


## Levantamento de Fraturas em Leito Fluvial por meio de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado): calibração da altura de voo


*Surveying Fractures in Riverbeds using UAVs (Unmanned Aerial Vehicles):  
calibration of flight height*

*Levantamiento de Fracturas en Lecho Fluvial utilizando VANT (Vehículos Aéreos  
No Tripulados): calibración de la altura de vuelo*

Diego Moraes Flores<sup>1</sup>

 <https://orcid.org/0000-0001-9485-0409>

Adalto Gonçalves Lima<sup>2</sup>

 <https://orcid.org/0000-0002-6054-702X>

---

**RESUMO:** Utilizar VANTs para produção de mosaicos de imagem de alta resolução tornou-se uma prática em diversas aplicações. Este trabalho selecionou dois trechos de leitos fluviais rochosos, um em basalto e outro em riodacito, para calibrar parâmetros de alturas de voo que otimizem a observação das fraturas na rocha. Utilizou-se de estatística básica para validar as diferenças entre cada altura selecionada para avaliação da densidade e da intensidade do fraturamento. Observou-se que a altura de 20 metros permite ótima visualização e um número maior de fraturas observáveis. Condições de voo, como horários de levantamento, podem realçar ou minimizar essas diferenças, como constatado no leito em riodacito. No entanto, alturas de 50 e 100 metros (leito em basalto), embora permitam a observação de menos fraturas, mostram diferenças médias pequenas (mas estatisticamente significativas;  $\alpha = 0,05$ ) quando comparadas entre si.

**PALAVRAS-CHAVES:** altura de voo; juntas; basalto; riodacito.

**ABSTRACT:** *The use of UAVs for producing high-resolution image mosaics has become common practice in various applications. This study focused on calibrating flight height parameters to optimize the observation of fractures in rocky riverbeds. Two sections of riverbeds, one in basalt and the other in rhyodacite, were selected for analysis. Basic statistics were employed to validate differences between selected flight heights, aiming to assess fracture density and intensity. Results indicated that a flight height of 20 meters provides optimal visualization and a greater number of observable fractures. However, flight conditions, such as survey times, can influence these differences, as evidenced in the rhyodacite riverbed. In contrast, flight heights of 50 and 100 meters (basalt riverbed) result in the*

---

<sup>1</sup> Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo – USP. Professor/Pesquisador efetivo da UNILA - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. E-mail: diego.flores@unila.edu.br.

<sup>2</sup> Doutor em Geografia pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor/pesquisador efetivo da Universidade Estadual do Centro-Oeste – Guarapuava (PR). E-mail: adalto@unicentro.br.

---

*observation of fewer fractures but exhibit small yet statistically significant mean differences ( $\alpha = 0.05$ ) when compared to each other.*

**KEYWORDS:** *flight height; joints; basalt; rhyodacites.*

**RESUMEN:** *El uso de VANT para la producción de mosaicos de imágenes de alta resolución se ha convertido en una práctica común en diversas aplicaciones. Este estudio se centró en calibrar los parámetros de altura de vuelo para optimizar la observación de fracturas en lechos rocosos de ríos. Se seleccionaron dos tramos de lechos, uno en basalto y otro en riolita, para el análisis. Se utilizó estadística básica para validar las diferencias entre las alturas de vuelo seleccionadas, con el objetivo de evaluar la densidad e intensidad de las fracturas. Los resultados indicaron que una altura de vuelo de 20 metros proporciona una visualización óptima y un mayor número de fracturas observables. Sin embargo, las condiciones de vuelo, como los horarios de relevamiento, pueden influir en estas diferencias, como se evidenció en el lecho de riolita. En contraste, las alturas de vuelo de 50 y 100 metros (lecho de basalto) resultan en la observación de menos fracturas, pero muestran diferencias medias pequeñas, pero estadísticamente significativas ( $\alpha = 0.05$ ) cuando se comparan entre sí.*

**PALABRAS-CLAVE:** *altura de vuelo; juntas; basalto; riodacitas.*

---

## INTRODUÇÃO

O uso de dados de fraturas em rochas, para análises sobre erosão fluvial e evolução da paisagem, remonta desde o início do século passado, com constante evolução de técnicas de mensuração. Ao longo do século XX e XXI, muitos estudos sobre tectônica, evolução de perfis longitudinais e redes de drenagem, desenvolveram técnicas de mensuração para verificar as taxas de erosão, bem como correlações entre a presença de conjuntos de fraturas e o rebaixamento dos leitos rochosos (Wager, 1937; Beaumont et al. 1992; Hallet, 1996; Montgomery, 1999; Whipple; Hancock; Anderson, 2000; Whipple; Snyder; Dollenmaye, 2000; Whipple, 2004; Kim; Hoey; Bishop, 2006; Wobus et al. 2006; Chatanantavet, Parker, 2009; Lamb et al., 2015; Choi; Dongyoun, 2024) .

A área da geomorfologia acerca de leitos fluviais rochosos necessita de uma avaliação mais cuidadosa dos dados de fraturamento (geometria, anisotropia), para que seja possível estabelecer modelos de erosão. Mesmo em rochas maciças o fraturamento é, em escala temporal mais ampla, o maior responsável pela incisão fluvial (Molnar; Anderson; Anderson, 2007). Combinar as metodologias de análise de fraturas às técnicas mais atuais de aerofotogrametria (Salvini et al., 2017), com qualidade e precisão nos produtos cartográficos, possibilita a quantificação da geometria do fraturamento e de sua anisotropia em diversas escalas, além de inferências sobre a dinâmica dos processos fluviais (Lima; Pelegrina; Pontarolo, 2021).

As imagens a partir de sensores orbitais podem ser muito úteis, porém em escalas mais amplas da paisagem (regional e semidetalhe). O desenvolvimento recente das tecnologias de

VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) tem fornecido a possibilidade de imagens com mais precisão e acurácia para escalas de detalhe, úteis para estudos de trechos fluviais, de modo isolado ou comparativamente (entre mesmo litotipos e/ou distintos). Esse tipo de levantamento, somado ao uso de aparelhos GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) no modo/opção RTK (*Real Time Kinematic* ou Posicionamento Cinemático em Tempo-Real), permite dados com resolução espacial centimétrica. Outras vantagens seriam a obtenção de dados de fraturas em localidades de difícil acesso, além de permitir rapidez às atividades de campo, bem como melhor e maior seleção de amostras comparativas.

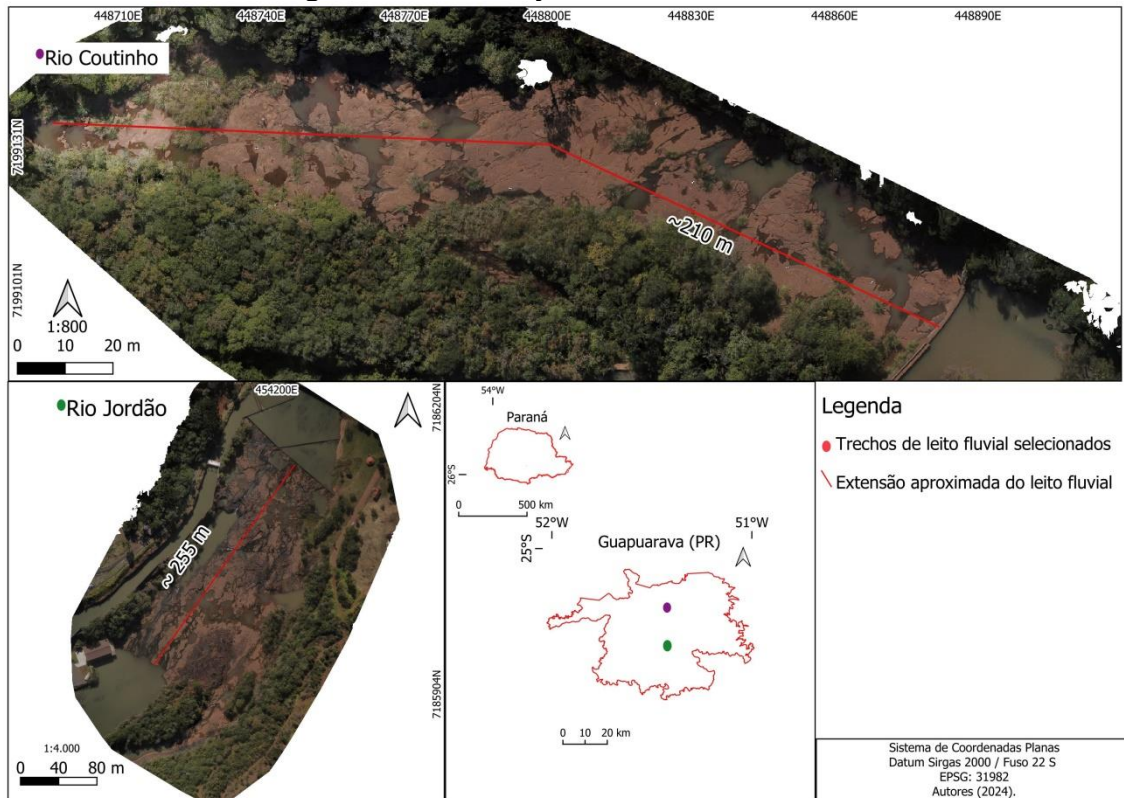
Desta forma, a presente pesquisa verificou a aplicabilidade do levantamento de fraturas em rocha, em trechos fluviais, com uso de voos sistemáticos por meio de VANTs, para analisar parâmetros da geometria e anisotropia do fraturamento. O objetivo principal foi utilizar procedimentos de calibração das alturas para melhor visualização de fraturas dos leitos fluviais.

## ÁREAS DE ESTUDO

As áreas selecionadas para a pesquisa são trechos de leito rochoso do Rio Jordão e Coutinho, em Guarapuava, PR (figura 1). Ambos fazem parte da média bacia do rio Iguaçu. Os trechos são zonas de ruptura, apresentando corredeiras e pequenas quedas e estão situados à jusante de pequenos barramentos artificiais, o que favorece a exposição do leito.

A região encontra-se no domínio das rochas vulcânicas da Bacia Sedimentar do Paraná, Grupo Serra Geral. O leito do rio Jordão, no trecho selecionado, é composto por basaltos da Formação Candói, Membro Foz do Areia. São rochas básicas, de coloração cinza escura e textura afanítica, esculpidas em uma zona interna de derrame, maciços e com disjunções colunares. O leito do rio Coutinho é formado por rioclitos da Formação Covó, Membro Guarapuava (Minerpar, 2013). Apresentam maior teor de sílicas e são rochas ácidas (leucocráticas), localmente apresentam uma textura porfírica bem desenvolvida. A rocha é fraturada, tanto vertical como horizontalmente. O fraturamento vertical possui distanciamento métrico.

Figura 1 – Localização das áreas de estudo



Fonte: Os autores.

## PARÂMETROS PARA O LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

O levantamento aerofotogramétrico ocorreu no dia 29/06/2023, no rio Jordão entre as 9 e 11 horas e no rio Coutinho entre as 14 e 16 horas. O VANT utilizado foi do modelo Mavic Pro Combo Fly da empresa DJI (quadricóptero), com sistema de posicionamento por satélite GPS. O aplicativo usado foi o *DJI PILOT* para sistema Android.

Para determinação das alturas de voo e GSD, selecionou-se um trecho do rio Jordão, de maior distância entre as margens (aproximadamente 160 metros), para o qual optou-se por três alturas (20, 50 e 100 metros). Para o rio Coutinho, com canal mais estreito (40 metros no trecho mais largo) e mata de maior porte, foram realizadas duas alturas de voo, 20 e 50 metros. A depender do trecho, a variação da topografia (mesmo pequena nos leitos fluviais) pode interferir, não permitindo que os sensores do VANT se adequem automaticamente, corrigindo a altura. Como o foco foi a observação das fraturas de forma mais nítida possível, quando da variação na topografia, a missão planejada para cada leito deveria buscar uma altura, ou intervalo desta, que gerasse a menor variação possível no GSD final e, portanto, procurar manter uma altura média, com erros para mais e para menos.

Como a distância focal está relacionada diretamente com a escala da imagem, houve a necessidade de alcançar uma distância focal fixa, assim todas as fotos teriam a mesma

escala ou uma variação que permitisse sempre a observação das fraturas. Devido à variação topográfica mencionada, tomou-se de uso a equação (1) para maior exatidão ao final dos levantamentos:

$$\frac{H}{F} = \frac{GSD}{\text{Tamanho do pixel}} \quad (1)$$

Onde:

H = altura de voo;

F = Distância Focal da câmera embarcada;

GSD = Ground Sample Distance (Distância de Amostragem do Solo).

A equação 1 relaciona a altura de voo, GSD, distância focal e tamanho do pixel, sendo os valores do tamanho do pixel e distância focal fixos. Como a altura de voo é diretamente proporcional ao GSD, isso significa que se houver uma variação no valor de H, haverá modificação no GSD, se H aumentar o GSD também irá aumentar (o inverso também). Maiores correções das variações citadas ficaram a cargo do processamento das imagens em software. Realizou-se uma reamostragem dos pixels, deixando-os todos do mesmo tamanho, normalmente um pouco acima do planejado nas missões (neste caso entre 1 e 4 centímetros de resolução final). Por isso, definiram-se alturas baixas de voo, contando com estas premissas. Os parâmetros do VANT utilizados para determinação da altura de voo e GSD adequados para a observação das fraturas, partiram da obtenção da distância focal da lente do quadricóptero (quadro 1).

**Quadro 1 – Parâmetros de distância focal do Vant Mavic Pro**

<b>Distância focal</b>	4,73	mm
	0,00473	m

Fonte: (Mavic Pro, 2017).

Para este modelo de VANT, os valores de comprimento (horizontal) e altura (vertical) do sensor, bem como, das imagens geradas foram os do quadro 2.

**Quadro 2 – Características do sensor**

	<b>Comprimento</b>	<b>Altura</b>	
Sensor	6,17	4,55	mm
Imagem	4000	3000	pixels

Fonte: (Mavic Pro, 2017).

Para determinar o tamanho do pixel realizou-se o cálculo da razão (equação 2) da dimensão do sensor, pela dimensão da imagem em milímetros:

$$\frac{6,17}{4000} = 0,0015425 \quad (2)$$

O resultado é o valor do comprimento (horizontal) do pixel (a). A altura (vertical) do pixel é obtida também pela razão entre altura do sensor e imagem (b). Os valores obtidos em pixels e que podem ser convertidos para metros (m) estão no quadro 3:

**Quadro 3** – Tamanho do pixel definido na configuração deste VANT é dado pelo uso dos seguintes dados

<b>Tamanho do pixel</b>	0,0015425 (a)	0,0015167 (b)	mm/pixels
	0,001529583 (c)		mm/pixels
	1,5 10 <sup>-6</sup> (d)		m/pixels

**Fonte:** Os autores.

O quadro 3 apresenta o valor final do tamanho do pixel obtido em (c) e (d) considerando os valores de configuração do Mavic Pro utilizado:

$$(a + b)/2 \quad (3)$$

Aplicando a equação (4), a fim de obter um GSD de parâmetro, sobre a altura de voo mínima a ser selecionada para este trabalho, obteve-se:

$$GSD = H * Tamanho\ do\ pixel / f \quad (4)$$

Onde:

H = 20 m (exemplo);

Tamanho do pixel = 1,52958;

f = distância focal = 0.00473.

Desta forma o GSD final para as missões de voo poderiam ser acima de 0,71 centímetros, considerando os voos a partir de 20 metros. Outro parâmetro fotogramétrico necessário no planejamento das missões de voo foi a escolha dos valores de sobreposição lateral e frontal. O ideal seria a escolha de no mínimo 60% a 70% de sobreposição lateral e 80% de sobreposição frontal (Alves Júnior et. al., 2015; Eisenbeiss, 2009; Sousa, 2017). O tipo de mapeamento selecionado, ou seja, o formato da área mapeada pelo VANT para cada voo foi majoritariamente no formato de polígonos. Os valores de sobreposição (lateral / frontal) foram de 80%, para obtenção de menores distorções. Para o aumento da acurácia e precisão topográfica foi utilizado RTK (Real Time Kinematic ou Posicionamento Cinemático em Tempo Real) da marca GEOMAX ZENITH-15 – GNSS (Sistema de navegação por satélite). Para obtenção de pontos de controle (Ground Control Points – GCP's) foram usados alvos artificiais, que serviram como dados para maior acurácia e precisão nas etapas de alinhamento das fotografias e pontarias (Agisoft Metashape Pro, versão: 1.18.3, 64 bits e WEBODM versão 3.0 gratuita).

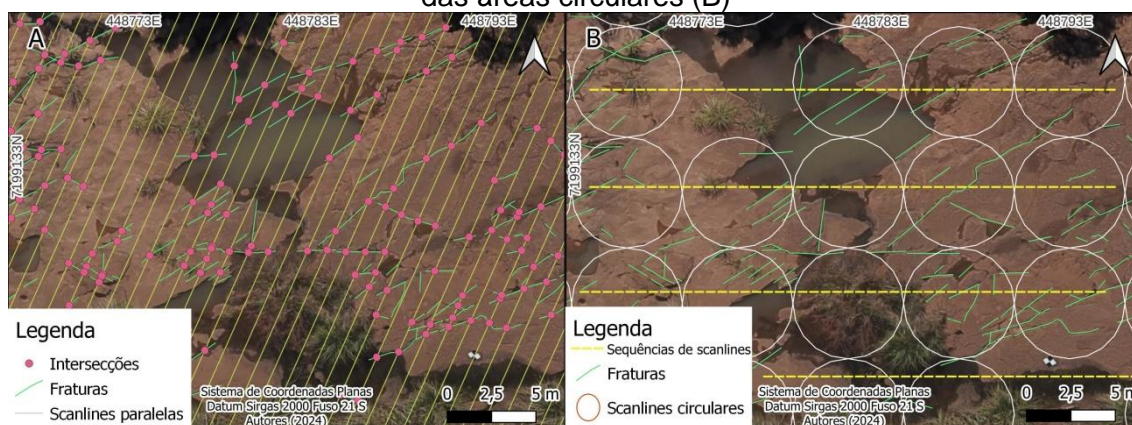


## LEVANTAMENTO DAS FRATURAS

Para verificar a diferença no desempenho dos levantamentos na caracterização do fraturamento dos leitos, foram obtidas a densidade (fraturas/m) e a intensidade (comprimento de fraturas/m<sup>2</sup>) para cada altura de voo. Não foi realizada comparação entre os dois trechos dos rios, mas apenas a comparação do desempenho das alturas de voo em cada canal fluvial (interno aos trechos). Todos os procedimentos foram realizados com ferramentas pertencentes ao Qgis 3.28 (Sistema de Informação Geográfica – SIG, de código aberto) e planilhas eletrônicas para o tratamento estatístico básico.

Para levantamento da densidade foi traçada uma sequência de linhas transversais ao leito, denominadas de *scanlines* retilíneas (Palmström, 2001), equidistantes 1 metro (figura 2A). O método visou facilitar a análise comparativa das alturas e a quantificação das densidades, não tendo propósito geomorfológico estrito, uma vez que não houve a consideração da variabilidade real da largura dos canais. No rio Jordão, a *scanline* foi de 46,9 metros, para todas as alturas de voo (20, 50, 100 metros). Para o rio Coutinho foi de 43,8 metros para as alturas de 50 e 20 metros. A adoção de diversas *scanlines* em sequência visa a verificação da anisotropia do fraturamento ao longo do trecho analisado, importante para diversos estudos geomorfológicos (Scott; Wohl, 2019). Para a análise comparativa interna a cada trecho, foram calculadas as médias das densidades obtidas nas diferentes alturas de voo, com aplicação do teste t de Student para verificar a significância das diferenças. Além disso, foi confeccionado o mapa de concentração de fraturas (hachuras de variação linear). Com relação à intensidade de fraturas, adotou-se a técnica de janelas amostrais circulares (Mauldon; Dunne; Rohrbaugh, 2001). Foram definidas áreas circulares de 3 metro de raio (27,83 metros quadrados de área), dispostas lado a lado, apenas na área coberta pelas *scanlines* retilíneas (figura 2A). Para cálculo automático da intensidade pelo SIG, as fraturas foram recortadas, mantendo-se apenas os traçados inseridos completamente nas áreas circulares. Foram calculadas as médias de intensidade para cada sequência (linhas tracejadas em 2B) de áreas circulares dispostas aproximadamente de modo transversal ao canal (figura 2B). Obteve-se, assim, uma sequência de médias de montante para jusante. Diferentemente da densidade, o cálculo da intensidade em áreas sequenciais permite um mapeamento das condições do leito, que possibilita avaliar a suscetibilidade à erosão por arrancamento (*plucking*; p. ex. Lima; Pelegrina; Pontarolo, 2021).

**Figura 2** – Exemplo de procedimentos adotados para traçado das *scanlines* retilíneas (A) e das áreas circulares (B)



Fonte: Os autores.

## PARÂMETROS DE VOO

O processamento das fotografias aéreas possibilitou boa visualização das fraturas. Contudo, a variação da resolução espacial de cada altura determinou um número maior ou menor de fraturas observáveis, em função da mudança de escala. Os erros totais gerados (planimétrico + altimétrico) e a resolução final de cada altura podem ser observados na tabela 1. Os erros ocorrem devido a incorreções durante os voos automáticos, oscilações no GNSS (RTK) na obtenção dos GCP's em campo (oscilações para o modo autônomo no RTK), variação do horário de obtenção das fotografias (luz do sol incidente que geram sombras), obstáculos físicos, como copa das árvores, e a ausência de número adequado de pontos homólogos em cada fotografia, no processamento digital de imagens (PDI).

**Tabela 1** – Resumo dos erros e resoluções finais para cada altura de voo praticada

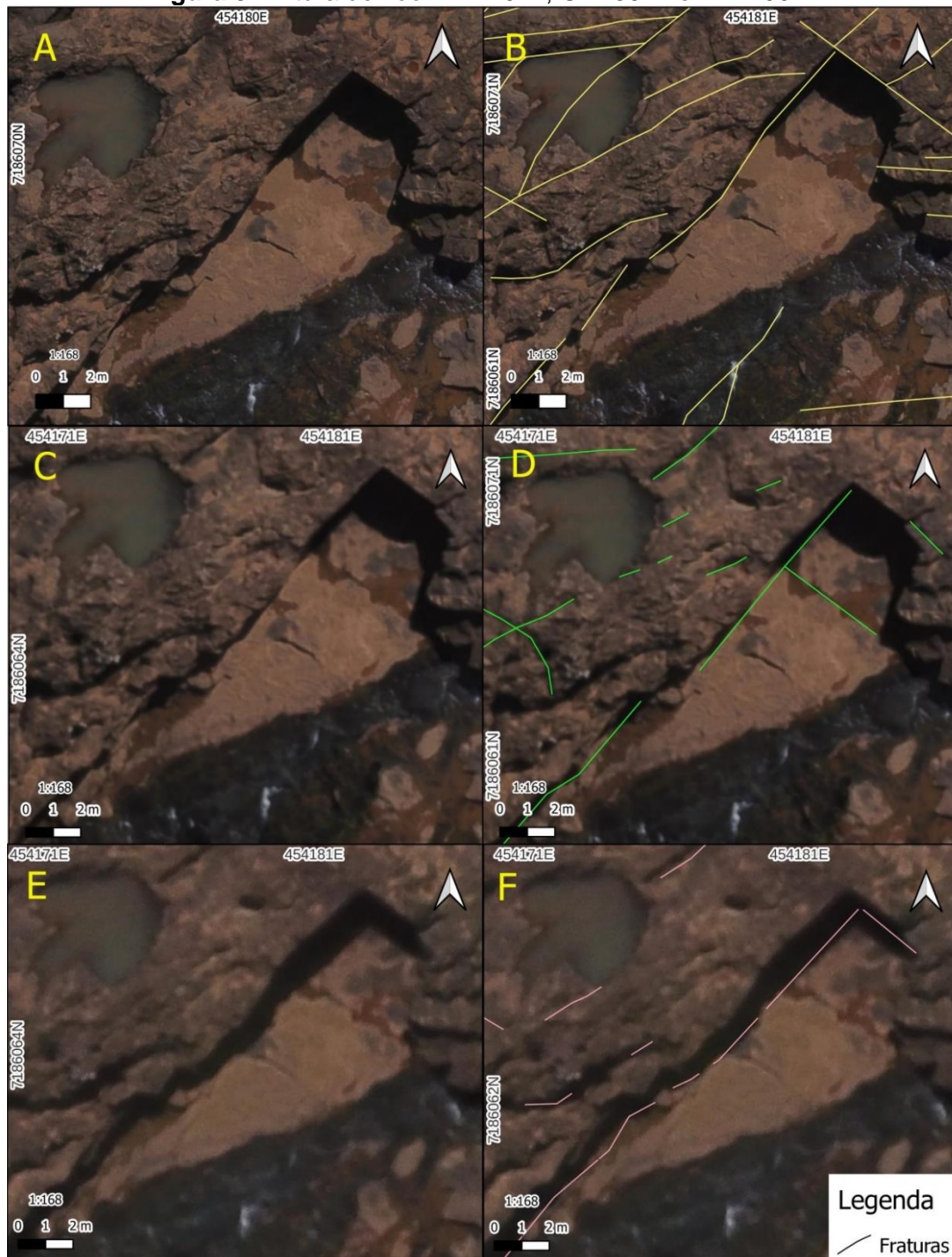
Rio	Altura de voo (metros)	Erros totais (voo+PDI)	Erro em pixel	Resolução final obtida (GSD)
Jordão	100	4 m	0,109	3,8 cm/px
	50	90 cm	0,075	2,3 cm/px
	20	70 cm	0,029	1,1 cm/px
Coutinho	50	1,28 m	0,083	2,8 cm/px
	20	50 cm	0,037	1 cm/px

Fonte: Os autores.



A figura 3 retrata trecho do leito fluvial do rio Jordão e a possibilidade de observação de detalhes, sem as fraturas vetorizadas e com as mesmas, em um mesmo recorte e escala (1:168).

**Figura 3** - Altura de voo: A-B 20 m; C-D 50 m e E-F 100 m

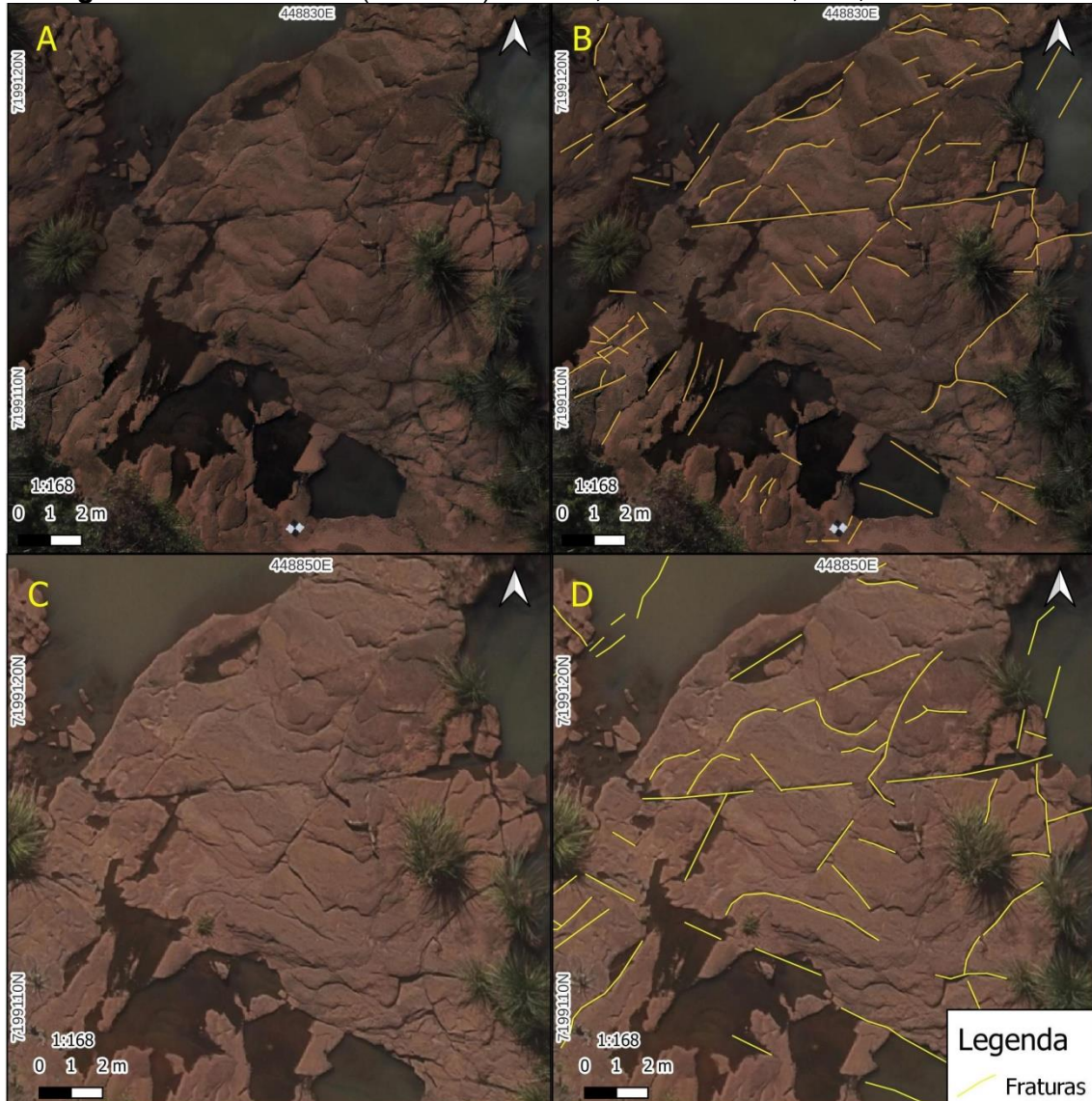


Fonte: Os autores.

Os recortes para o rio Coutinho (figura 4) evidenciam uma das variações sobre a qualidade das imagens. As fotografias do rio Jordão foram obtidas entre 9h-11 horas e as do

rio Coutinho entre 14h-16 horas do mesmo dia (29/06/2023). Os voos realizados com a luz solar o mais vertical possível (nadir) permitiram menos interferência de sombras projetadas pelas copas de árvores e demais obstáculos.

**Figura 4 - Os riodacitos (Coutinho) em A-B, 20 m de altura; C-D, 50 m de altura**



Fonte: Os autores.

Outra diferença está relacionada à tipologia das rochas. O leito do rio Jordão é composto por basaltos, rochas melanocráticas, e o leito do rio Coutinho é formado por riodacitos, leucocráticas. Essa diferença litológica implica em reflectâncias específicas, interferindo na clareza das fotografias. No entanto, o fluxo de sedimentos argilosos pode resultar em um filme de coloração clara sobre as rochas, que diminui as diferenças inter-litologias. Outra distinção dos dois trechos é o processo de formação e a química, que condicionam fraturamentos naturais distintos (Mineropar, 2013).



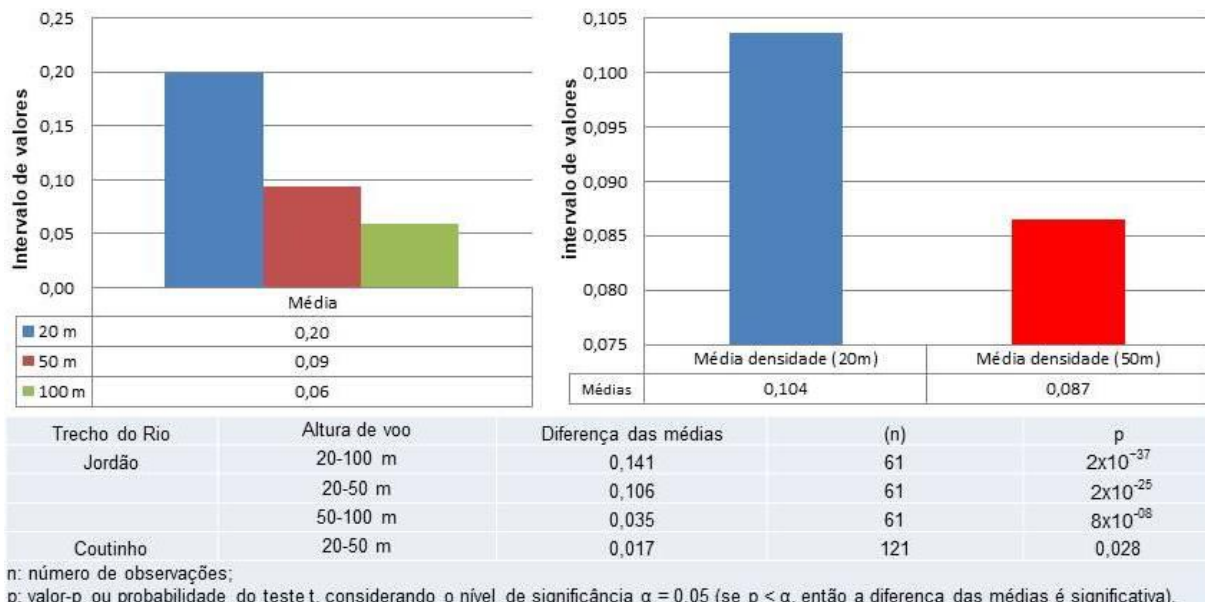
## GEOMETRIA DAS FRATURAS: DIFERENÇAS ENTRE ALTURAS DE VOO

A geometria das fraturas é aqui definida como o seu arranjo em termos de sua densidade (fraturas/m) e intensidade (comprimento de fraturas/m<sup>2</sup>). Em um primeiro momento, esses parâmetros são avaliados sem considerar sua distribuição espacial ao longo dos trechos, apenas para se ter uma quantificação das diferenças entre os levantamentos. Em seguida, é avaliada a diferença em termos de distribuição espacial, ou seja, o efeito das diferentes alturas de voo sobre a caracterização da anisotropia do fraturamento dos trechos.

### DENSIDADE

No trecho do rio Jordão, a altura de 20 metros possibilitou observar um número maior de fraturas e assim, a média das densidades é maior em relação às alturas de 50 e 100 metros. Nos valores obtidos entre as diferenças das médias, a altura de 20 metros manteve valor médio maior de fraturas observadas, quando comparado às outras duas alturas (50/100). As alturas de 50 e 100 metros apresentaram diferenças médias menores, comparadas entre si (figura 5).

**Figura 5** – Médias, diferenças das médias e teste t para densidade de fraturas dos trechos dos rios Jordão e Coutinho



**Fonte:** Os autores.

Com base nos resultados do teste t a comparação entre alturas de 20/50, bem como 20/100 (Jordão), verificou que as diferenças entre as médias destas alturas são

estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ). Portanto, podemos concluir que o número médio de fraturas observadas na altura de 20 metros é significativamente diferente do número médio de fraturas observáveis em relação às alturas de 50 e 100 metros.

A diferença das médias das densidades entre as alturas de 50 e 100 metros também se mostrou significativa ( $\alpha = 0,05$ ). Conclui-se, portanto, que há uma diferença significativa no número médio de fraturas observáveis, entre as alturas de 50 e 100 metros.

Para o trecho do rio Coutinho, a média obtida para a altura de 20 metros foi maior em relação à altura de 50 metros, o que indicaria melhores condições de observações de fraturas na altura menor. O valor baixo (0,017) da diferença das médias entre as duas alturas indica que as mesmas são muito semelhantes. Isoladamente, isso sugeriria que não há uma grande discrepância entre as características das fraturas entre estas alturas praticadas. Entretanto, como o teste de significância das diferenças das médias (teste t) leva em consideração o desvio padrão e o tamanho das amostras, verifica-se uma diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ), entre as duas alturas de voo. Isso sugere que a diferença entre estas, não é devido ao acaso, mas sim que há uma diferença real nas características de observação em função da mudança de altura e demais condições de voo (figura 5).

Os resultados confirmam, de modo geral, o conceito aerofotogramétrico intuitivo de que alturas de voo mais baixas permitem a observação de mais detalhes da superfície (Figueiredo; Figueiredo, 2018). Embora as diferenças tenham sido significativas, no caso do Jordão a maior discrepância entre alturas consecutivas está entre 20 e 100 metros. Em termos práticos, isto significa que se as condições de levantamento não permitirem um voo a 20 metros, a opção por 100 metros terá uma perda muito grande de informação, mas o mesmo aconteceria com o voo a 50 metros. Em todo caso, entre 20 e 50 metros existem muitas possibilidades e deve-se procurar voar na menor altura possível.

Porém, se o planejamento de voo para 20 metros for substituído, devido às condições locais ou momentâneas, por um voo a 50 metros, a perda de informação pode ser aceitável, dependendo dos objetivos. No trecho do Rio Coutinho, as médias próximas podem estar relacionadas às características da rocha e às condições de altura do sol. Os riodacitos são rochas mais claras e, dependendo da inclinação do sol no momento do levantamento, o contraste com os traços de fratura pode ser realçado. Isso pode ser uma relativa vantagem para a escolha das alturas de voo, embora a diferença estatística permaneça válida.

## INTENSIDADE

Para o trecho do rio Jordão, a altura de 20 metros apresentou média geral mais alta (0,325), seguida das alturas de 50 metros (0,172) e 100 metros (0,13). A diferença das médias

entre as alturas de 20 e 50 metros e entre 20 e 100 metros obteve valores maiores, sendo a maior diferença entre as alturas de 20/100 metros (0,156), o que era esperado. A diferença das médias no intervalo de alturas 50/100 metros (0,025) foi a mais baixa, o que infere menos fraturas observáveis no conjunto das áreas circulares (tabela 2). No rio Coutinho a diferença das médias apresentou valor (0,003) muito próximo. No entanto, a média de 20 metros foi mais alta (0,235), em relação à altura de 50 metros (0,221).

**Tabela 2** – Estatísticas da intensidade de fraturas conforme alturas de voo

Trecho do Rio	Altura de voo	Intensidade de fraturas (médias)	Diferença das médias	(n)	p
Jordão	20 m	0,325		13	
	50 m	0,172		13	
	100 m	0,13		13	
	20-50 m		0,13		0,011
	20-100 m		0,156		0,002
	50-100 m		0,025		0,291
Coutinho	20 m	0,235		22	
	50 m	0,221		22	
	20-50 m		0,003		0,648

n: número de observações;

p: valor-p ou probabilidade do teste t, considerando o nível de significância  $\alpha = 0,05$  (se  $p < \alpha$ , então a diferença das médias é significativa).

**Fonte:** Os autores.

Analisado os valores de teste t (tabela 2) é possível distinguir diferenças significativas ( $\alpha = 0,05$ ) em algumas situações. Para o trecho do rio Jordão, comparadas às alturas de 20/50 metros e 20/100 metros há diferenças significativas ( $\alpha = 0,05$ ). Isto não ocorre entre as alturas de 50/100 metros, onde os resultados sugerem que não são estatisticamente significativas as diferenças ( $\alpha = 0,05$ ). No trecho do rio Coutinho, não há diferença significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre as médias das intensidades nas diferentes alturas de voo, o que não chega a contestar o princípio de voo baixo = GSD baixo e melhor resolução espacial (mais detalhes) no trecho selecionado, pois a presença de fraturas internas às áreas circulares no geral é em menor número, em relação às scanlines retilíneas, que obtém maiores cruzamentos.

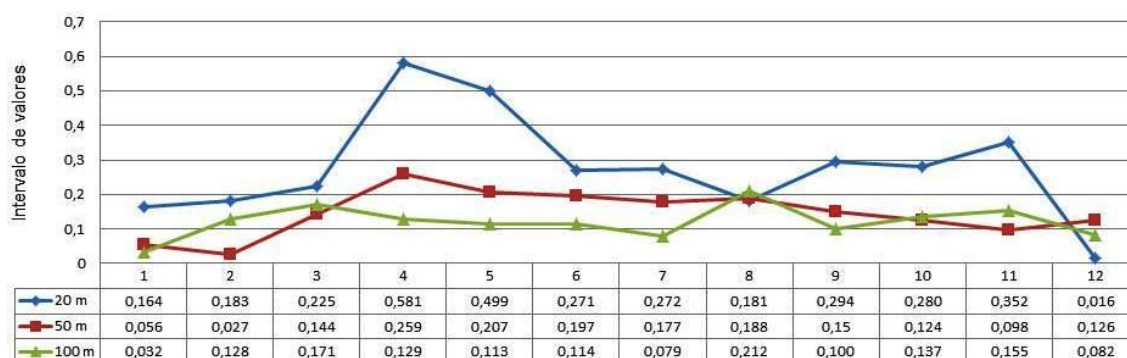
A revisão de cada procedimento no tratamento dos mosaicos, dados no SIG e nas planilhas eletrônicas, reforçou as constatações de que as condições de voo no dia foi o fator de influência. O voo no fim da tarde para a altura de 20 metros no Coutinho interferiu na observação de fraturas na vetorização do mosaico em SIG. Ou seja, embora a 20 metros a possibilidade de observação seja melhor, a iluminação diferenciada reduziu a acurácia em relação à altura de 50 metros. Soma-se a isso a subjetividade do usuário do SIG, sua experiência nas identificações e medições.



Para analisar, de modo sintético, a variação da intensidade ao longo dos trechos, de montante para jusante, verificou-se a média nas sequências de áreas circulares transversalmente aos canais. No rio Jordão, a média de cada transversal para a altura de 20 metros manteve valores mais altos em quase toda a extensão analisada (figura 6). Apenas quando da presença de áreas circulares com menos fraturas vetorizadas o valor obtido para a média da transversal foi mais baixo que para outras alturas (ponto 8 e ponto 12 – figura 6), o que era de se esperar. Valores mais altos e uma variação maior dos valores na altura de 20 metros traduzem a melhor resolução das imagens.

A análise da figura 6 indica que a altura de 50 metros mostrou tendência de aumento (até a quarta transversal) e diminuição (quinta transversal em diante) mais suaves, com poucas variações de montante a jusante. Porém, o comportamento geral é semelhante ao observado a 20 metros, diminuída uma escala. Na maior parte dos casos, na altura de 100 metros os valores são menores, sem caracterizar a tendência que escalas de mais detalhe permitem detectar. Porém, em transversais específicas (2, 3, 8, 10, 11, 12), as médias são ligeiramente mais altas, quando comparado à altura de 50 metros e/ou 20 metros (ponto 8). Isso ocorreu pelo efeito do número absoluto de fraturas nessas áreas circulares em relação às suas homólogas nas alturas mais baixas.

**Figura 6** – Médias das áreas circulares transversais do rio Jordão, de montante a jusante do trecho

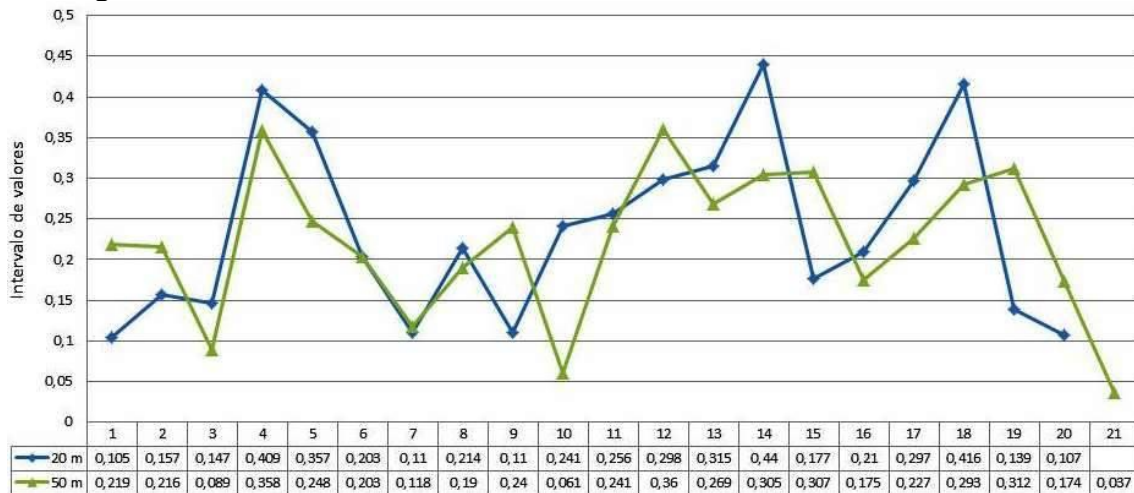


Fonte: Os autores.

No rio Coutinho, as transversais apresentaram maiores variações pontuais entre as duas alturas. Na altura de 50 metros, as transversais com valores médios ligeiramente mais altos em relação a 20 metros refletiram a melhor visualização das feições de fratura, contrariando a lógica fotogramétrica. Como mencionado anteriormente, o voo a 20 metros efetuado ao final da tarde pode ter afetado o resultado (menos fraturas visíveis). Além disso, os softwares de processamento, por vezes, selecionam os melhores pontos homólogos nas fotografias aéreas, para as etapas de confecção dos mosaicos, algo que pode ter interferido nos valores das médias transversais neste caso. Em cerca de 50% dos casos a altura de 20

metros não se mostrou melhor em detalhamento que a altura de 50 metros, sendo estas semelhantes na eficiência (figura 7). Conclui-se que, para trabalhos com estes objetivos, é necessário efetuar os voos para as diferentes alturas, com luz incidente que gere pouca ou nenhuma sombra em projeção.

**Figura 7** – Médias das áreas circulares transversais ao trecho do rio Coutinho



Fonte: Os autores.

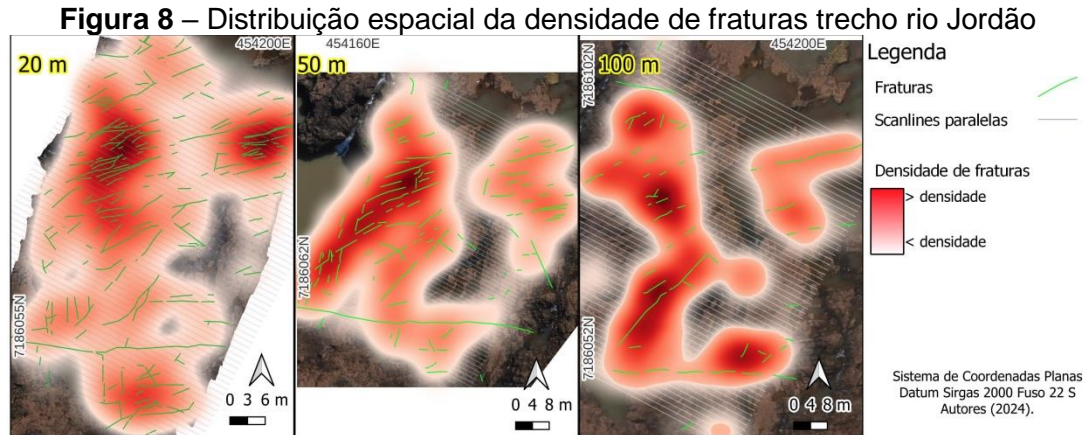
## DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS FRATURAS - DENSIDADE

Na análise da erosão em leitos rochosos é necessário conhecer a anisotropia do substrato, que resulta na efetividade diferencial da ação hidráulica, sobretudo em termos de arrancamento (Scott; Wohl, 2019). A altura de voo pode afetar a avaliação dessa anisotropia. O mapa de densidade das fraturas elaborado para cada altura de voo permitiu observar que as fraturas mais longas são visíveis nas três alturas de voo. As fraturas menores produzem concentrações diferenciadas, e como a sua visibilidade depende da altura de voo, a distribuição das zonas de maior concentração (e maior erodibilidade potencial) varia de acordo com isso (figura 8).

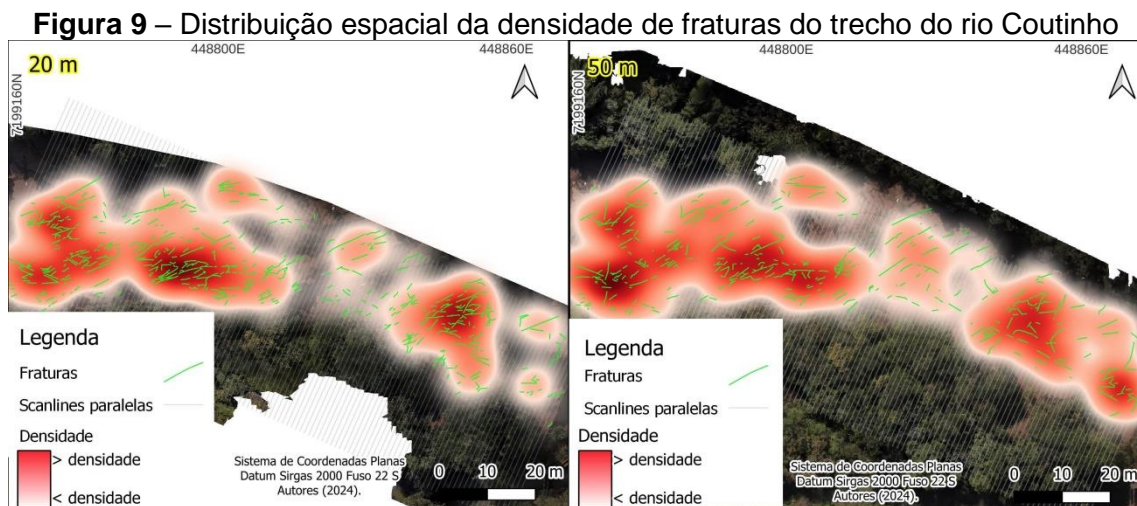
Os tons de maior densidade se alteram dentro da área, de cada altura, quando da mudança de voo para 50 e 100 metros. Nos casos do Jordão e Coutinho, a diferença na interpretação de zonas de maior densidade, nos produtos de diferentes alturas, é resultado do processo de geração do mapa de densidade, que depende da presença maior ou menor das fraturas de pequena extensão.

No caso do Coutinho, a diferença 20/50 é menos pronunciada que no Jordão. No trecho do rio Coutinho, no dia do voo, a vazão fluvial se encontrava baixa, o que possibilitou boa visualização das rochas do leito. O levantamento na altura de 50 metros foi realizado antes da altura de 20 metros. O voo de 20 metros foi realizado depois de alguns testes de desvios das copas das árvores, em horário próximo ao fim da tarde (16 horas). A incidência de luz

inclinada nas árvores foi refletida nas fotografias e conseqüentemente no mosaico final, causando mais imprecisões de vetorização no trecho a jusante, na altura de 20 metros (figura 9).



Fonte: Os autores.



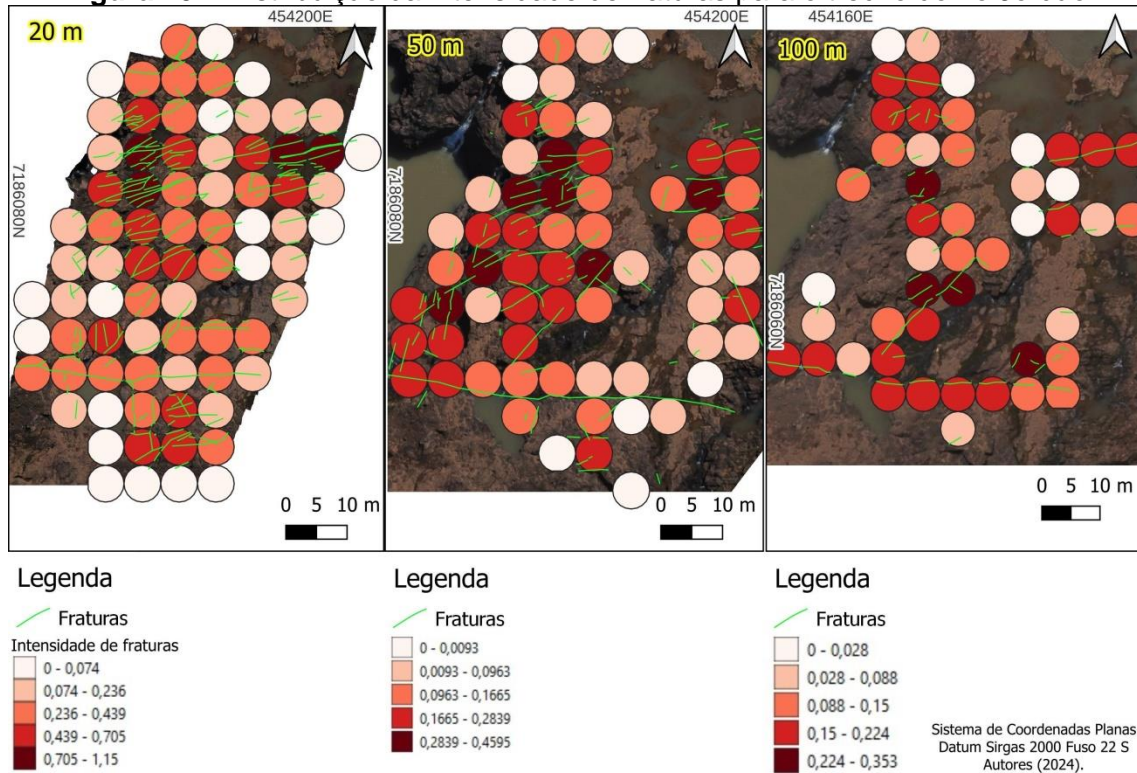
Fonte: Os autores.

## INTENSIDADE RIO JORDÃO

A distribuição dos valores de intensidade para as alturas do trecho do rio Jordão, mostrou variabilidade espacial considerável. A altura de 20 metros apresentou intervalo de intensidade maior (legenda da figura 10) e um recobrimento maior do trecho com áreas circulares com dados efetivos. As alturas de 50/100 apresentaram intervalos de valores menores e recobrimento igualmente menores. Para efeito de interpretações acerca da erodibilidade, as duas alturas de voo (50/100) podem mascarar as inferências se não observados os valores decimais de legenda em cada área circular, em relação à altura de 20 metros.



**Figura 10 – Distribuição da intensidade de fraturas para o trecho do rio Jordão**



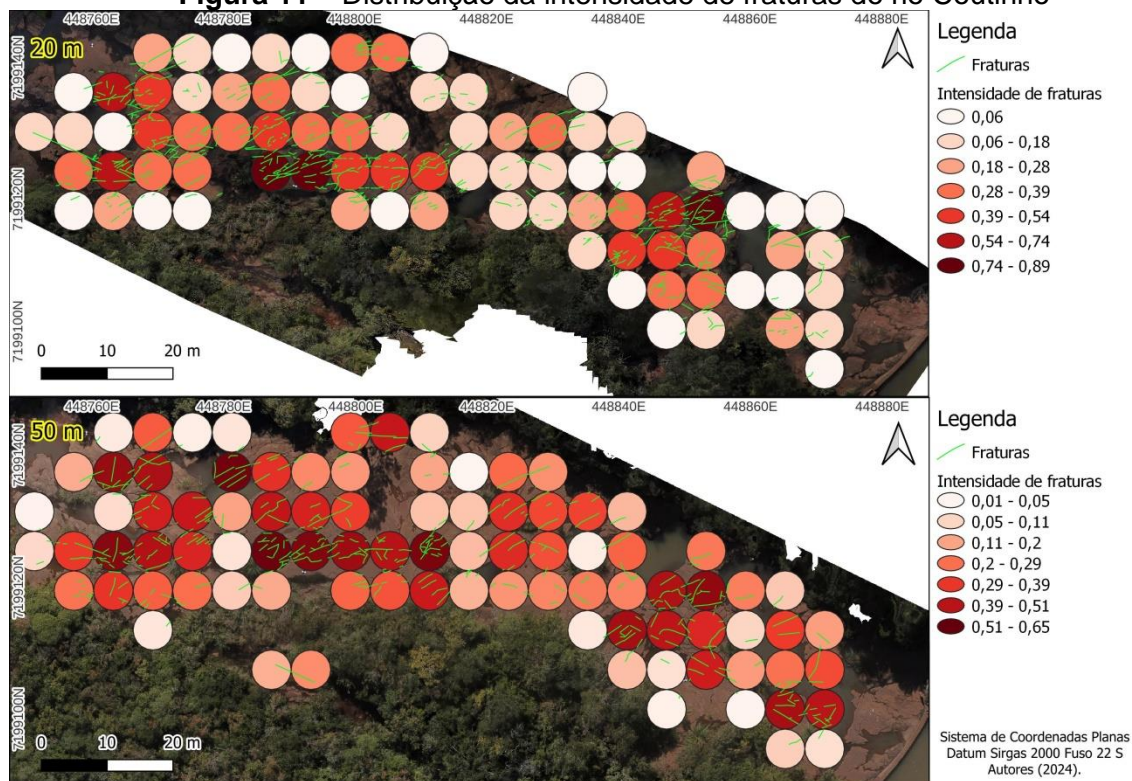
Fonte: Os autores.

## INTENSIDADE RIO COUTINHO

A distribuição da intensidade no rio Coutinho indicou variabilidade condicionada à altura de voo. Em 20 metros os maiores valores concentraram-se em áreas circundadas por valores menores. Em 50 metros valores maiores distribuíram-se no leito (figura 11).

Contudo, os valores mais altos de intensidade da altura de 50 metros correspondem aos valores intermediários da altura de 20 metros. Isso, de certa forma, traduz as variações observadas nos gráficos produzidos para as duas alturas (figura 8). A mesma relação pode ser feita para o trecho do rio Jordão e suas alturas, os valores de intensidade maiores em 50/100 correspondem aos valores intermediários ou mais baixos na altura de 20 metros. Desse modo, apesar das diferenças em valores absolutos, em termos relativos, e visualmente, mantém-se a correspondência dos setores que podem apresentar maior erodibilidade potencial.

**Figura 11 – Distribuição da intensidade de fraturas do rio Coutinho**



Fonte: Os autores.

## CONCLUSÕES

As comparações das alturas de voo selecionadas para observação das fraturas rochosas se mostraram válidas para obtenção de detalhes dos trechos dos leitos fluviais. Erros de obtenção dos GCP's, somados às variações naturais na obtenção das fotografias em campo (luz, ventos etc.) e os procedimentos em PDI são fatores que influenciam no aumento de erros altimétricos e planimétricos, mas que corretamente organizados permitem acurácia e precisão aos trabalhos.

No geral, a escolha da altura de 20 metros dentre as demais alturas (50 e/ou 100 metros) se mostrou mais adequada, com GSD e resolução espacial melhor para acurácia visual das fraturas dos trechos de leitos fluviais rochosos selecionados. No entanto, a depender das condições de voo e objetivos dos trabalhos, alturas de voo maiores podem permitir também boa observação de detalhes e extensão em área.

A distribuição das áreas de densidade de fraturas dependeu das quantidades de fraturas existentes para cada altura de voo praticada. As fraturas de menor extensão interferiram nas manchas de calor, o que coincidiu também com os intervalos de valores maiores (maior densidade).

O voo de 20 metros de altura foi o que resultou em valores médios mais altos de densidade de fraturas. Em termos de distribuição espacial, as alturas de 50 e 100 metros



resultaram em concentrações diferenciadas em relação à altura de 20 metros, devido à menor visualização de fraturas pequenas. Quando comparados os dois trechos de rios estudados, o Coutinho obteve diferenças menores de densidade entre as alturas de voo. Isso realçou o fato de que o tipo de rocha (mais clara) e o horário de levantamento (mais cedo) em maior altura acabam compensando, em parte, as diferenças. Porém, há necessidade de se fazer a comparação das alturas 20/50 em condições iguais (menor projeção de sombras) para que esses resultados sejam mais conclusivos.

Com relação à distribuição espacial da intensidade de fraturas, medida em áreas circulares, apesar das diferenças em valores absolutos entre-escalas, em termos relativos mantém-se a correspondência dos setores que podem apresentar maior erodibilidade potencial.

Procedimentos mais automatizados, para a vetorização de fraturas em mosaicos, por exemplo, podem permitir melhor comparação entre o desempenho dos levantamentos com alturas diferentes de voo. O geoprocessamento com uso de Machine Learning e Deep Learning ou procedimentos de modelagem gráfica, junto ao uso de linguagem de programação (Python) para SIG's poderá fornecer novas formas de análises. Entretanto, o estudo aqui desenvolvido mostrou alguns aspectos fundamentais a serem considerados nos levantamentos de fraturas com VANTs nos estudos geomorfológicos.

## REFERÊNCIAS

ALVES JÚNIOR, Leomar Rufino; CÔRTEZ, João Batista Ramos; FERREIRA, Manuel Eduardo; SILVA, Janete Rêgo. Validação de ortomosaicos e modelos digitais de terreno utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um vant. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 67, n. 7, p. 1453-1466, nov./dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv67n7-49198>.

BEAUMONT, Christopher; FULLSACK, Philippe; HAMILTON, Juliet. Erosional control of active compressional orogens. *In*: MCCLAY, Kevin Richard (ed.). **Thrust tectonics**. Dordrecht: Springer, 1992. p. 1-18.

CHATANANTAVET, Phairot; PARKER, Gary. Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 114, p. 1-22, Nov. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JF001044>.

CHOI, Inhyeok; DONGYOUNG, Kwak. Optimizing terrain classification methods for the determination of bedrock depth and the average shear wave velocity of soil. **Remote Sensing**, Basileia, v. 16, n. 2, p. 2-24, Jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16020233>.

EISENBEISS, Henri. **UAV Photogrammetry**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de Tecnologia de Dresden, Dresden, 2009. Disponível em: [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD\\_Theses/105.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD_Theses/105.pdf). Acesso em: 10 jun. 2024.

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó; FIGUEIREDO, Symone Maria de Melo. Planos de voo semiautônomos para fotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas de classe 3. **Circular Técnica**, Rio Branco, v. 75, p. 1-56, nov. 2018. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/187874/1/26750.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2024.

HALLET, Bernard. Glacial quarrying: a simple theoretical model. **Annals of Glaciology**, Cambridge, v. 22, p. 1-8, Jan. 1996. DOI: <https://doi.org/10.3189/1996AoG22-1-1-8>.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **O grupo serra geral no estado do Paraná: mapeamento geológico na escala de 1:250.000 (I e II)**. Curitiba: Instituto Água e Terra, 2013. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Publicacoes-para-download>. Acesso em: 7 maio 2024.

KIM, Ju-Yong; HOEY, Trevor Bryan; BISHOP, Paul. Erosion processes in bedrock river: a review with special emphasize on numerical modelling. **Korea Journal of Quaternary Research**, Daejeon, v. 20, n. 2, p. 11-29, 2006. Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO200634515186285.page>. Acesso em: 10 jun. 2024.

LAMB, Michael Peter; FINNEGAN, Noah James; SCHEINGROSS, Joel Stephen; SKLAR, Leonard S. New insights into the mechanics of fluvial bedrock erosion through flume experiments and theory. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 244, p. 33-55, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.003>.

LIMA, Adalto Gonçalves; PELEGRINA, Marcos Aurélio; PONTAROLO, Murilo. Fracture variability in basalts and its effect on river erosion: a case study in the Paraná volcanic province. **Earth Science Research Journal**, Bogotá, v. 25, n. 1, p. 13-19, Jan./Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.85098>.

MAULDON, Matthew Bruce; DUNNE, William Michael; ROHRBAUGH JUNIOR, Michael Bruce. Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. **Structural Geology**, Amsterdam, v. 23, p. 247-258, Jan. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00094-8).

MAVIC PRO: manual do usuário. Shenzhen: DJI, 2017. Disponível em: [https://dl.djicdn.com/downloads/mavic/20170630/Mavic+Pro+User+Manual+V1.6\\_PT.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/mavic/20170630/Mavic+Pro+User+Manual+V1.6_PT.pdf). Acesso em: 10 jun. 2024.

MOLNAR, Peter; ANDERSON, Robert Stephen; ANDERSON, Suzanne Prestrud. Tectonics, fracturing of rock, and erosion. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 112, p. 1-12, Sept. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JF000433>

MONTGOMERY, David. Process domains and the river continuum. **Journal of the American Water Resources Association**, Hoboken, v. 35, p. 397-410, June 1999. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03598.x>.

PALMSTRÖM, Arild. Measurement and characterization of rock mass jointing. In: SHARMA, Vishnu Mohan; SAXENA, Krishna Raju. **In-situ characterization of rocks**. Rotherdan: Balkema, 2001. p. 49-97.

SALVINI, Roberto; MASTROROCOCO, Gianluca; SEDDAIU, Marcello; ROSSI, Davide; VANNESCHI, Claudio. The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, Abingdon, v. 8, n. 1, p. 34-52, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1199053>.

SCOTT, David Natan; WOHL, Ellen Elizabeth. Bedrock fracture influences on geomorphic process and form across process domains and scales. **Earth Surface Process and Landforms**, Hoboken, v. 44, p. 27-45, July 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4473>.

SOUSA, Hélio Lopes. Sensoriamento remoto com VANTs: uma nova possibilidade para a aquisição de geoinformações. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 326-342, jul./set. 2017. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>. Acesso em: 15 maio 2024.

WAGER, Laurence Robert. The arun river drainage pattern and the rise of the Himalaya. **Geographical Journal**, Hoboken, v. 89, p. 239-250, Mar. 1937. DOI: <https://doi.org/10.2307/1785796>.

WHIPPLE, Kelin. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, San Mateo, v. 32, p.151-185, Sept. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120356>.

WHIPPLE, Kelin; HANCOCK, Gregory Scott; ANDERSON, Robert Stephen. River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. **Bulletin of the Geological Society of America**, McLean, v. 112, n. 3, p. 490-503, Mar. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<490:RIIBMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<490:RIIBMA>2.0.CO;2).

WHIPPLE, Kelin; SNYDER, Neil Patrick; DOLLENMAYER, Kevin. Rates and processes of bedrock incision by the Upper Ukak river since the 1912 Novarupta ash flow in the Valley of Ten Thousands Smokes, Alaska. **Geology**, McLean, v. 28, n. 9, p. 835-838, Sept. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<835:RAPOBI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<835:RAPOBI>2.0.CO;2).

WOBUS, Cameron; WHIPPLE, Kelin; KIRBY, Eric; SNYDER, Neil; JOHNSON, Joel; SPYROPOLOU, Krystala; CROSBY, Benjamin Taylor; SHEEHAN, David. Tectonics from topography: procedures, promise and pitfalls, in tectonics, climate and landscape evolution. **Geological Society of America Special Papers**, McLean, v. 398, p. 55-74, Jan. 2006. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04)).

**Recebido:** abril de 2024.

**Aceito:** junho de 2024.