

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E TECNOLOGIA AMBIENTAL - PPGCTA

Fernanda Gumisson Miranda

**IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE
RESERVATÓRIO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA**

Frederico Westphalen, RS
2023

Fernanda Gumisson Miranda

**IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE
RESERVATÓRIO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), campus Frederico Westphalen, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Renato Beppler Spohr

Frederico Westphalen, RS
2023

Fernanda Gumisson Miranda

**IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE
RESERVATÓRIO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), campus Frederico Westphalen, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Aprovado em 17 de março de 2023

Prof. Dr. Renato Beppler Spohr (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Genésio Mario da Rosa (UFSM)

Prof. Dr. Mario Santos Nunes (URI)

Frederico Westphalen, RS
2023

Miranda, Fernanda Gumisson
IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE
RESERVATÓRIO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA / Fernanda Gumisson
Miranda.- 2023.
108 p.; 30 cm

Orientador: Renato Beppler Spohr
Coorientador: Fabio Marcelo Breunig
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós
Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, RS, 2023

1. Monitoramento Ambiental; Processos Erosivos;
VANTS; Usina Hidrelétrica. I. Beppler Spohr, Renato II.
Marcelo Breunig, Fabio III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, FERNANDA GUMISSON MIRANDA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE RESERVATÓRIO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA

AUTORA: Fernanda Gumisson Miranda
ORIENTADOR: Prof. Dr. Renato Beppler Spohr

O Brasil aliado com o crescimento demográfico e a exuberância dos recursos hídricos no país, direcionado para o setor de energia elétrica tem investido em novos empreendimentos voltados a geração de energia elétrica, através de fontes renováveis. Com isso, diversos impactos ao meio ambiente são gerados, dentre eles a manifestação de processos erosivos nas margens de reservatórios resultante da variabilidade do nível de operação dos reservatórios. Através do auxílio da bibliografia se observou determinadas metodologias de monitoramento de processos erosivos e as quais muitas vezes são oriundas de métodos empíricos e onerosos. Em vista disso, o presente trabalho buscou pelo intermédio de um estudo de caso, aprimorar o trabalho em campo por meio de aplicação de tecnologia direcionado ao mapeamento de áreas. O estudo de caso compreende na estruturação inicial, levantamento aéreo de monitoramento, levantamento topográfico e análise de dados. Foram realizados quatro levantamentos aéreos seguidos de processamento por meio de software *agisoft photoscan*, onde constatou-se através do produto gerado *orthomosaic* processo erosivo na margem do reservatório da usina hidrelétrica PCH RS-155 no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, constatando a ocorrência de um processo erosivos e demais possíveis áreas com susceptibilidade dos mesmos, todavia, em decorrência GCPs distante das áreas de monitoramento sucedeu-se em erros expressivos na geração das curvas de nível, não se fazendo viável a estimativa de perda de solo oriundo do processo erosivo.

Palavras-chave: Noroeste. Monitoramento Aéreo. Georreferenciamento.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF EROSION PROCESSES ON THE BANKS OF A HYDROELECTRIC POWER PLANT RESERVOIR

AUTHOR: Fernanda Gumisson Miranda
ADVISOR: Prof. Dr. Renato Beppler Spohr

Brazil allied with the demographic growth and the exuberance of the hydric resources in the country, directed to the sector of electric energy has invested in new enterprises directed to the generation of electric energy, through renewable sources. With this, several impacts on the environment are generated, among them the manifestation of erosive processes on the banks of reservoirs resulting from the variability in the level of operation of the reservoirs. Through the help of the bibliography, certain methodologies for monitoring erosive processes were observed, which are often based on empirical and costly methods. In view of this, the present work sought, by means of a case study, to improve field work through the application of technology directed at mapping areas. The case study comprises the initial structuring, aerial monitoring surveys, topographic surveys, and data analysis. Four aerial surveys were conducted followed by processing using the software agisoft photoscan, where it was found through the generated product orthomosaic erosive process on the margin of the reservoir of the hydroelectric power plant PCH RS-155 in the northwest of the state of Rio Grande do Sul, verifying the occurrence of an erosive process and other possible areas with susceptibility of the same, however, due to GCPs distant from the monitoring areas it succeeded in significant errors in the generation of contour lines, not making viable the estimate of soil loss from the erosive process.

Keywords: Northwest. Aerial Monitoring. Georeferencing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição interna da matriz energética no Brasil por fonte geradora. ...	12
Figura 2 – Potencial de geração de energia elétrica no Brasil, por região.	13
Figura 3 – Capacidade instalada por estado.	14
Figura 4 – Curvas-guia em um Reservatório de Múltiplos Usos.	16
Figura 5 – Principais atividades envolvidas em Geoprocessamento.	27
Figura 6 – Estrutura do SIG.	28
Figura 7 – Orthomosaic resultante do primeiro levantamento, demonstrando a área do estudo e detalhamento do túnel adutor e indicação do sentido do fluxo da água	37
Figura 8 – Interface do software PIX4Dcapture e o plano de voo da área	38
Figura 9 – Tie Points	41
Figura 10 – Estimativa de erros do processamento sem GCPs no primeiro voo.	44
Figura 11 – Estimativa de erros do processamento sem GCPs no último voo.	46
Figura 12 – Mapa demonstrativo de erro das curvas de nível.	49
Figura 13 – Densidade e sobreposição das imagens do VANT para o primeiro voo (A) e último voo (B)	50
Figura 14 – Demarcação das áreas com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.	51
Figura 15 – Área identificada com geração de processos erosivos, denominada como P01, demonstra em sequência através das imagens A, B e C, o desenvolvimento do processo erosivo.	53
Figura 16 – Perfil do processo erosivo identificado	54
Figura 17 – Delimitação da área que compreende ao processo erosivo.	55
Figura 18 – Ponto 02 (P02) com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.	56
Figura 19 – Ponto 03 (P03) com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.	57
Figura 20 – Pontos 04, 05 e 06 (P04, P05 e P06) com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos voos realizados	39
Tabela 2 – Nível do curso hídrico nos dias de levantamento aéreo	42
Tabela 3 – Tabela sínteses dos erros médios sem GCPs e com GCPs para os quatro voos realizados	43
Tabela 4 – Estimativa de erro dos GCPs do primeiro voo.....	45
Tabela 5 – Estimativa de erro dos GCPs do último voo.	46

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVO GERAL	10
1.1.1	Objetivos Específicos	11
2.	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO	12
2.2	RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS	14
2.2.1	Operação dos reservatórios.....	14
2.2.2	Processos erosivos em margens de reservatórios	17
2.2.3	Impacto das ondas nas margens de reservatórios.....	19
2.2.4	Aspecto da resistência mecânica do solo	20
2.2.5	Deslizamentos em massa	22
2.2.6	Medidas mitigadoras de processos erosivos em reservatórios.....	23
2.3	GEOPROCESSAMENTO.....	25
2.3.1	Levantamento Topográfico	30
2.3.2	Topografia com drones.....	31
2.3.3	Uso de drones no controle a erosão	33
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1	ESTUDO DE CASO	35
3.1.1	Estruturação inicial.....	36
3.1.2	Levantamento aéreo	37
3.1.3	Levantamento topográfico	39
3.1.4	Processamento de imagens.....	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – AUTORIZAÇÃO CERILUZ.....	70
	APÊNDICE B – PLANTA VOO 1 E VOO 2.....	71
	APÊNDICE C – PLANTA VOO 3 E VOO 4.....	72
	APÊNDICE D – RELATÓRIO DO VOO 1	73
	APÊNDICE E – RELATÓRIO DO VOO 2.....	82
	APÊNDICE E – RELATÓRIO DO VOO 3.....	91
	APÊNDICE F – RELATÓRIO DO VOO 4.....	100

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se como um dos países com maior abundância de recursos hídricos aptos a serem explorados para a geração de energia (TOLMASQUIN, 2005). Desse modo, esta é uma característica que desperta o olhar de empreendimentos hidrelétricos, que só aumentam ao longo dos anos (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017).

Contudo, a implementação destes empreendimentos, gera alterações no ambiente, seja na parte hidráulica ou, até mesmo, na formação de reservatórios de água, onde estes favorecem o surgimento de processos erosivos. Sobre isso, Sales et al. (2017) afirmam que as erosões são processos físicos em que há deslocamento de matéria sólida, ou seja, solo, vegetação e rochas, que são arrastados pela ação das chuvas, dos rios, mares, geleiras ou ventos.

No país, o setor de geração de energia elétrica, a maior atenção tem ficado com as ocorrências de erosões em margens de reservatórios de usinas hidroelétricas (COELHO, 2008; SIQUEIRA et al., 2013), uma vez que a matriz energética do Brasil depende altamente desta forma de geração de energia, e esse, corresponde a aproximadamente 70% da capacidade de geração instalada (SIPOT, 2013).

Ademais, para que seja possível compreender o processo erosivo, é preciso monitorar todo o processo no entorno dos reservatórios, o qual é comum ser feito utilizando técnicas de topografia clássica (SIQUEIRA et al., 2013). Contudo, técnicas de posicionamento mais modernas como o GNSS (Global Navigation Satellite System), trouxeram novas possibilidades de monitoramento por topografia, substituindo os equipamentos clássicos por receptores GNSS.

No entanto, o processo padrão de GNSS, utilizando estacas pode ser bastante oneroso, por isso, propôs-se neste trabalho a utilização do método, aliado ao monitoramento das margens de reservatórios de acumulação de água, por meio de VANTs (e/ou Drones), trazendo otimização do processo de mapeamento à campo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade da aplicação dos produtos gerados de imagens oriundas de VANTs (e/ou Drones), no monitoramento dos processos erosivos nas margens de

reservatórios de acumulação de água, resultante do barramento de cursos hídricos para o aproveitamento energético.

1.1.1 Objetivos Específicos

- I. Mapeamento das áreas de interesse;
- II. Monitoramento das áreas de interesse no reservatório de usina hidrelétrica;
- III. Identificar e apresentar a distribuição dos processos erosivos nas margens do empreendimento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

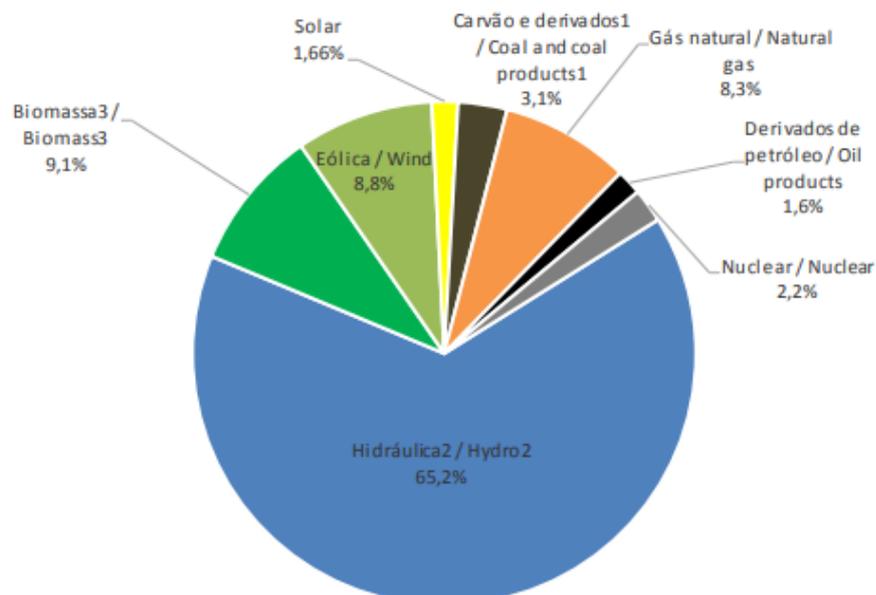
2.1 POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

O território brasileiro é um dos maiores detentores de recursos hídricos, diante disso, apresenta uma crescente demanda pela geração de energia elétrica, que por sua vez, vem promovendo a criação de novos empregos e implantação de empreendimentos hidrelétricos (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017).

À medida que a energia elétrica se tornou mais amplamente utilizada e a tecnologia de geração e transmissão evoluiu, foram construídos empreendimentos hidrelétricos cada vez maiores. Inicialmente, o potencial hidráulico foi explorado principalmente nas regiões Sul e Sudeste, e posteriormente essas regiões foram interligadas (TOLMASQUIM, 2016).

Atualmente, o Brasil contém uma matriz elétrica com derivação majoritariamente renovável, com proeminência para a fonte hídrica que compreende a oferta interna de 65,20%, conforme expõe a Figura 1, ainda o país conta com uma oferta interna total de fontes renováveis de cerca de 84,80% de eletricidade, decorrente da soma da produção nacional e de importações de origem principalmente renovável (EPE, 2021).

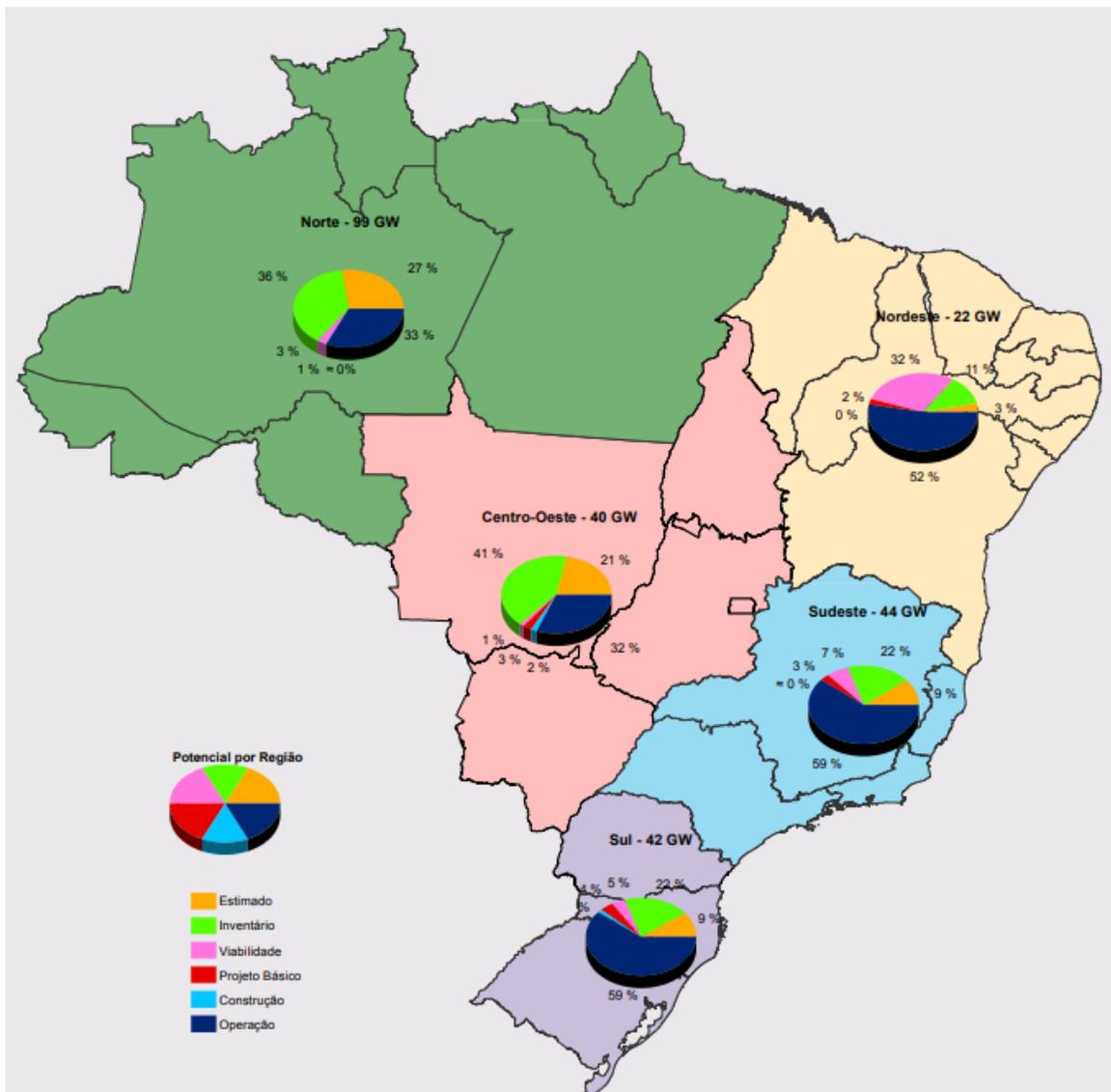
Figura 1 – Composição interna da matriz energética no Brasil por fonte geradora.



Fonte: EPE (2021).

De acordo com o Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT) (2018), as usinas hidrelétricas de território brasileiro, possuem uma geração de energia de 246 gigawatt (GW) (Figura 2) , o que corresponde a cerca de 44% do potencial do país, sendo a região Norte (99 GW) a principal produtora de energia, seguido das regiões Sudeste e Sul.

Figura 2 – Potencial de geração de energia elétrica no Brasil, por região.

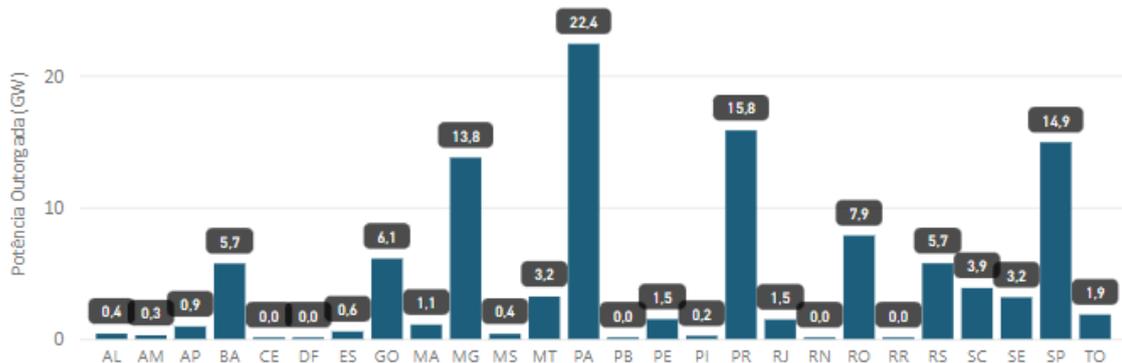


Fonte: SIPOT (2018).

O Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) (2021), apresenta a atual potência outorgada em GigaWatts (GW) por estado (Figura 3), onde o estado do

Pará destaca-se com a maior potência outorgada em 22,4 GW, seguido dos estados do Paraná (15,8 GW) e São Paulo (14,90 GW).

Figura 3 – Capacidade instalada por estado.



Fonte: SIGA (2021).

Ainda em conformidade com SIGA (2021), o Rio Grande do Sul, estado este onde encontra-se a usina hidrelétrica da presente pesquisa, dispõe de 147 empreendimentos contemplados entre construção não iniciada, construção e operação, sendo eles Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH's), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) e Usinas Hidrelétricas (UHE's), com potência outorgada em 5.745.214,20 GW.

No entanto, recentes dados do SIGA (2021), o estado do Rio Grande do Sul, apresenta cerca de 66 novos empreendimentos em estudos para implantação, sendo esses PCH's e UHEs, este número corresponde a um crescimento estimado em 45% de novos empreendimentos hidrelétricos para os próximos anos.

2.2 RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

2.2.1 Operação dos reservatórios

Os reservatórios apresentam características hidráulicas de rios e lagos e, por isso, são considerados como uma transição entre estes ambientes. Além disso, sua circulação é causada pelas entradas e saídas de água advindas dos cursos d'água afluentes, eventuais ligações entre canais e o vento (MEES; ANA, 2020).

A construção de reservatórios tem como uma das principais funções, armazenar água que escoar em um curso d'água, contudo, este armazenamento pode ter distintas finalidades, como beneficiar a sociedade (MEES; ANA, 2020) ou também para a economia, consumo, lazer, geração de energia, entre outras. (CARVALHO et al., 2017).

A construção de reservatórios, tem como principais finalidades, irrigação, abastecimento da população, controle de cheias e geração de energia elétrica (ALVES et al., 2020). Entretanto, é essencial ponderar que a construção de reservatórios, pode ocasionar ao sistema impactos, os quais devem ser analisados e discutidos, levando sempre em consideração as questões ambientais, uma vez que influenciam diretamente no meio ambiente (SILVA, 2019).

Segundo Maia (2006), a construção de um reservatório de água faz surgir uma barreira no curso d'água, fazendo com que a área da seção transversal expanda e a velocidade do fluxo diminua. Quando isso acontece, o material em suspensão se deposita e gera o assoreamento do reservatório, provocando assim, alterações significativas no entorno do empreendimento.

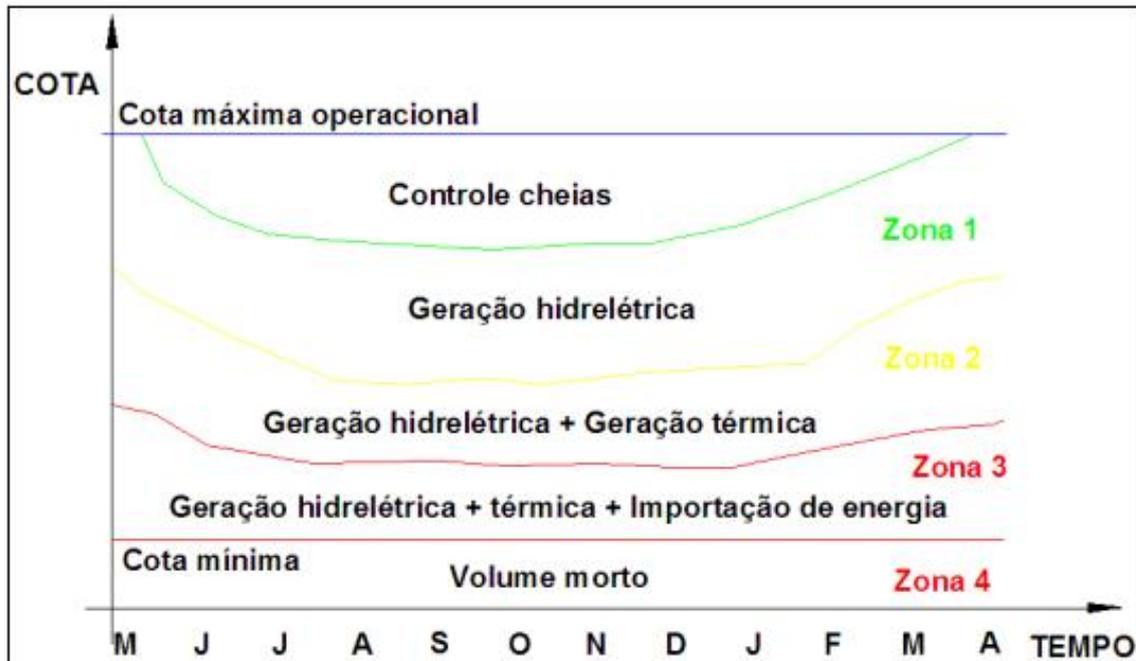
Segundo estudos de Barbosa et al. (2018) e Silva et al. (2020), a construção de reservatórios, influencia significativamente na biodiversidade local, através da perda de habitats naturais, fragmentos do ecossistema, deslocando comunidades, e gerando adversidades sociais e econômicas. Uma vez que, a elevação do nível da água, aumenta perdas pelo aumento do volume evaporado pelo reservatório e interrupção parcial do transporte de sedimentos e nutrientes (SOUZA et al., 2019). Ainda em conformidade com Lima et al. (2021), a alteração na disponibilidade de sedimentos, reduzindo na qualidade do solo.

Os autores ainda pontuam a classificação dos reservatórios, que se dão por suas características físicas ou construtivas, como “capacidade de armazenamento, altura do barramento e tempo de residência médio de uma parcela de água no seu interior” (MEES; ANA, 2020). Além disso, eles são influenciados pela operação de abertura de comportas de fundo das barragens, fazendo com a divisão do volume útil do reservatório fique em diferentes “zonas”, as quais possuem políticas de descargas específicas.

A Figura 4 apresenta um esquema particular de subdivisão em zonas, de um reservatório com dois usos predominantes: a geração de energia e o controle de

cheias. Essas regras de operação são chamadas de curvas-guia e definem as vazões efluentes, ao longo do ano, em função do volume do reservatório.

Figura 4 – Curvas-guia em um Reservatório de Múltiplos Usos



Fonte: Bravo (2010).

Sobre o funcionamento, é possível perceber que, quando o nível da água do reservatório estiver acima da “curva-guia para controle de cheias”, as demandas de geração de energia são atendidas em 100%, assegurando o volume de espera para amortecer futuras cheias.

Entretanto, se o nível da água estiver na Zona 1, a demanda de energia é atendida, já se tiver na Zona 2, a demanda de energia não pode ser atendida somente com geração hidrelétrica, precisando assim de outras fontes de geração de energia.

Na Zona 3, quando se usa a geração hidrelétrica e a geração térmica juntas, percebe-se que não são suficientes para atender a demanda, tendo assim que importar energia de outros sistemas. Por fim, se o armazenamento estiver na Zona 4, não existe geração hidrelétrica e a demanda irá depender da capacidade de geração das usinas térmicas e da disponibilidade de energia desde outros sistemas, sendo possível ocorrer racionamento de energia (MEES; ANA, 2020).

A utilização das curvas-guia permite gerenciar estrategicamente a operação do reservatório, considerando os aspectos hidrológicos e as demandas de energias, com

base na capacidade de armazenamento do reservatório, ou seja, operar estrategicamente o controle de comportas, quanto ao nível da água do reservatório (LEE et al., 2018).

2.2.2 Processos erosivos em margens de reservatórios

As erosões são comuns e de grande intensidade em praticamente todos os países de clima tropical. Entretanto, principalmente na região central do Brasil, onde predomina uma camada extensa de solo desprovido de cobertura vegetal e a distribuição de precipitação com variações sazonais e regionais, assim como de intensidades distintas, sendo um grande volume de chuvas em poucos meses do ano a probabilidade de ocorrer processos erosivos é ainda maior (SALES, 2017).

Para Bertoni, Lombardi e Neto (2010), o processo erosivo é originado por duas forças, uma ativa e outra passiva. A força ativa é proveniente da precipitação, do declive, do comprimento das encostas e do potencial de absorção de água no solo. Já a força passiva é relativa à resistência do solo, que sobre influência da ação erosiva da água e da densidade da vegetação.

Sobre isso, Paiva (2016), caracteriza o processo como natural ou acelerado. A erosão natural advém de circunstâncias naturais, ou seja, não pode ser contida por compreende um ciclo maior que abrange a sedimentação e erosão em circunstância de um equilíbrio dinâmico. Todavia, cabe evidenciar, que os processos erosivos naturais são muito pequenos, quando comparado ao processo erosivo acelerado.

No entanto, a erosão acelerada apresenta tendência de ser mais crítica e complexa para ser eliminada, apesar disso, pode ser reduzida, e dentre seus efeitos mais expressivos, destaca-se a produção exorbitante de sedimentos e deposição destes em reservatórios e enchentes em regiões planas (PAIVA, 2016).

Em solos que encontram-se desprovidos de cobertura vegetal, a erosão acelerada é desfrutada pelo escoamento, ocasionando marcas na superfície do solo, o escoamento ainda pode gerar o aumento da vazão em cursos hídricos (PAIVA, 2016).

Desse modo, estima-se que no Brasil, “as perdas de solo em decorrência de processos erosivos são de 750 milhões de toneladas anualmente” (HERNANI et al., 2002, p. 34) e, somente na região do sul, mais de 40% das áreas manifestam

vulnerabilidade elevada e solos com predisposição a erosão (MANZATTO; JUNIOR; PEREZ, 2002).

Nascimento et al., (2017) descreve que o tipo de cobertura do solo no entorno dos reservatórios está diretamente associado aos processos erosivos, em reservatórios de usinas hidrelétricas de pequeno dimensionamento. Sobretudo, devido ao efeito das ondas associadas e a variação do nível da água do reservatório, sendo os principais processos erosivos os solapamentos da base dos taludes, desconfinamento, movimentos de massa e *piping*, mais conhecido como tubulação, que corresponde a uma *erosão* tubular regressiva.

Na área de influência indireta (AII) de um reservatório de usina hidrelétrica, são prováveis a formação de processos erosivos em decorrência do impacto da precipitação e do escoamento superficial, originando processos erosivos como sulcos, ravinas e voçorocas, no entanto, os referidos processos erosivos encontram-se distantes da faixa de oscilação do nível da água (DEWES, 2019) e, portanto, não serão aprofundados neste trabalho.

Por conseguinte, a operação do reservatório de uma usina hidrelétrica tem potencial para ocasionar em suas bordas a redução da massa de solo, em decorrência da sequência do solo úmido para seco, provocado pela alteração do nível da água.

Além disso, a implicação das ondas originada pela ação do vento e a perda de massa do solo, resulta no assoreamento do reservatório, o qual possui efeitos resultantes como a atenuação da vida útil, sua capacidade produtiva de energia elétrica e possibilidade de insegurança das estruturas construídas no entorno (SALES et al., 2017).

Contudo, algumas vezes a engenharia desconsidera que os cursos hídricos e reservatórios não transportam somente água, mas também sedimentos, os quais estão diretamente relacionados com a estabilidade das margens, por meio de diferentes processos erosivos (PAIVA, 2016). Por isso, a fiscalização das margens dos reservatórios é de extrema importância para identificação de extrações ilegais e prevenção de processos erosivos.

Diante do exposto, verifica-se que os aspectos hidrológicos são elementos importantes na avaliação dos processos erosivos que acontecem nas margens de muitos reservatórios. Assim, é preciso levar em consideração o entendimento do clima, visto que as alterações climáticas podem gerar intensificação ou deflagração dos processos erosivos. Romão e Souza (2017, p. 54) explicam que isso pode ocorrer

em razão do entorno dos reservatórios sofrer ação da variação significativa do nível de sua lâmina d'água e da própria existência dessa lâmina d'água.

Por conseguinte, a operação do reservatório de uma barragem, por exemplo, pode provocar, em suas margens, desestruturação e perda de massa do solo, principalmente pelo umedecimento e secagem, devido as mudanças do nível de água. Além disso, processos erosivos ocorrem devido ao escoamento superficial e ao fluxo interno de água e são intensificados pelo uso indevido das margens e pela exploração inadequada de áreas durante a construção do reservatório (MASCARENHA et. al., 2017).

Além disso, a desestruturação e a consequente perda de massa do solo ocasionam assoreamento dos reservatórios, reduzindo assim a sua capacidade produtiva e sua vida útil. Isso pode resultar em movimentos de massa e instabilidade das estruturas construídas no entorno dos reservatórios.

Diante disso, é importante compreender o comportamento dos solos situados no entorno dos reservatórios quando submetidos às ações da água a fim de entender os processos erosivos.

2.2.3 Impacto das ondas nas margens de reservatórios

As margens dos reservatórios podem ser acometidas por ondas ocasionadas, geralmente, pela ação dos ventos, variação brusca de vazão e movimentações de embarcações, que causam instabilidade (MASCARENHA et. al., 2017).

A formação de uma onda é oriunda de um sistema, quando este é deslocado do seu ponto de equilíbrio, o qual deriva da especificidade da agitação ocasionada pelo meio de propagação (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

De acordo com Fernandez e Fulfaro (2000), a onda atinge diretamente a margem do reservatório, faz um corte na parte inferior e forma um ressalto na parte superior. Os blocos que ficam falhados permanecem no pé da encosta até que se desintegram e as ondas removem os sedimentos.

As ondas mecânicas são geradas a partir de uma perturbação em um meio, propagando-se com certa velocidade. As ondas em meios líquidos, observadas em uma praia ou formadas em um lago natural ou artificial, são principalmente geradas pela ação contínua do vento sobre a superfície/espelho d'água, que se torna o mecanismo perturbador. (MASCARENHA et.al., 2017, p. 65).

Para os autores, quanto mais a coluna líquida é sensibilizada pela ação do vento, o volume de água deslocado se torna maior. Esse ciclo só finaliza quando “o peso relativo dessa massa líquida em trânsito vence a força capilar da água, tornando, então, a onda em gravitacional.” Ademais, quanto mais água chega à crista da onda, o seu próprio peso a impulsiona para o vale da onda e isso se repete até restabelecer o equilíbrio (MASCARENHA et al., 2017, p. 65).

Para Soares et al., (2014), a movimentação das águas superficiais se sucede em virtude da ação das forças tangenciais entre a água e o vento, bem como, por meio da discordância da pressão atmosférica na extensão da superfície das águas do reservatório, ocasionando assim o desenvolvimento das ondas em decorrência ao desequilíbrio hidrostático.

Menezes (2016) ainda descreve que as ondas observadas em mares, lagos e rios, são caracterizadas como irregulares, o que torna o estudo e modelagem das ondas complexo. Dessa maneira, as pesquisas realizadas no Brasil, referentes a previsão das ondas formadas pela ação dos ventos, são realizadas através de métodos e fórmulas empíricas, levando em consideração as bordas livres e desprezando as estimativas e parâmetros de monitoramento dos processos erosivos nas margens de reservatórios (MARQUES, 2005).

Desse modo, é importante compreender cada item no processo de erosão, pois eles variam em cada reservatório. É preciso prestar atenção que:

“na morfologia e geologia da encosta, na topografia e profundidade do reservatório, nas condições meteorológicas, no regime de ondas, na mobilidade dos sedimentos e na erosão do leito de fundo.” (VOLKER; HENRY, 1988 apud MASCARENHA et al., 2017, p. 96).

Ademais, os reservatórios mais afetados pelas ondas são os que tem ciclos de cheias mais frequentes e os que tem ciclos maiores, sendo que podem levar até décadas para apresentar modificações nas encostas. Diante disso, o próximo item busca explicar como acontece a erosão no solo, principalmente na região estudada pela pesquisa.

2.2.4 Aspecto da resistência mecânica do solo

Dentre os fatores do processo de erosão, a natureza do solo é o que determina o quanto o terreno está suscetível à erosão, seja pela sua capacidade de infiltração

da água, ou pela resistência à desagregação e transporte de partículas (SILVA et al., 2009).

Desse modo, Das (2011) afirma que existem diferentes tipos de solo e que possuem propriedades parecidas podem se dividir em grupos e subgrupos. Sobre isso, Pinto (2006), pondera que classificar os solos é de muita valia, a partir do momento em que é possível estimar seu provável comportamento ou até definir qual o melhor método de investigação frente a algum problema.

Sobre os aspectos do solo, a resistência mecânica das encostas e taludes que delimitam o reservatório, é uma questão que precisa ser estudada e que, segundo Reid (1992, p. 78) depende principalmente da “composição granulométrica, estratigrafia, estrutura e umidade inicial do solo, orientação da margem, inclinação e altura do talude.”

Dito isso, sabe-se que ao longo de rios e encostas existem diferentes tipos de extratos depositados que, certamente, vieram de processos antigos de deposição fluvial ou movimentos de massas de solo (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Para Lawson (1985) e Reid (1992), quando há camadas de solo com pouca resistência e também que são recobertas por camadas de material fino e coeso, a probabilidade da erosão ser mais intensa e o recuo da margem mais acelerado é ainda maior.

Ademais, diversos fatores dos taludes, que são as inclinações que limitam um aterro, também contribuem com o entendimento sobre a mecânica do solo. Good (1992) e Reid (1992), salientam sobre a inclinação: quanto mais íngreme o talude ou a encosta, mais instável ela será e, quanto menor a inclinação, melhor as condições de estabilidade do local, fazendo com que diminua riscos de perdas de solo por erosão.

Outro fator exposto pelos autores se refere a altura do talude, que pode influenciar diretamente a quantidade de volume que o solo perde e também a velocidade de recuo das margens (CASADO et al., 2002). De modo geral, quanto mais alto o talude, maior quantidade de solo sofrerá erosão durante as chuvas sucessivas. No entanto, taludes altos só se formam em locais com topografia acidentada, como é o caso de encostas ao longo de reservatórios (REID, 1992).

Além das características do talude, a composição granulométrica, que são as propriedades físicas dos solos como a natureza, forma, tamanho, densidade e arranjo, também influenciam nos processos de erosão do solo. Sobre isso, Stevaux e

Latrubesse (2017, p, 43), afirmam que solos argilosos são menos propensos à erosão, porque apresentam forças de coesão entre as partículas em comparação com solos friáveis (sem coesão).

Em relação ao solo estudado no trabalho, a área pertence à região noroeste do Rio Grande do Sul, onde os solos de origem residual são predominantes. Ademais, este solo corresponde à solos argilosos lateríticos, que se caracterizam por apresentar em sua composição uma parcela considerável de grãos de areia, apresentando atributos semelhantes aos solos classificados como solos arenosos lateríticos.

O solo laterítico caracteriza-se pela origem em lugares bem drenados de locais tropicais úmidos, como produto da transformação da camada superior do subsolo devido a ocorrência de um intemperismo físico e químico (VILLIBOR; NOGAMI, 2009). Para Pinto (2016), tais solos apresentam coloração avermelhada peculiar, devido a sua fração argila ser composta em sua maioria por minerais caulínicos, apresentando elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos.

Para Nogami e Vilibor (1995), a granulometria deste tipo de solo varia entre amplos limites, como argilas a areias com finos argilosos podendo conter até 50% ou não de silte sem apresentar características siltosas.

Por fim, estes fatores nos fazem compreender que a análise da erosão em margens de reservatórios é complexa, visto que são muitos fatores a serem considerados e que podem atuar conjuntamente para o acontecimento, no entanto, Reid (1992), afirma que, o efeito adverso gerado pelas ondas é de longe o mais significativo em relação à perda de solo.

2.2.5 Deslizamentos em massa

Tem se tornado cada vez mais frequente eventos climáticos extremos em nosso país, devido principalmente as rápidas mudanças climáticas. Isso tem provocado inundações, enxurradas e movimentos de massa de diversas categorias.

Deslizamentos, movimentos de massa ou rompimentos de taludes, como pode-se chamar, podem acontecer, segundo a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1998), pela execução de cortes nos maciços.

Um deslizamento é um movimento de descida de rocha, solo, ou ambos, em declive, que ocorre na ruptura de uma superfície — ruptura curva (escorregamento rotacional) ou ruptura plana (escorregamento translacional),

na qual a maior parte do material move-se como uma massa coerente ou semicoerente, com pequena deformação interna (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Geralmente, os deslizamentos acontecem devido a fortes chuvas, alguns incêndios florestais, também pode ser por terremotos, ou alguma causa humana perigosa (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008). Ademais, esses movimentos de massa tendem a ocorrer com maior frequência nas margens de reservatórios, esses são os chamados escorregamentos.

Sobre isso, Carvalho (2018, p. 98) apresenta 4 tipos de deslizamentos, movimentos de massa ou escorregamento:

Devido à inclinação: ocorrem quando a inclinação do talude excede aquela imposta pela resistência ao cisalhamento do maciço e nas condições de presença de água.

Por descontinuidades: o contato solo-rocha constitui, em geral, uma zona de transição entre esses materiais. Quando ocorre um contraste de resistência acentuado entre eles, com inclinação forte e, principalmente, na presença de água, a zona de contato pode condicionar a instabilidade do talude.

Por percolação de água: ocorrem devido à percolação de água, que são ocorrências que se registram durante períodos de chuva quando há elevação do nível do lençol freático ou, apenas, por saturação das camadas superficiais de solo. Quando os taludes interceptam o lençol freático, a manifestação, eventual, da erosão interna pode contribuir para a sua estabilização.

Em aterro: quando construídos aterros sobre rochas resistentes, os aterros se mostram, em geral, estáveis por longo tempo. No caso de aterros sobre solos moles, como argila marinha ou argila orgânica, o seu projeto e construção devem obedecer a técnicas adequadas, de modo a impedir que ocorram recalques exagerados, deixando as pistas com ondulações e provocando rompimentos ou deslizamentos de canaletas, bueiros e galerias.

Diante disso, entende-se que existem diferentes tipos de deslizamentos, por isso, compreender as características de cada um e, principalmente, o tipo específico de risco em cada área, é fundamental para poder planejar ações adequadas que possam diminuir o risco de danos. Ademais, Highland e Bobrowsky (2008, p. 39) afirmam que: “o tipo de deslizamento determinará a velocidade potencial do movimento, o provável volume de deslocamento, a distância de deslocamento, como os possíveis efeitos do deslizamento e as medidas mitigadoras apropriadas a serem consideradas.”

2.2.6 Medidas mitigadoras de processos erosivos em reservatórios

Como já foi apresentado anteriormente, obras como a construção de hidrelétricas, por exemplo, podem causar desequilíbrios ecológicos de grandes

proporções, sejam eles a curto, médio ou longo prazo. Contudo, sabe-se que temos uma necessidade constante de gerar energia, produzir alimentos, ter momentos de lazer, e para isso utilizamos diversos recursos hídricos. Desse modo, o nosso esforço enquanto cidadãos conscientes, é no sentido de reduzir, de forma significativa, os danos causados aos recursos hídricos.

Se por alguma razão não for possível evitar ou impedir os danos ambientais, há métodos, que podem ser implantados para atenuar os impactos diretos ou indiretos. Tais métodos de monitoramento, são utilizados para avaliar a magnitude dos danos causados e tomar decisões pertinentes, alguns destes métodos, incluem técnicas de sensoriamento remoto, análise de imagens e monitoramento de mudanças topográficas.

Fernandes (1990) Rocha e Souza Filho (1996) e Rocha (2002) citam três principais métodos a serem utilizados no monitoramento, sendo todos feitos com medições diretas no campo: método dos pinos, método das estacas e método das perfilagens sucessivas.

O Método de Pinos utilizado por Hooke (1980), Rocha e Souza Filho (1996) consiste na “inserção manual de pinos na face das margens, mantendo uma porção do comprimento total dos pilotos exposta, de modo que o recuo da margem possa ser mensurado a partir de campanhas de medição sucessivas” (BRADBURY et al., 1995; CORREA; CURRAN, 2001; FILHO, 2009; GATTO, 1988; HAIGH, 1977). Ademais, os pinos tem características conforme a área e a distribuição espacial na margem variam de acordo com tipo e magnitude dos processos erosivos atuantes.

De modo geral, a quantidade de vezes que se mede os pinos de erosão está diretamente ligada à velocidade de evolução das margens monitoradas. Entretanto, tem-se vantagens para o uso deste método, seja pela sua simplicidade, facilidade na construção e instalação, pelo baixo custo de implantação, pela flexibilidade de monitoramento de taludes de diferentes fisionomias e também pela dispensa de energia elétrica para o seu funcionamento (LAWLER, 1993; RUBIO, 2014). Sobre as desvantagens, a principal é fato de que o método só pode ser instalado em taludes com material fino.

Já o Método das Estacas, empregado por Rocha e Souza Filho (1996) e inicialmente por Hughes (1977), não é tão utilizado quanto o dos pinos, mas consiste na instalação de estacas de madeira posicionadas no topo do talude. “A cravação é realizada em linhas a uma distância conhecida desde a crista do talude e numa faixa

com largura variável e proporcional à velocidade de recuo das margens, que pode variar de 2 a 6 metros” (GATTO, 1988, p. 97).

Este método só permite a quantificação do recuo da borda do barranco e o resultado do processo se dá pela distância entre as estacas e a medida da margem. Ademais, ele faz uma avaliação bastante subjetiva da magnitude dos processos erosivos atuantes na face do talude e, por isso, recomenda-se utilizá-lo como uma ferramenta auxiliar a outros métodos.

O terceiro é o Método das Perfilagens Sucessivas, que também foi utilizado por Rocha e Souza Filho (1996) e nos mostra o levantamento de perfis nas margens monitoradas, deixando nítido a evolução progressiva de seus perfis. Ele é utilizado como maneira gráfica para evidenciar a evolução da face do barranco e morfologia da seção transversal, ao longo do período monitorado.

Desse modo, este método permite a caracterização espaço-temporal do recuo da margem, em relação a um marco topográfico conhecido (BORGES, et al., 2017) e o levantamento dos dados pode ser feito com réguas graduadas ou trena métrica. (CORREA; SOUZA FILHO, 2009).

A vantagem deste método é o seu baixo custo de levantamento e obtenção de dados. Além disso, quando se combina ele com o método dos pinos, a avaliação é ainda mais satisfatória (WOLMAN, 1959). Uma desvantagem reside no fato de que se obtêm somente a representação da morfologia da face do talude.

Em relação aos métodos, para escolher com qual método se irá trabalhar ou ainda se fará a união de alguns, é preciso considerar as condições de cada local e não as especificações técnicas de cada um. Para tanto, é necessário considerar a velocidade da água, que indica a capacidade erosiva do fluxo, além disso, estudo prévio das condições hidráulicas e do tipo de material do local monitorado.

2.3 GEOPROCESSAMENTO

Existe uma grande influência das inovações tecnológicas em nossa vida, principalmente nas informações sociais e espaciais (SANTOS, 2017). Desde os tempos remotos até a atualidade, as informações têm sido apresentadas de forma gráfica pelos antigos cartógrafos, contudo, com a evolução da tecnologia e principalmente do sensoriamento remoto, tornou-se possível obter, armazenar e

representar informações geográficas em ambiente computacional, abrindo espaço para o surgimento da Geomática (ALVES et al., 2019).

Historicamente, a tecnologia avançou e foi tornando-se parte dos sistemas de monitoramento e obtenção de dados geográficos. Nos anos 1970, surgiu a expressão Geographic Information System (GIS), que só era usado por grandes corporações devido ao seu custo (ROSA, 2013).

Na década de 1980 os sistemas de informação geográfica tiveram um avanço, os computadores pessoais ficaram mais modernos, diminuiu-se os custos e se desenvolveu ambientes mais amigáveis e interativos. A década de 1990 consolidou definitivamente o uso da tecnologia de microinformática como ferramenta de apoio à tomada de decisão, alcançando o mercado final (ROSA, 2013).

No decorrer da Era Contemporânea, as grandes corporações consolidaram-se e começaram a utilizar a intranet, além disso, nessa época surgiram aplicativos como Google Maps, Google Earth e Google Street View, os quais passaram a fazer parte do cotidiano das pessoas (BARROS et al., 2016).

Ademais, neste período destaca-se diversas tecnologias que auxiliaram no campo das bases de dados e das análises geográficas: a cartografia, o sensoriamento remoto, os sistemas de informação geográfica (GIS) e o GPS. No Brasil estas tecnologias são conhecidas como: Geomática, Geoprocessamento, Sistema de Informação Geográfica e mais recentemente Geotecnologias.

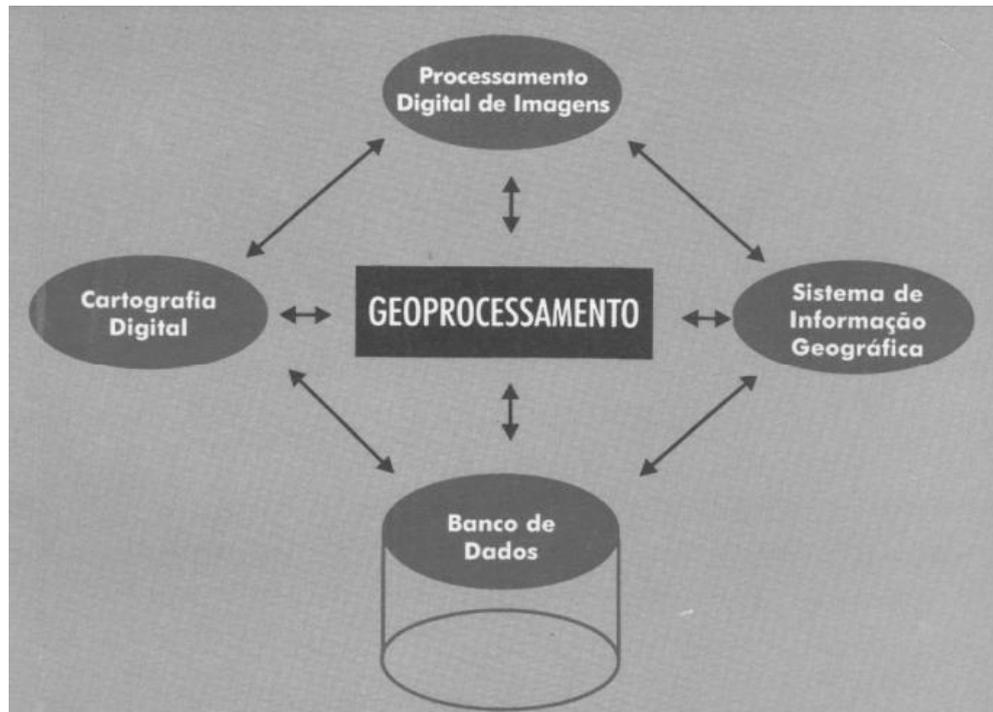
Para Rosa (2013, p. 45), as geotecnologias são um conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica, que são compostas por soluções de hardware, software e peopleware. Dentre as geotecnologias se destaca: a cartografia digital, o sensoriamento remoto, o sistema de posicionamento global e o sistema de informação geográfica (ROCHA, 2000).

Dentro do desenvolvimento destas novas tecnologias, o termo geoprocessamento é muito utilizado. Curiosamente, este termo é usado quase que exclusivamente no Brasil e aqui no país é usado como sinônimo de Geomática. No entanto, para Rosa (2013) geoprocessamento pode ser definido como:

O conjunto de tecnologias destinadas a coleta e tratamento de informações espaciais, assim como o desenvolvimento de novos sistemas e aplicações, com diferentes níveis de sofisticação. Pode ser aplicado a profissionais que trabalham com cartografia digital, processamento digital de imagens e sistemas de informação geográfica. (ROSA, 2013, p. 59).

A Figura 5, demonstra as principais atividades envolvidas e inter-relacionadas em geoprocessamento, independente do software utilizado.

Figura 5 – Principais atividades envolvidas em Geoprocessamento



Fonte: Rosa (2013, p. 59).

Camara et al., (2001), também define geoprocessamento como:

uma tecnologia ou conjunto de instrumentos necessárias para obtenção, manipulação e armazenamento de dados georreferenciados para transformá-los em informação relevante através de imagens gráficas. A utilização dos dados georeferenciados possibilita planejar e monitorar questões ligadas ao espaço físico geográfico através de arquivos digitais contendo mapas, gráficos, tabelas, entre outros. (CAMARA et. al., 2001, p.3).

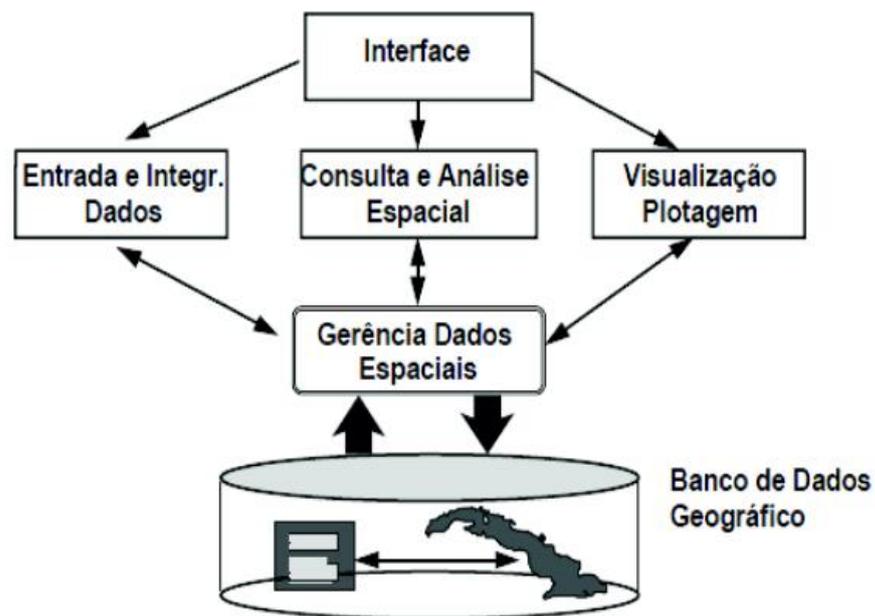
Este uso de computadores para o manuseio de uma grande quantidade de dados levou ao desenvolvimento dos chamados "Sistemas de Informação", ou seja, ambientes utilizados para armazenar e analisar dados. Um caso específico deste sistema se chama SIG, ou seja, Sistema de Informação Geográfica.

O SIG é de extrema relevância para o geoprocessamento, uma vez que é um "sistema destinado à aquisição, armazenamento, manipulação, análise, simulação, modelagem e apresentação de dados referidos espacialmente na superfície terrestre, integrando diversas tecnologias" (ROSA, 2013, p. 60).

Seu uso teve início no Brasil na década de 1980, tendo tido como precursor o SAGA (Sistema de Análise Geo-Ambiental), desenvolvido na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente tem-se diversos SIGs disponíveis no mercado, incluindo alguns de distribuição gratuita.

Na Figura 6, é apresentado o fluxograma da estruturação do SIG, onde demonstrar desde a interação com o usuário até a geração de bancos de dados.

Figura 6 – Estrutura do SIG



Fonte: BISI; SILVA (2018, P. 74)

Fitz (2008) define SIG como:

Um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido (FITZ, 2008, p. 64).

Desse modo, as informações georreferenciadas processadas pelo sistema, possibilitam maior facilidade, segurança e agilidade nas atividades humanas, referentes ao monitoramento, planejamento e tomada de decisão, relativas ao espaço geográfico.

O SIG possui três aplicações fundamentais na área da geográfica, sendo a primeira como instrumento na elaboração de mapas, criação e visualização de dados espaciais, a segunda como suporte para análise espacial e fenômenos e para

integração de informações geoespaciais e por último, como banco de dados geográficos, com fundação de armazenamento e recuperações de informações espaciais (PIROLI, 2010)

Ao definir um SIG para fazer parte do projeto, é necessário observar alguns aspectos relativos ao hardware, como:

Número de usuários, forma e nível de compartilhamento dos dados, desempenho necessário para atender as demandas, quais hardwares suportam quais softwares, relações custos desempenho ou custo benefício, previsão de expansão do sistema, centralização ou descentralização das bases de dados e interfaces com outros sistemas (PIROLI, 2010, p. 67).

Portanto, o principal objetivo de um SIG é servir como instrumento para todas as áreas que fazem uso de mapas, pois permite integrar em uma única base de dados informações de vários estudos, combinando dados de diferentes fontes e gerando novos tipos de informações (DA SILVA; ZAIDAN, 2004). Ademais, o SIG permite aos usuários e/ou profissionais integrarem seus dados e métodos permitindo-os a elaboração de mapas e a busca e análise de vários dados.

Quanto ao potencial do geoprocessamento e dos SIGs para a sociedade em geral, tem-se infinitas possibilidades e importância, principalmente à área ambiental.

Segundo Piroli (2010), os SIGs podem ser usados para algumas finalidades:

Análises geográficas, processamento digital de imagens, modelagem numérica do terreno, geodésia e fotogrametria, agricultura de precisão, produção cartográfica, modelagem de redes, mapas cadastrais e ambientais, planejamento urbano, rural, ambiental e de negócios (PIROLI, 2010, p. 69).

Além disso, permitem exibir informação sobre redes de transporte, hidrografia, características de população, atividade econômica, jurisdições políticas, e outras características dos ambientes naturais e sociais, tudo pelo banco de dados (LONGLEY et. al., 2013).

Ou seja, é um sistema valioso que pode auxiliar por exemplo, na administração de riscos e de recursos ambientais, no planejamento urbano, planejamento de emergência, entre outros. Concomitante, órgãos do governo e empresas tem utilizado estas ferramentas para análise de recursos ambientais, planejamento de uso do solo e de infraestrutura, análise de bens imóveis, marketing, análise demográfica entre outras (MIRANDA, 2005).

Por fim, sabe-se que para questões ligadas ao meio ambiente, as tecnologias de informação geográfica são muito usadas, principalmente para monitorar regiões distantes, calcular impactos ambientais, encontrar focos de incêndios e também na fiscalização de áreas desmatadas, entre outros (ROSA, 2013).

2.3.1 Levantamento Topográfico

A Topografia é uma das áreas em que se trabalha com medidas, sejam elas lineares ou angulares, feitas sobre a superfície da Terra, sendo que, a partir destas medidas se calcula coordenadas, áreas, volumes, entre outras variáveis (KAHMEN; FAIG, 1988).

De acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1994), Norma Brasileira para execução de Levantamento Topográfico, o levantamento topográfico é definido por:

Conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas (NBR 13133, ABNT, 1994, p.3).

Ademais, é durante um levantamento topográfico que são determinados pontos de apoio, sejam eles planimétricos, altimétricos ou planialtimétricos, e a partir destes, são feitos os demais pontos que permitem representar a área levantada (KAHMEN; FAIG, 1988).

Araújo (2014), nos apresenta a diferença de cada tipo de levantamento. O Levantamento Planimétrico é quando são feitas leituras de ângulos e distâncias no campo, determinando pontos e feições do terreno que serão projetados sobre um plano horizontal de referência através de suas coordenadas X e Y.

Por outro lado, o Levantamento Altimétrico é feito a partir da tomada de ângulos ou distâncias, determinando as feições morfométricas do terreno, estando relacionados a um plano de referência vertical ou de nível através de suas coordenadas Z vinculadas às X e Y. E por fim, quando abrangemos as duas outras espécies de levantamentos e se unem os dados adquiridos, a este é dado o nome Levantamento Planialtimétrico (ARAÚJO, 2014).

Sobre isso, existem duas etapas para fazer o levantamento topográfico, sendo a primeira a de estabelecimento do apoio topográfico e a segunda de levantamento

de detalhes. Sobre isso, de acordo com a NBR 13133 (ABNT 1994, p.4) os pontos de apoio são definidos por: “pontos que amarram ao terreno o levantamento topográfico e, por isso, devem ser materializados por estacas, piquetes, marcos de concreto, pinos de metal, tinta, dependendo da sua importância e permanência.”

É por meio da topografia que se consegue levantar informações com qualidade, principalmente em pequenas áreas, como no caso de áreas urbanas, por exemplo, em que os levantamentos topográficos fornecem as bases de dados para os projetos de mapeamento.

Contudo, muitas vezes podem acontecer erros em um trabalho topográfico, uma vez que por melhores que sejam os equipamentos, o operador e os ajudantes este sempre existe. Dessa forma, Brandalize (2008, p. 106) aponta alguns passos principais a serem seguidos na realização de um serviço de topografia, sendo eles:

- (1º) Tomar conhecimento da área de trabalho/estudo;
 - (2º) Qual o tipo de serviço que deve ser executado;
 - (3º) Utilizar uma caderneta de campo para eventuais anotações ou descrições que precisem ser feitas;
 - (4º) Adquirir informações com o proprietário ou moradores do local (se possível);
 - (5º) Quais equipamentos são necessários para o desenvolvimento do trabalho;
 - (6º) Executar o levantamento com excelência, visando atingir a descrição mais próxima do real que seja possível;
 - (7º) Realizar o trabalho visando à otimização o tempo despendido para a execução do mesmo;
 - (8º) Utilizar o software adequado para o tratamento dos dados em escritório;
 - (9º) Apresentar o trabalho da melhor forma possível e de fácil compreensão.
- Sabendo destes passos, para realizar levantamentos topográficos existem basicamente três métodos, sendo eles, por irradiação, por intersecção e por caminhamento.

2.3.2 Topografia com drones

Os levantamentos planialtimétricos são necessários para a realização de projetos ambientais e civis, tornando possível visualizar acidentes geográficos e de outras características do relevo, evidenciando superfícies íngremes e planas, por exemplo.

O uso de drones ou veículos aéreos não tripulados (VANT), tem aumentado muito na área da topografia, principalmente em razão das suas diversas vantagens perante a topografia convencional. Para Eisenbeiss e Zhand (2006, p. 56), o termo VANT refere-se “a qualquer veículo aéreo não tripulado, tendo como premissa que o controlador da aeronave esteja em uma base no solo.”

Segundo Pereira (2017), o drone vem sendo explorado desde a segunda guerra mundial, projetado inicialmente pela Alemanha como um míssil guiado, sofrendo ao longo dos anos várias mudanças e melhorias, fazendo com que seja usado de maneira mais ampla.

Sobre isso, Carvalho (2018, p. 46) afirma que “o tempo de um levantamento planialtimétrico efetuado com um drone é três vezes menor que o utilizado com métodos convencionais”. Ainda que, sua utilização trouxe algumas mudanças, que são, segundo a Droneng (2019), a facilidade na operação, a diminuição dos custos e também das equipes em campo, além de maior velocidade de aquisição de dados, tendo grande vantagem sobre o método tradicional.

Por conseguinte, para a realização de levantamentos de grandes áreas com obstáculos, destacam-se tanto a utilização de drones, com ou sem pontos de controle GNSS (Global Navigation Satellite System), quanto dos drones RTK (Real Time Kinematic), que também podem ser utilizados com ou sem os pontos de controle GNSS.

O método de levantamento GNSS/RTK utiliza sistema geodésico de coordenadas para determinação de um ponto na superfície da Terra. Sendo que a sigla GNSS se refere ao sistema de cobertura de satélites utilizada pelo equipamento, sistema esse que utiliza vários outros sistemas, tais como, GPS, GLONASS (Global Navigational Satellite System), GALILEO e BEIDOU, citados como os principais (DRONEG, 2020)

Segundo estudo feito por Droneng (2020), a diferença do uso do drone para a topografia convencional é que com o drone percebe-se maior produtividade, pois há uma grande diferença no tempo de execução, que é menor. Além disso, afirma que seja também pelo nível de detalhamento do terreno, pois é obtida uma nuvem de milhares de pontos, sendo assim, a representação é mais fiel ao terreno, trazendo maior qualidade ao seu produto final. Outro motivo é o cálculo de volume mais preciso, pois devido ao detalhamento do terreno maior, o modelo apresentado da superfície do terreno é mais denso, sendo possível coletar nuances no terreno.

Dentre as vantagens apontadas no estudo sobre a topografia com drones, o mesmo autor traz a possibilidade de sua realização de forma remota, sem precisar sair do local e percorrer o terreno para capturar as informações.

Contudo, uma desvantagem é que não é possível realizar a locação do terreno apenas com os drones, pois a locação é um tipo de projeto em que já se possui as

coordenadas dos pontos e através destas coordenadas se materializa estes pontos no terreno.

2.3.3 Uso de drones na identificação de processos erosivos

Uma parcela significativa dos solos do planeta vem sofrendo com a degradação, sobretudo, devido aos processos de erosivos. Neste sentido, o monitoramento ambiental é importante e deve estar inserido no contexto da gestão ambiental, tomada de decisões e suporte à fiscalização.

Diante disso, as geotecnologias são ferramentas fundamentais para o gerenciamento e monitoramento da superfície terrestre. Na última década, imagens aéreas obtidas com drones têm proporcionado novas visões do ambiente produtivo, auxiliando na tomada de decisão sobre práticas para aprimorar os sistemas de produção, focado principalmente no aumento da produção e na redução de custos (FRACHINI et al., 2018).

Em razão disso, Silva (2019) aborda que os vants ou drones passaram a ser uma ferramenta utilizada principalmente na agricultura e nas áreas ambientais, para facilitar processos de mapeamento e, principalmente, evitar e/ou diminuir casos de erosão no solo, visto que a erosão é uma ação que pode causar grandes prejuízos.

Ademais, os drones não podem evitar a erosão, contudo, o mapeamento feito com a utilização deles pode ajudar no planejamento e agir estrategicamente para evitar muitos processos de erosão (ROCHA et al., 2021).

Além disso, existe também a possibilidade de modelagens digitais com drones, sendo amplamente utilizados, por exemplo, no estudo comparativo de grandes áreas para monitoramento de queimadas, ocupação urbana, plantio dentre outros (SOUZA, 2018). Por outro lado, o seu resultado no monitoramento de pequenas regiões não é tão comum devido a baixa resolução de satélites e a distância entre a área de estudo e os sensores.

Com o surgimento do VANT, a resolução dos modelos digitais melhorou e possibilitou a análise de regiões menores, mas com maior detalhe. Eles são equipados com sistemas globais de navegação, unidades de medição inercial que, associados a outros sensores, conseguem determinar a localização espacial com muito baixo custo de aquisição (BRAZ et. al., 2015).

Além disso, esta tecnologia já é usada para gerar informações diversas, como

para medir o volume de reservatórios, determinar a quantidade de espécies vegetais em certa região, identificar falhas em lavouras e também para estimar produções agrícolas, por meio do cálculo de biomassa.

Sobre o assunto, em 2020 foi dado início ao desenvolvimento de um estudo no Instituto Agronômico (IAC-APTA), vinculado à Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo, em Campinas, o qual utiliza imagens aéreas, geradas por VANTS, para calcular a erosão do solo onde há culturas instaladas.

O uso de drones se acentua cada vez mais nesta área, principalmente por mostrar-se uma ferramenta mais ágil, de menor custo e que gera um baixo impacto ambiental (BERTOLDO et. al., 2019).

Perante a isso, todas essas características justificam a utilização de drones para a parte prática da pesquisa. Ademais, o que mais nos chama a atenção é pelo fato de ter tanta efetividade quanto o método convencional, mas ter um custo bem menor. Para seguir a pesquisa, iremos entender os materiais e métodos utilizados e como o trabalho foi desenvolvido, a partir do referencial teórico aqui exposto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na usina hidrelétrica PCH RS-155 (28°18'45.80"S; 53°53'46.06"O), na cidade de Ijuí, situada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, em parceria com a Cooperativa de Geração de Energia e Desenvolvimento Social LTDA – CERILUZ GERAÇÃO.

A usina PCH RS-155 está em funcionamento desde agosto de 2012, é composta por duas turbinas com capacidade de geração de 5,982 MW. Considerada eficiente pela empresa, pois sua área de alagado é de apenas 1,8 hectares fora do leito natural do rio, via de regra, apresentando baixo impacto ambiental ao seu entorno.

Para elaboração do presente trabalho foi utilizado da aplicação de duas tecnologias, as quais foram alcançadas por meio de 04 (quatro) levantamentos aéreos em um período de 09 (nove) meses e um levantamento dos Ground Control Points (GCP) com equipamento GNSS RTK.

O mapeamento na área a usina hidrelétrica PCH RS-155, foi realizado com veículo aéreo não tripulado (VANT) ou comumente conhecidos como “drones” em 4 (quatro) momentos, sendo o primeiro em 20 de maio de 2020, o segundo em 16 de julho de 2020, o terceiro em 17 de outubro de 2020 e o último em 20 de janeiro de 2021, já o levantamento dos GCP por meio de GNSS RTK foi realizado no dia 14 de julho de 2021.

No contexto do presente estudo, ainda foram utilizados os dados históricos fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), uma vez que a instituição disponibiliza informações fluviométricas referentes à usina hidrelétrica PCH RS-155. A análise dos dados fluviométricos da usina hidrelétrica PCH RS-155 permitirá uma compreensão mais aprofundada das variações do fluxo de água. Essas informações são de suma importância para o estudo de aspectos relacionados à disponibilidade hídrica.

3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O estudo compreendeu em 04 (quatro) etapas para o seu desenvolvimento, sendo elas, a estruturação inicial, levantamento aéreo de monitoramento, levantamento topográfico e processamento de imagens.

As respectivas etapas compõem atribuições inerentes que devem ser realizadas através de procedimentos contínuos, as quais serão especificadas e descritas a seguir.

3.1.1 Estruturação inicial

A primeira etapa corresponde ao reconhecimento da área, a qual foi realizada através de visita *in loco*, seguido da análise da área com auxílio do *software Google Earth Pro®*. As imagens de satélites presente no *Google Earth Pro®* são atualizadas anualmente, com isso, foi possível delinear a área de interesse.

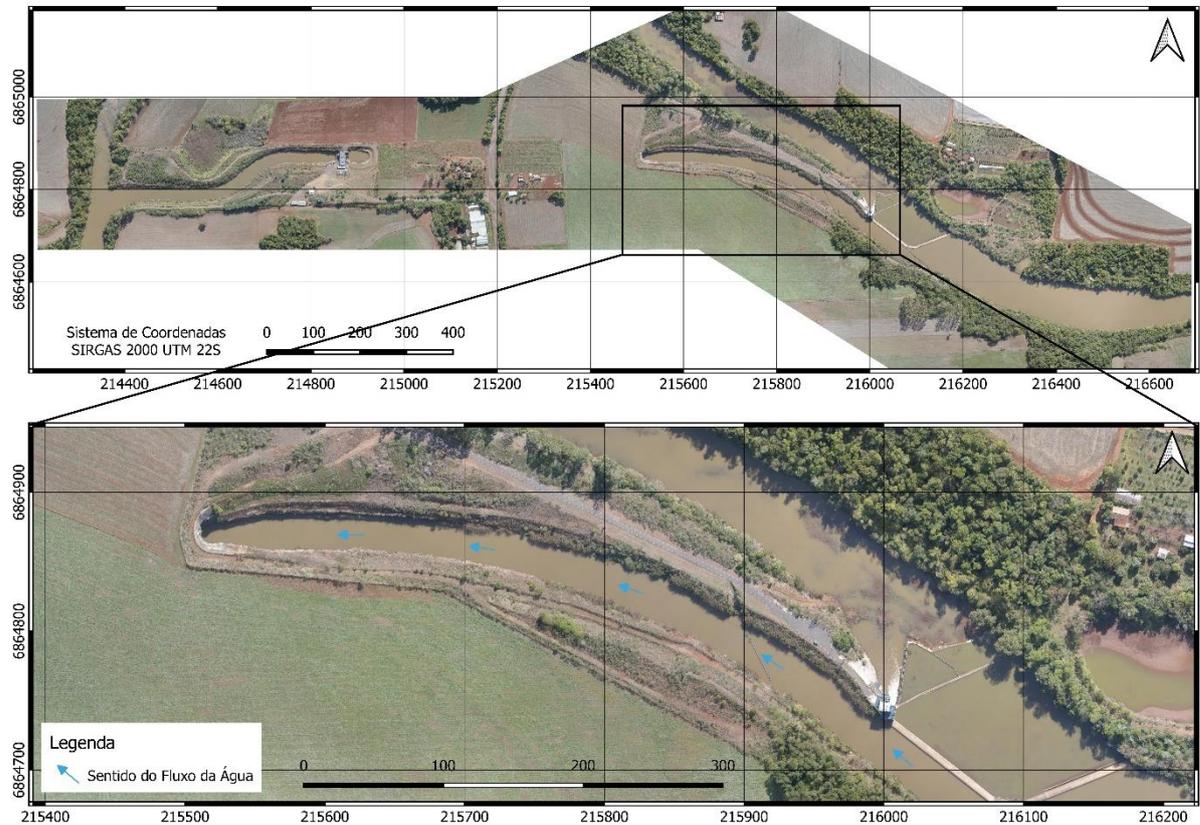
A área compreende uma usina hidrelétrica que apresenta uma singularidade, a mesma foi construída com um túnel adutor escavado em rocha, o qual possui uma profundidade de 40 metros e atravessa a rodovia RS-155. Esse túnel adutor liga a barragem a casa de máquinas.

Como o túnel adutor foi escavado em rocha, (Figura 7), não será alvo do presente estudo. Portanto, a área de interesse neste trabalho será a montante do início do túnel adutor, onde foram observadas áreas com parcelas sem vegetação e com presença de mata ciliar adjacente ao curso hídrico.

Via de regra, regiões com presença de maciços rochosos não irão difundir processos erosivos oriundos da influência do reservatório.

Na Figura 7, a seguir, demonstra a orthomosaic da área, com detalhamento do túnel adutor, indicando também o sentido do fluxo da água.

Figura 7 – Orthomosaic resultante do primeiro levantamento, demonstrando a área do estudo e detalhamento do túnel adutor e indicação do sentido do fluxo da água



Fonte: Autora (2022).

3.1.2 Levantamento aéreo

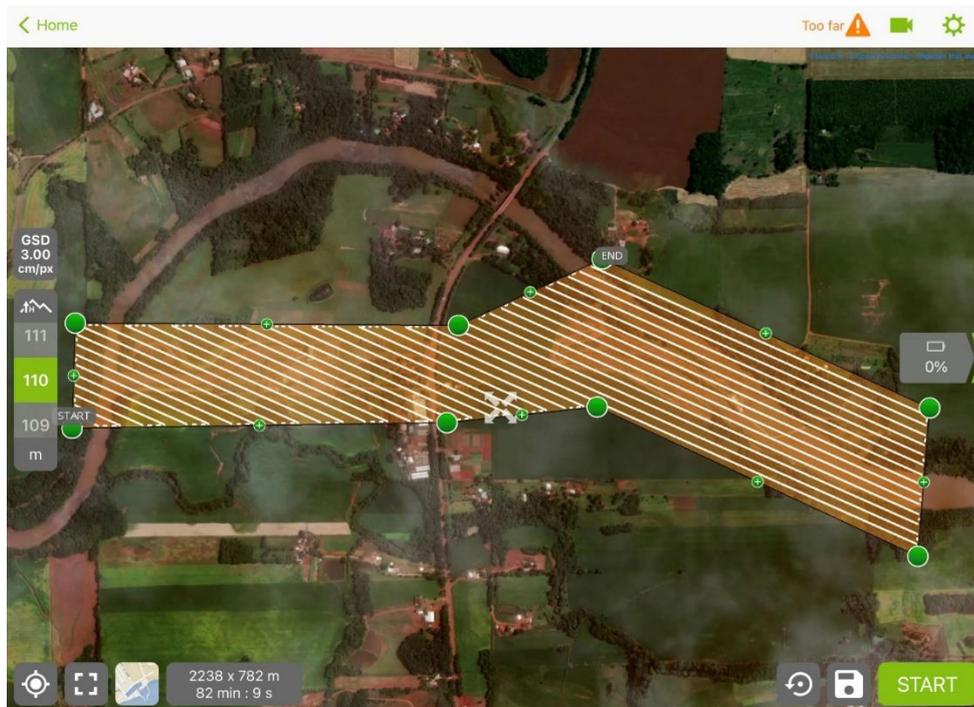
Primeiramente, realizou-se um levantamento aéreo da área de interesse, com a finalidade de obter maior entendimento para estudo das especificidades das regiões abordadas.

Para a realização do levantamento aéreo, foi utilizado um VANT da marca DJI modelo *Phantom 4 PRO*, com uma câmera de 20 megapixels e capacidade de voo de 25 a 30 minutos por bateria. Além disso, conta com um posicionamento por satélite, GPS e GLONASS. A utilização deste equipamento foi em decorrência da disponibilidade do mesmo.

Para o mapeamento com VANT, necessita-se do planejamento prévio, o qual comumente é realizado por meio de aplicativos de aparelho celular, todavia, o mesmo deve ser compatível com o equipamento (Figura 8). Portanto, foi utilizado o aplicativo *PIX4Dcapture*. A utilização do aplicativo possibilitou a automatização do processo de

captura das fotografias aéreas por meio de plano de voo previamente traçado dentro do aplicativo, viabilizando a sobreposição das imagens obtidas da área.

Figura 8 – Interface do software PIX4Dcapture e o plano de voo da área



Fonte: Autora (2022).

No aplicativo, foi realizado o dimensionamento da área de interesse, conforme estruturação inicial do projeto.

A configuração da sobreposição das imagens foi de suma importância para o estudo, visto que garante uma maior confiabilidade dos dados para o processamento das informações. Sendo essa configuração responsável pela determinação de profundidade, distância e altura de objetos existentes na área.

A sobreposição é dividida em laterais e longitudinais, no presente caso, considerou-se a sobreposição lateral em 85% e longitudinal em 85%.

Nas configurações do software, foram determinados outros parâmetros de voo, tais como altura do VANT em relação ao solo, velocidade, número de imagens e número de *pixels*, o qual este último influencia na resolução das fotografias capturadas durante o voo. Isto é, quanto menor o pixel por centímetro quadrado, melhor será a resolução das fotografias obtidas. A Tabela 1 aponta os parâmetros utilizados no planejamento dos voos.

Tabela 1 - Dados dos voos realizados

Nº Voo	Área	Velocidade	Altitude do Voo	Resolução	Nº de Fotos
01	1.490.000 m ²	15 m/s	193 m	4,77 cm/pix	636
02	1.090.000 m ²	15 m/s	139 m	3,39 cm/pix	974
03	1.600.000 m ²	15 m/s	199 m	4,81 cm/pix	777
04	1.280.000 m ²	15 m/s	176 m	4,34 cm/pix	671

Fonte: Autora (2022).

Após a execução dos voos e aquisição das fotografias aéreas, totalizou-se a aquisição de 3.058 imagens.

3.1.3 Levantamento topográfico

O levantamento topográfico na usina tem como finalidade a coleta de pontos de controle (GCPs - *Ground Control Points*) e verificação. Ambos os GCPs podem ser de diversas formas e tamanho, desde que possam ser visualizados e identificados posteriormente no processamento das imagens.

Os GCPs podem ser divididos em artificiais ou naturais (pré-existent), sendo os naturais pontos fixos na área, como o meio fio, pinturas em asfalto e outros elementos. Já os pontos artificiais são marcações executadas pelo homem antes do levantamento topográfico e do voo.

O levantamento topográfico foi realizado com conjunto de receptores GNSS-RTK Topcon GR3 L1/L2 e compreendeu na coleta dos GCPs dentro da área de estudo, de maneira abrangente em toda a extensão da usina hidrelétrica, obtendo-se as coordenadas (latitude, longitude e altitude) conhecidas, as quais foram utilizadas no processamento das imagens capturadas pelo VANT.

Os GCPs com as coordenadas conhecidas tiveram por finalidade o aumento na precisão posicional do produto final do processamento das imagens.

O ponto ocupado pela base do conjunto GNSS-RTK foi ajustado utilizando o serviço online para pós-processamento de dados GNSS (IBGE-PPP) diretamente na coletora do GNSS RTK. Em seguida, os demais pontos coletados foram ajustados utilizando as coordenadas precisas da base. Tal correção é extremamente relevante para conferir maior precisão aos dados obtidos.

3.1.4 Processamento de imagens

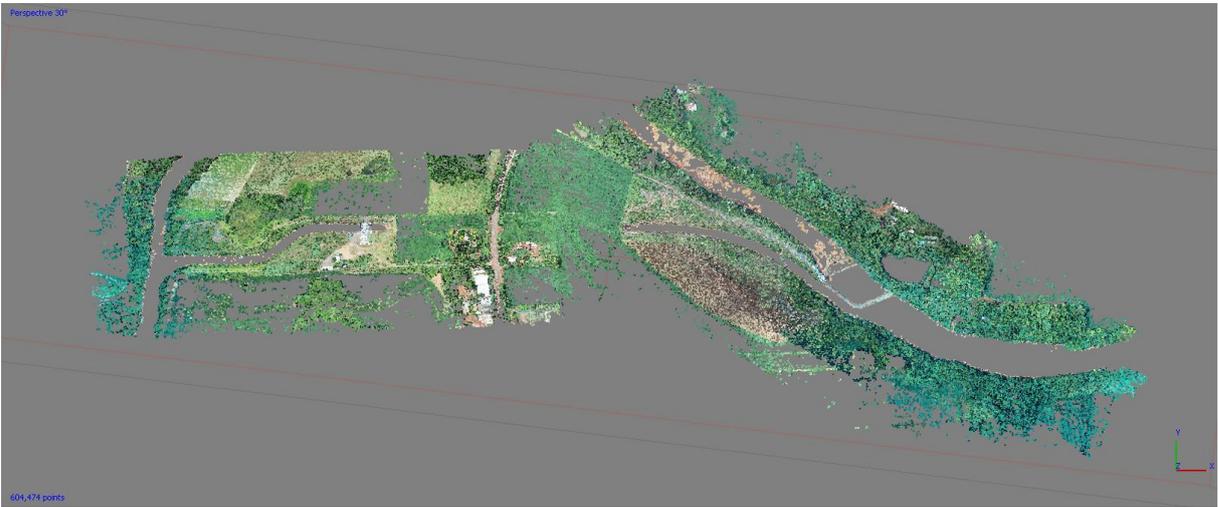
Após levantamento aéreo e topográfico, foi realizado o processamento das imagens utilizando-se do *software Agisoft Photoscan Professional*. O *software* foi utilizado, em sua maioria, na aquisição e análises de boa parte dos produtos gerados, dos quais destacam-se o modelo digital de terreno (MDT), modelo digital de superfície (MDS), curvas de nível e *orthomosaic*.

A fim de evitar possíveis falhas e/ou distorções no decorrer do processamento, oriundo da má qualidade de alguma imagem, foi realizada a verificação prévia das imagens capturadas.

O processamento das imagens foi realizado, conforme descrito nas etapas a seguir:

1. Importação das imagens junto a área de trabalho do *software* e transformado o sistema de coordenadas para o datum de referência SIRGAS 2000, zona 22S, ou seja, transformação das coordenadas das imagens para formato UTM.
2. Importação dos pontos de controle para dentro do *software*, também com o datum de referência SIRGAS 2000, zona 22S, afim compatibilizar com o sistema de coordenadas das imagens, conforme configurado no item 1.
3. Execução do alinhamento prévio das imagens, com objetivo de gerar uma nuvem de pontos espaçadas, denominada *Tie Points*. A referida etapa tem por finalidade a localização dos GCPs junto as imagens, para que seja realizado o posicionamento dos mesmos junto as imagens, a respectiva etapa ainda, tem como objetivo a correção geométrica do produto final *orthomosaic*, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Tie Points



Fonte: Autora (2022).

4. Após etapa a 3 foi realizado novamente o alinhamento das fotos, desta vez já com correção das imagens juntamente aos GCPs. O *Tie Points* foi realizado com precisão maior que a etapa anterior.

5. Elaboração do *Build Dense Cloud*, o qual se caracteriza como uma densificação da nuvem de pontos (*Tie Points*).

6. Classificação dos elementos que compõe o terreno (edificações, vegetação, água, dentre outros). O mesmo é realizado por meio do *Classify Ground Points*. As etapas descritas se referem a geração do Modelo Digital de Terreno (MDT).

7. Construção do modelo, consiste na elaboração de uma rede de triangulação do terreno, conforme classificado na etapa anterior, tendo em vista que os vértices dos triângulos retratam os pontos da superfície da área.

8. Geração do *Build DEM* a partir da construção do modelo de terreno, o qual consiste na geração do modelo digital de elevação do terreno, com isso é possível elaboração das curvas de nível.

9. Por fim, com base nas etapas anteriores, é gerado o *Build Orthomosaic*, que se resume a unificação de todas as imagens do voo do VANT.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise dos dados gerados utilizou-se dos quatro voos realizados na área, aliado a isso, os dados históricos disponíveis pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) no sistema Hidroweb, a estação fluviométrica 75180000-PCH RS-155 barramento apresentou variações para as datas em que foi realizado os levantamentos aéreos.

Durante o período de monitoramento deste estudo, foi possível observar a variação do nível do curso hídrico, o que permitiu a análise das áreas antes da inundação das margens do reservatório e posteriormente. Essa análise comparativa revelou informações relevantes sobre os processos erosivos ocorridos na região, a Tabela 2, traz os dados históricos do sistema Hidroweb da ANA, para as datas dos voos e o nível que se encontra o curso hídrico para a referida data.

Tabela 2 – Nível do curso hídrico nos dias de levantamento aéreo

Nº Voo	Data	Nível
01	20/05/2020	208 cm
02	16/07/2020	309 cm
03	17/10/2020	255 cm
04	30/01/2021	247 cm

Fonte: ANA (2021).

Posteriormente ao processamento das imagens obtidas, o *software Agisoft Photoscan* obteve o relatório dos produtos gerados com informações imprescindíveis para assegurar a sua qualidade e precisão.

Com a finalidade de atenuar os respectivos erros expressivos, utilizou-se dos GCPs no processamento, sucedendo-se na diminuição expressiva dos erros médios para os eixos X, Y e Z. O que antes apresentava erros médios na ordem de metros agora com o emprego dos GCPs passa a apresentar erros médios na ordem de centímetros.

Silva et al., (2020) descreve que a utilização de GCPs exerce uma função fundamental na georreferenciação e precisão dos dados geoespaciais, visto que os mesmos, dispõem de coordenadas conhecidas com alta acurácia, utilizadas como referências ao processamento e alinhamento das imagens, corrigindo distorções e acrescentando confiabilidade aos produtos gerados.

O mesmo foi constatado pelo estudo de Gonçalves et al., (2018), onde o mesmo descreve que ao inserir os GCPs no fluxo do processamento, corrige distorções e resulta em uma melhoria expressiva dos dados georreferenciados, visto que a redução dos erros médios para a ordem dos centímetros é primordial para aplicações que demandam de alta precisão, por exemplo, estudos de mudanças geodésicas, mapeamento topográfico e monitoramento ambiental.

A Tabela 3, evidencia o comparativo do processamento com GCPs e sem GCPs para os levantamentos aéreos realizados.

Tabela 3 – Tabela sínteses dos erros médios sem GCPs e com GCPs para os quatro voos realizados

Voos	Sem GCPs			Com GCPs		
	X erro (m)	Y erro (m)	Z erro (m)	X erro (m)	Y erro (m)	Z erro (m)
Voo 01	5,321	3,111	47,491	0,134	0,084	0,449
Voo 02	4,137	2,777	28,259	0,078	0,096	0,765
Voo 03	5,399	3,593	17,336	0,153	0,141	0,454
Voo 04	5,482	2,912	38,055	0,079	0,073	0,176

Fonte: Autora (2022).

Conforme exposto pela Tabela 3, constata-se que os erros médios correspondentes aos eixos X, Y e Z, sem os GCPs compreendem a erros na ordem de metros.

Fundamentado nisso, observa-se que a média de erros mais expressivos para os voos realizados se dá no eixo Z, o qual corresponde a cota e/ou altitude, oriundo da baixa precisão do VANT.

Ainda que o segundo e o terceiro voo realizado na área do estudo, não serão detalhados nesse presente estudo, em decorrência dos voos terem sido realizados em datas em que o curso hídrico se encontrava com o nível da água elevado (Tabela 3) encobrimdo as margens do reservatório, não se fazendo possível analisar a incidência de processos erosivos. Via de regra, evidencia-se que o segundo voo em comparação aos quatro voos realizados, foi o que apresentou menor erro médio para o eixo X (7,8 cm) e maior erro médio para o eixo Z (76,5 cm). O terceiro voo, foi o que apresentou maior erro médio entre os quatros voos realizados no que tange os eixos X e Y, sendo eles 15,3 e 14,1 centímetros.

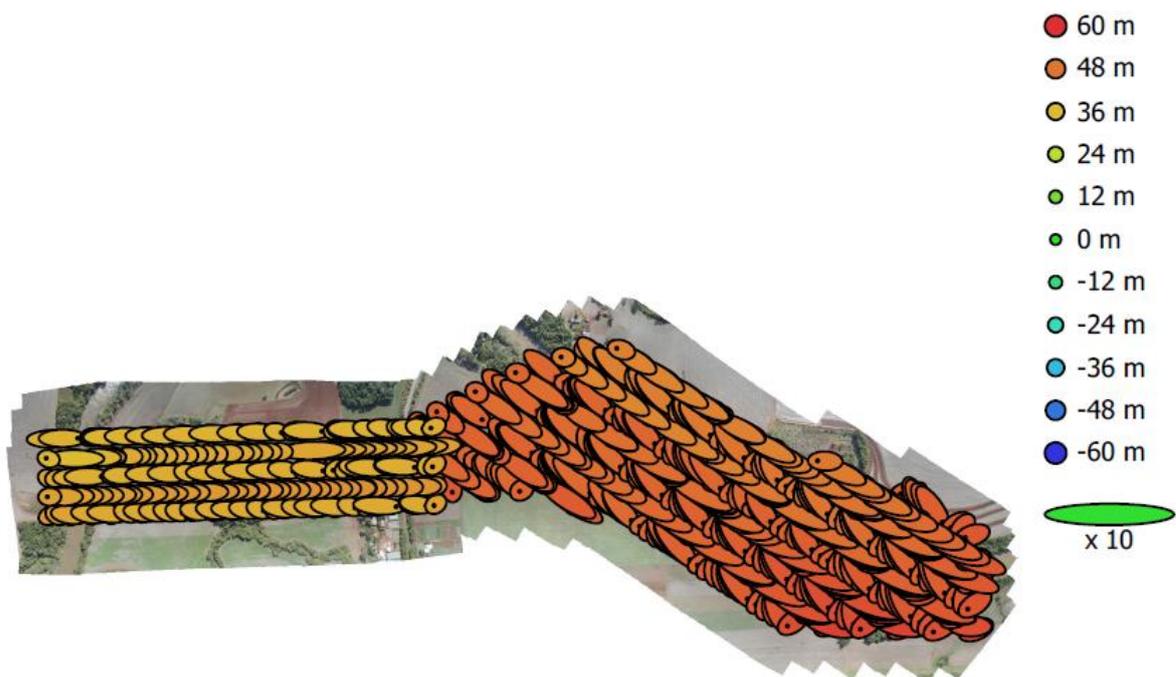
Estudos realizados por Silva et al., (2019) avaliaram os erros de GCPs em levantamentos topográficos de alta precisão, sendo assim os resultados obtidos identificaram que os GCPs podem ser influenciados por diversos fatores, como por exemplo, as técnicas de campos praticadas e até mesmo condições atmosféricas durante o levantamento em campo.

Já o estudo de Pereira et al., (2020) analisou os diferentes métodos de levantamento e processamento, objetivando a identificação dos erros mais comuns, sendo os resultados oriundos da falta de planejamento no levantamento dos GCPs, aliado a distribuição adequada e a quantidade de pontos.

Souza et al., (2018) descreve a importância da calibração dos equipamentos de levantamento, principalmente a calibração do equipamento de levantamento dos GCPs, ou seja, o GNSS RTK, visto que a calibração colabora com a atenuação dos erros inerentes aos equipamentos, garantindo maior confiabilidade dos resultados.

Diante dos resultados expostos pela Tabela 3, não foi possível identificar um fator isolado que tenha ocasionado os erros observados nos GCPs. É importante ressaltar que diversos elementos podem contribuir para a ocorrência de erros nos GCPs, e a análise desses fatores pode ser complexa, em virtude de que o erro pode ser oriundo do levantamento ou do processamento das imagens.

Figura 10 – Estimativa de erros do processamento sem GCPs no primeiro voo.



Fonte: Autora (2022).

A partir do relatório do processamento das imagens para o primeiro voo, observou-se erros entre 36 e 60 metros acima da cota real, sem a utilização dos GCPs, conforme demonstra a Figura 10, compreendendo erros médios para os eixos X, Y e Z, correspondente a 5,321, 3,111 e 47,491 metros, respectivamente.

A Tabela 4, expõe de maneira mais detalhada os erros para cada GCPs empregado no processamento das imagens no primeiro voo

Tabela 4 – Estimativa de erro dos GCPs do primeiro voo.

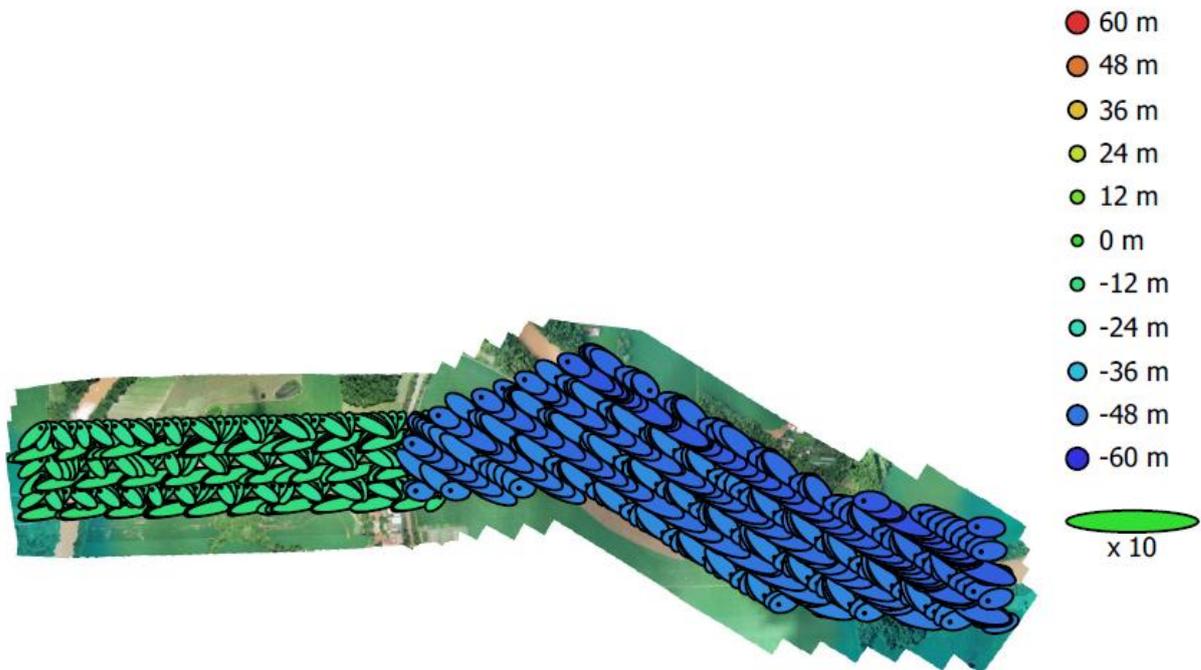
GCP	X erro (cm)	Y erro (cm)	Z erro (cm)
PC1	4,1	2,0	24,2
PC3	4,3	2,1	-12,2
PC5	0,9	-0,6	-43,2
PC7	-8,6	-10,0	-81,1
PC10	6,1	0,4	39,6
PC13	14,1	-0,7	-15,0
PC15	10,4	5,9	5,260
PC16	-35,6	-14,9	91,3
PC18	9,4	19,3	-23,1
PC19	6,54	1,3	-31,51
PC21	-11,4	-5,3	35,0
Total	13,4	8,4	44,9

Fonte: Autora (2022).

Após a aplicação dos 11 GCPs no processamento do primeiro voo, constatou-se uma atenuação nos erros médios para os eixos X, Y e Z, sendo eles 13,4, 8,4 e 44,9 centímetros, conforme exhibe a Tabela 4.

Para o último voo, também se observou erros entre -48 e -60 metros, desta vez abaixo da cota real (Figura 11), onde apresentou erros médios para os eixos X, Y e Z, equivalente a 5,5, 2,9 e 38,1 m, respectivamente.

Figura 11 – Estimativa de erros do processamento sem GCPs no último voo.



Fonte: Autora (2022).

Empregando-se também no processamento os GCPs, passando a atingir erros médios para os eixos X, Y e Z, próximo a 7,9, 7,3 e 17,6 cm respectivamente, conforme demonstra a Tabela 5.

Tabela 5 – Estimativa de erro dos GCPs do último voo.

GCP	X erro (cm)	Y erro (cm)	Z erro (cm)
PC1	-7,7	4,2	8,9
PC3	-2,7	-3,7	-8,6
PC5	1,5	-6,4	-27,2
PC7	-0,3	2,9	39,7
PC13	5,7	-3,1	6,9
PC15	-3,5	5,3	9,3
PC16	-12,5	-13,1	-10,3
PC18	0,1	10,8	-8,4
PC19	0,7	-6,1	-13,1
PC21	18,8	9,3	12,3
Total	7,9	7,3	17,6

Fonte: Autora (2022).

Cabe evidenciar, que para o último voo, não foi utilizado no processamento o PC10, em virtude de o mesmo estar situado próximo a vegetação e a mesma encontra-se encobrindo a visualização do GCP.

A utilização dos GCPs para o levantamento aéreo se torna crucial, uma vez que atenua eficientemente os erros médios, elevando a acurácia nos produtos gerados. Concomitantemente aos GCPs, realizou-se o levantamento dos pontos de verificação, com a finalidade de validar a precisão aos produtos gerados pelos processamentos realizados.

Para o primeiro voo, constatou-se através dos 6 (seis) pontos de verificação que a geração do produto *ortomosaic*, apresentou deslocamento para os eixos X e Y de aproximadamente 0,123 cm. No entanto, para o último voo, para os mesmos 6 (seis) pontos de verificação, o deslocamento médio foi de 0,129 cm para os eixos X e Y.

O estudo realizado por Borges et. al (2017), demonstrou um levantamento aéreo juntamente com 12 GCPs sendo 3 (três) destes para análise e verificação de precisão dos produtos gerados, aferir um erro altimétrico de 7,2 cm e planialtimétrico de 5,0 cm. Via de regra, os resultados obtidos se sobressaem principalmente no que tange ao planialtimétrico, visto que para o altimétrico (Z) obteve um erro maior que o citado pelo autor (44,9 cm para o primeiro voo e 17,6 cm para o último voo).

A vista disso, outro produto gerado oriundo do processamento no *Agisoft Photoscan*, foi o levantamento planialtimétrico o qual realizou-se o comparativo das curvas de níveis de ambos os voos. Para as mesmas, constatou-se erro significativos em regiões onde os GCPs encontravam-se relativamente distantes.

A obtenção de curvas de nível com essas características indicadas, remete à qualidade da filtragem do terreno realizada no processamento das imagens aéreas do modelo digital de superfície, em que foi possível retirar essencialmente todos os objetos fixos na superfície, como casas e vegetação, que estavam acima do nível do solo e que poderiam comprometer as informações de elevação para a criação de contornos.

Segundo Machado et. al. (2016), evidencia-se que os erros oriundos da classificação automática do *dense cloud* no *Agisoft Photoscan* são a oclusão e textura homogênea da superfície, onde a oclusão trata-se de parte ou da totalidade da superfície escondida ou coberta por árvores, construções e outros elementos da paisagem. A textura homogênea da superfície impossibilita o *software* distinguir as áreas capturadas, ocasionando em dados impreciso ou faltantes.

Em vista disso, para os erros não serem expressivos, devem ser realizadas boas práticas de captura das imagens, como por exemplo, iluminação apropriada e

captura e diferentes ângulos e altitudes, aliado a isso, técnicas de processamento, principalmente na correção da qualidade e remoção de ruídos das imagens obtidas (FRANÇA et.al., 2017).

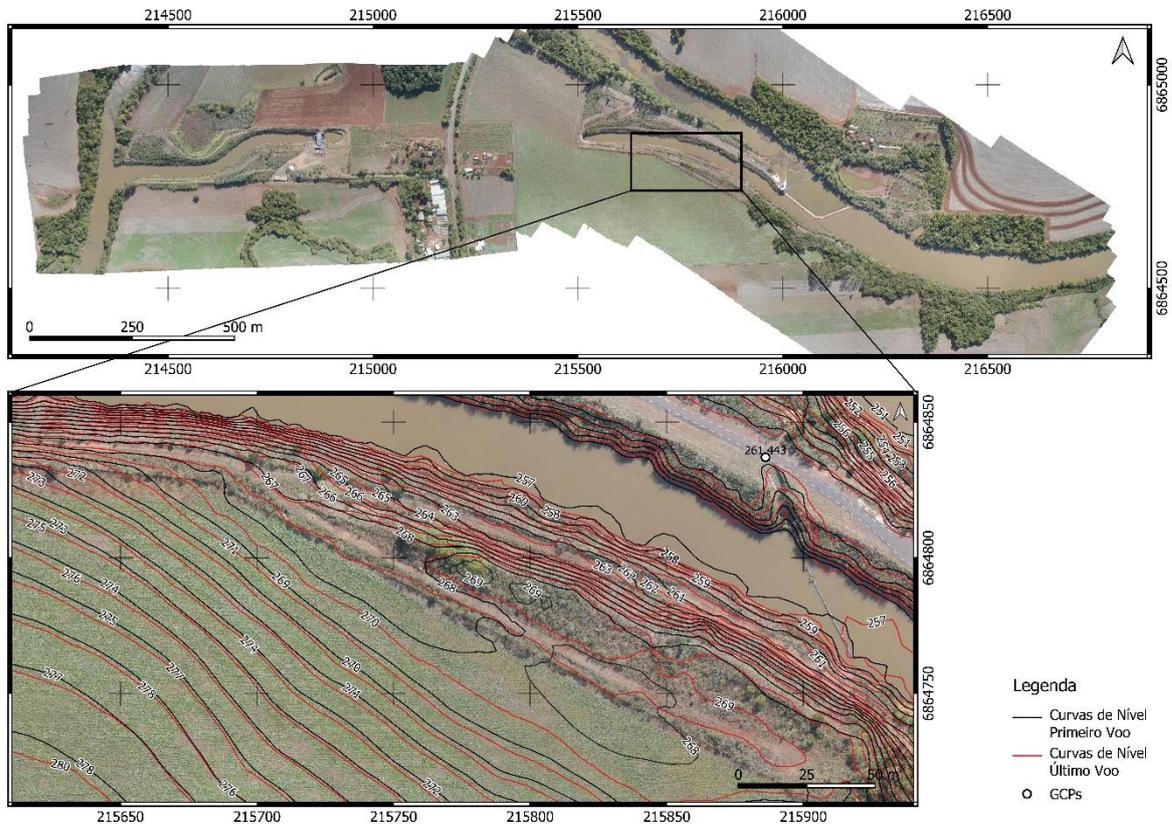
Por fim, Machado et. al. (2016), descrevem que é substancial que o usuário do *Agisoft Photoscan* conheça os erros da classificação e detenha de técnicas de processamento das imagens que intervêm para geração de produtos confiáveis e precisos.

A classificação errônea sobre o *dense cloud*, afeta diretamente a precisão das curvas de nível, conforme demonstra estudos realizados pelos pesquisadores Castro et. al. (2020) e Furtado e Souza (2019).

Sendo assim, a utilização dos GCPs é fundamental para precisão e validação dos produtos gerados, no entanto, a presença de vegetação e outros obstáculos, comprometem a qualidade, principalmente do levantamento aéreo e posteriormente na classificação do *dense cloud* durante o processamento das imagens no *Agisoft Photoscan*, logo, fica indispensável a adoção de boas práticas durante os levantamentos para garantir acurácia aos produtos gerados, sobretudo as curvas de nível.

A Figura 12, demonstra a comparação das curvas de nível obtidas do primeiro e do último voo. As curvas de nível provenientes do processamento do primeiro voo são representadas pela cor preta, enquanto as curvas de nível derivadas do processamento do último voo são mostradas em cor vermelha.

Figura 12 – Mapa demonstrativo do erro das curvas de nível



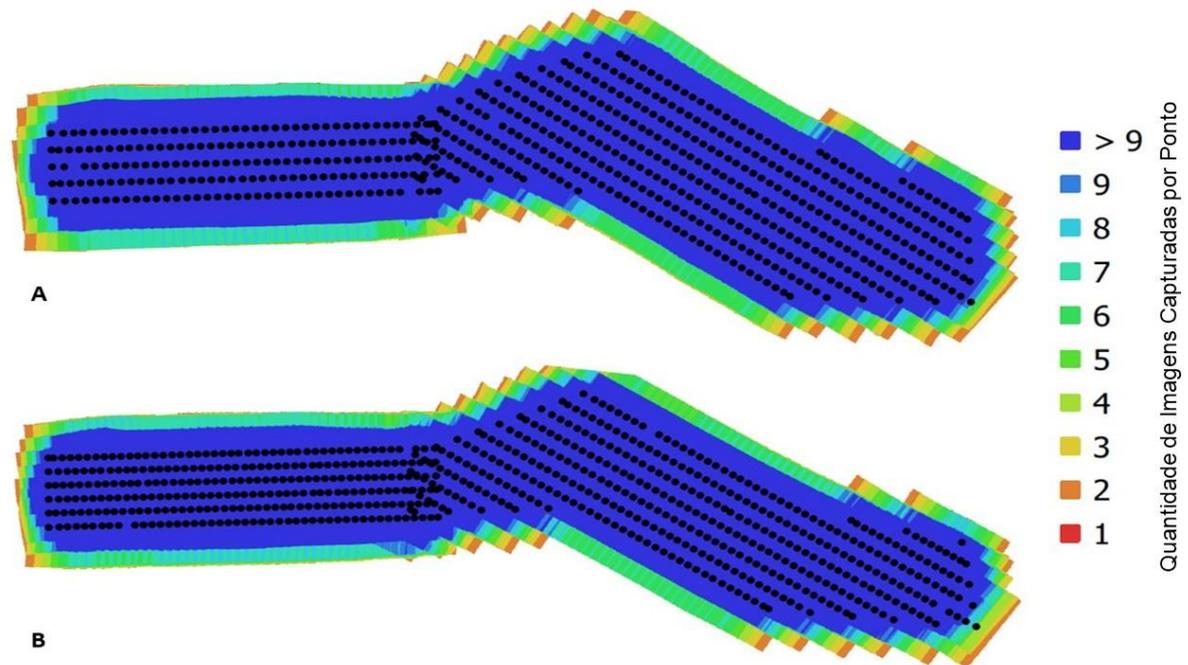
Fonte: Autora (2022).

Quanto à *orthomosaic* gerada, apresentou resolução de 4,77 cm/pix para o primeiro voo e 4,34 cm/pix para o último voo, revelando uma boa qualidade na resolução do produto final, mesmo que ainda em algumas regiões, principalmente nas sobreposições das imagens e extremidades do produto final, seja perceptível algumas distorções.

A sobreposição das imagens na realização do voo é de suma relevância, pois também é um fator de consideração no que se refere a qualidade e número de pixel por centímetro. A sobreposição apropriada assegura a captação de imagens completa da área mapeada, o que permite uma análise mais detalhada, pois possibilita no produto *orthomosaic* com maior resolução, o que é essencial para a identificação e interpretação precisa das características e elementos presentes na superfície.

Nas imagens A e B da Figura 13, constata-se que a sobreposição e densidade das imagens obtidas durante o levantamento, correspondendo a cerca de 9 imagens por ponto capturadas pelo VANT.

Figura 13 – Densidade e sobreposição das imagens do VANT para o primeiro voo (A) e último voo (B)



Fonte: Autora (2022).

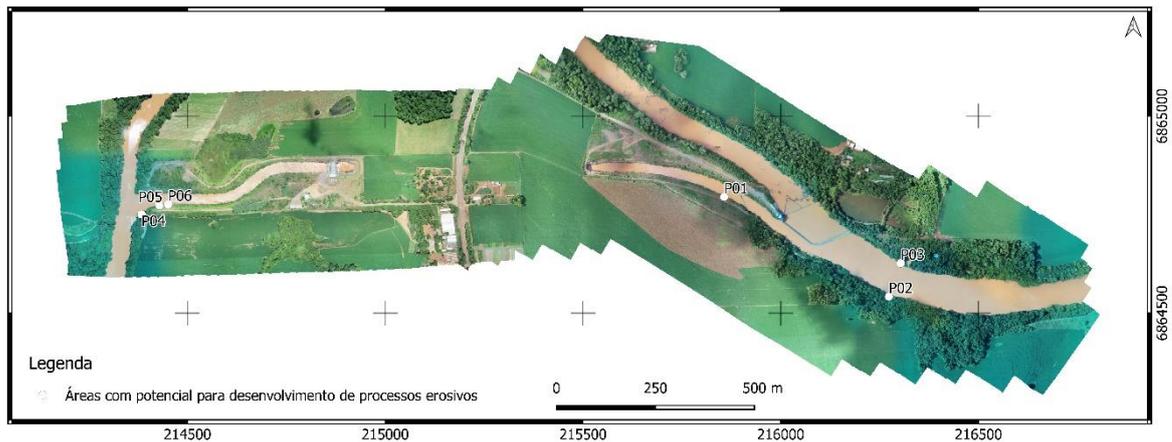
Segundo o estudo de Jain et al., (2018) relata que a sobreposição das imagens permite a integração de forma mais precisa, obtendo um produto final, ou seja, a *orthomosaic* mais completa. Aliado a isso, Chang e Tsai (2019), complementam que a sobreposição das imagens capturadas afeta diretamente nos estudos topográficos, visto que a falta de sobreposição adequada pode levar a erros significativos na modelagem de superfícies.

O estudo realizado por Miraldes (2020), retrata que os VANTs são considerados ferramentas de alta resolução que possibilitam a obtenção de dados visuais cada vez mais precisos, permitindo, também, a redução de custos, risco e a realização de inspeções com maior frequência e qualidade.

Por conseguinte, mesmo que majoritariamente a área do empreendimento seja compreendida por mata ciliar no entorno das margens do reservatório e seu túnel adutor seja constituído por maciço rochoso, foi possível observar, com base no *orthomosaic*, fragmentos da área do empreendimento com potencial para desenvolvimento de processos erosivos. Na Figura 14, são apresentadas regiões com susceptibilidade a processos erosivos, as quais foram demarcadas na *orthomosaic* e

denominadas como P01, P02, P03, P04, P05 e P06, identificadas no período do presente estudo.

Figura 14 – Demarcação das áreas com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.



Fonte: Autora (2022).

Das regiões com susceptibilidade na geração e/ou formação de processos erosivos, indicados na Figura 14, cabe destacar o P01. Esse ponto (P01), situado na margem do reservatório, foi observado através das *orthomosaics*, resultando na Figura 15, nessa ordem observa-se as imagens A, B e C, sendo a imagem A oriunda do primeiro voo realizado, a imagem B, proveniente do segundo voo e a imagem C, precedente do último voo, a formação de processo erosivo para o local. Na imagem B, pode ser observado precisamente as características da ocorrência de processos erosivo.

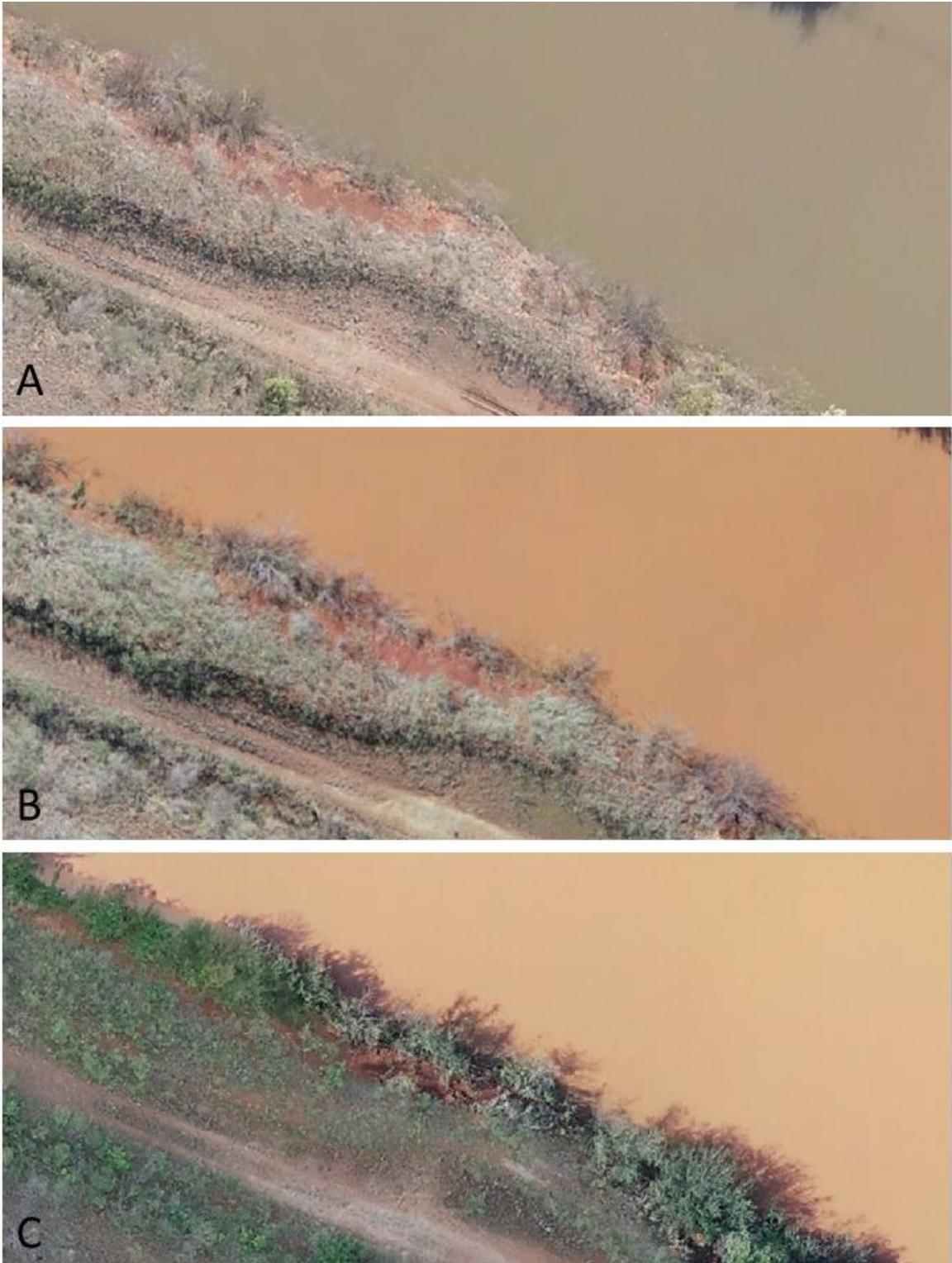
Segundo os estudos realizados por Santos et al. (2017), a ocorrência de processos erosivos esta atribuída a diversos fatores, sendo um dos fatores a oscilação do nível da água, visto que no período de enchente a força da água aumenta e tem potencial para desgastar as margens, e no período de seca, a exposição por prologada das margens as torna vulneráveis em decorrência das intempéries e processos naturais.

Ainda em conformidade com o autor, a vegetação trabalha como barreira natural de proteção ao solo das forças erosivas da água e reduzindo a velocidade de escoamento, logo a remoção maturação ao a inexistência de manejo da vegetação pode ocasionar maior suscetibilidade a formação de processos erosivos.

Outrossim, o solo também possui aspecto fundamental na erosão das margens, na medida que solos com baixa capacidade de retenção de água, alta suscetibilidade a compactação ou baixa resistência mecânica estão mais propensos a erosão (LIU et al., 2019)

Em vista disso, as pesquisas realizadas por Mendes et al. (2018) demonstram que os solos argilosos lateríticos, tem baixa permeabilidade o que consecutivamente gera um escoamento superficial mais condensado e sucessivamente uma maior suscetibilidade à erosão hídrica, aliado a isso, estudos realizados por Nóbrega et al. (2020), concluem que em solos argilosos lateríticos a remoção ou manejo inadequado da vegetação aumentam significativamente a suscetibilidade a erosão.

Figura 15 – Área identificada com geração de processos erosivos, denominada como P01, demonstra em sequência através das imagens A, B e C, o desenvolvimento do processo erosivo.



Fonte: Autora (2022).

Para o referido processo erosivo, por meio de ferramenta disponível no *software Agisoft Photoscan*, realizou o traçado sobre a área, iniciando no ponto 1 e finalizando no ponto 2, compreendendo a distância aproximada de 20 metros, para o mesmo conforme exposto na Figura 16, constata-se a existência do processo erosivo através do perfil da área, o qual foi observado na imagem B da Figura 15.

Figura 16 – Perfil do processo erosivo identificado



Fonte: Autora (2022).

A partir da constatação do referido processo erosivo, ainda por meio de ferramenta disponível no *software Agisoft Photoscan*, delimitou-se a área correspondente ao processo erosivo, conforme demonstra a Figura 17, na mesma observa-se que a área corresponde a 27,9 m².

Figura 17 – Delimitação da área que compreende ao processo erosivo



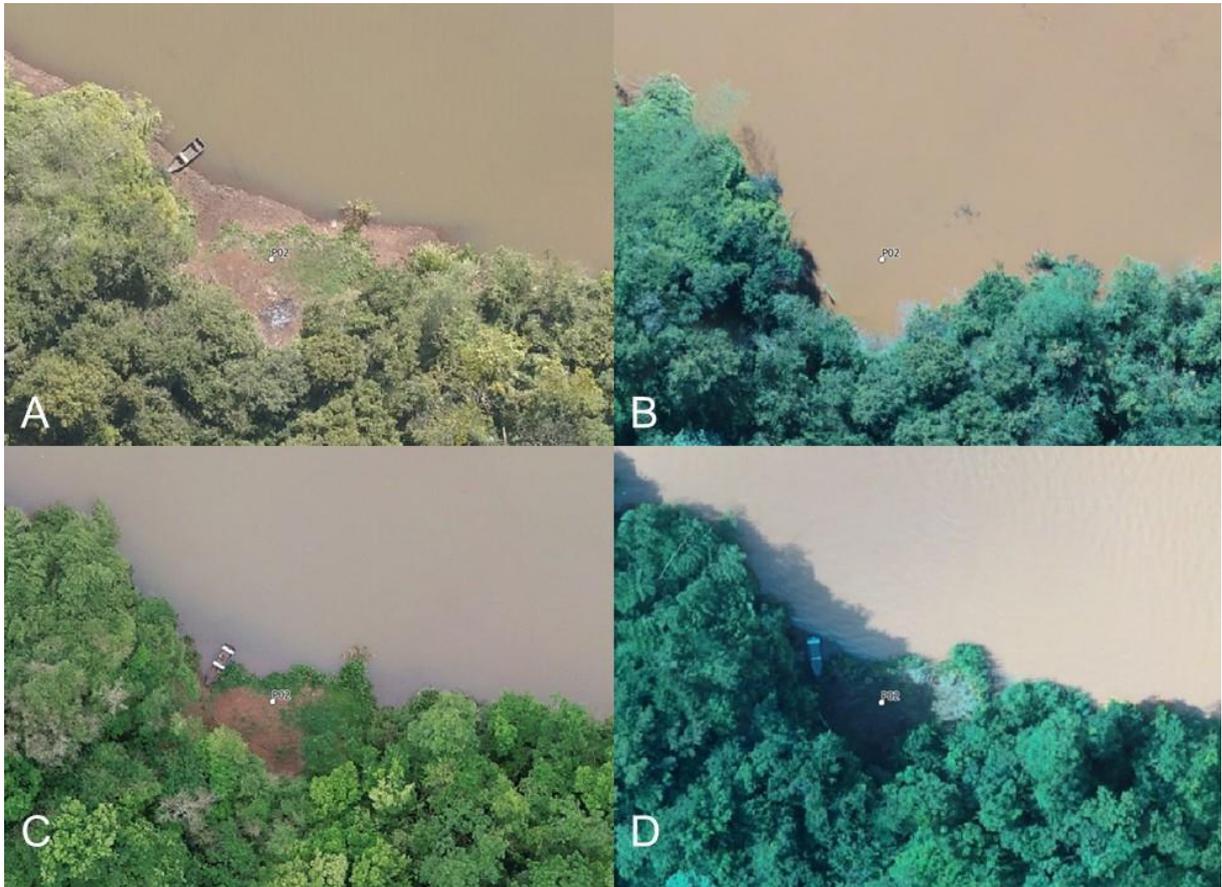
Fonte: Autora (2022).

A segunda área observada com potencialidade na evolução erosão, inicialmente identificada pela Figura 14, denominada como P02, a seguir mais detalhada na Figura 18, através dos quatro voos realizados na área do estudo, sendo a imagem A, B, C e D, oriunda dos voos 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Conforme a Tabela 2 e supramencionado, Figura 18 e Figura 19, constata-se a variação do nível do curso hídrico sobre a margem do reservatório que compreende o empreendimento.

Estudo como o de Rojas et al. (2019), constata-se que a exposição das margens de reservatórios, aumentam expressivamente a suscetibilidade a erosão, a qual aliada a variação do nível da água, ausência de vegetação e velocidade do fluxo, potencializa o desenvolvimento de processos erosivos, o que resulta na ocorrência de perda de solo e consecutivo assoreamento do curso hídrico, comprometendo a estabilidade das margens.

Figura 18 – Ponto 02 (P02) com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.



Fonte: Autora (2022).

Figura 19 – Ponto 03 (P03) com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.



Fonte: Autora (2022).

A variação do nível da água pode originar processos erosivos, os quais ainda podem ser agravados em locais com solos frágeis e susceptíveis a ação da água, como por exemplo, margens de cursos hídricos (DEBASTIANE et. al., 2016).

Para as Figuras 18 e 19, observou-se que a alteração do nível da água, sendo que no segundo voo, exposto por ambas as imagens B, o nível da água encobre as áreas de interesse.

Ainda considerando as duas áreas citadas, em vista das mesmas situarem-se a montante do barramento da usina hidrelétrica e sucedendo-se processos erosivos e, consecutivamente, a deposição de sedimentos, juntamente com a margem correspondente ao perímetro do reservatório comportando-se da mesma maneira, ao longo da vida útil do reservatório pode ocasionar consequências significativas no desempenho do empreendimento.

O estudo de Barros et. al. (2006) desenvolvido na Usina Hidrelétrica de Furnas no Estado de Minas Gerais e Santos et. al. (2015) na Usina Hidrelétrica de Itaipu situada na fronteira entre Brasil e Paraguai, aborda as consequências disso, no qual os autores constataram que a diminuição do volume de armazenamento da água e o aumento da turbidez, resultante da deposição de sedimentos no reservatório.

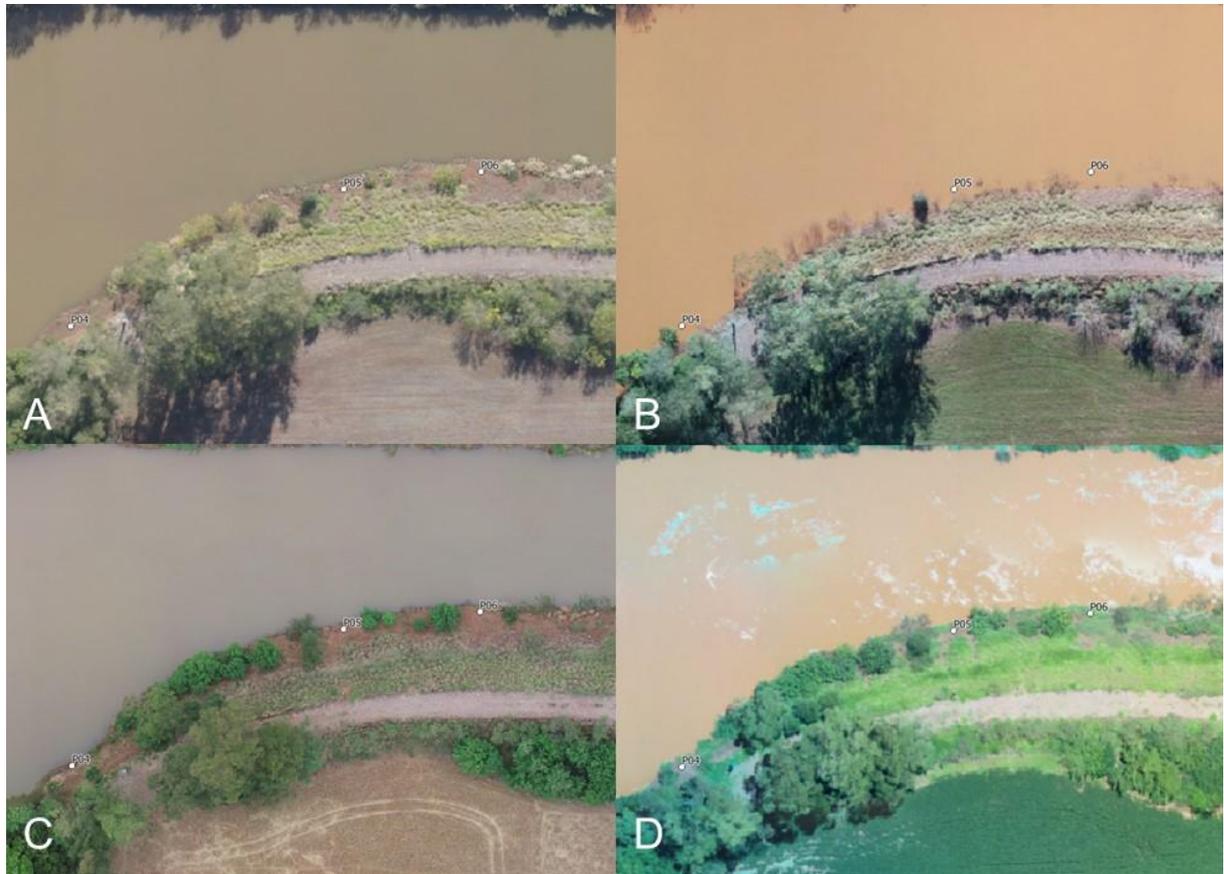
Na Figura 20, são apresentados os pontos denominados como P04, P05 e P06, localizados a jusante do barramento do empreendimento, que possuem potencial na ocorrência de processos erosivos. É importante ressaltar que, apesar de estarem situados a jusante, isso não dispensa a necessidade de monitorar os processos erosivos nesses pontos. Além disso, é fundamental compreender que pelo fato de estarem localizados a jusante não é pretexto para negligenciar o monitoramento dos processos erosivos.

Em vista de estarem localizados a jusante, não influenciam diretamente no barramento da usina hidrelétrica e tampouco na capacidade de armazenamento do reservatório, mas ainda assim intervêm sobre o curso hídrico.

Estudo realizados por Oliveira et al. (2018), evidenciam que processos erosivos a jusante da usina, pode vir a decorrer em perda do solo, assoreamento do curso hídrico e instabilidade das margens, assim como, comprometer a qualidade da água e a biodiversidade.

Rosa et. al. (2019) descrevem que a incidência de sedimentos a jusante da usina hidrelétrica atua diretamente na dinâmica fluvial, aumentando a velocidade e reduzindo a vazão da água, e em casos de regiões ribeirinhas elevação no número de enchentes em períodos intensas chuvas.

Figura 20 – Pontos 04, 05 e 06 (P04, P05 e P06) com potencial para desenvolvimento de processos erosivos.



Fonte: Autora (2022).

Resultou-se que para os pontos P04, P05 e P06, não foi observado processos erosivos, uma vez que os referido pontos permaneceram inalterados durante o período de observação, ou seja, durante os 9 (nove) meses de realização do presente estudo.

5. CONCLUSÃO

Nos levantamentos aéreos realizados na área, no período de 9 meses, constatou-se efetivamente 01 (um) processo erosivo na margem do reservatório e 5 (cinco) pontos com possibilidade na geração de processos erosivos, uma vez que os mesmos possuem declividade alta, são desprovidos de mata ciliar ou vegetação rasteira e sofrem incidência direta da chuva e escoamento superficial.

Para esse estudo, destaca-se que a área do empreendimento apresenta poucas áreas com susceptibilidade de desenvolvimento e ocorrência de processos erosivos.

Quanto ao processo erosivo identificado com o monitoramento aéreo, não foi possível estimar a perda de volume de solo, uma vez que foi constatado erro significativo no processamento e, consecutivamente, nos produtos gerados, principalmente em relação às curvas de nível.

Para estudos futuros, recomenda-se o estudo em reservatório com as margens desprovidas de vegetação e inserção de GCPs artificiais (se for o caso) próximos às áreas com maior incidência de processos erosivos, a fim de atenuar erros na geração de curvas de nível.

Para estudos futuros, recomenda-se que para o monitoramento, a determinação de um período para o intervalo de tempo entre os voos. Além do tempo, outro fator de determinação no monitoramento é a variação do nível da água ou precipitação, visto que são dados coletados diariamente pelas empresas responsáveis por estes empreendimentos. Assim, locais identificados como mais suscetíveis podem receber voos com maior frequência ao passo que locais como esse podem ser revisitados com menor regularidade.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. 1994. Disponível em: <http://www.carto.eng.uerj.br/cdecart/download/NBR13133.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2022.

A LAVOURA. **Pesquisa inédita utiliza drones para estimar erosão do solo em lavouras**. Notícia online. Disponível em: <https://alavoura.com.br/pesquisa-inovacao/tecnologia-agricola/pesquisa-inedita-utiliza-drones-para-estimar-erosao-do-solo-em-lavouras/>. Acesso em: 5 jan. 2023.

ALVES, M. A. et al. Sensoriamento remoto aplicado à Geomática. Revista Brasileira de Geomática, v. 7, n. 3, p. 72-88, 2019.

ALVES, M. A. F. et al. Análise de Impactos Ambientais em Áreas de Preservação Permanente no Entorno de Reservatórios de Água. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 3, p. 1014-1027, 2020.

ANA – Agência Nacional de Água. **Hidroweb**: Sistema de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Instrução Suplementar - IS nº 21- 002**. Emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental para Veículos Aéreos Não Tripulados, 2012.

ARAÚJO, C. A. S. **Apostila**: Topografia Prática. Universidade Federal do Pampa. UNIPAMPA. Caçapava do Sul. 2014. Disponível em: https://sites.unipampa.edu.br/novostalentoscacapava/files/2014/11/produ%C3%A7%C3%A3o_4_6_Aposlita_Topografia.pdf. Acesso em: 15 dez. 2022.

BARBOSA, C.; SANTOS, T.; FERREIRA, M. Environmental and social impacts of hydroelectric power plants: a review. Journal of Cleaner Production, 198, 1270-1283. 2018.

BARROS, A. L. et al. Geotecnologias aplicadas à análise e gestão territorial. Anuário do Instituto de Geociências, v. 39, n. 2, p. 41-53, 2016.

BARROS, M. T. L.; PEZZATO, L. E.; SEVERO, M. I. S. Impactos da deposição de sedimentos sobre a qualidade da água em reservatórios de usinas hidrelétricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 2, p. 81-92, 2006.

BERTOLDO, M. S. et al. **Avaliação do uso de drones na geração de modelos numéricos de terreno para fins de manejo da erosão de solos agrícolas**. In: 28º Encontro Anual de Iniciação Científica. Universidade Estadual de Maringá. Maringá: Engenharias, 2019.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. Ed. São Paulo: Ícone. 2012

BISI, F. N.; SILVA, F. C. **Introdução ao geoprocessamento**. Escola de Serviço Público do Espírito Santo. Governo do Estado do Espírito Santo, 2018.

BORGES, R. O. et al. **Utilização de drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para caracterização topográfica da infraestrutura de transportes no Brasil**. In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro, 2017.

BRADBURY, J. et al. **Monitoring and management of streambank erosion and natural revegetation on the lower Gordon River**, Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia. *Environmental Management*, v. 19, n. 2, p. 259–272, 1995.

BRANDALIZE, M. C. B. **Geoprocessamento Apontamentos**. Universidade Federal do Paraná, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental – Curitiba, 2008. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/2436410/2/Modelos-Terrestres>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BRAVO, J. **Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas**. 2010. 226 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2010.

BRAZ, A. M. et al. **Análise da Aplicação de VANT na Atualização de Cadastro Florestal com Uso de Pontos de Controle**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Anais [...] João Pessoa: INPE, 2015, 543p.

CARVALHO, H. **Análise comparativa de levantamentos planialtimétricos: topografia convencional, GPS e drone**. 2018.143f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2018.

CARVALHO, J. C. de; et. al. Aspectos legais relacionados à preservação ambiental das margens dos reservatórios. In: SALES, M.M. et al. **Erosão em Borda de Reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017.

CASTRO, A. L. et al. **Influência da Resolução Espacial da Nuvem de Pontos na Acurácia de Curvas de Nível**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 6, p. 1231-1242, 2020.

CERILUZ. **Cooperativa Regional de Energia e Desenvolvimento Ijuí LTDA**. Disponível em: <https://www.ceriluz.com.br/index.php/2017-02-16-12-49-55/usina-rs-155>. Acesso em: 28 dez. 2022.

CHANG, K. T.; TSAI, F. **Evaluating the feasibility of using unmanned aerial vehicle technology for terrain modeling**. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 144. 2019

CORREA, G. T.; FILHO, E. E. DE S. **Avaliação dos processos de erosão marginal no Arquipélago Floresta Japonesa (Alto Rio Paraná)**. *Geografia*, v. 18, n. 2, p. 1–20, 2009.

COELHO, F. R. **Análise do comportamento geomecânico das margens de reservatórios de usinas hidroelétricas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

CURRAN, J. H. **Baseline channel morphology and bank erosion inventory of South Fork Campbell Creek at Campbell Tract, Anchorage, Alaska, 1999 and 2000**. Anchorage: United States Department of the Interior - Geological Survey, 2001.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DEBASTIANI, V. J., et al. **Assessment of erosion susceptibility in a hydroelectric reservoir in Southern Brazil**. Environmental Earth Sciences, p. 1-11 2016.

DRONENG. **3 motivos para utilizar drones na Topografia**. 2020. Disponível em: <https://blog.droneng.com.br/3-motivos-para-utilizar-drones-na-topografia/>. Acesso em: 25 out. 2020.

DRONENG. **Topografia: história e atuações**. 2019. Disponível em: <https://blog.droneng.com.br/topografia-historia-e-atuacoes/>. Acesso em: 24 out. 2020

EISENBEISS, H.; ZHAND, L. **Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laserscanner in a cultural heritage application**. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany, v. 36, 2006.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FARIA, R. R De; COSTA, M. E. **A inserção dos Veículos Aéreos Não Tripuláveis (drones) 99 como tecnologia de monitoramento no combate ao dano ambiental**. Revista Ordem Pública, v. 8, n. 1, jan./jul. 2015.

FERNANDEZ, O.V. Q. **O método dos pinos na quantificação da erosão marginal em rios e reservatórios**. Revista de Departamento de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, n. 15, p. 160 – 163, jan/dez. 1996.

FORMIGA, K. T. M.; VASCO, J. R. G.; PEREIRA, T. S. R. **Monitoramento e modelagem de ondas em reservatórios**. In: SALES, M. M. et al. Erosão em borda de reservatório. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. V. 3p. 584.

FRACHINI, J. C. et al. **Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2018.

FRANÇA, G.; SOUZA, R. C. M.; RIBEIRO, J. V. **Avaliação da precisão da classificação de nuvens de pontos densas em imagens aéreas de alta resolução**. Boletim de Ciências Geodésicas, p. 540-554, 2017.

FROEHLICH, D. C. **Parâmetros de Ruptura de Barragem de Terraplenagem na Engenharia Hidráulica**. Anais... Conferência Nacional ASCE de 1987 sobre Engenharia Hidráulica, Virginia, 1987, p. 570-575.

FURTADO, G. R.; SOUZA, R. M. **Comparação de Métodos de Classificação de Nuvem de Pontos para Geração de Modelo Digital do Terreno**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 25, n. 2, p. 250-265, 2019.

GATTO, L. W. **Techniques for Measuring Reservoir Bank Erosion**. Hanover, New Hampshire: US Army Corps of Engineers, 1988.

GOMES, A. L. G. **Comparação de diferentes tipos de GCPs em trabalhos de topografia**. Revista Brasileira de Geomática, v. 1, n. 1, p. 20-28, 2017.

GONÇALVES, A. L. et al. **Uso de Pontos de Controle Georreferenciados (GCPs) em imagens de sensoriamento remoto para fins de mapeamento**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 11, n. 5, p. 1989-2001, 2018.

GOOD, G. The costs associated with shoreline erosion on Illinois lakes and reservoirs. In: **Workshop on reservoir shoreline erosion: a national problem**. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1983.

HAIGH, M. **The use of erosion pins in the study of slope evolution**. Chicago, Illinois: Department of geography, University of Chicago, 1977.

HERNANI, L. C.; et al. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V. et al. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 47-60.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O Manual de Deslizamento: um Guia para a Compreensão de Deslizamentos**. Virginia: Geological Survey Circular, 2008, 129p.

HOOKE, J. M. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. Earth Surface Processes. **Chichester**, v. 5, n. 2, p. 143-157, abr.-jun. 1980.
HUGHES, D. J. Rates of erosion on meander arcs. In: GREGORY, K. J. **River Channel Changes**. Chichester: John Wiley, 1977. p. 193-205.

ICOLD - Comissão Internacional de Grandes Barragens. **Erosão interna de barragens, diques e diques existentes e suas fundações**. Internal erosion processes and engineering assessment. Bulletin, 2013.

JAIN, M.; MOHANTY, S.; NAGENDRA, R.; VERMA, R.; GARG, R. D. (2018). **Aerial image mosaicking using Harris corner detection and SIFT algorithm**. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(9), 55-62.

LAWLER, D. M. Needle ice processes and sediment mobilization on river banks: the River Ilston, West Glamorgan, UK. **Journal of Hydrology**, v. 150,

n. 1, p. 81–114, 1993b.

LEE, J. Y.; JUN, K. S. (2018). **Optimal Operation of a Multi-Reservoir System Based on Reservoir Operation Curves**. *Water*, 10(4), 401. doi: 10.3390/w10040401

LIMA, L. S.; PINTO, T. K. S.; MENEZES, G. T. **Analysis of sediment transport in a Brazilian hydroelectric reservoir**. *Applied Water Science*, 11(3), 1-9. 2021.

LIU, X.; WEI, W.; HUANG, Y.; WANG, J. (2019). **Influence of soil properties on the erosion resistance of a hydropower reservoir bank**. *Sustainability*, 11(20), 5835.

LONGLEY, P. A.; et al. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. Porto Alegre, Buokman, 2013.

MACHADO, N. M. et al. Análise da acurácia de modelos digitais de superfície gerados a partir de dados LiDAR e fotogrametria. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 6, p. 1153-1164, 2016.

MAIA, A. G. **As consequências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens**. 2006. 271f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

MANZATTO, C. V.; JUNIOR, E. D. F.; PEREZ, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Embrapa Solos. 2002.

MAPPA. **Como prevenir a erosão do solo com mapas de drone**. 2020. Disponível em: <https://mappa.ag/blog/erosao-do-solo-como-prevenir-mapas-de-drone/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

MASCARENHA, M.M. dos A. et. al. Ensaio aplicados ao estudo de erosões nas bordas e áreas do entorno de reservatórios. In: SALES, M. M. et. al. **Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017.

MEES, A.; ANA. **Qualidade da água em reservatórios**. 2020. Unidade 1: Reservatórios. Disponível em: https://capacitacao2.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2205/1/Unidade_1.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.

MENDES, T. M.; PINTO, F. A. F.; NÓBREGA, R. S. A.; SILVA, M. L. N. **Comportamento hidrológico de solos argilosos lateríticos**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, e0170224. 2018.

MENEZES, A. V. **Proposta metodológica para estudo de perda de massa de solos situados em bordas de reservatório devido ao efeito de ondas por meio de um canal hidráulico**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

MIRALDES, J. P. N. D. **Inspeção Técnica de Construções com Recurso a Drones – Casos de Estudo**. 2020. 129f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Universidade Beira Interior. Covilhã, Portugal, 2020.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. EMBRAPA, Brasília, 2005.

NÓBREGA, G. N. et al. **Impact of vegetation on erosion susceptibility of lateritic clayey soils**. Soil Science Society of America Journal, v. 84, n. 3, p. 654-664, 2020.

OLIVEIRA, G. C.; CORDEIRO, T. M.; ROCHA, H. R.; FERREIRA, L. L. **Environmental impacts of the hydroelectric power plants on the fluvial dynamics: a study case of Santa Isabel do Rio Negro, Brazil**. Environmental Earth Sciences, 77(13), 1-12. 2018.

PAIVA, B. S. **Avaliação do comportamento dos processos erosivos existentes em dois trechos da rodovia BR-158/MT, sob diferentes condições ambientais**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais) - Centro Universitário La Salle, Canoas, 2016.

PEREIRA, A. M. et al. **Avaliação dos erros sistemáticos e aleatórios em projetos fotogramétricos utilizando pontos de controle georreferenciados**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 26, n. 2, p. 326-342, 2020.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIROLI, E. L. **Introdução ao geoprocessamento**. Unesp/Campus Experimental de Ourinhos, 2010. Disponível em: http://vampira.ourinhos.unesp.br:8080/cediap/material/livro_introducao_ao_geoprocessamento.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

REID, J. R. Mechanisms of shoreline erosion along lakes and reservoirs. In: **Workshop on reservoir shoreline erosion: a national problem**. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Ed. Autor, Juiz de Fora, 2000.

ROCHA, F. A. et al. **Uso de drones para mapeamento e análise de riscos ambientais em áreas degradadas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 25, n. 4, p. 343-349, 2021.

ROCHA, P. C.; SOUZA FILHO, E. E. Erosão marginal em canais associados ao Rio Paraná na região de Porto Rico-PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 44, p. 97-116. UFPR, Curitiba, 1996.

ROCHA_____. **Dinâmica dos canais no sistema rio-planície fluvial do alto rio Paraná, nas proximidades de Porto Rico-PR**. 2002. 171 f. Tese (Doutorado em

Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2002.

ROJAS, R.; DE LIMA, J. L.; KOBAYASHI, S. **Spatial-temporal analysis of soil erosion susceptibility in the Paranoá Lake watershed, Brazil**. *Catena*, 183, 104210. 2019.

ROMÃO, P. A.; SOUZA, N. M. **Aspectos geológicos e hidrogeológicos na deflagração e evolução da erosão hídrica em margens de reservatórios**. In: SALES, M. M. et. al. *Erosão em borda de reservatório*. Goiânia: Gráfica UFG, 2017.

ROSA, L. P., et al. **Sedimentation in rivers: processes and impacts on fluvial dynamics**. *Environmental Earth Sciences*, p. 359, 2019.

ROSA, R. **Apostila Introdução ao geoprocessamento**. Universidade Federal de Uberlândia - Instituto de Geografia, 2013.

RUBIO, M. F. **Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios. Pesquisa e Desenvolvimento no estudo de casos nas UHEs Chavantes e Rosana (Rio Paranapanema, SP/PR)**. 2014. 234f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SALES, M. M. et. al. **Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017.

SANTOS, A. R. et al. Deposição de sedimentos em reservatórios de usinas hidrelétricas: impactos e mitigação. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 45, n. 2, p. 205-214, 2015.

SANTOS, E. F.; SALES, M. M.; FRANÇA, L. G.; SILVA, C. G. **Influência da variação do nível do reservatório na erosão costeira e perda de solo em margens de reservatórios hidrelétricos**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(3), 858-867. 2017.

SANTOS, J. S. **Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) e seu papel na sociedade atual**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 2, n. 7, p. 150-161, 2017.

SANTOS, L. F. B. dos. **Avaliação de modelo digital de terreno gerado através de VANT em planícies pantaneiras**. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL. **Aneel**. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 03 out. 2021.

SILVA, C. R. et al. Variabilidade espacial dos solos florestais de Capão Bonito (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, Botucatu, 2009. **Anais...** Botucatu, FCA/UNESP, 2009.

- SILVA, J. M. et al. **Utilização de Pontos de Controle Georreferenciados na correção geométrica de imagens de satélite.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 72, n. 3, p. 539-549, 2020.
- SILVA, J. M. L. **Drones: uma nova tecnologia na agricultura de precisão.** Cadernos de Agroecologia, v. 14, n. 2, 2019.
- SILVA, L. R. et al. **Erros na obtenção de pontos de controle georreferenciados em levantamentos topográficos de alta precisão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, n. 12, p. 866-872, 2019.
- SILVA, R. S.; SOUSA, A. G.; OLIVEIRA, V. H. **Environmental impacts and socioeconomic consequences of hydroelectric dams: a systematic review of the Brazilian experience.** Journal of Environmental Management, 262, 110308. 2020.
- SIQUEIRA, G. C.; SILVA, R. B.; BARBOSA, M. R. **Erosão em margens de reservatórios: Estudo de caso na UHE Xingu.** In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Belo Horizonte, MG. 2013.
- SIPOT - Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT). Eletrobras, 2018. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro.** Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 02 out. 2021.
- SOARES, M.S.; MARQUES, M.; LANGE, D.R.; SANTOS, I. Utilização de mapas de fetch como método de delimitação de áreas propensas a erosão em reservatório: estudo de caso da uhe capivari-cachoeira - pr. **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, v.10, n.1, p.717-721, 2014.
- SOUZA, G. **Análise da Influência das Configurações dos pontos de apoio e do voo na Acurácia de Ortofotomosaicos elaborados a partir de dados de VANT.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- SOUZA, G. M.; BICUDO, D. C.; SALES, R. F. **The impact of hydroelectric power generation on water availability in Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 100-115. 2019.
- SOUZA, V. R. et al. **Influência de erros em receptores GNSS no posicionamento de pontos de controle georreferenciados.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 6, p. 1187-1197, 2018.
- TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável:** Hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.
- TONUSSI, A. P. **Estudo de ruptura de barragem por piping.** 2017. 100f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Curso de Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

VEIGA, L. A.K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. 2007.

XAVIER DA SILVA, J. E Z Aidan, R.T. **Geoprocessamento e análise ambiental: aplicações**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2004. 363 p.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A... **Física II: Termodinâmica e ondas**. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008. 329p.

APÊNDICE A – AUTORIZAÇÃO CERILUZ



Universidade Federal de Santa Maria – Campus Frederico Westphalen
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental



AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA

Eu, Fernanda Gumisson Miranda, CPF 034.764.020-61, Engenheira Civil, discente da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – *Campus* Frederico Westphalen, no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), matrícula 201970494, sob orientação do Prof(a). Dr(a). Renato Beppler Spohr, venho através deste solicitar a Cooperativa de Geração de Energia e Desenvolvimento Social LTDA (CERILUZ GERAÇÃO), CNPJ 08.290.060/0001-06, autorização para realização de pesquisa *in loco* na usina hidrelétrica PCH RS – 155 através da realização mapeamento aéreos com a utilização de drone (VANTS) pelo período de 18 meses, a contar da presente data, para desenvolvimento da dissertação de mestrado, intitulada “Mapeamento e Monitoramento de Processos Erosivos em Margens de Usinas Hidrelétricas com Utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS)”, sem ônus financeiro.

Ijuí, RS, 27 de abril de 2020.

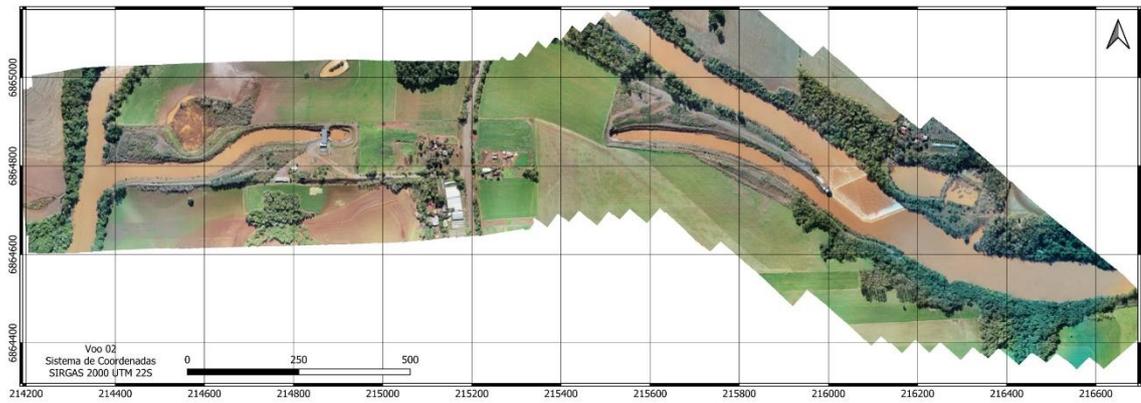
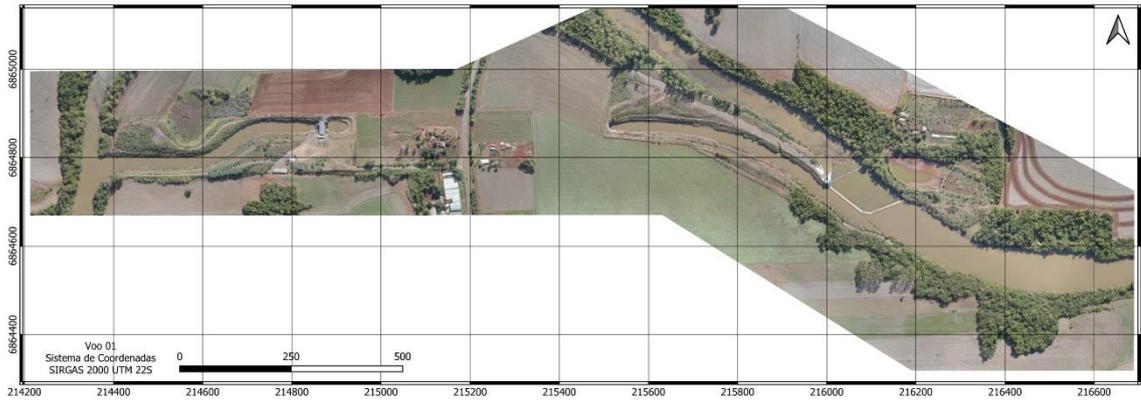
FERNANDA GUMISSON Assinado de forma digital por
FERNANDA GUMISSON
MIRANDA:03476402061
Dados: 2023.03.10 17:57:20 -03'00'

.....
Fernanda Gumisson Miranda
Mestranda do PPGCTA/UFSM-FW

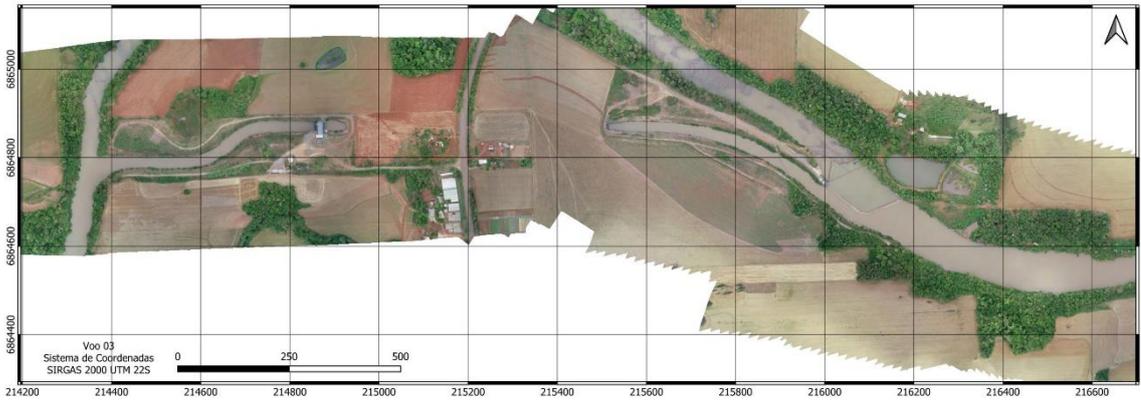
.....
Cooperativa de Geração de Energia e Desenvolvimento Social LTDA (CERILUZ
GERAÇÃO)
CNPJ 08.290.060/0001-06
Juarez Bernardi
Engenheiro Civil
CREA RS 140473-D



APÊNDICE B – PLANTA VOO 1 E VOO 2



APÊNDICE C – PLANTA VOO 3 E VOO 4



APÊNDICE D – RELATÓRIO DO VOO 1

Agisoft PhotoScan

Processing Report
22 January 2023



Survey Data

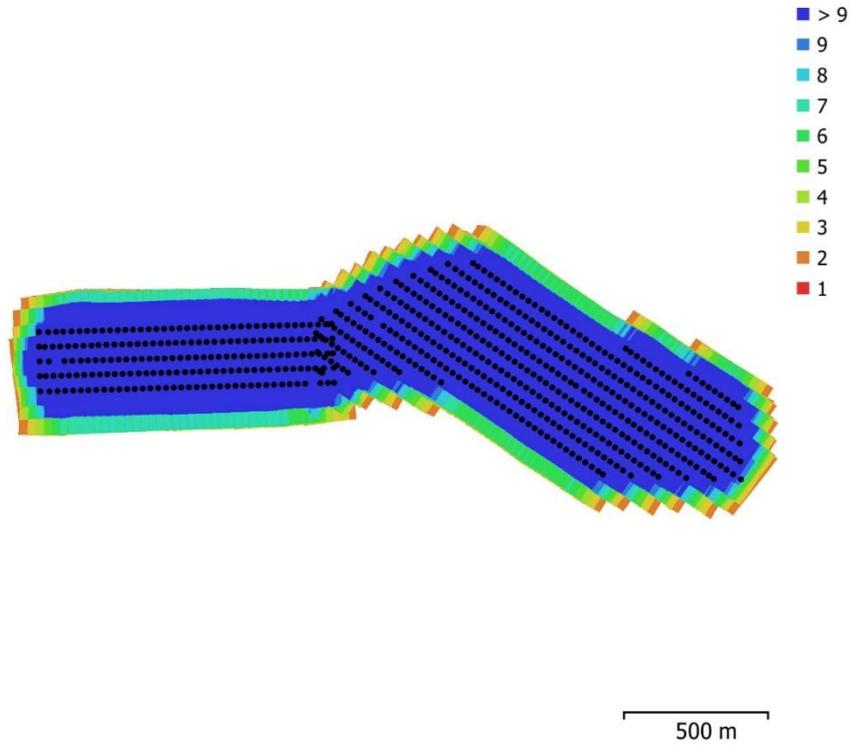


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	636	Camera stations:	636
Flying altitude:	193 m	Tie points:	809,043
Ground resolution:	4.77 cm/pix	Projections:	3,224,322
Coverage area:	1.49 km ²	Reprojection error:	1.16 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 um	Não

Table 1. Cameras.

Calibração da Câmera

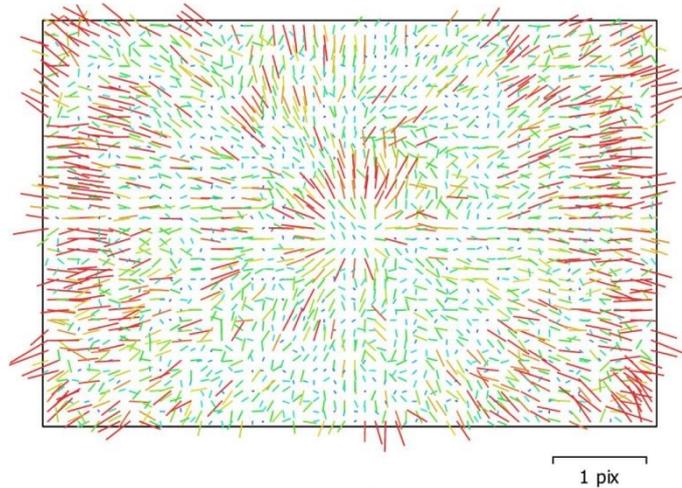


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8mm).

FC6310 (8.8mm)

636 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 um

	Valor	Error	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3648											
Cx	2.70841	0.033	1.00	0.00	0.03	0.02	-0.01	0.00	-0.00	0.00	0.32	0.01
Cy	-15.9936	0.027		1.00	-0.01	0.00	0.01	-0.00	0.00	-0.00	0.01	0.23
B1	-0.462932	0.017			1.00	0.05	0.01	-0.03	0.03	-0.02	0.01	0.01
B2	0.127499	0.017				1.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.01
K1	0.00580699	4.9e-05					1.00	-0.85	0.82	-0.78	0.16	0.01
K2	-0.0545902	0.0002						1.00	-0.99	0.96	-0.01	0.00
K3	0.0984966	0.00038							1.00	-0.99	0.01	-0.00
K4	-0.0586047	0.00024								1.00	-0.01	-0.00
P1	0.000954471	1.4e-06									1.00	0.01
P2	-0.00134509	1e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

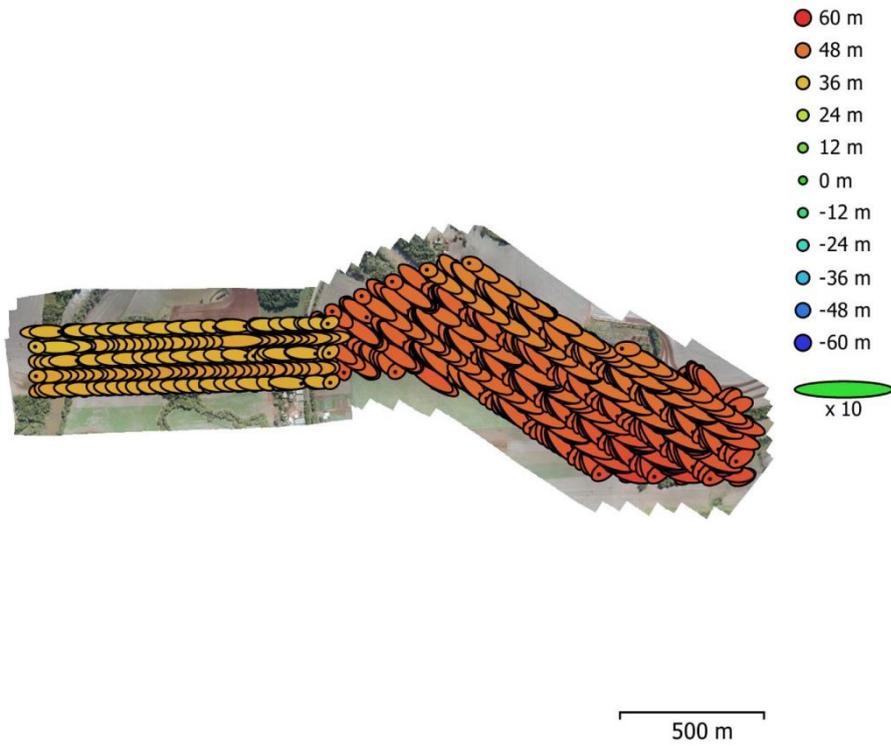


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
5.32049	3.11127	47.4906	6.1634	47.8889

Table 3. Average camera location error.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points



● Control points † Check points 500 m

Fig. 4. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Número	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
11	13.3805	8.35647	44.9232	15.7755	47.6126

Table 4. Control points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
PC1	4.10996	1.97366	24.2216	24.6469	0.605 (18)
PC3	4.30366	2.08077	-12.2462	13.1461	0.606 (28)
PC5	0.926842	-0.634113	-43.2001	43.2147	0.476 (22)
PC7	-8.58876	-10.0494	-81.1258	82.1958	3.018 (30)
PC10	6.05579	0.426431	39.6085	40.071	1.178 (21)
PC13	14.0142	-0.674081	-15.0208	20.5543	0.663 (24)
PC15	10.3609	5.85026	5.26037	13.0094	1.024 (14)
PC16	-35.6037	-14.8944	91.8747	99.6516	20.394 (15)
PC18	9.44258	19.2992	-23.1233	31.5643	0.735 (19)
PC19	6.4769	1.28467	-31.4713	32.1566	0.662 (12)
PC21	-10.9641	-5.26352	35.0219	37.0735	1.324 (23)
Total	13.3805	8.35647	44.9232	47.6126	5.422

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

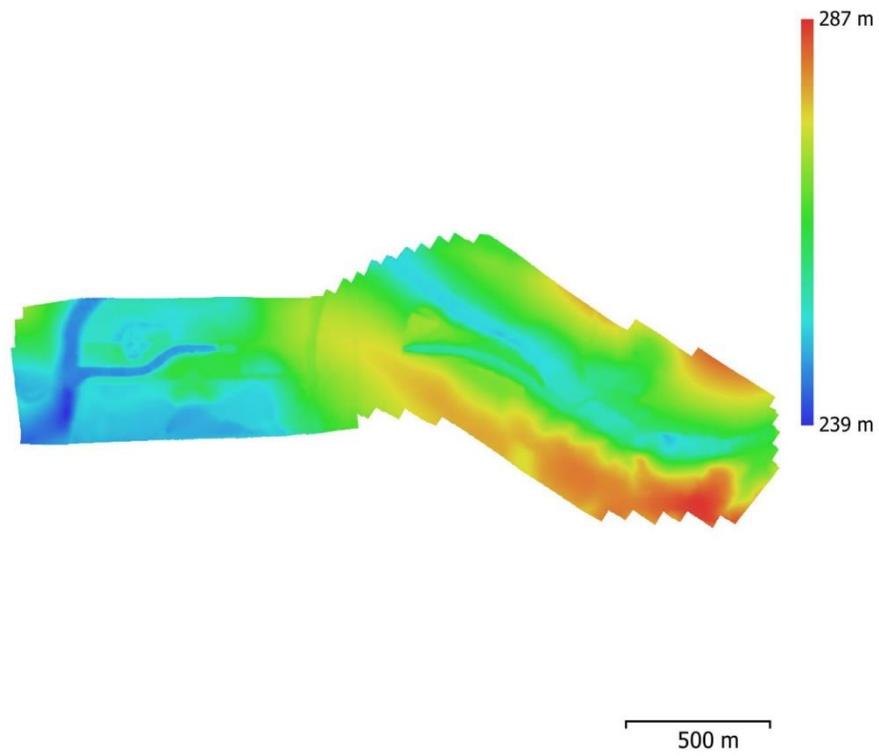


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 19.1 cm/pix
Point density: 27.5 points/m²

Processing Parameters

Geral

Câmaras	636
Aligned cameras	636
Marcadores	11
Shapes	
Polylines	282
Polygons	100
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Nuvem de Pontos

Pontos	809,043 of 980,513
RMS reprojection error	0.134174 (1.16015 pix)
Max reprojection error	0.363238 (12.6202 pix)
Mean key point size	8.00575 pix
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Key points	Não
Average tie point multiplicity	4.83403

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Média
Generic preselection	Sim
Reference preselection	Sim
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Filter points by mask	Sim
Mask tie points	Não
Adaptive camera model fitting	Sim
Matching time	56 minutes 47 seconds
Alignment time	22 minutes 0 seconds

Dense Point Cloud

Pontos	52,130,150
Cores dos pontos	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	5 hours 38 minutes
Dense cloud generation time	2 hours 23 minutes

Modelo

Faces	199,999
Vértices	105,390
Cores dos vértices	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surface type	Mapa de alturas / Terreno
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Número de faces	10,426,029
Tempo de processamento	4 minutes 21 seconds

DEM

Tamanho	18,531 x 7,487
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)

Parâmetros de reconstrução

Source data	Mesh
Interpolation	Enabled
Tempo de processamento	3 minutes 23 seconds

Orthomosaic

Tamanho 55,979 x 21,703
Coordinate system SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Colors 3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Modo de combinação Mosaico
Surface DEM
Enable hole filling Sim
Tempo de processamento 43 minutes 4 seconds

Software

Version 1.4.3 build 6488
Platform Windows 64

APÊNDICE E – RELATÓRIO DO VOO 2

Agisoft PhotoScan

Processing Report
27 November 2022



Survey Data

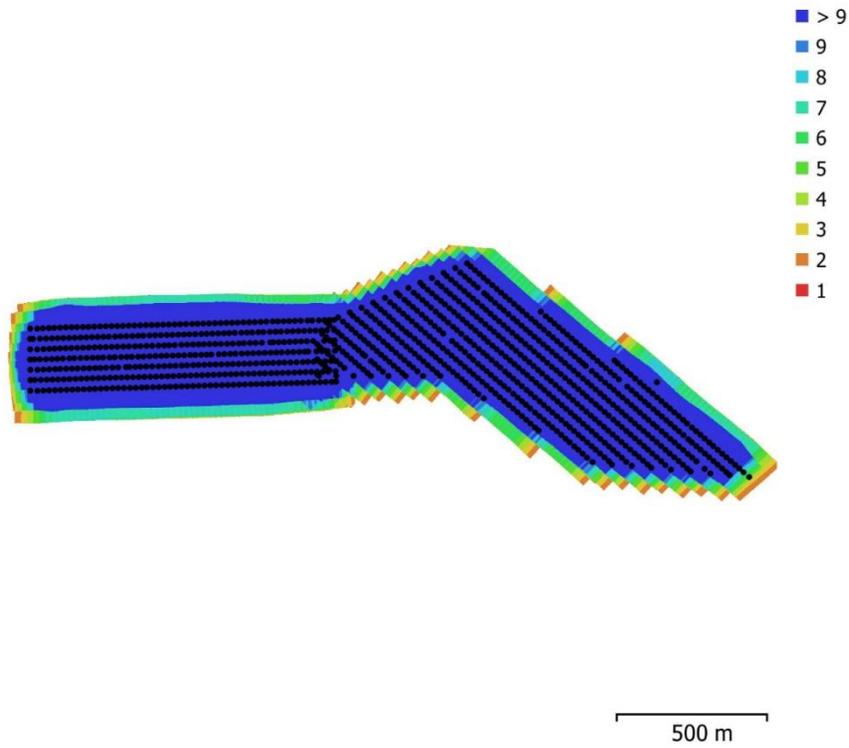


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	974	Camera stations:	974
Flying altitude:	139 m	Tie points:	1,575,621
Ground resolution:	3.39 cm/pix	Projections:	6,087,483
Coverage area:	1.09 km ²	Reprojection error:	0.538 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 um	Não

Table 1. Cameras.

Calibração da Câmera

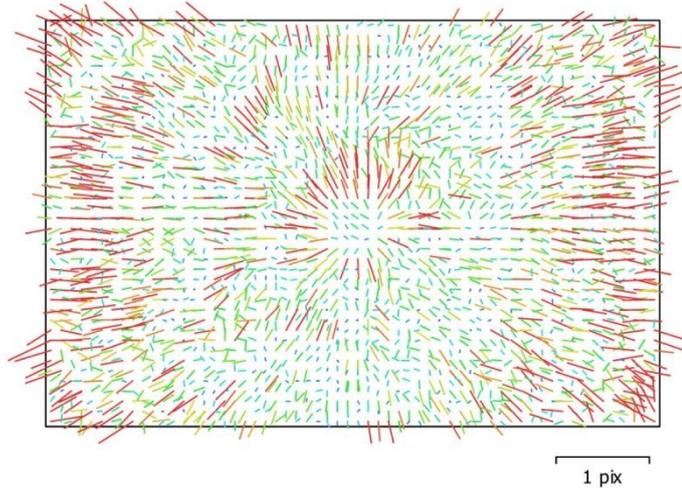


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8mm).

FC6310 (8.8mm)

974 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 5472 x 3648 8.8 mm 2.41 x 2.41 um

	Valor	Error	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3648											
Cx	2.17165	0.016	1.00	-0.01	0.02	0.02	-0.00	-0.01	0.01	-0.00	0.26	0.01
Cy	-16.3435	0.014		1.00	-0.01	0.02	-0.01	0.00	-0.00	-0.00	-0.02	0.17
B1	-0.438774	0.0056			1.00	0.03	0.02	-0.03	0.02	-0.02	0.01	-0.00
B2	0.0588604	0.0055				1.00	0.01	-0.00	0.00	-0.00	0.02	0.01
K1	0.00632381	2.5e-05					1.00	-0.70	0.68	-0.65	0.36	0.06
K2	-0.0554724	8e-05						1.00	-0.99	0.96	-0.03	0.00
K3	0.0979698	0.00015							1.00	-0.99	0.03	0.00
K4	-0.0570145	9.2e-05								1.00	-0.03	-0.00
P1	0.000890379	6.4e-07									1.00	0.07
P2	-0.00139992	4.6e-07										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

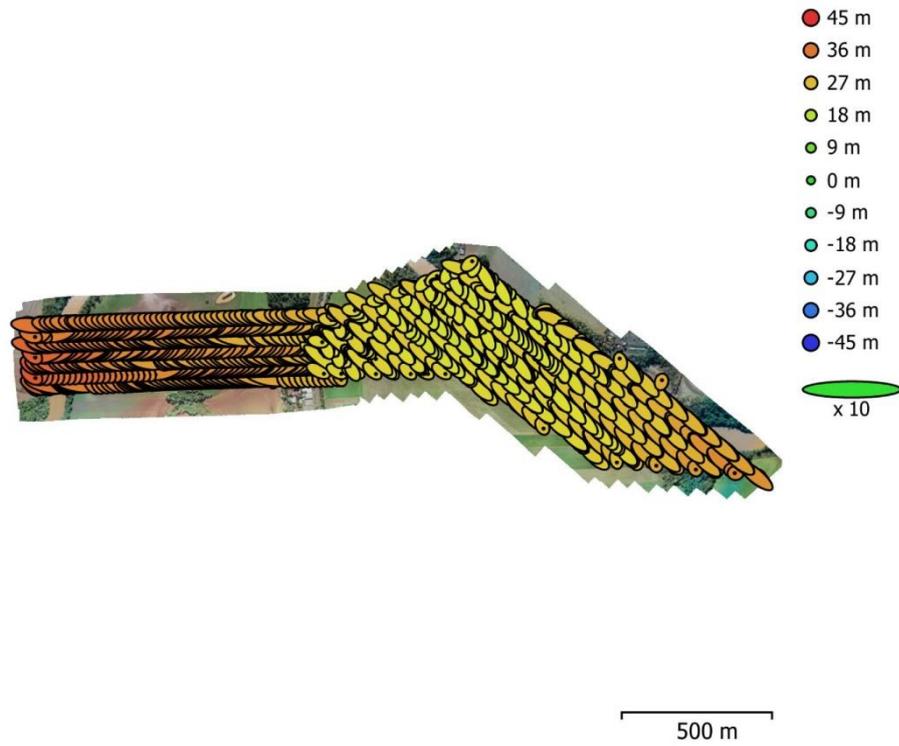


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
4.13701	2.77723	28.2586	4.98276	28.6946

Table 3. Average camera location error.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

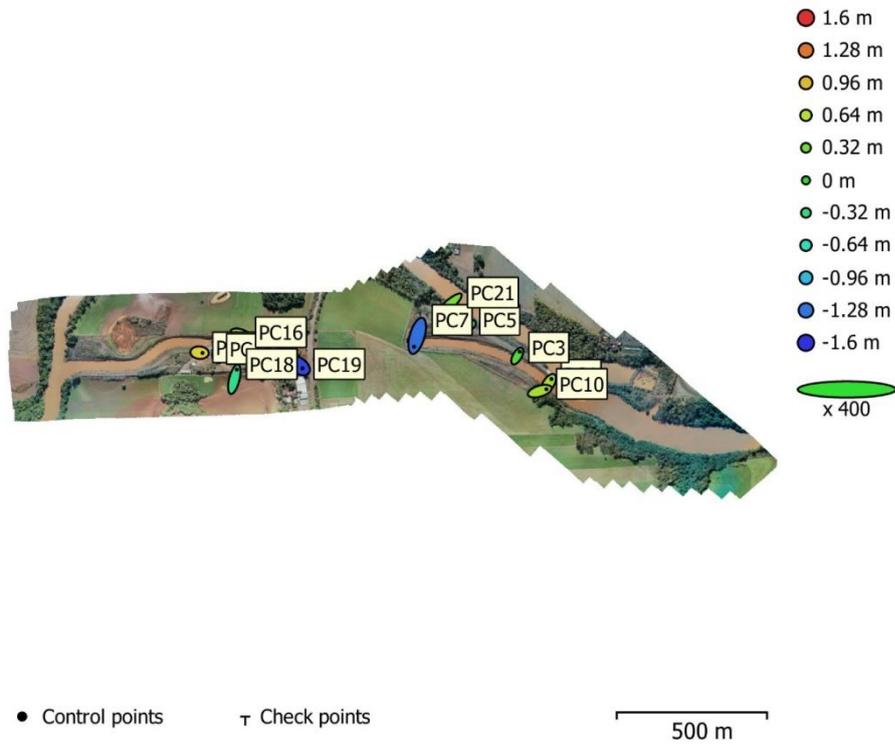


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Número	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
11	7.77694	9.59561	76.4976	12.3514	77.4883

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
PC1	5.18118	8.26387	56.7798	57.6115	0.633 (20)
PC3	4.11065	7.21531	13.267	15.6516	0.716 (33)
PC5	-4.23942	-1.72013	-40.9134	41.1684	0.472 (25)
PC7	-5.29203	-18.244	-130.744	132.117	2.836 (23)
PC10	10.9873	3.32944	54.6807	55.8729	3.238 (14)
PC13	4.82223	-0.424209	86.0103	86.1464	0.634 (35)
PC15	-0.749626	3.29116	51.7834	51.8933	0.984 (20)
PC16	-8.72179	3.31428	59.6378	60.3633	1.541 (23)
PC18	4.06952	16.1647	-42.9478	46.0692	0.621 (32)
PC19	6.86616	-4.77921	-150.612	150.844	0.652 (23)
PC21	-17.0662	-15.4744	32.3767	39.7362	0.852 (23)
Total	7.77694	9.59561	76.4976	77.4883	1.344

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

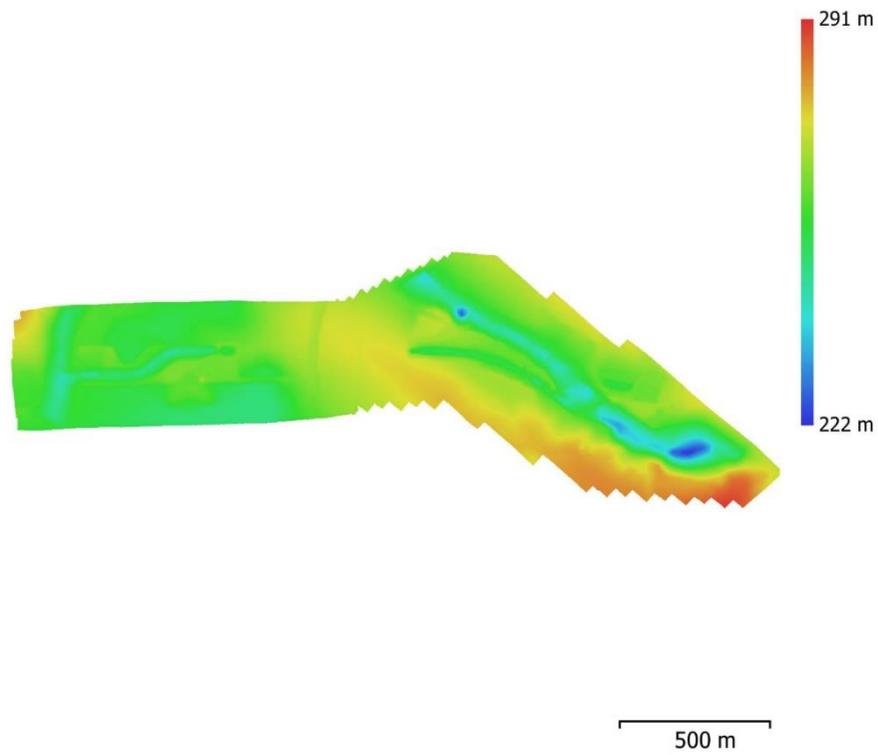


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 13.6 cm/pix
Point density: 54.3 points/m²

Processing Parameters

Geral	
Câmaras	974
Aligned cameras	974
Marcadores	11
Shapes	
Polylines	318
Polygons	316
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Nuvem de Pontos	
Pontos	1,575,621 of 1,729,711
RMS reprojection error	0.193125 (0.53771 pix)
Max reprojection error	0.558079 (8.95939 pix)
Mean key point size	2.72888 pix
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Key points	Não
Average tie point multiplicity	4.24463
Parâmetros de alinhamento	
Precisão	Elevada
Generic preselection	Sim
Reference preselection	Sim
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Filter points by mask	Sim
Mask tie points	Não
Adaptive camera model fitting	Sim
Matching time	6 hours 15 minutes
Alignment time	31 minutes 58 seconds
Dense Point Cloud	
Pontos	72,954,144
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Parâmetros de reconstrução	
Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	6 hours 57 minutes
Dense cloud generation time	5 hours 10 minutes
Modelo	
Faces	200,000
Vértices	105,380
Cores dos vértices	3 bands, uint8
Parâmetros de reconstrução	
Surface type	Mapa de alturas / Terreno
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Número de faces	14,590,817
Tempo de processamento	8 minutes 22 seconds
DEM	
Tamanho	21,682 x 8,210
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Parâmetros de reconstrução	
Source data	Mesh
Interpolation	Enabled
Tempo de processamento	5 minutes 21 seconds

Orthomosaic

Tamanho	75,411 x 25,423
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Colors	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Modo de combinação	Mosaico
Surface	DEM
Enable hole filling	Sim
Tempo de processamento	1 hours 10 minutes

Software

Version	1.4.3 build 6488
Platform	Windows 64

APÊNDICE E – RELATÓRIO DO VOO 3

Agisoft PhotoScan

**Processing Report
22 January 2023**



Survey Data

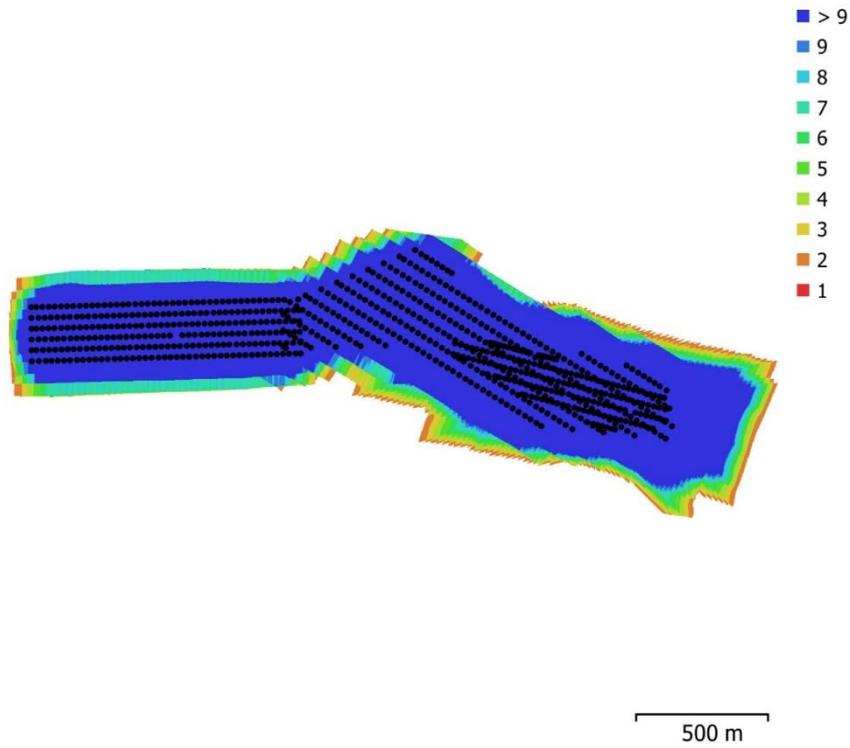


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	777	Camera stations:	777
Flying altitude:	199 m	Tie points:	1,046,983
Ground resolution:	4.81 cm/pix	Projections:	4,066,176
Coverage area:	1.6 km ²	Reprojection error:	1.02 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 um	Não

Table 1. Cameras.

Calibração da Câmera

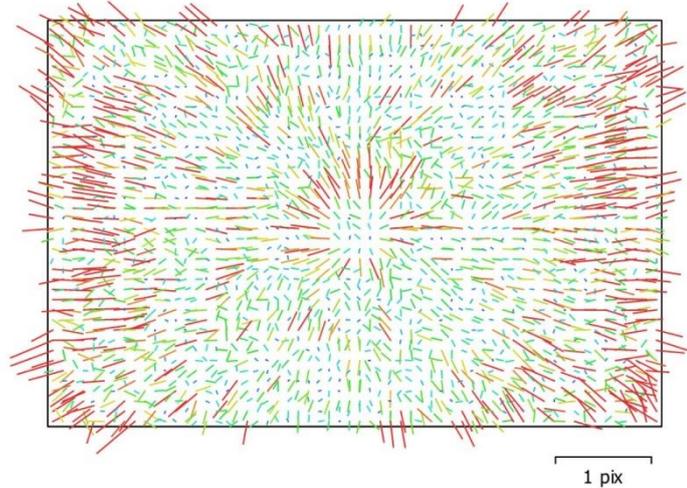


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8mm).

FC6310 (8.8mm)

777 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 5472 x 3648 8.8 mm 2.41 x 2.41 um

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3643.78	0.063	1.00	0.08	-0.31	-0.07	-0.20	-0.09	0.11	-0.09	0.07	0.02	-0.00
Cx	2.70651	0.026		1.00	-0.02	-0.18	-0.04	0.00	-0.01	0.01	-0.01	0.43	0.01
Cy	-16.446	0.025			1.00	-0.02	-0.05	-0.00	0.00	-0.00	0.01	0.00	0.20
B1	-0.340482	0.013				1.00	0.03	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.00
B2	-0.113709	0.013					1.00	-0.01	0.00	-0.00	0.01	0.00	0.02
K1	0.00600082	3.9e-05						1.00	-0.96	0.91	-0.87	0.01	-0.01
K2	-0.0492395	0.00018							1.00	-0.99	0.96	0.00	-0.00
K3	0.0882983	0.00034								1.00	-0.99	-0.01	0.00
K4	-0.0521861	0.00022									1.00	0.01	-0.00
P1	0.000979382	1.2e-06										1.00	0.02
P2	-0.00140872	9.5e-07											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

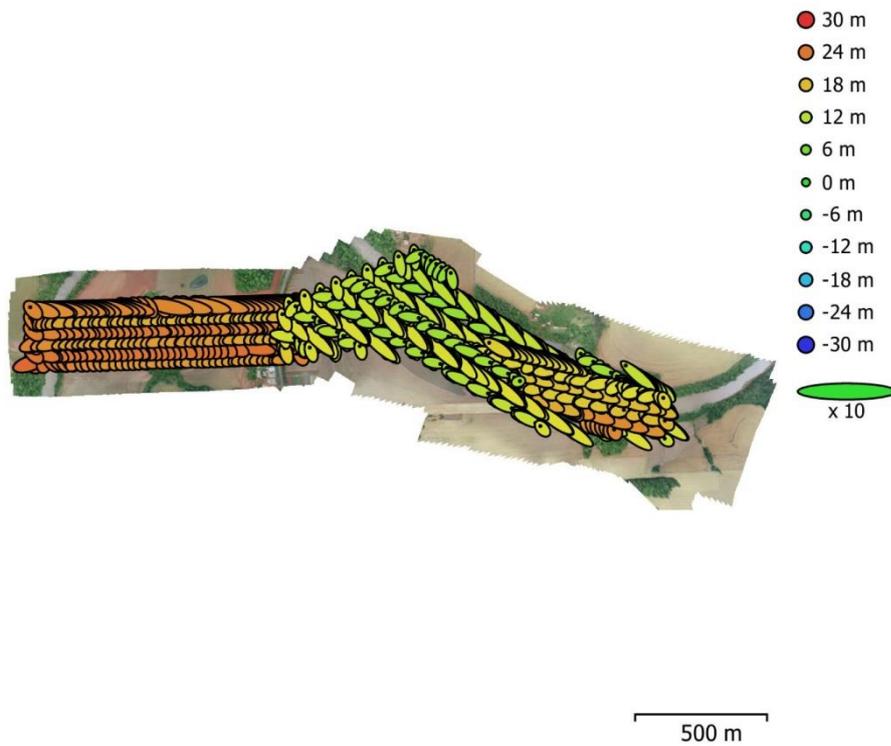


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
5.39997	3.59256	17.3357	6.48584	18.5093

Table 3. Average camera location error.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Número	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
11	15.3075	14.1417	45.4074	20.84	49.9614

Table 4. Control points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
PC1	8.81512	3.20999	-9.43574	13.3058	0.679 (20)
PC3	8.27214	-0.765155	-52.0943	52.7525	0.562 (34)
PC5	-43.7948	-37.799	118.759	132.1	71.037 (24)
PC7	5.86376	-2.05789	-11.0376	12.6668	2.913 (25)
PC10	19.1492	16.6708	-1.10275	25.413	1.617 (23)
PC13	4.16213	-4.50777	0.451781	6.15203	0.763 (37)
PC15	-1.65146	-3.72246	15.505	16.0309	0.924 (25)
PC16	-3.17744	18.4455	-54.8897	57.9932	14.008 (21)
PC18	2.19978	9.89709	17.9613	20.6252	0.580 (28)
PC19	6.50185	-1.71395	14.3007	15.8026	0.725 (25)
PC21	-5.92225	1.65824	-43.2431	43.6783	2.070 (31)
Total	15.3075	14.1417	45.4074	49.9614	20.714

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

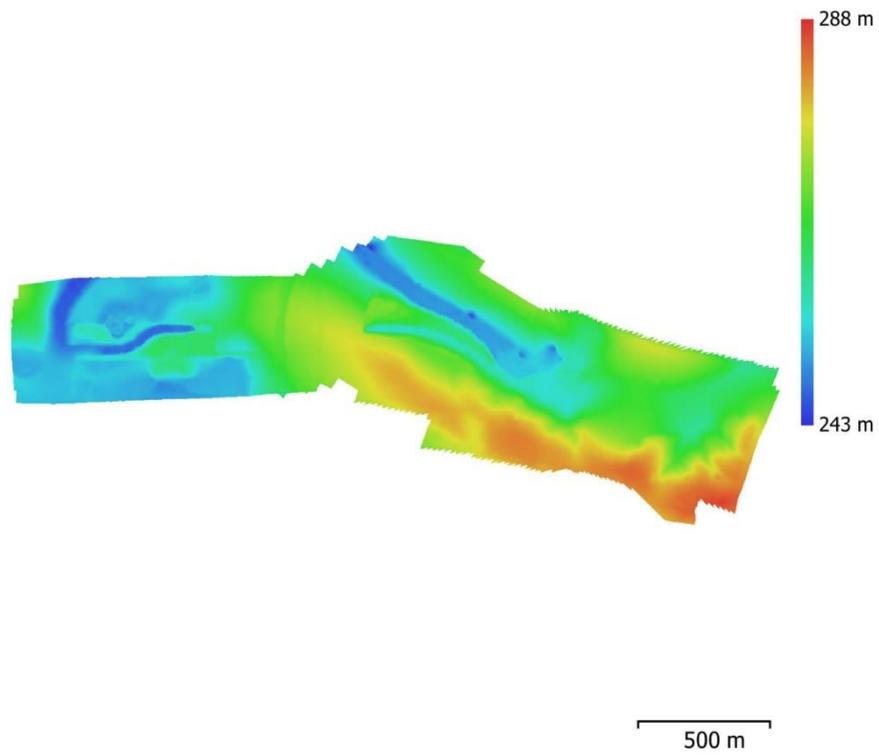


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 19.2 cm/pix
Point density: 27 points/m²

Processing Parameters

Geral

Câmaras	777
Aligned cameras	777
Marcadores	11
Shapes	
Polylines	306
Polygons	150
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Nuvem de Pontos

Pontos	1,046,983 of 1,214,087
RMS reprojection error	0.129001 (1.02101 pix)
Max reprojection error	0.374963 (13.4724 pix)
Mean key point size	7.40953 pix
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Key points	Não
Average tie point multiplicity	4.53003

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Média
Generic preselection	Sim
Reference preselection	Sim
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Filter points by mask	Sim
Mask tie points	Não
Adaptive camera model fitting	Sim
Matching time	55 minutes 4 seconds
Alignment time	30 minutes 19 seconds

Dense Point Cloud

Pontos	51,650,026
Cores dos pontos	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	6 hours 27 minutes
Dense cloud generation time	15 hours 21 minutes

Modelo

Faces	199,983
Vértices	106,552
Cores dos vértices	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surface type	Mapa de alturas / Terreno
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Número de faces	10,329,992
Tempo de processamento	4 minutes 27 seconds

DEM

Tamanho	18,643 x 7,324
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)

Parâmetros de reconstrução

Source data	Mesh
Interpolation	Enabled
Tempo de processamento	4 minutes 17 seconds

Orthomosaic

Tamanho 60,631 x 22,983
Coordinate system SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Colors 3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Modo de combinação Mosaico
Surface DEM
Enable hole filling Sim
Tempo de processamento 15 hours 40 minutes

Software

Version 1.4.3 build 6488
Platform Windows 64

APÊNDICE F – RELATÓRIO DO VOO 4

Agisoft PhotoScan

Processing Report
22 January 2023



Survey Data

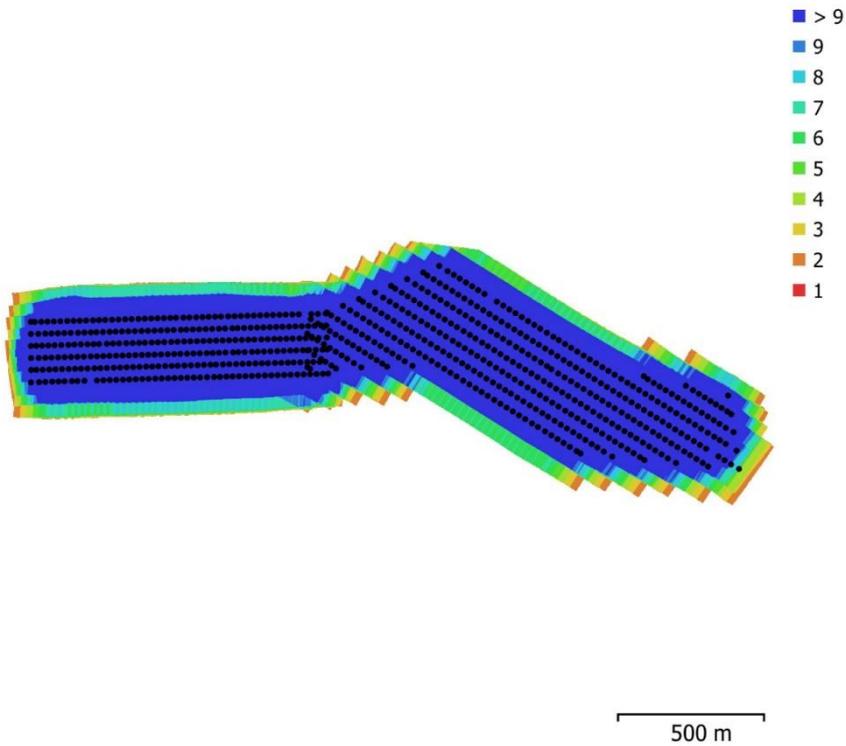


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	671	Camera stations:	671
Flying altitude:	176 m	Tie points:	604,474
Ground resolution:	4.34 cm/pix	Projections:	1,657,475
Coverage area:	1.28 km ²	Reprojection error:	0.803 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 um	Não

Table 1. Cameras.

Calibração da Câmera

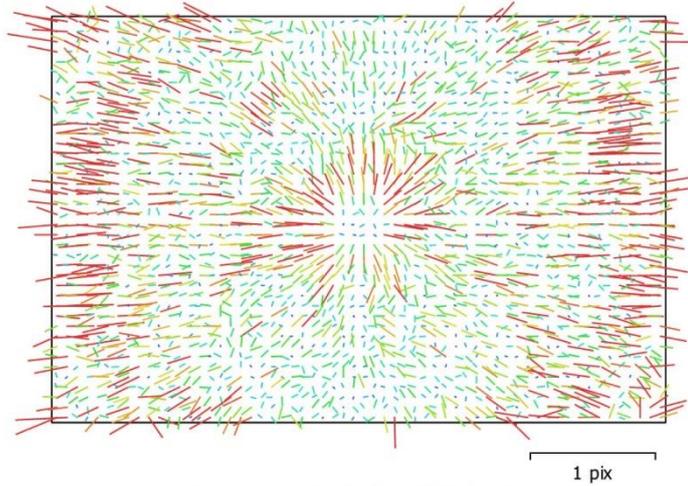


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8mm).

FC6310 (8.8mm)

671 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 5472 x 3648 8.8 mm 2.41 x 2.41 um

	Valor	Error	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	3648										
Cx	2.32224	0.055	1.00	0.02	-0.06	-0.07	-0.02	0.02	-0.02	0.36	-0.00
Cy	-16.6543	0.044		1.00	0.04	-0.07	0.00	-0.00	0.00	0.03	0.32
B1	-0.73823	0.05			1.00	-0.01	-0.00	-0.02	0.02	0.01	0.04
B2	-0.241543	0.05				1.00	-0.00	-0.01	0.01	-0.12	-0.01
K1	-0.00209385	4.1e-05					1.00	-0.77	0.72	0.08	0.02
K2	-0.00778877	9.2e-05						1.00	-0.98	0.00	0.01
K3	0.00743718	7.7e-05							1.00	-0.00	-0.01
P1	0.00100732	2.3e-06								1.00	0.01
P2	-0.00154481	2e-06									1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

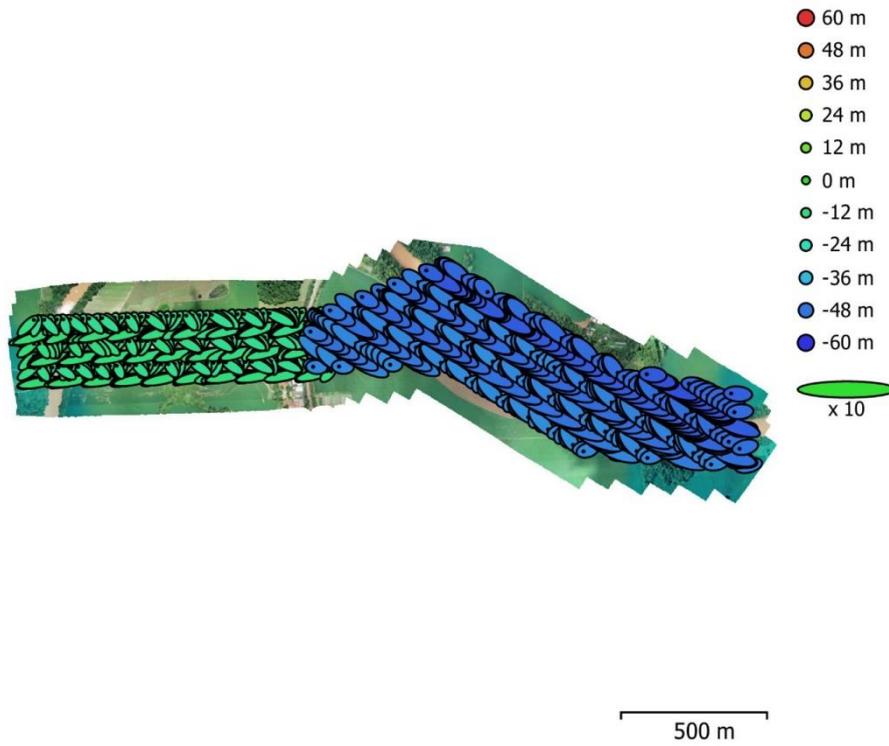


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
5.4818	2.91187	38.0545	6.20719	38.5574

Table 3. Average camera location error.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

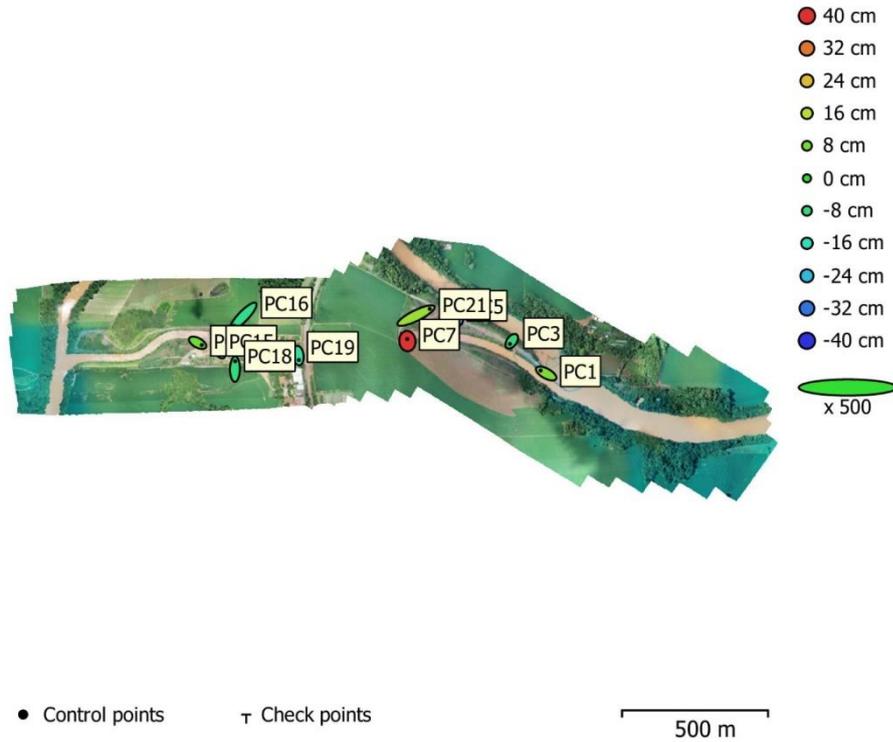


Fig. 4. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Número	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
10	7.8922	7.28999	17.6149	10.7439	20.6328

Table 4. Control points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
PC1	-7.65868	4.18926	8.87905	12.4516	0.808 (15)
PC3	-2.65348	-3.73465	-8.57235	9.71976	0.680 (22)
PC5	1.51917	-6.41978	-27.2339	28.0215	0.634 (23)
PC7	-0.28985	2.9203	39.6918	39.8001	2.610 (13)
PC13	5.66643	-3.13224	6.94329	9.49361	0.587 (29)
PC15	-3.50355	5.28564	9.27947	11.2393	1.195 (15)
PC16	-12.5364	-13.1403	-10.3412	20.899	2.156 (11)
PC18	0.105112	10.8081	-8.37993	13.6766	0.505 (17)
PC19	0.725426	-6.09445	-13.0527	14.4236	0.443 (12)
PC21	18.7803	9.26439	12.31	24.2912	2.201 (20)
Total	7.8922	7.28999	17.6149	20.6328	1.310

Table 5. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

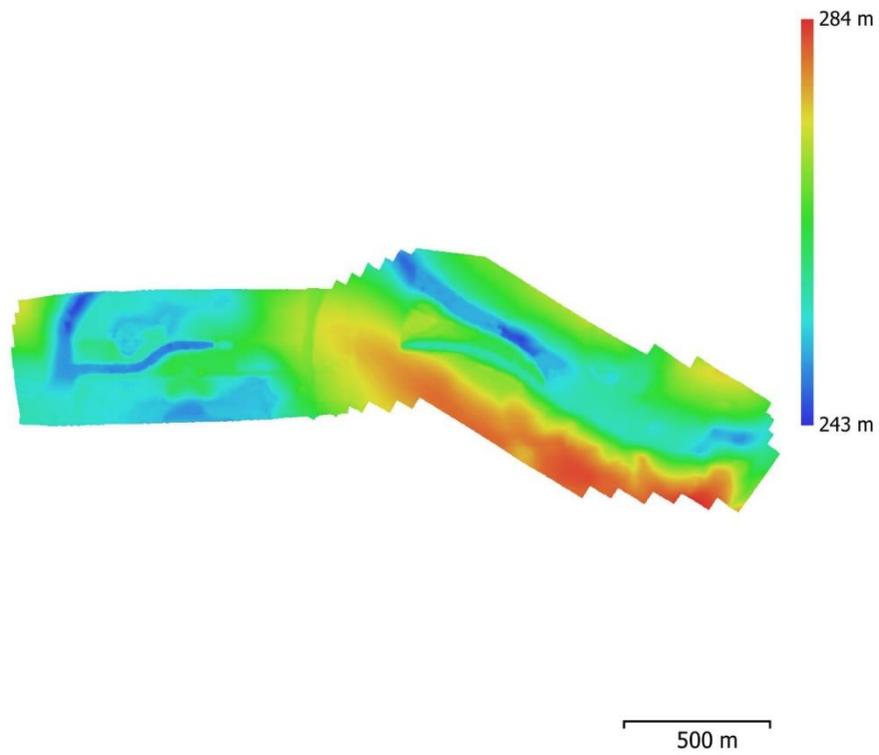


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 17.4 cm/pix
Point density: 33.1 points/m²

Processing Parameters

Geral

Câmaras	671
Aligned cameras	671
Marcadores	10
Shapes	
Polylines	268
Polygons	198
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Nuvem de Pontos

Pontos	604,474 of 801,923
RMS reprojection error	0.108368 (0.803171 pix)
Max reprojection error	0.266645 (5.59053 pix)
Mean key point size	7.00414 pix
Cores dos pontos	3 bands, uint8
Key points	Não
Average tie point multiplicity	3.43515

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Média
Generic preselection	Sim
Reference preselection	Sim
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Filter points by mask	Sim
Mask tie points	Não
Adaptive camera model fitting	Sim
Matching time	33 minutes 28 seconds
Alignment time	10 minutes 50 seconds

Dense Point Cloud

Pontos	56,596,458
Cores dos pontos	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	3 hours 3 minutes
Dense cloud generation time	2 hours 32 minutes

Modelo

Faces	199,997
Vértices	104,212
Cores dos vértices	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surface type	Mapa de alturas / Terreno
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depth filtering	Aggressive
Número de faces	11,319,278
Tempo de processamento	5 minutes 46 seconds

DEM

Tamanho	19,420 x 7,048
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)

Parâmetros de reconstrução

Source data	Mesh
Interpolation	Enabled
Tempo de processamento	3 minutes 48 seconds

Orthomosaic

Tamanho	60,663 x 21,019
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 22S (EPSG::31982)
Colors	3 bands, uint8

Parâmetros de reconstrução

Modo de combinação	Mosaico
Surface	DEM
Enable hole filling	Sim
Tempo de processamento	48 minutes 53 seconds

Software

Version	1.4.3 build 6488
Platform	Windows 64