

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Alessandro Pimentel Mesquita**

**FERRAMENTA SEMIAUTOMATIZADA PARA  
REDUÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE TERRA EM  
PISTAS AEROPORTUÁRIAS**

Trabalho de Graduação  
2024

**Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica**

**Alessandro Pimentel Mesquita**

**FERRAMENTA SEMIAUTOMATIZADA PARA  
REDUÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE TERRA EM  
PISTAS AEROPORTUÁRIAS**

Orientador

Prof. Dr. Evandro José Silva (ITA)

**ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA**

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Pimentel Mesquita, Alessandro  
Ferramenta Semiautomatizada para Redução da Movimentação de Terra em Pistas  
Aeroportuárias / Alessandro Pimentel Mesquita.  
São José dos Campos, 2024.  
42f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de  
Aeronáutica, 2024. Orientador: Prof. Dr. Evandro José Silva.

1. Terraplenagem. 2. Aeródromo. 3. Aterros. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

PIMENTEL MESQUITA, Alessandro. **Ferramenta Semiautomatizada para Redução da Movimentação de Terra em Pistas Aeroportuárias**. 2024. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Alessandro Pimentel Mesquita

TÍTULO DO TRABALHO: Ferramenta Semiautomatizada para Redução da Movimentação de Terra em Pistas Aeroportuárias.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2024

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Alessandro Pimentel Mesquita  
Rua do H8B, Ap. 217  
12.228-461 – São José dos Campos–SP

# FERRAMENTA SEMIAUTOMATIZADA PARA REDUÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE TERRA EM PISTAS AEROPORTUÁRIAS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

*Alessandro Pimentel Mesquita*

---

Alessandro Pimentel Mesquita

Autor

*Evandro José da Silva*

---

Evandro José Silva (ITA)

Orientador

*Evandro José da Silva*

---

Prof. Dr. Evandro José da Silva

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 15 de Novembro de 2024.

À minha família, amigos da graduação,  
professores e colegas por me apoiarem  
e motivarem durante a elaboração deste  
trabalho que encerra minha passagem  
por este querido instituto

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu pai Francisco, à minha mãe Jacyra, aos meus irmãos Lucas e Nicolas, ao meu tio Ednaldo, aos meus avós e outros tios por todo o apoio que recebi tanto para ingressar no ITA quanto para concluir minha graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica aqui.

Também não poderia deixar de citar as duas pessoas mais próximas a mim que me acompanharam nos melhores e nos mais desafiadores momentos dessa graduação; Rafaella Carmo e Samara Lemos, eu só tenho a agradecer pela amizade e apoio de vocês durante esse período e que a amizade desse trio continue se estendendo para muito além do ITA.

Por fim, gostaria de agradecer também a todos os outros amigos do H8 que conheci e dividi momentos durante essa graduação, aos meus colegas e professores que me acompanharam durante essa jornada e, finalmente, ao Professor Evandro, que desde o início do curso profissional desempenhou um papel fundamental como professor, coordenador e orientador durante esses últimos 3 anos.

# Resumo

O crescimento significativo da aviação regional no Brasil tem intensificado a demanda por novas infraestruturas aeroportuárias, evidenciando a necessidade de otimização nos projetos de implantação de novas pistas e aeródromos. A movimentação de terra representa um dos maiores desafios nesses projetos, sendo capaz de influenciar consideravelmente os custos, o tempo de execução e os impactos ambientais associados à terraplenagem. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação de uma ferramenta semiautomatizada que visa reduzir o volume de terraplenagem na construção de pistas aeroportuárias e suas faixas adjacentes, utilizando Modelos Digitais e Elevação (MDE). A abordagem proposta está alinhada às diretrizes do "Manual de Apoio à Prospecção de Novos Sítios Aeroportuários Regionais", promovendo maior eficiência e sustentabilidade nas obras aeroportuárias. Assim, espera-se que a ferramenta contribua para a modernização dos processos de engenharia no setor de terraplenagem, reduzindo custos, prazos e impactos ambientais; além de atender às crescentes demandas da aviação regional brasileira.

# Abstract

The significant growth of regional aviation in Brazil has intensified the demand for new airport infrastructures, highlighting the need for optimization in the design of new runways and aerodromes. Earthmoving represents one of the greatest challenges in these projects, as it can considerably influence costs, execution time, and the environmental impacts associated with earthworks. In this context, this work proposes the development and implementation of a semi-automated tool that aims to reduce the volume of earthworks in the construction of airport runways and their adjacent strips, using Digital Elevation Models (DEMs). The proposed approach aligns with the guidelines of the "Manual for Supporting the Prospecting of New Regional Airport Sites," promoting greater efficiency and sustainability in airport construction. Thus, it is expected that the tool will contribute to the modernization of engineering processes in the earthworks sector, reducing costs, timelines, and environmental impacts, in addition to meeting the growing demands of Brazilian regional aviation.

# Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Anuário do Transporte Aéreo (ANAC, 2023) . . . . .	14
FIGURA 2.1 – Faseamento do MESA . . . . .	20
FIGURA 2.2 – Exemplo de área a ser planejada para a instalação de uma pista de aeródromo . . . . .	21
FIGURA 2.3 – Exemplo de análise de sítios proposto no Manual . . . . .	22
FIGURA 2.4 – Instituto de Energia e Ambiente (2020) . . . . .	23
FIGURA 2.5 – Boxplot dos erros por classe de declividade para o modelo digital de elevação global ASTER nas quatro áreas de estudo do artigo . . . . .	24
FIGURA 2.6 – Depressões artificiais no SRTM v4.1 (primeira e segunda colunas) e sua ausência no MERIT (terceira e quarta colunas). Na quinta coluna, são apresentados dados de origem do SRTM v2.1 sem preenchimento de vazios. . . . .	25
FIGURA 3.1 – PANDA, a plataforma interativa da Copernicus onde foram feitos os downloads dos MDE's com pixels de 30 metros . . . . .	27
FIGURA 3.2 – Pseudocódigo - Etapa 1 . . . . .	28
FIGURA 3.3 – Pseudocódigo - Etapa 2 . . . . .	29
FIGURA 3.4 – Pseudocódigo - Etapa 3 . . . . .	29
FIGURA 3.5 – Pseudocódigo - Etapa 4 . . . . .	30
FIGURA 3.6 – Pseudocódigo - Etapa 5 . . . . .	30
FIGURA 3.7 – Posições de rotação e translação das áreas retangulares de teste (para cada uma das 6 translações, ocorrem 4 rotações) . . . . .	31
FIGURA 3.8 – Exemplo utilizado na validação do código . . . . .	32
FIGURA 4.1 – Limites definidos para a área de estudo (em vermelho) . . . . .	33

---

FIGURA 4.2 – Para cada uma das duas translações adotadas (inferior à esquerda e superior à direita), foram consideradas 6 retações intercaladas em $30^\circ$ .	34
FIGURA 4.3 – Fonte: Autor . . . . .	35
FIGURA 4.4 – Fonte: Autor . . . . .	36
FIGURA 4.5 – Variação da altura de aterro para cada aeronave . . . . .	36

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Otimização de fatores e processos relacionados à movimentação de terra . . . . .	18
TABELA 2.2 – Resumo dos seis Modelos Digitais de Elevação analisados no artigo.	25
TABELA 3.1 – Valores médios das rotações apresentadas e cada uma das translações	31

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
AW3D30	ALOS World 3D 30 m
AHP	Analytic Hierarchy Process
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ICAO	International Civil Aviation Organization
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MERIT	Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM
MESA	Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários
NASADEM	NASA Digital Elevation Model
RBAC	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TanDEM-X	TerraSAR-X Add-on for Digital Elevation Measurements

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Contextualização . . . . .	14
1.2	Definição do Problema . . . . .	15
1.3	Objetivo . . . . .	16
1.4	Organização do trabalho . . . . .	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	18
2.1	Topografia na Análise Locacional e Métodos de Otimização do Processo de Movimentação de Terra . . . . .	18
2.2	Topografia na Análise Locacional de Aeroportos . . . . .	19
2.2.1	Abordagem Acadêmica . . . . .	19
2.2.2	Abordagem Normativa e Regulatória no Brasil . . . . .	20
2.3	Geoprocessamento, Modelos Digitais de Elevação e suas limitações . . . . .	22
2.3.1	Modelos Digitais de Elevação . . . . .	22
2.3.2	Limitações dos Modelos Digitais de Elevação . . . . .	23
2.3.3	Efeito prático da escolha de um MDE . . . . .	25
2.3.4	Limitações de leitura em regiões de vegetação . . . . .	26
3	METODOLOGIA . . . . .	27
3.1	Base de Dados . . . . .	27
3.2	Recorte da Área de Interesse . . . . .	28
3.3	Cálculo da Movimentação de Terra . . . . .	28
3.4	Validação do cálculo de movimentação . . . . .	30
4	APLICAÇÃO . . . . .	33

---

4.1	Escolha da área de interesse . . . . .	33
4.2	Relação entre o comprimento do platô e a movimentação de terra . . . .	34
4.3	Limitações de expansão do aeródromo . . . . .	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	38
5.1	Considerações finais . . . . .	38
5.2	Aprimoramento futuro da ferramenta . . . . .	38
	REFERÊNCIAS . . . . .	40

# 1 Introdução

A aviação regional no Brasil tem experimentado um crescimento significativo, impulsionado por investimentos governamentais e pela necessidade de ampliar a conectividade entre diferentes regiões do país. Esse cenário demanda a expansão e construção de infraestruturas aeroportuárias adequadas para atender ao aumento do fluxo aéreo. Um dos principais desafios nesse processo é a otimização da movimentação de terra durante a construção de pistas aeroportuárias, que impacta diretamente nos custos e prazos das obras. Desenvolver ferramentas semiautomatizadas para reduzir a movimentação de terra torna-se, portanto, uma estratégia essencial para melhorar a eficiência do processo e a sustentabilidade dos projetos aeroportuários.

## 1.1 Contextualização

O crescimento acelerado da demanda por transporte aéreo no Brasil, mesmo após a queda repentina devido à pandemia de Covid-19, tem evidenciado a saturação dos principais aeroportos nacionais. Esse crescimento pode ser visualizado na figura a seguir:

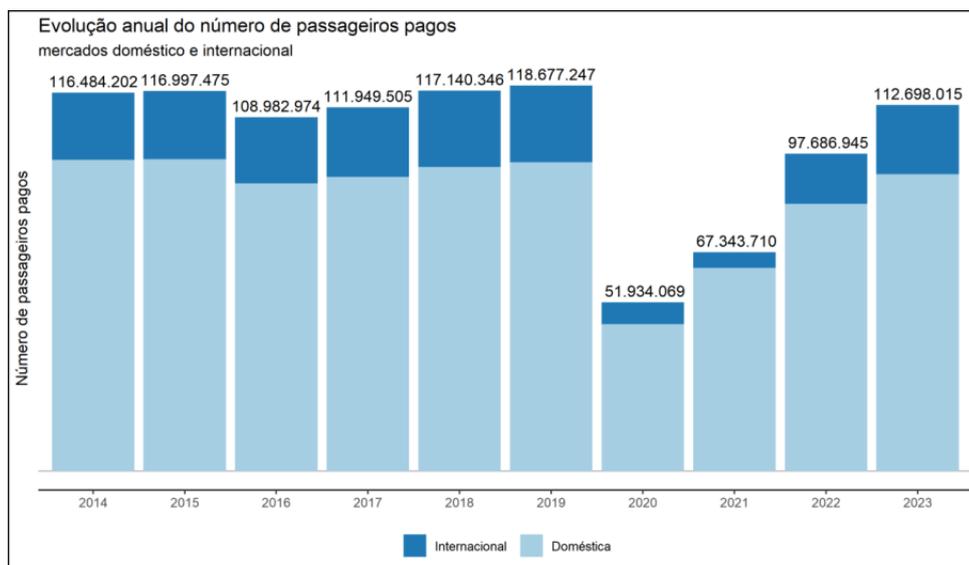


FIGURA 1.1 – Anuário do Transporte Aéreo (ANAC, 2023)

Conforme informado pelo governo federal em 2018 (Airway, 2018), é necessário expandir a infraestrutura aeroportuária para atender ao aumento do fluxo de passageiros e cargas. Nesse sentido, a aviação regional emerge como uma alternativa estratégica para descongestionar os grandes hubs aeroportuários e promover a integração de regiões menos acessíveis.

Em 2021, o Ministério da Infraestrutura anunciou investimentos significativos na expansão da aviação regional no país (Ministério da Infraestrutura, 2021). Esses investimentos visam não apenas ampliar a infraestrutura aeroportuária brasileira, como também melhorar a qualidade e a segurança das operações aéreas em localidades remotas.

O Brasil tem se destacado entre os países que impulsionaram a aviação regional nos últimos anos, tendo em vista a intenção governamental direcionada à descentralização do transporte aéreo, que, hoje, é muito centralizada nos maiores e mais saturados aeroportos do país (Instituto Brasileiro de Aviação, 2018).

Juntamente à essa expansão, houve a natural necessidade por um procedimento regulatório que estabelecesse critérios mais objetivos a serem obedecidos na escolha de um novo sítio aeroportuário, que é um processo complexo e composto por várias etapas. Nesse contexto, em 2021, foi lançado o *"Manual de Apoio à Prospecção de Sítios Aeroportuários"* (Ministério dos Portos e Aeroportos, 2021), com o intuito de orientar e padronizar os procedimentos para identificação e avaliação de locais adequados à implantação de novos aeroportos regionais.

Entre os vários procedimentos descritos no manual, vale destacar a movimentação de terra, que, assim como outros projetos de infraestrutura, também se configura como uma etapa que consome muito tempo e recursos em um processo de escolha de um novo sítio aeroportuário. Assim, a adoção de ferramentas semiautomatizadas para a redução da movimentação de terra surge como uma abordagem promissora e necessária, contribuindo para a eficiência operacional e a viabilidade econômica dos projetos aeroportuários.

## 1.2 Definição do Problema

Conforme já citado, a construção e ampliação de pistas aeroportuárias no Brasil enfrentam um desafio significativo relacionado ao alto volume de movimentação de terra necessário para a terraplenagem. Este processo, fundamental para a implementação de infraestruturas aeroportuárias, representa uma das etapas mais dispendiosas e complexas dos projetos (Ministério dos Portos e Aeroportos, 2021). A movimentação excessiva de terra não só aumenta os custos e o tempo de execução das obras, como também acarreta em impactos ambientais consideráveis, como a alteração de ecossistemas e o aumento das emissões de carbono.

A falta de soluções tecnológicas que integrem dados topográficos de forma eficiente dificulta a redução dos volumes de terra movimentados, ou seja, dificulta a escolha de sítios que demandem menores movimentações; o que poderia limitar a aplicabilidade de projetos mais econômicos e sustentáveis.

Este cenário evidencia a necessidade de abordar o desafio de minimizar a movimentação de terra sem comprometer a segurança e a funcionalidade das pistas aeroportuárias, contribuindo para a viabilidade dos projetos e para o desenvolvimento da aviação regional no país.

### 1.3 Objetivo

O objetivo principal deste Trabalho de Graduação é desenvolver e implementar uma ferramenta semiautomatizada que viabilize a redução do volume de terraplenagem na implantação de pistas aeroportuárias e de suas faixas adjacentes, utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE). Assim, o trabalho se propõe especificamente a:

- Analisar as principais dificuldades e desafios associados à movimentação de terra em projetos aeroportuários;
- Desenvolver algoritmos que se integrem aos MDE's e otimizem o planejamento da terraplenagem, respeitando as limitações tecnológicas e de dados existentes;
- Implementar a ferramenta proposta em um ambiente computacional adequado, facilitando seu uso por profissionais da área;
- Avaliar a eficácia da ferramenta por meio de estudos de caso, comparando os resultados com métricas conhecidas obtidas em métodos tradicionais de planejamento

Dessa forma, este trabalho propõe-se a contribuir ativamente para a modernização dos processos de engenharia relacionados à construção de novos aeródromos; alinhando-se às necessidades atuais de eficiência, economia e sustentabilidade no setor de infraestrutura, e em conformidade com as diretrizes governamentais estabelecidas no Manual de Apoio à Prospecção de Novos Sítios Aeroportuários.

### 1.4 Organização do trabalho

Os capítulos desta tese foram organizados da seguinte maneira:

- 
- Capítulo 1 : Introdução - Contextualiza e traz as motivações que levaram à realização desta Tese de Graduação;
  - Capítulo 2: Revisão Bibliográfica - Apresenta uma breve discussão sobre os conhecimentos existentes nos assuntos abordados que serão de grande relevância para o desenvolvimento deste Trabalho de Graduação;
  - Capítulo 3: Metodologia - Explica como o conhecimento apresentado no Capítulo anterior foi desenvolvido para chegar no objetivo proposto no Capítulo 1;
  - Capítulo 4: Aplicação - Expõe e interpreta os resultados obtidos; e
  - Capítulo 5: Considerações finais - Faz uma conclusão geral do trabalho, sugere futuras implementações para futuros trabalhos que possam complementar a tese.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Topografia na Análise Locacional e Métodos de Otimização do Processo de Movimentação de Terra

A movimentação de terra é uma etapa fundamental em projetos de infraestrutura, além de ser responsável por uma parte bastante relevante na contabilização do custo e do tempo de execução de uma obra. Devido a esse fato, é comum que sejam propostos métodos de otimização da etapa de movimentação de terra de uma obra, em que esse processo é melhorado através dos vários fatores que o influenciam. Desse modo, foi realizada uma pesquisa na literatura acadêmica relacionada ao tema para a verificação de como a de movimentação de terra é tratada e otimizada em projetos de infraestrutura.

<b>Autores</b>	<b>Pontos de Otimização</b>	<b>Método de Otimização</b>
(JABRI, 2014)	Logística e comportamento em terraplenagem.	Modelagem Baseada em Agentes (ABMS).
(GAŠPARÍK <i>et al.</i> , 2022)	Seleção de máquinas de terraplenagem	Multicritério com suporte de software
(FALCÃO <i>et al.</i> , 2016)	Custo e tempo em projetos de movimentação de terra	Programação matemática e técnicas de otimização
(JABRI, 2014)	Gestão de recursos em obras de movimentação de terra	Simulação baseada em células utilizando dados de GPS
(PARENTE <i>et al.</i> , 2015)	Alocação de equipamentos de terraplenagem	Algoritmos genéticos e programação linear.

TABELA 2.1 – Otimização de fatores e processos relacionados à movimentação de terra

De acordo com a revisão de literatura apresentada na tabela, a relevância da movimentação de terra decorre não apenas do volume significativo de material a ser escavado, transportado e compactado, como também dos custos e do tempo associados a grandes obras. De acordo com os artigos, o processo de movimentação de terra é otimizado a partir de uma abordagem multidisciplinar, permitindo a avaliação de diferentes cenários

de operação, considerando variáveis como custo, consumo de combustível, produtividade e impacto ambiental. Nesse contexto, também é possível observar a lacuna da falta de ferramentas automatizadas específicas para o cálculo da movimentação de terra.

## 2.2 Topografia na Análise Locacional de Aeroportos

A movimentação de terra em projetos de novos sítios aeroportuários é influenciada por uma série de fatores, que são documentados tanto no meio acadêmico, quanto em regulamentações dos órgãos governamentais brasileiros.

### 2.2.1 Abordagem Acadêmica

Alves et al. (2020) propuseram uma metodologia denominada MESA (Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários) para servir de apoio à prospecção de novos sítios aeroportuários regionais, ao reduzir a subjetividade e otimizar decisões durante esse processo de escolha, considerando critérios técnicos e geográficos. A metodologia é dividida em quatro etapas:

1. Identificação de critérios para a seleção de sítios aeroportuários com base na literatura
2. Seleção e sistematização dos critérios relevantes
3. Identificação dos critérios eliminatórios e limiares específicos para redução da área de busca
4. Definição dos Critérios de Pontuação para ranquear os sítios candidatos

Nessa etapa 3 de identificação de critérios eliminatórios, uma das variáveis consideradas é extremamente relevantes para a movimentação de terra de um projeto: a elevação (TAL), que estabelece um valor máximo de diferença de elevação dentro do sítio considerado. A partir da análise dessa variável, o MESA evita locais que demandariam movimentações excessivas de terra, o que poderia inviabilizar a escolha do local do sítio como um todo, tanto financeiramente quanto em termos de impacto ambiental.

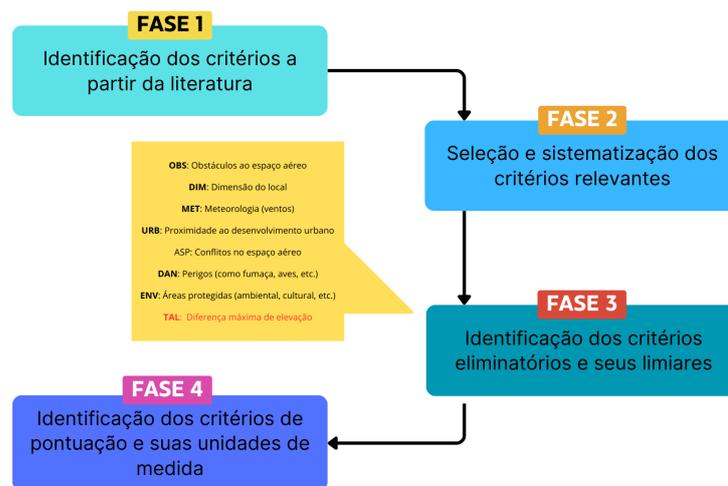


FIGURA 2.1 – Faseamento do MESA

De forma análoga, Çolak et al. (2023) propuseram uma metodologia baseada em análise multicritério e SIG para seleção de locais de construção de aeroportos na província de Ordu, na Turquia. O estudo utilizou o método AHP (Analytic Hierarchy Process) para ponderar 16 critérios, incluindo aspectos topográficos como inclinação e elevação do terreno, essenciais para projetos de movimentação de terra. Foi aplicada uma análise de sensibilidade para verificar a influência de cada critério nos resultados, enquanto mapas detalhados foram gerados para visualização das áreas mais adequadas. A abordagem destaca a relevância de dados geoespaciais e ferramentas analíticas para otimizar projetos de engenharia civil, minimizando custos de movimentação de terra e impactos ambientais.

### 2.2.2 Abordagem Normativa e Regulatória no Brasil

Do ponto de vista regulatório, a movimentação de terra em projetos de novos sítios aeroportuários é influenciada principalmente por dois documentos: o RBAC (Regulamento Brasileiro da Aviação Civil) n°154 (ANAC, 2024) e o Manual de Apoio à Prospecção de Sítios Aeroportuários do Ministério da Infraestrutura.

O RBAC n° 154 estabelece normas para o projeto de aeródromos no Brasil, incluindo diretrizes sobre características físicas, auxílios visuais e sistemas de infraestrutura necessários para garantir a segurança e eficiência das operações. Esse regulamento também está de acordo com as normas internacionais regidas pela ICAO (International Civil Aviation Organization). No que diz respeito às características físicas, essa norma seta parâmetros de dimensionamento da pista e da faixa de pista; dois parâmetros fundamentais no cálculo da movimentação de terra no projeto de um novo sítio aeroportuário, tendo em vista que são áreas que devem sofrer um intenso processo de terraplenagem. Outras áreas que

também influenciam a movimentação de terra do projeto do aeródromo e que são citadas na norma são as áreas da RESA nas cabeceiras e as áreas de operação de rádio-altímetro.

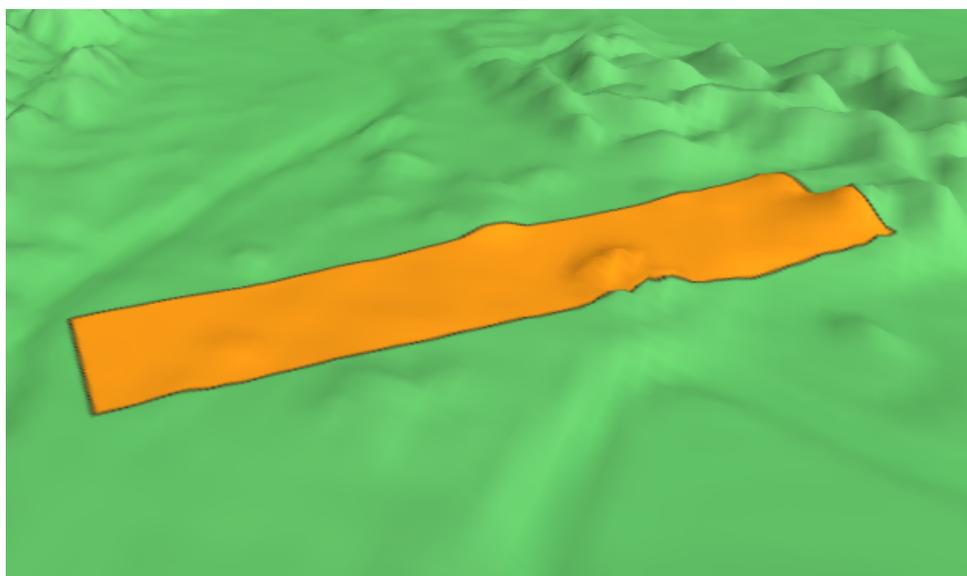


FIGURA 2.2 – Exemplo de área a ser planejada para a instalação de uma pista de aeródromo

Quanto ao Manual de Apoio à Prospecção de Sítios Aeroportuários, ele é responsável por orientar a seleção de locais para novos aeroportos regionais, abordando critérios de viabilidade geográfica, ambiental e de infraestrutura. Ao fazer isso, o manual possibilita a otimização de gastos e a minimização dos impactos socioambientais no desenvolvimento aeroportuário.

Nesse sentido, o manual traz alguns pontos que envolvem diretamente a movimentação de terra, os quais vale destacar:

- Dimensionamento e Orientação dos Sítios Aeroportuários: o Polígono Preliminar do Sítio (PPSit) estabelece o espaço candidato para a construção de um aeródromo, ajustando a extensão e a largura do terreno a ser preparado para a pista de pouso e decolagem (PPD) e outras infraestruturas. Vale ressaltar que o manual recomenda que sejam evitados superdimensionamentos, de forma a reduzir custos, especialmente pensando em termos de movimentação de terra.
- Critério TOPAlt (variação de altimétrica): o manual apresenta esse critério, que avalia a diferença de elevação dentro do PPSit para calcular o volume de terra a ser movimentado. O manual estabelece limites de elevação recomendados, porém abrindo margem para eventuais ajustes, com o fim de controlar os custos de terraplenagem de acordo com as condições locais

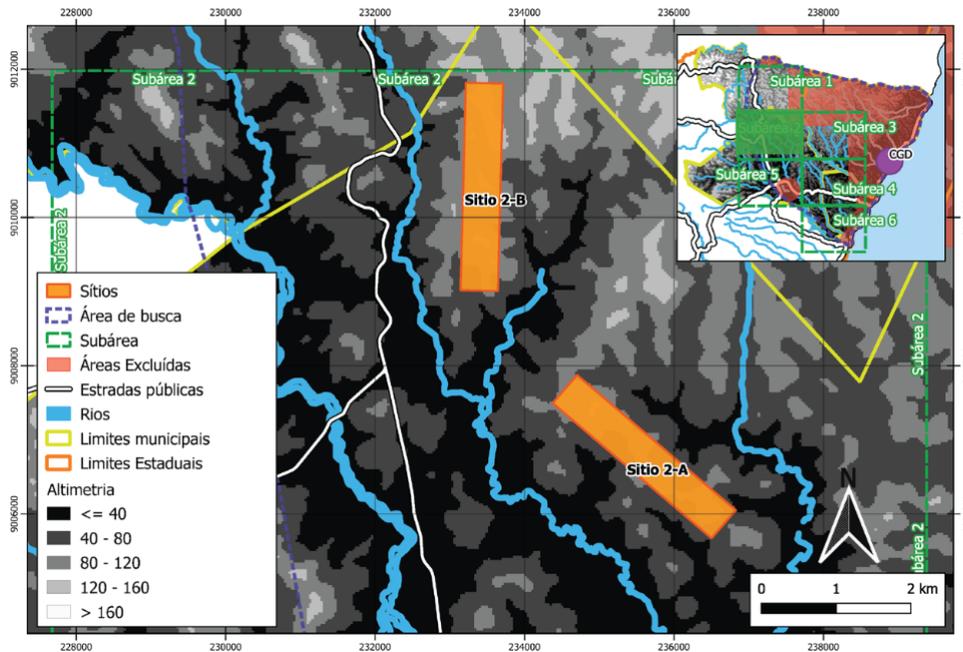


FIGURA 2.3 – Exemplo de análise de sítios proposto no Manual

## 2.3 Geoprocessamento, Modelos Digitais de Elevação e suas limitações

O geoprocessamento é uma técnica que envolve a manipulação e a análise de dados geoespaciais e desempenha um papel fundamental em uma larga gama de estudos de engenharia, especialmente em aplicações que requerem precisão na movimentação de terra. Através de Modelos Digitais de Elevação (MDE's), é possível obter uma representação detalhada da topografia, essencial para planejar intervenções no solo, como a movimentação de terra para a construção civil. No entanto, a precisão dos dados de elevação é frequentemente limitada pela presença de artefatos, erros de leitura topográficos e variações na cobertura do solo, o que impacta a confiabilidade dos modelos.

### 2.3.1 Modelos Digitais de Elevação

Os Modelos Digitais de Elevação, ou MDE's, são representações matemáticas tridimensionais da superfície terrestre geradas a partir de dados de elevação coletados, costumeiramente, a partir de radares ou sensores ópticos de satélites. Os MDE's são obtidos de diversas fontes, como as missões Shuttle Radar Topography (SRTM) e Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER); além de modelos mais recentes como o MERIT e o AW3D30.

Os MDE's permitem a obtenção de diversas variáveis topográficas, como a inclinação

e a delimitação de bacias hidrográficas, que são essenciais para a modelagem de processos ambientais e para o planejamento de obras de infraestrutura. Além disso, esses modelos também são fundamentais no estudo de mudanças climáticas, na modelagem de erosão e sedimentação, e na gestão de recursos naturais.

Dois conceitos derivados dos MDE's são aos Modelos Digitais de Terreno (MDT) e os Modelos Digitais de Superfície (MDS). Os MDT's representam exclusivamente a topografia do terreno em si, livre de quaisquer interferências de objetos superficiais, como construções, árvores ou outros elementos; sendo amplamente utilizado em aplicações que exigem uma descrição precisa do relevo natural (Instituto de Energia e Ambiente - USP, 2020). Já os MDS's, diferentemente dos MDT's, não incluem somente o relevo do terreno, como também os objetos que sobre ele estão, como edificações, vegetação mais densa, árvores pontuais, entre outros.

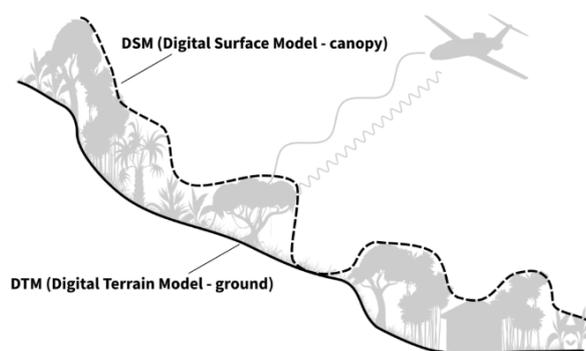


FIGURA 2.4 – Instituto de Energia e Ambiente (2020)

Para todos os efeitos, um MDE também pode ser utilizado como MDT, de duas formas: a primeira consiste na conversão direta de um MDE para MDT, através da exclusão e correções de objetos na superfície do terreno; a segunda consiste na utilização de MDE's em localidades de terreno nú e sem objetos ou estruturas na superfície, que é, essencialmente, a definição de um MDT.

### 2.3.2 Limitações dos Modelos Digitais de Elevação

Os MDE's apresentam uma série de limitações no que diz respeito à precisão e confiabilidade dos dados. Dessa forma, foi realizada uma pesquisa na literatura acadêmica para a averiguação dessas limitações.

De forma a mapear essas limitações, Uuemaa et al. (2020) avaliou a precisão vertical de seis MDE's gratuitos disponíveis globalmente (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) em quatro regiões de topografia e cobertura do solo diversas.

O estudo destacou os seguintes pontos como principais fatores limitantes da precisão

e aplicabilidade dos MDE's:

- **Precisão Vertical Geral:** praticamente todos os modelos globais analisados superestimam a elevação da superfície quando comparados à modelos de referência. Constatou-se que áreas florestadas, em específico, apresentavam consideráveis erros positivos em relação aos modelos de referência.
- **Efeito da Inclinação do Terreno:** a inclinação apresentou o maior efeito sobre a precisão dos MDE's. Todos os 6 modelos analisados apresentaram incertezas crescentes com o crescimento da inclinação do terreno. O efeito pode ser visualizado no mapa de erro para a área de estudo da Nova Zelândia a seguir:
- **Efeito da Cobertura Vegetal:** o estudo mostrou que os MDE's são geralmente mais precisos em áreas herbáceas ou de cultivo (estimativas ligeiramente superestimadas), em comparação com áreas florestadas. Além disso, constatou-se que a magnitude do erro em áreas urbanas ou em construção é similar aos erros gerados em áreas herbáceas ou de cultivo.
- **Erros sobre corpos d'água:** com exceção do TanDEM-X, todos os outros modelos apresentaram extensos erros extensos na aferição da elevação sobre corpos de água por motivos técnicos específicos de cada modelo.
- **Efeito da Resolução Espacial:** principalmente nos modelos de resolução espacial de 90 metros (TanDEM-X e MERIT), foram observados erros consideráveis em áreas de terrenos mais acidentados, tendo em vista que a elevação pode mudar significativamente dentro de uma distância horizontal de 90 metros.

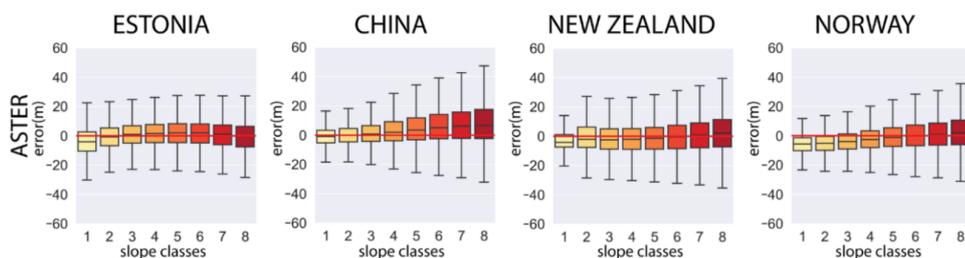


FIGURA 2.5 – Boxplot dos erros por classe de declividade para o modelo digital de elevação global ASTER nas quatro áreas de estudo do artigo

Também como uma forma de avaliar essas limitações dos MDE's, (HIRT, 2018) propôs e implementou uma técnica denominada Maximum Slope Approach (MSA) que utiliza as inclinações dos terrenos como indicadores para detecção e localização de artefatos espúrios; ou seja, erros sistemáticos que distorcem a representação do terreno, conseqüentemente afetando a precisão de análises geoespaciais. No estudo, a MSA é aplicada para a triagem

completa de dois MDE's: o SRTM v4.1 e o MERITDEM. Em resumo, o artigo estabelece e apresenta os seguintes artefatos principais encontrados nos MDE's analisados:

- a. Depressões artificiais e representação incorreta das estruturas de drenagem
- b. espigão ("spike") isolado
- c. espigões ("spikes") e depressões dentro de um cânion
- d. vazios não preenchidos
- e. defeitos em linhas costeiras

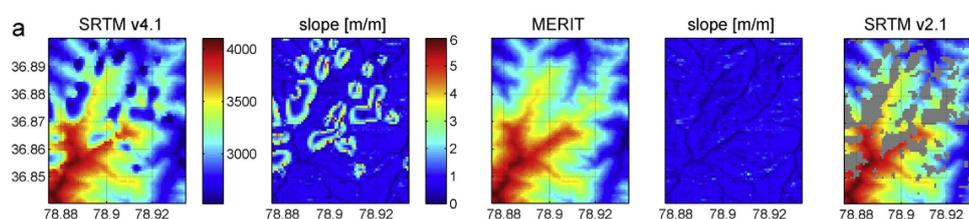


FIGURA 2.6 – Depressões artificiais no SRTM v4.1 (primeira e segunda colunas) e sua ausência no MERIT (terceira e quarta colunas). Na quinta coluna, são apresentados dados de origem do SRTM v2.1 sem preenchimento de vazios.

### 2.3.3 Efeito prático da escolha de um MDE

Moges (2023) avaliou o efeito da escolha do MDE na delimitação de rios e bacias hidrográficas e na simulação de escoamento em quatro regiões demográficas distintas e com condições de terreno diversas. Os resultados evidenciaram que a escolha do MDE, de fato, influencia significativamente na precisão da delimitação de rios e bacias em comparação à influência na simulação de escoamento da mesmabacia. Os MDE's analisados foram o AW3D30, o COP30, o MERIT, o TanDEM-X e o HydroSHEDS; dos quais o AW3D30 e o COP30 apresentaram o melhor desempenho.

Nome	Resolução Espacial (m)	Ano de Lançamento	Fonte
AW3D30	30	2022	JAXA (2021)
COP30	30	2021	ESA (2021)
HydroSHEDS	90	2008	Lehner et al. (2008)
MERIT	90	2017	Yamazaki et al. (2017)
NASADEM	30	2020	NASA JPL (2020)
TanDEM-X	90	2018	DLR (2018)

TABELA 2.2 – Resumo dos seis Modelos Digitais de Elevação analisados no artigo.

As principais vantagens do AW3D30 e do COP30 em relação aos demais são listadas a seguir:

1. **Resolução espacial de 30 metros:** os dois modelos apresentaram o menor desvio em relação às geometrias de referência na delimitação de rios e bacias; ao contrário dos MDE's mais grosseiros (90 metros) que enfrentam dificuldades de precisão em súbitas mudanças de elevação
2. **Menor influência da cobertura vegetal:** os dois modelos apresentaram uma melhor precisão na delimitação de rios em bacias florestadas
3. **Consistência de resultados para diferentes tipos de terrenos:** os dois modelos apresentaram resultados mais consistentes independentemente do terreno analisado; ao passo que os demais modelos apresentavam bons desempenhos para alguns terrenos e desempenhos ruins para outros.

### 2.3.4 Limitações de leitura em regiões de vegetação

Algumas técnicas de obtenção dos MDE's, como por exemplo o radar de abertura sintética interferométrica (InSAR) (HUBER *et al.*, 2021), utilizam a diferença de fase entre sinais refletidos de dois satélites para gerar dados topográficos. No caso do TanDEM-X, que utiliza essa técnica e sinais de radar de banda X, tem sua precisão limitada, pois a curta frequência interage majoritariamente com o topo de árvores, por exemplo. Assim, uma eventual decorrelação temporal do sinal em vegetações altas e esparsas pode prejudicar a qualidade dos dados coletados.

Outras técnicas, como o Light Detection and Ranging (Lidar) (POLIDORI; HAGE, 2020), utilizam pulsos laser capazes de penetrar vegetações mais esparsas e refletir no solo, gerando MDT's. Embora essa técnica tenha maior capacidade de penetração em florestas densas, ele também é influenciado pela densidade da vegetação, o que pode comprometer a precisão em áreas onde o feixe de laser não atinge completamente o solo.

## 3 Metodologia

### 3.1 Base de Dados

Inicialmente, é importante ressaltar que, para a metodologia, é ideal a utilização de Modelos Digitais de Terreno (MDT) para o cálculo de movimentação de terra, tendo em vista que é o modelo que realmente se propõe a representar a elevação do solo propriamente. No entanto, conforme já discutido, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) se aproximam de MDT's em áreas com baixa incidência de obstáculos verticais no solo e de vegetação relativamente densa. Assim, realizou-se uma busca por uma base de dados de MDE acessível e com boa precisão, resultando na base do sistema Copernicus (2024) do Programa Espacial da União Europeia.



FIGURA 3.1 – PANDA, a plataforma interativa da Copernicus onde foram feitos os downloads dos MDE's com pixels de 30 metros

## 3.2 Recorte da Área de Interesse

Na sequência, é realizado o corte e reprojeção da área de interesse para a análise, tomando-se o cuidado para que a área de interesse esteja dentro das limitações impostas para a utilização de um MDE como MDT. É importante ressaltar que o Sistema de Coordenadas Geográficas adotado para a padronização de todos os arquivos trabalhados será o SIRGAS 2000; tomando-se o cuidado apenas na escolha da zona UTM, de acordo com a localização da área. O recorte e a reprojeção da área é feita utilizando-se o software QGIS, uma multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

## 3.3 Cálculo da Movimentação de Terra

O cálculo propriamente dito da movimentação de terra foi efetuado a partir de um código construído em Python, utilizando o editor Visual Code Studio e, para melhorias e geração de algumas partes do código, o ChatGPT 4. Em resumo, é gerado um retângulo que irá representar uma simplificação do terreno do aeródromo; em seguida, o retângulo é rotacionado e transladado, gerando várias posições das quais serão calculadas as movimentações de terra. As etapas de funcionamento do código são descritas a seguir:

1. Inserção de dados de entrada, como coordenadas e dimensões do polígono preliminar do sítio (PPSit), parâmetros de rotação e translação, e código EPSG;

```
Início
// Dados de entrada para o platô do aeródromo
Definir easting = 564026 // Coordenada UTM Easting do canto inferior esquerdo
Definir northing = 7518485 // Coordenada UTM Northing do canto inferior esquerdo
Definir dim1 = 2000 // Largura do platô em metros (dimensão leste-oeste)
Definir dim2 = 2500 // Comprimento do platô em metros (dimensão norte-sul)
Definir epsg_code = 31983 // Código EPSG para o sistema de coordenadas SIRGAS 20

// Parâmetros de rotação
Definir angulos = [0, 15, 30, 45, 60, 75, 90] // Lista de ângulos de rotação em graus (

// Parâmetros de translação
Definir dx = 1000 // Distância horizontal de translação em metros
Definir dy = 1000 // Distância vertical de translação em metros
Definir nx = 3 // Número de repetições horizontais
Definir ny = 2 // Número de repetições verticais

// Diretório de dados
Definir diretorio_dados = 'dados'
Criar diretorio 'dados' se não existir

// Caminhos dos arquivos
Definir caminho_dem = 'dados/seu_mde.tif' // Caminho para o MDE original
Definir output_tif_path = 'dados/mde_{epsg_code}.tif' // Caminho para o MDE reprojetado

// Carregar e reprojetar o MDE
Chamar função carregar_dem_reprojetado(caminho_dem, epsg_code, output_tif_path) retornan
Fim
```

FIGURA 3.2 – Pseudocódigo - Etapa 1

2. Geração da geometria do retângulo (PPSit), bem como as posições geradas a partir da da rotação e translação da geometria inicial;

```
Início
// Loop sobre as linhas (translações verticais)
Para i de 0 até ny - 1 faça
  deslocamento_y = i * dy

  // Loop sobre as colunas (translações horizontais)
  Para j de 0 até nx - 1 faça
    deslocamento_x = j * dx

    // Coordenadas transladadas do canto inferior esquerdo
    easting_trans = easting + deslocamento_x
    northing_trans = northing + deslocamento_y

    // Para cada ângulo de rotação
    Para cada angulo em angulos faça
      // Criar a geometria do retângulo rotacionado
      geometria_retangulo = criar_retangulo(easting_trans, northing_trans, dim1, dim2,
      // Prosseguir para a próxima etapa com a geometria criada
    Fim para
  Fim para
Fim para
Fim
```

FIGURA 3.3 – Pseudocódigo - Etapa 2

3. A partir das geometrias geradas na etapa anterior, são construídos arquivos raster e cada platô é posicionado com a altitude média da projeção do retângulo (PPSit) no MDE. Nesta etapa, foram observados vazios de informações no MDE, que foram desconsiderados no cálculo da altitude média;

```
Início
// Para cada geometria de retângulo gerada
Para cada geometria_retangulo gerada na Etapa 2 faça
  // Recortar o MDE usando a geometria do retângulo
  (dem_recortado, novo_profile) = recortar_dem_com_geometria(output_tif_path, geometria_retangulo)

  Se dem_recortado não é NULO então
    // Calcular cotas e movimentação de terra
    resultados = calcular_cotas_e_movimentacao(dem_recortado, novo_profile, output_sup)

    // A função também cria o arquivo raster com o platô na cota média
    // Continuar para a próxima etapa com os resultados obtidos
  Fim se
Fim para
Fim
```

FIGURA 3.4 – Pseudocódigo - Etapa 3

4. Em seguida, com cada posição transladada e rotacionada dos (PPSits) do aeródromo posicionadas sobre o MDE, foram calculadas as movimentações de terra (corte, aterro e saldo). Nesta etapa, devido às análises propostas na próxima seção, foi necessário a conversão do volume de corte para volume de aterro, utilizando os fatores multiplicativos  $f_1$  (devido à conversão de terra *in situ* para terra solta) e  $f_2$  (devido à conversão de terra solta para aterro);

```
Início
// Para cada conjunto de resultados obtido
Para cada resultados obtido na Etapa 3 faça
// Os resultados incluem:
// - cota_maxima
// - cota_minima
// - cota_media
// - volume_aterro
// - volume_corte
// - movimentacao_total
// - altura_media_aterro

// Os volumes de aterro e corte são calculados com base na diferença entre o MDE e a
// Prosseguir para salvar os dados na próxima etapa
Fim para
Fim
```

FIGURA 3.5 – Pseudocódigo - Etapa 4

5. Por fim, todos os dados de movimentação de terra são salvos em um arquivo de saída no formato de uma planilha, permitindo a seleção das melhores posições para a construção de um sítio em termos de terraplenagem, além da realização de algumas análises secundárias.

```
Início
// Inicializar arquivo Excel para saída
Abrir escritor_excel para 'dados/resultados_movimentacao_terra.xlsx'

// Loop sobre as posições transladadas
Para cada posição (i, j) correspondente a uma translação faça
// Criar DataFrame df_posicao com os resultados da posição atual
// Definir nome da aba do Excel como 'Linha{i+1}_Coluna{j+1}'
Escrever df_posicao na aba correspondente do arquivo Excel
Fim para

// Salvar e fechar o arquivo Excel
escritor_excel.close()
Fim
```

FIGURA 3.6 – Pseudocódigo - Etapa 5

### 3.4 Validação do cálculo de movimentação

Nesta análise, para a validação do cálculo, tomou-se uma área com ocorrência de áreas planas, áreas residenciais e áreas montanhosas, além de se considerar um retângulo correspondente a um aeródromo de pequeno porte (400 m x 2500 m). A verificação gerou dois pontos principais que comprovam a validação do cálculo:

- **As diferenças de movimentação de terra entre as posições do platô em regiões planas e regiões montanhosas é considerável**

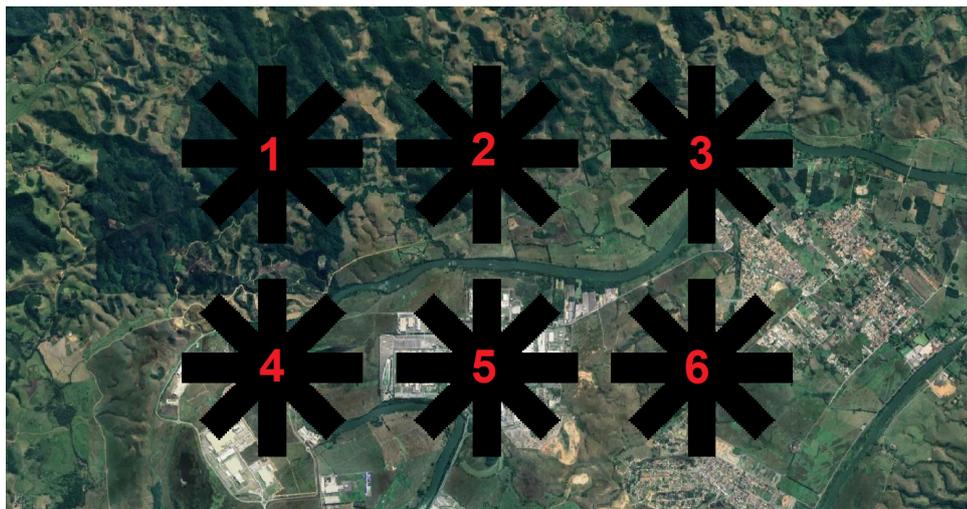


FIGURA 3.7 – Posições de rotação e translação das áreas retangulares de teste (para cada uma das 6 translações, ocorrem 4 rotações)

N° do PPSit	1	2	3	4	5	6
$Vol_{aterro}(m^3)$	9573316	9228135	7579025	3458531	1599032	5016545
$Vol_{corte}(m^3)$	9573302	9228152	7579025	3458533	1599039	5016550

TABELA 3.1 – Valores médios das rotações apresentadas e cada uma das translações

Constata-se que os volumes de corte e aterro das translações 1, 2 e 3 (presentes em áreas montanhosas) são consideravelmente maiores que os valores apresentados nas translações 4 (vegetação baixa), 5 (grandes estacionamentos) e 6 (áreas residenciais de baixa densidade).

- **Os valores de corte e aterro são próximos ao valor de movimentação de terra encontrado na literatura**

Para a verificação da validade do cálculo realizado, foi efetuada uma pesquisa acerca da quantidade de terra movimentada em um projeto de um novo aeroporto, encontrando-se um intervalo de valores de volume de corte/aterro entre 3 e 8 milhões de  $m^3$  para um sítio de aeródromo regional (Relatório de Impacto Ambiental - Volume IV, 2020).



FIGURA 3.8 – Exemplo utilizado na validação do código

O PPSit apresentado acima, localizado sobre superfícies relativamente planas) e pertencente à translação 4 da figura anterior, apresentou os volumes tanto de corte quanto de aterro de aproximadamente 5.4 milhões de  $m^3$  de terra, estão na faixa de valores citada anteriormente.

# 4 Aplicação

## 4.1 Escolha da área de interesse

Considerando a premissa de utilização do MDE como um MDT em superfícies com menor incidência de obstáculos verticais como construções e florestas densas, adotou-se uma área retangular com uma grande incidência de pastos nas proximidades da cidade de Pato Branco, no Paraná. A zona UTM adotada para essa localidade será a 22S.



FIGURA 4.1 – Limites definidos para a área de estudo (em vermelho)

Assim, utilizando-se o código, foram efetuadas duas análises nesta área, que serão apresentadas nos tópicos na sequência.

## 4.2 Relação entre o comprimento do platô e a movimentação de terra

A primeira análise consiste na comparação entre os valores de movimentação de terra para diferentes dimensões do platô (PPSit), de forma a verificar a relação entre esse volume e o aumento das dimensões. Para a análise, será considerada a aeronave Airbus A320-200, cujo comprimento básico de decolagem é 2025 metros e o código de referência é 4C (ANAC, 2024). Para todos os efeitos, seguindo as regras do RBAC 154, será adotada uma largura total do platô de 280 metros (faixa de pista) em todos os casos, alterando-se apenas o comprimento. Assim, serão considerados os três seguintes casos de platô:

- **Somente pista:** dimensões de 2025 m x 280 m;
- **Faixa de pista:** considerando as tabelas do RBAC 154, as dimensões serão de 2145 m (120 metros da faixa de pista) x 280 m;
- **Sítio completo:** Para este caso, serão consideradas as dimensões da faixa de pista e a RESA (Área de Segurança de Fim de Pista). Assim, adotou-se as dimensões de 2325 (120 metros da faixa de pista e 180 metros da RESA) m x 280 m.

Os volumes adotados na análise serão os volumes de corte. As duas posições consideradas (incluindo suas respectivas rotações intercaladas em 30 °) para a análise são mostradas na figura a seguir:

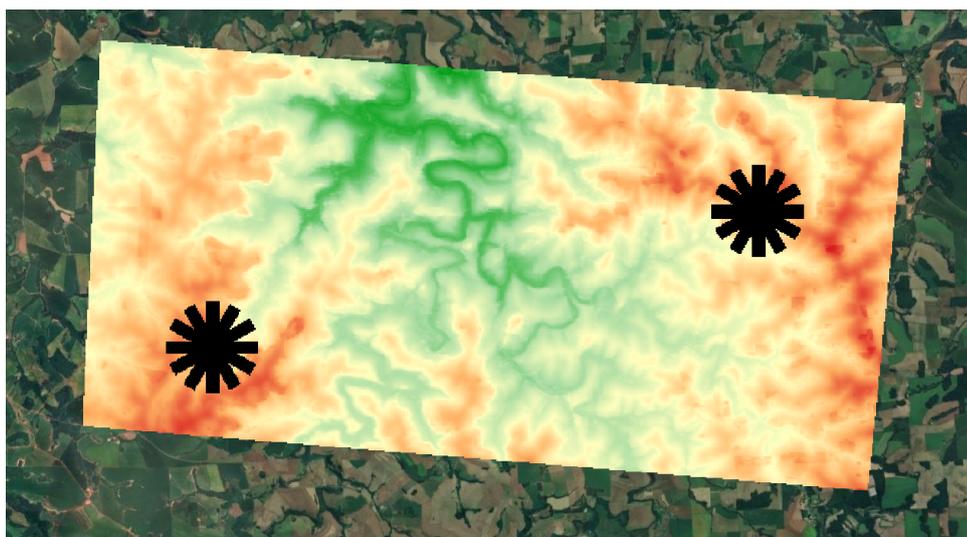


FIGURA 4.2 – Para cada uma das duas translações adotadas (inferior à esquerda e superior à direita), foram consideradas 6 rotações intercaladas em 30°.

Na imagem, foi efetuado um tratamento no MDE da área de análise, diferenciando as áreas de maiores cotas em vermelho, e de menores cotas em verde. O caso mostrado

se refere ao platô somente da pista (2025 m); o mesmo procedimento será efetuado tanto para o platô da faixa de pista (2145 m) quanto para o platô do sítio completo (2325 m).

Na sequência, foram construídos dois gráficos relativos a cada posição transladada (posição inferior corresponde às rotações do canto inferior esquerdo da Figura 4.2, e a superior corresponde ao canto superior direito), onde serão computados os valores de corte de terreno em metros cúbicos em função do comprimento do platô, considerando-se cada ângulo da rotação:

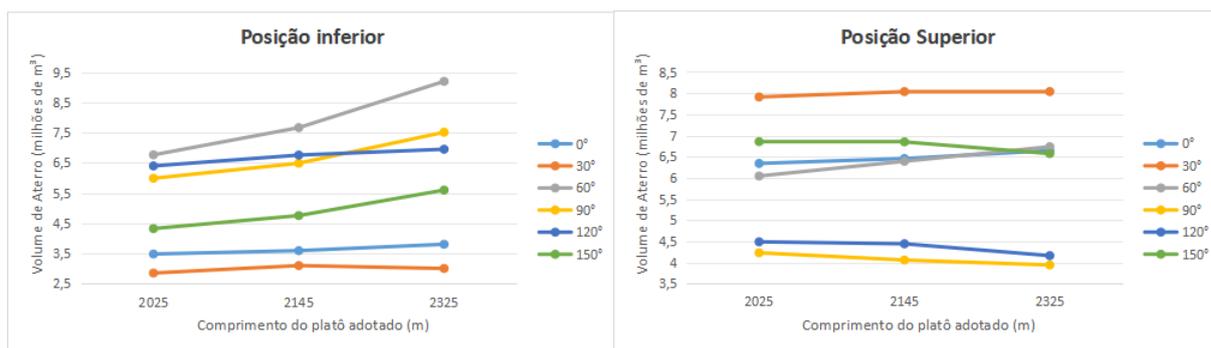


FIGURA 4.3 – Fonte: Autor

### 4.3 Limitações de expansão do aeródromo

Em uma segunda análise, será verificado o quanto a expansão de um aeródromo pode ser limitada considerando o fator de movimentação de terra. Para tanto, serão considerados dois casos de platôs: um para o Cesnna 208 Caravan e o outro para o Airbus A320-200 (considerando operações IFR). Limitando-se os limites do sítio aeroportuário à faixa de pista e RESA, têm-se as seguintes dimensões dos platôs conforme o RBAC 154:

- **Cesnna 208 Caravan:** 950 m (pista, faixa e RESA) x 140 m
- **Airbus A320-200:** 2325 m (pista, faixa e RESA) x 280 m

Em resumo, a análise ocorrerá a partir do cálculo da altura média de aterro obtida a partir da divisão da subtração entre aterro e corte sobre o valor da área do respectivo platô. Esse parâmetro de altura demonstrará proporcionalmente como a movimentação de terra evolui com o aumento do platô para diferentes aeronaves. Assim, tomou-se 40 posições de platô para cada uma das aeronaves, conforme ilustrado na imagem a seguir:

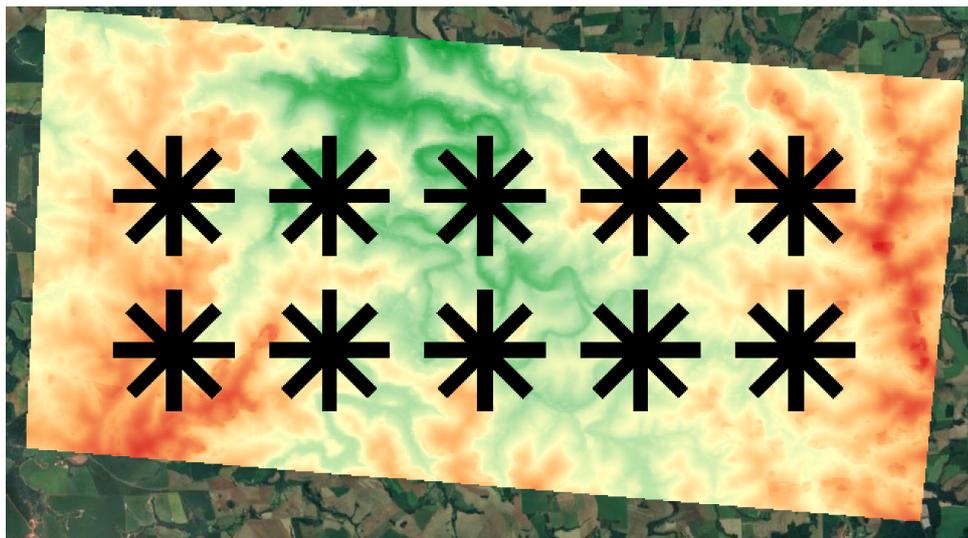


FIGURA 4.4 – Fonte: Autor

Os valores foram apresentados para cada aeronave, de forma que torne-se visualmente possível verificar os resultados esperados para a análise proposta:

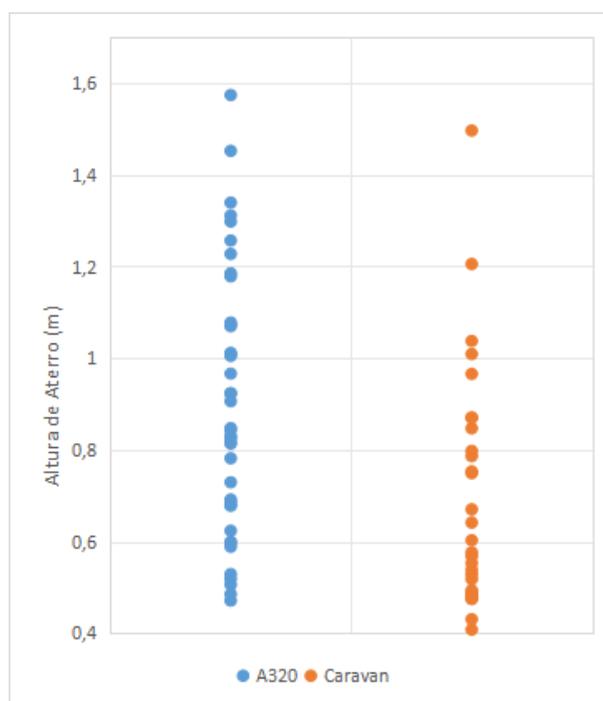


FIGURA 4.5 – Variação da altura de aterro para cada aeronave

É possível observar uma concentração de valores maiores para o A320, em comparação ao Caravan; que é exatamente o resultado esperado.

Assim, é importante considerar que, a priori, projetos de aeródromos menores podem ser mais atrativos em termos de custos de terraplenagem. No entanto, considerando o contexto de expansão da infraestrutura aeroportuária no Brasil, a busca prévia por áreas

---

adequadas à futuras expansões de infraestrutura é mais vantajosa; ainda que, inicialmente, opte-se pela construção de uma pista para a operação de aeronaves menores. É possível afirmar isso, tendo em vista que a escolha prévia de um sítio aeroportuário menor pode limitar de forma definitiva ou inviabilizar financeiramente uma tentativa de expansão futura do aeródromo, pois o cálculo de movimentação de terra não foi efetuado considerando essa expansão.

# 5 Considerações Finais

## 5.1 Considerações finais

Diante dos objetivos propostos neste Trabalho de Graduação, verificou-se que a ferramenta semiautomatizada desenvolvida para o cálculo da movimentação de terra oferece apoio ao usuário na escolha de um sítio que envolva menores volumes de corte e aterro. Além disso, possibilita a realização de análises de cenários diversos, considerando o posicionamento de potenciais platôs de aeródromos e sua influência na operação e nos processos de expansão da infraestrutura aeroportuária.

Vale ressaltar ainda que a ferramenta foi devidamente validada a partir de dois modos: o primeiro diz respeito à diferença de volumes de corte/aterro esperada entre regiões mais planas e mais montanhosas; e o segundo partindo-se da comparação entre os valores de movimentação de terra obtidos pela ferramenta e um valor de referência observado em um caso real. Além disso, a aplicação da ferramenta trouxe importantes evidências para afirmar a não linearidade da movimentação de terra e o comprimento do PPSit; além do fato de que, pensando em um contexto de futura expansão, é muito mais atrativo financeiramente a escolha de um sítio com a dimensão que se espera no futuro.

Dessa forma, em se tratando do contexto de expansão aeroportuária no Brasil, a ferramenta apresentada pode ser utilizada para auxiliar na prospecção de novos sítios aeroportuários, com base nos parâmetros de movimentação de terra; tanto facilitando a visualização do problema quanto possibilitando rapidez no processo, uma vez que a ferramenta permite a rápida replicação de um PPSit em várias posições dentro de uma área de estudo.

## 5.2 Aprimoramento futuro da ferramenta

Conforme comunicado, é evidente que a ferramenta proposta é limitada às áreas onde é possível adotar um MDE com MDT, por conta da também limitada quantidade de dados de MDT disponíveis gratuitamente. Adicionalmente, ela apresenta uma limitação

no que diz respeito à localização dos platôs propostos; tendo em vista que a ferramenta os posiciona em posições previamente determinadas e que não necessariamente entrariam entre as melhores em termos de movimentação de terra.

Além disso, o processo de prospecção de um novo sítio aeroportuário regional é muito mais complexo que somente a movimentação de terra, que é o único fator devidamente coberto pela ferramenta. Desse modo, no futuro, é possível integrar outras variáveis pertinente ao processo de seleção de um novo sítio na ferramenta proposta neste trabalho, tais como a limitação da área de busca de sítios a partir dos limites de áreas de preservação, ocorrência de corpos hídricos, áreas urbanizadas, antenas, etc.

# Referências

- Airway. **Governo anuncia plano para crescimento do setor aeroaviário no Brasil**. 2018. Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<https://www.airway.com.br/governo-anuncia-plano-para-crescimento-do-setor-aeroviario-no-brasil/>>.
- ALVES, C. J. P.; SILVA, E. J. d.; MÜLLER, C.; BORILLE, G. M. R.; GUTERRES, M. X.; ARRAUT, E. M.; PERES, M. S.; SANTOS, R. J. d. Towards an objective decision-making framework for regional airport site selection. **Journal of Air Transport Management**, Elsevier, v. 89, p. 101888, 2020.
- ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo**. 2023. Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo>>.
- ANAC. **Características Físicas e Operacionais de Aeronaves Comerciais**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aeroportos-e-aerodromos/certificacao/arquivos/Caracteristicasfisicaseoperacionaisdeaeronavescomerciais.xlsx/view>>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- ANAC. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil: RBAC nº 154, Emenda nº 08 - Projeto de Aeródromos**. [S.l.], jul 2024. Aprovado pela Resolução nº 751, de 10.07.2024. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-154-111-001>>.
- COPERNICUS. 2024. Disponível em: <https://panda.copernicus.eu/web/cds-catalogue/panda>. Acesso em: 10 de novembro de 2024. Disponível em: <<https://panda.copernicus.eu/web/cds-catalogue/panda>>.
- FALCÃO, V.; JÚNIOR, E. F. N.; PRATA, B. Optimization techniques applied to earthmoving and highway construction: a survey. **International Review of Civil Engineering (IRECE)**, v. 7, n. 5, p. 137–144, 2016.
- GAŠPARIK, J.; MOTYČKA, V.; ŠT'ASTNÝ, P.; SZALAYOVÁ, S. Multi-criteria optimization of mechanized earth processes and its impact on economic and environmental sustainability. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 1, p. 78, 2022.
- HIRT, C. Artefact detection in global digital elevation models (dems): The maximum slope approach and its application for complete screening of the srtm v4.1 and merit

dems. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 207, p. 27–41, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717306211>>.

HUBER, M.; OSTERKAMP, N.; MARSCHALK, U.; TUBBESING, R.; WENDLEDER, A.; WESSEL, B.; ROTH, A. Shaping the global high-resolution tandem-x digital elevation model. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, IEEE, v. 14, p. 7198–7216, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9484642>>.

Instituto Brasileiro de Aviação. **Governo alerta sobre a saturação de aeroportos**. 2018. Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<https://institutoaviacao.org/noticias/infraestrutura/governo-alerta-sobre-a-saturacao-de-aeroportos/>>.

Instituto de Energia e Ambiente - USP. **Modelos Digitais de Terreno**. 2020. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5181959/mod\\_resource/content/1/08\\_aula\\_mdt\\_2020.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5181959/mod_resource/content/1/08_aula_mdt_2020.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2024.

JABRI, A. **Agent-Based Modeling and Simulation of Earthmoving Operations**. Dissertação (Mestrado) — Concordia University, Montreal, Canada, 2014. Master's Thesis.

Ministério da Infraestrutura. **Governo Federal investe na expansão da aviação regional no Brasil**. 3 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2021/3/governo-federal-investe-na-expansao-da-aviacao-regional-no-brasil>>. Acesso em: 12 out. 2024.

Ministério dos Portos e Aeroportos. **Manual de Apoio à Prospecção de Sítios Aeroportuários Regionais**. 2021. Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aereo/manual-de-apoio-a-prospeccao-de-sitios-aeroportuarios-regionais>>.

MOGES, D. M.; VIRRO, H.; KMOCH, A.; CIBIN, R.; ROHITH, A.; MARTÍNEZ-SALVADOR, A.; CONESA-GARCÍA, C.; UUEMAA, E. How does the choice of dems affect catchment hydrological modeling? **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 892, p. 164627, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723032503>>.

PARENTE, M.; CORTEZ, P.; CORREIA, A. G. An evolutionary multi-objective optimization system for earthworks. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 42, n. 15, p. 6674–6685, 2015.

POLIDORI, L.; HAGE, M. E. Digital elevation model quality assessment methods: A critical review. **Remote Sensing**, MDPI, v. 12, n. 21, p. 3522, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3522>>.

Relatório de Impacto Ambiental - Volume IV. **Garden**. 2020. Disponível em: [http://ww2.fepam.rs.gov.br/doclics/pacuera/VOLUME\\_IV-RIMA.pdf](http://ww2.fepam.rs.gov.br/doclics/pacuera/VOLUME_IV-RIMA.pdf). Acesso em: 15 de novembro de 2024.

UUEMAA, E.; AHI, S.; MONTIBELLER, B.; MURU, M.; KMOCH, A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (aster, aw3d30, merit, tandem-x, srtm, and nasadem). **Remote Sensing**, MDPI, v. 12, n. 3482, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3482>>.

---

ÇOLAK, H. E.; BAYKAL, T. M.; GENÇ, N. Multicriteria decision and sensitivity analysis support for optimal airport site locations in ordu province, turkey. **Annals of GIS**, Taylor & Francis, v. 29, n. 3, p. 441–468, 2023.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">21 de novembro de 2024</p>	3. DOCUMENTO Nº <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-102/2024</p>	4. Nº DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">42</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Ferramenta Semiautomatizada para Redução da Movimentação de Terra em Pistas Aeroportuárias			
6. AUTOR(ES): <b>Alessandro Pimentel Mesquita</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1.Movimentação 2. Terra 3.Aeródromo 4.Platô 5. Corte 6.Aterro			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Aeródromo; Pista (de pouso e decolagem); Aterros; Otimização; Inovações tecnológica; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;">(X) Nacional    ( ) Internacional</span> ITA, São José dos Campos. Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Evandro José da Silva; Apresentação em 21/11/2024. Publicada em 2024			
11. RESUMO: <p>O crescimento significativo da aviação regional no Brasil tem intensificado a demanda por novas infraestruturas aeroportuárias, evidenciando a necessidade de otimização nos projetos de implantação de novas pistas e aeródromos. A movimentação de terra representa um dos maiores desafios nesses projetos, sendo capaz de influenciar consideravelmente os custos, o tempo de execução e os impactos ambientais associados à terraplenagem. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação de uma ferramenta semiautomatizada que visa reduzir o volume de terraplenagem na construção de pistas aeroportuárias e suas faixas adjacentes, utilizando Modelos Digitais e Elevação (MDE). A abordagem proposta está alinhada às diretrizes do "Manual de Apoio à Prospecção de Novos Sítios Aeroportuários Regionais", promovendo maior eficiência e sustentabilidade nas obras aeroportuárias. Assim, espera-se que a ferramenta contribua para a modernização dos processos de engenharia no setor de terraplenagem, reduzindo custos, prazos e impactos ambientais; além de atender às crescentes demandas da aviação regional brasileira.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;">                     (X) <b>OSTENSIVO</b>                      ( ) <b>RESERVADO</b>                      ( ) <b>SECRETO</b> </p>			