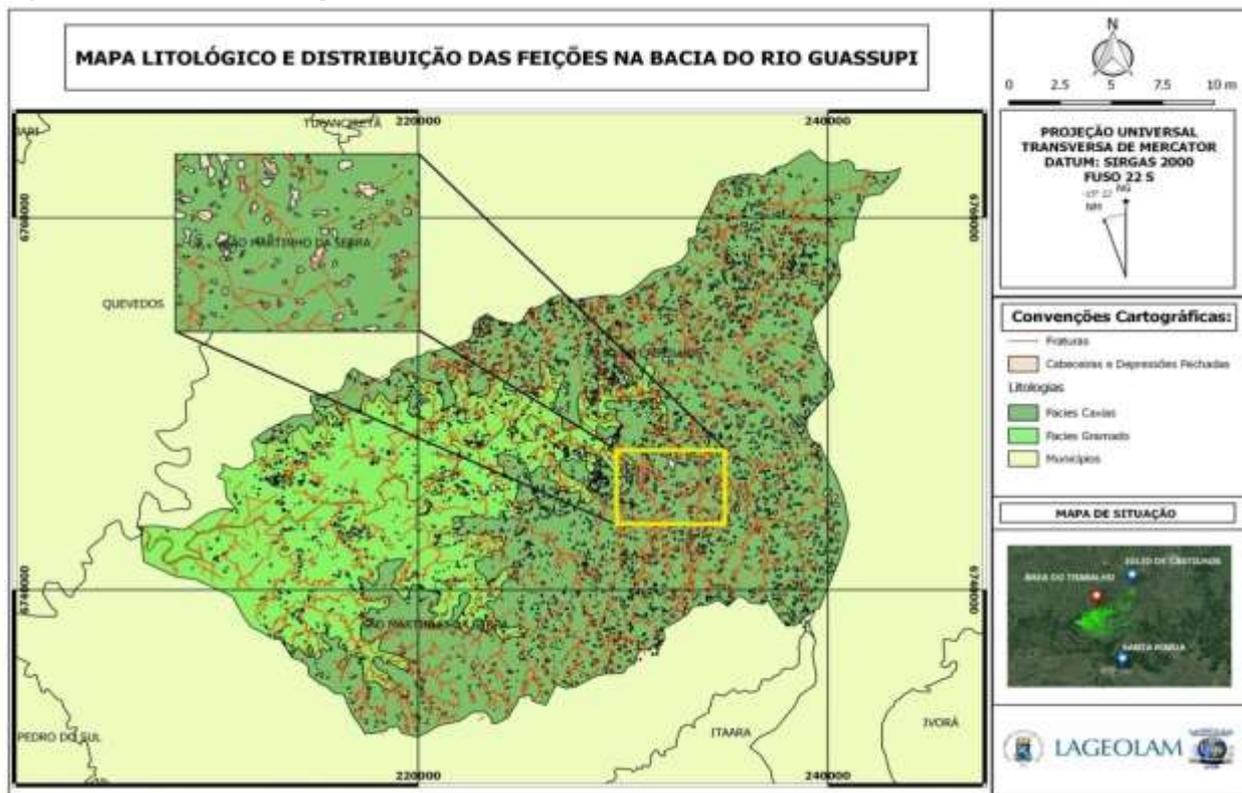
Foram diagnosticadas 169 Depressões Fechadas na Fácies Caxias, resultando em uma densidade de 0,42 depressões por km², enquanto que, na Fácies Gramado, registrou-se 65 depressões fechadas, o que resulta em uma densidade de 0,33 depressões por km².

O cálculo da relação entre a superfície total estudada e a soma das áreas individuais das cabeceiras e depressões permite a obtenção do *Pitting index*. Esse índice é comumente utilizado para estimar o grau de desenvolvimento do carste ou a intensidade dos processos de carstificação (MORAIS; SORIANO, 2017), sendo aplicado na área de estudo como parâmetro para avaliar a intensidade dos processos responsáveis pela gênese das feições nas diferentes litologias da bacia hidrográfica. Para as cabeceiras (Cabeceiras de Divisor, Concavidades Rasas e Depressões em Fundo de Vale), a Fácies Caxia, apresenta *Pitting index* de 15,20 e a Fácies Gramado, 26,23. Para as Depressões Fechadas, a Fácies Caxias tem índice de 694,17 e a Fácies Gramado apresenta índice de 1.150,59.

Esse índice é melhor compreendido quando analisado juntamente com os valores percentuais ocupados pelas feições em cada litologia. Na Fácies Caxias, as cabeceiras ocupam 6,57% da área total dessa litologia, enquanto que, no Gramado, o percentual é de 3,81%. Já para as Depressões Fechadas, essas feições ocupam,

na Fácies Caxias, 0,14% da área, enquanto que, na Fácies Gramado, o valor é de 0,086% da área total dessa litologia. Esses valores são coerentes e confirmam que a ampla maioria das cabeceiras e das Depressões Fechadas são de dimensões areais pequenas e que ambos os conjuntos de feições estão mais presentes na Fácies Caxias (figura 11).

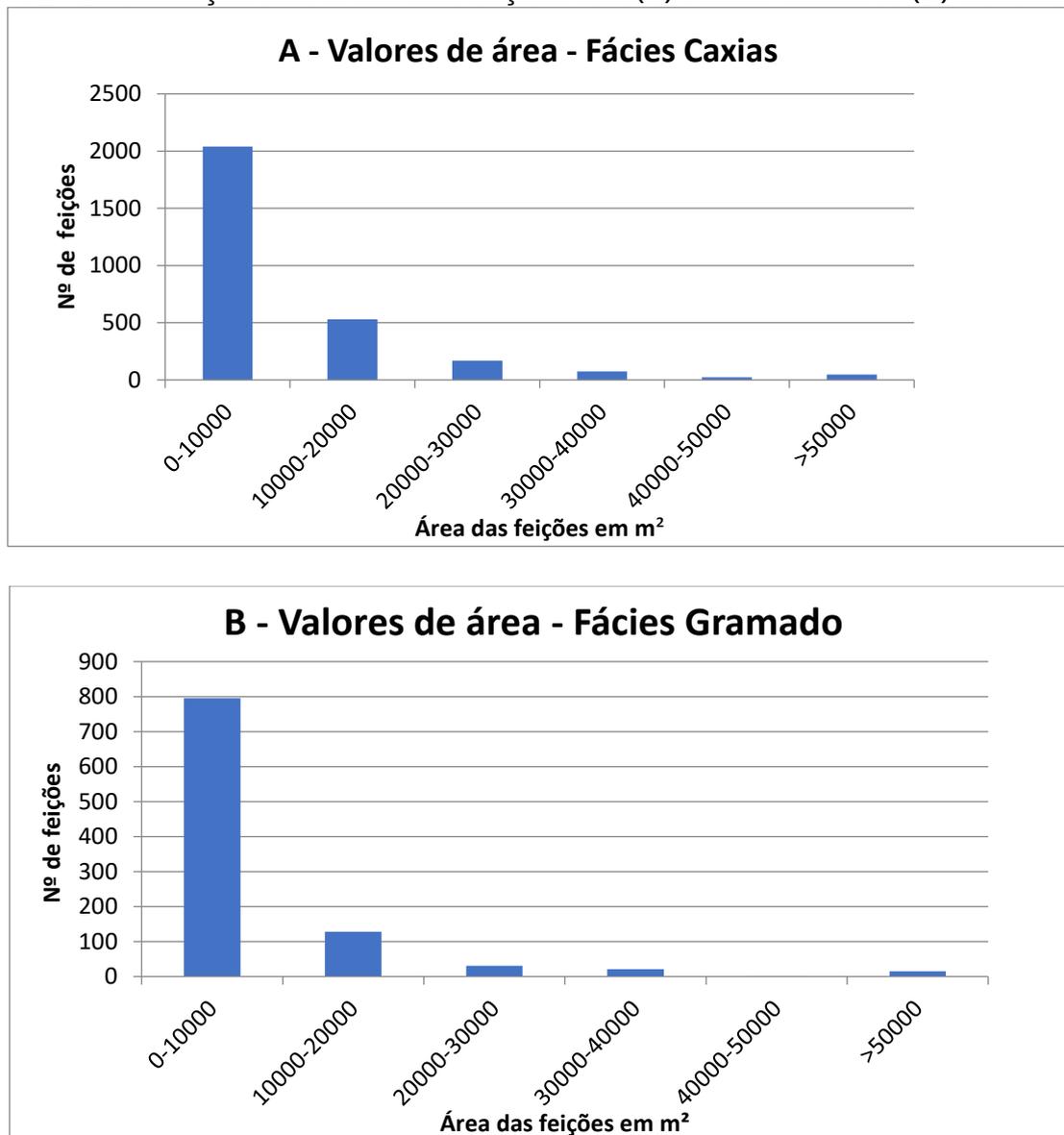
Figura 11 - Mapa Litológico com os lineamentos morfoestruturais e distribuição das feições na bacia hidrográfica.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Analisando as áreas das feições em cada litologia, verificou-se que, na Fácies Caxias, os valores oscilaram entre 39,7 e 159.794,73 m² com média de 9.075,42 m² e desvio padrão de 12.019,4 m². Na Fácies Gramado, os valores de área variaram entre 84,3 e 159.717,98 m² com média de 7.376,20 m² e desvio padrão de 12.581,70. Os gráficos A e B da figura 12, mostram a distribuição das áreas das feições nas Fácies Caxias e Gramado, respectivamente.

Figura 12 - Distribuição das áreas das feições nas (A) Fácies Caxias e (B) Gramado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores observados indicam o predomínio de cabeceiras com tamanhos pequenos em ambas as litologias, com poucas feições, apresentando grandes formas individuais. A maioria das feições tem dimensões areais inferior a 10.000 m².

Foi verificada a distribuição dos eixos principais das feições em cada litologia, conforme mostra a tabela 02.

Tabela 02 - Total de eixos principais e percentual de cabeceiras nas Fácies Caxias e Gramado.

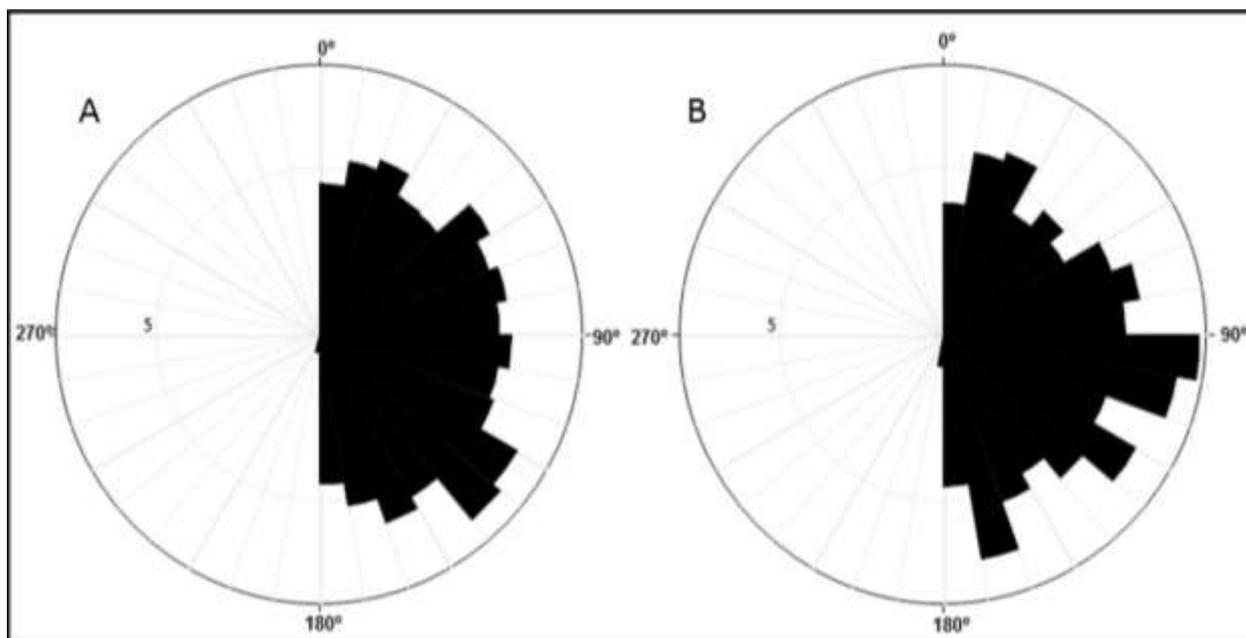
Grupos	Fácies Caxias		Fácies Gramado	
	Nº de eixos principais das cabeceiras	%	Nº de eixos principais das cabeceiras	%
N-S	254	9,4	83	9,3
NNE	249	9,2	90	10,1
NE1	97	3,6	22	2,8
NE2	232	8,6	61	7,6
NE3	178	6,6	54	6,2
NE4	116	4,3	35	4,0
NE5	105	3,9	31	3,5
E-W	411	15,2	170	18,9
ESE	195	7,2	60	6,9
SE	606	22,4	217	24
SSE	258	9,5	96	10,9

Fonte: Organização dos autores.

Dos 2.702 eixos principais das cabeceiras na Fácies Caxias, a direção SE (117,5 - 152,5°) registra 606 eixos, equivalendo a 22,4% do total dos eixos nessa litologia. No conjunto, os eixos de direção NE (27,5 - 77,5°) representam 27% do total identificado nas rochas ácidas. A Figura 13 mostra a distribuição da direção dos eixos das cabeceiras de drenagem na Fácies Caxias e Gramado.

Na Fácies Gramado, foram mapeados 919 eixos, prevalecendo em termos totais também a direção SE, com 217 eixos, o que equivale a 24%. No conjunto, a direção NE destaca-se com 24,1% do total dos eixos. Ocorre uma grande concentração de eixos maiores com direção entre 90 - 110° coincidindo com o grupo de lineamentos E-W, como é possível observar no diagrama de rosetas representado na figura 13.

Figura 13 - Diagramas de rosetas correspondentes aos eixos maiores das cabeceiras de drenagem na Fácies Caxias (A) e Fácies Gramado (B).



Fonte: Elaborado pelos autores.

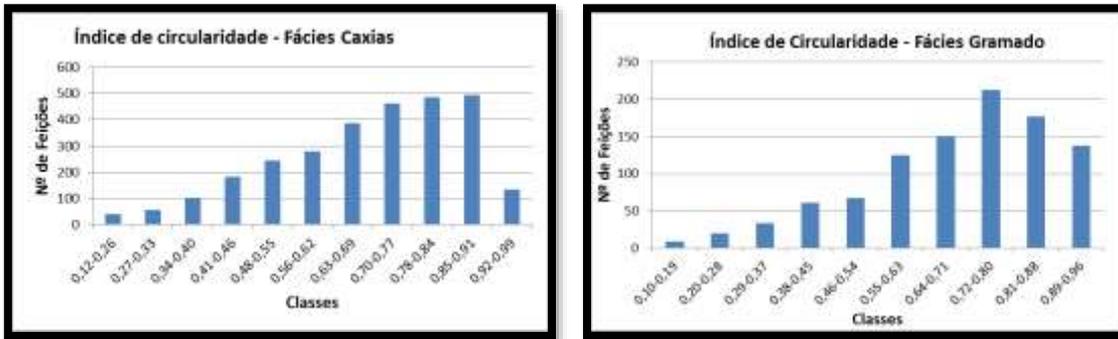
Os fatores tectônicos como falhas, fraturas e descontinuidades constituem-se em zonas que oferecem maior facilidade para alteração do material rochoso, provavelmente pelo contato por tempo prolongado da água com a rocha. Como destaca Queiroz Neto (2010), nessas zonas, pontual ou linearmente, ocorrem as maiores perdas de matéria, que acabam provocando deformações na superfície sob as quais vão se acumular as águas das chuvas. O interior das fraturas armazena e transmite maior quantidade de água, fato que favorece a alteração geoquímica e o transporte mecânico dos materiais (WRAY, 1997; FORD; WILLIAMS, 2007).

O processo descrito anteriormente representa o primeiro passo para a formação das depressões fechadas. A feição que, no princípio, está individualizada no terreno, tende à coalescência com as depressões vizinhas que têm sua gênese pelo mesmo processo, passando então à formação de depressões compostas que evoluem para cabeceiras de drenagem.

Dessa forma, os lineamentos morfoestruturais condicionam o sentido de alongamento das feições, determinando o índice de circularidade das cabeceiras e

depressões fechadas. Na Fácies Caxias, a maioria das feições enquadram-se na classe de índice de circularidade entre 0,85 – 0,91, enquanto que, na Fácies Gramado, as feições predominam na classe de 0,72 – 0,80 (figura 14).

Figura 14 – Índice de circularidade das feições na Fácies Caxias e Gramado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No domínio das rochas ácidas da Fácies Caxias, que sustenta o topo do Planalto das Araucárias, o índice de circularidade das feições é ligeiramente superior. Tal fato pode ser explicado por fatores como a baixa declividade dessa superfície e pela maior resistência da rocha frente aos processos de alteração geoquímica. Já na Fácies Gramado, as feições apresentam maiores irregularidades, com morfologias bem distintas que refletem as condições de relevo mais inclinado e menor resistência da rocha.

O índice de circularidade indica o grau de evolução, expressando o controle das estruturas geológicas sobre as feições. Com base nos resultados, é possível concluir que, na Fácies Caxias, as depressões apresentam menor grau de evolução em relação a Fácies Gramado. O topo do planalto, com menor declividade, altitudes elevadas e litologia mais resistente, oferece condições para que a evolução das depressões fechadas para cabeceiras de drenagem tenha sido relativamente lenta no tempo geológico.

Na Fácies Gramado, as condições litológicas aliadas ao relevo inclinado favoreceram a alteração geoquímica e mecânica das depressões fechadas no tempo geológico, promovendo a coalescência destas e a evolução para cabeceiras

de drenagem e, posteriormente, para os vales, fato que explica o menor número tanto de depressões fechadas como de cabeceiras no domínio dessa litologia.

6 CONCLUSÃO

As feições foram classificadas em quatro conjuntos que melhor resumem as suas características fisionômicas e morfológicas. As Depressões Fechadas estão concentradas principalmente nas porções mais planas do terreno em cotas altimétricas superiores a 400 metros. As Cabeceiras em Divisor ocupam a maior faixa de altitude da bacia, estando localizadas próximas dos divisores d'água em altitudes superiores a 490 m e declividades de suas vertentes acima de 5%, coincidindo com o domínio das rochas ácidas.

Já as Concavidades Rasas apresentam formato arredondado ou alongado, com ramificações que se prolongam em direção aos divisores. Ocupam o domínio das rochas ácidas em cotas altimétricas superiores a 400 m nas porções planas do topo do Planalto. O último conjunto de feições identificadas na bacia hidrográfica são as Depressões em Fundo de Vale que se constituem em grandes áreas deprimidas, situadas em duas faixas distintas de altitudes, a primeira entre 420 - 440 metros sobre as rochas ácidas, o que permite conjecturar sobre a existência de uma camada menos resistente na Fácies Caxias que detonou a gênese e evolução das Depressões em Fundo de Vale nessa faixa de altitude. O segundo no intervalo situa-se entre 390-400 metros, no contato entre as Fácies Caxias e Gramado.

As feições estão associadas principalmente aos lineamentos morfoestruturais de direção NE e SE. Não foram registradas diferenças significativas com relação à orientação das cabeceiras e depressões em função da litologia. No entanto, com relação à distribuição das feições de acordo com a litologia, foram registradas diferenças significativas que mostram uma concentração maior das feições na Fácies Caxias.

A restrição de depressões fechadas e cabeceiras na porção da bacia ocupada pelas rochas básicas aliada às ocorrências significativas de vales largos e entalhados no domínio das rochas básicas com direções preferencias NE e SE seria um indício de estágio avançado de evolução das feições, evidenciado pela ocorrência de rebaixamento de divisores e coalescência de vales em cabeceiras de drenagem.

REFERÊNCIAS

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 2, v.22, p.222-227, 1992.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 69-100, 2003.

COMPANHIA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul** CPRM. Escala de 1:750.000. 2008.

FELIZOLA, H. F.; BOULET, B. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil), and analogy to the slope evolution. **Geomorphology**, v.16 p.77-86, 1994.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Chichester: J. Wiley & Sons, 2007, 576 p.

GONTAN, J. E. N. **Mapeamento e caracterização de feições pseudo-cársticas em duas áreas do Rio Grande do Sul, através de técnicas e sensoriamento remoto e SIG**. 2002. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GONTAN, J. E. N.; MACIEL FILHO, C. L. Levantamento das feições cársticas no planalto vulcânico do Rio Grande do Sul – Área de São Martinho da Serra. In: CONGRESO URUGUAYO DE GEOLOGIA

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000. São Paulo: IPT, 1981.

MACIEL FILHO, C. L.; CABRAL, I. L. L.; SPINELLI, J. Feições Semelhantes à Morfologia Cárstica no Planalto Vulcânico do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5., 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993, p. 147-150.

MACIEL FILHO, C. L. et al. Feições de carste sobre a formação Serra Geral na região de Vacaria, RS, e Lages, SC. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 14, n. 48, p.197-208, 2013.

MORAIS, F.; SORIANO, M. A. Análisis morfométrico de dolinas y parámetros geofísicos aplicados al estudio de los flujos de agua subterránea en la cuenca del Ebro, Zaragoza, España morphometric. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 221-232, 2017.

PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E.; GEREMIA, F. Cabeceiras de drenagem da Bacia do Rio Quatorze – Formação Serra Geral (SW do Paraná): Distribuição espacial, propriedades morfológicas e controle estrutural. **RA'eGA**, Curitiba, n. 12, p. 211-219, 2006.

PILO, L. B. Geomorfologia Cárstica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S.l.]: v. 1, n. 1, p. 88-102, 2000.

QUEIROZ NETO, J. P. O Papel da Pedogênese no Modelado do Relevo: Busca de Novos Paradigmas. In: VI SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FISICA, 2010. Coimbra. **Anais...** Coimbra, p. 1-19, 2010.

ROSSATO. M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 253p. 2011.

STRIEDER, A. J.; AMARO, V. E. Structural patterns removed from remotely sensed lineaments. **Revista da Escola de Engenharia**, Porto Alegre, v. 25, n. 4, p.109-117, 1997.

UAGODA, R.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Contribuição a Geomorfologia Cárstica em Rochas Quartzíticas: Médio Vale do Rio Preto, RJ/MG. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA E REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORFOLOGY, 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2006.

XAVIER, R. A., COELHO NETTO, A. L. Ocorrência de Depressões Fechadas em Divisores de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Geografias**, n. 4, 61-68, 2008.

WRAY, R. A. L. Quartzite dissolution: karst or pseudokarst? **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, n. 1, p. 9, 2003.

ZALAN, P. V. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. (Coord.). **Origem e Evolução das Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1990. p. 135-168.

1 – Vinicius Duarte Guareschi

Professor do Colégio Militar de Santa Maria-RS.

<https://orcid.org/0000-0002-4856-9496> e vdguareschi@yahoo.com.br

Contribuição: Escrita – Primeira Redação

2 – Andrea Valli Nummer

Professor Titular da Universidade Federal de Santa Maria. Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0001-9271-442X> e a.nummer@gmail.com

Contribuição: Escrita - Primeira Redação

3 – Anderson Augusto Volpato Scoti

Professor Adjunto A do departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Maria

<https://orcid.org/0000-0001-8667-0432> e ascoti2@gmail.com

Contribuição: Escrita – Primeira Redação

Como citar este artigo

GUARESCHI, D., Vinícius, NUMMER, V. Andrea, SCOTI, V., A., Anderson. Distribuição espacial e propriedades morfológicas de depressões fechadas e cabeceiras de drenagem na Bacia Hidrográfica do Rio Guassupi, Rio Grande do Sul, Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 25, e08, p. 01-27, 2021. DOI 10.5902/2236499441814. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236499441814>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.