

A proposta desse trabalho foi identificar e avaliar os componentes e possíveis instabilidades nos maciços do aterro sanitário de Lages, Santa Catarina, com uso de aeronaves remotamente pilotadas. O aerolevanteamento foi feito utilizando as plataformas RVJET e Phantom 4 Advanced com implantação de pontos de controle no solo. Concluiu-se que o aterro sanitário segue com recalques uniformes e com velocidades estáveis de deformação, não ultrapassando os níveis de alerta. A análise do comportamento dos recalques ao longo do tempo com o uso de veículos aéreos não tripulados se mostrou bastante eficiente para o monitoramento ambiental de aterros sanitários possibilitando a construção de uma base de dados digitais e análises diversas para previsibilidade de eventos.

Orientador: Prof. Dr. Ildegardis Bertol

Coorientador: Dr. André Leonardo B. Buck

Lages, 2020

ANO  
2020

MARIANA BONELLA CUNHA | AVALIAÇÃO DE INSTABILIDADE EM UM  
ATERRO SANITÁRIO



**UDESC**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

## AVALIAÇÃO DE INSTABILIDADE EM UM ATERRO SANITÁRIO

MARIANA BONELLA CUNHA

LAGES, 2020

**MARIANA BONELLA CUNHA**

**AVALIAÇÃO DE INSTABILIDADE EM UM ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

**Orientador:** Prof. Dr. Ildegardis Bertol

**Coorientador:** Dr. André Leonardo Bortolotto Buck

**LAGES - SC  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Cunha, Mariana Bonella  
Avaliação de instabilidade em um aterro sanitário / Mariana  
Bonella Cunha. -- 2020.  
62 p.

Orientador: Ildegardis Bertol  
Coorientador: André Leonardo Bortolotto Buck  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação , Lages, 2020.

1. Aterro sanitário. 2. Monitoramento. 3. Aeronave remotamente  
pilotada. 4. RPA. I. Bertol, Ildegardis. II. Buck, André Leonardo  
Bortolotto. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação -- Selecione  
--. IV. Título.

**MARIANA BONELLA CUNHA**

**AVALIAÇÃO DE INSTABILIDADE EM UM ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ildegardis Bertol

Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Éder Alexandre Schatz Sá

Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Benito Roberto Bonfatti

Universidade do Estado de Minas Gerais

Lages (SC), 24 de junho de 2020.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família pelo carinho, incentivo e compreensão. Em especial à minha mãe por me oportunizar tantos aprendizados ao longo da vida sem medir esforços. Mais uma vez gostaria de expressar minha gratidão pelo apoio. Amo vocês!

Ao professor e amigo Ildegardis Bertol, pela orientação dedicada e pela confiança depositada em mim para chegarmos até aqui. Ao André Bortolotto Buck, pela amizade, troca de ideias e discussões para melhoria deste trabalho bem como pelas oportunidades durante a graduação.

À empresa SF - Geo Engenharia, pelo estágio realizado durante a graduação, apoio ao projeto de pesquisa e disponibilização dos equipamentos e suporte à coleta de dados a campo. À Serrana Engenharia LTDA que cedeu a área para estudo para a coleta dos dados que tornaram este trabalho executável.

Agradeço aos colegas do mestrado e amigos, pelo convívio, pela amizade e incentivo nos momentos difíceis, em especial a Daiane Schier, Daniely Rossini, Karolyne Libardo, Mayara Rafaeli e Renata Magro.

À UDESC, pelo ensino público, gratuito e de qualidade, na graduação e no mestrado e pelos recursos financeiros fornecidos por meio do Programa de Monitoria de Pós-graduação (PROMOP). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse estudo.



“Só se pode alcançar um grande êxito quando  
nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

(Friedrich Nietzsche)





## RESUMO

CUNHA, Mariana Bonella. **Avaliação de instabilidade em um aterro sanitário**. 2020. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, SC, 2020.

Os resíduos sólidos quando depositados inadequadamente trazem grandes problemas ao meio ambiente e a saúde pública. A Lei Federal nº 12.305/10, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), dispõe sobre a gestão desses resíduos e prevê a substituição dos lixões a céu aberto por aterros sanitários. Devido, principalmente, à natureza heterogênea dos materiais, diferentes dimensões de partículas e biodegradação dos resíduos, os aterros podem sofrer com deslocamentos verticais/horizontais que pode comprometer a estabilidade no aterro sanitário. Medições são essenciais para monitoramento dessas movimentações em aterros municipais por razões econômicas e de segurança. O avanço tecnológico dos últimos anos tem mudado as técnicas e os equipamentos utilizados nos levantamentos topográficos. O uso da aerofotogrametria por veículos aéreos não tripulados (RPA) pode ser uma alternativa de monitoramento rápida e eficaz para subsidiar o planejamento estratégico em aterros. Este trabalho foi realizado com o objetivo de identificar recalques e mudanças que evidenciem instabilidade nos maciços do Aterro Municipal de Lages - SC por meio de uma análise temporal com RPA. O aerolevantamento foi feito utilizando as plataformas RVJET e Phantom 4 *Advanced* com implantação de pontos de controle no solo. Como resultado desses voos, foram produzidos ortomosaicos e modelos digitais de elevação periódicos. A partir das séries temporais foram realizados monitoramentos dos componentes e possíveis pontos de instabilidades nos maciços. A velocidade elevada dos deslocamentos foi verificada apenas nas frente de serviços, o que era esperado devido ao acréscimo constante de resíduos e o baixo grau de recalque esperado para o período analisado. Conclui-se que o aterro sanitário segue com recalques uniformes e com velocidades estáveis de deformação, não ultrapassando os níveis de alerta. A análise do comportamento dos recalques ao longo do tempo pode ter sido influenciada pelo excesso de vegetação sobre os maciços. Contudo, o uso de veículos aéreos não tripulados se mostrou eficiente para o monitoramento ambiental de aterros sanitários possibilitando a construção de uma base de dados e análises diversas por meio de inspeções visuais e da variação da cota dos maciços. O RPA apresenta grande potencial de uso para o monitoramento de aterros sanitários. Esse monitoramento deve ser de caráter complementar a outras análises instrumentais, contribuindo ainda mais para o entendimento do comportamento dos maciços ao longo dos anos.

**Palavras-chave:** Aterro sanitário. Monitoramento. Aeronave remotamente pilotada. RPA.



## ABSTRACT

CUNHA, Mariana Bonella. Assessment of instability in a landfill. 2020. 62 p. Dissertation (Master in Environmental Sciences) - State University of Santa Catarina. Graduate Program in Environmental Sciences, Lages, SC, 2020.

Solid waste, when improperly disposed, pose major problems to the environment and public health. The Federal Law n°. 12,305/10, which institutes the National Solid Waste Policy (PNRS), stipulates the management of this waste and the replacement of open dumps by landfills. Due mainly to the heterogeneous nature of the materials, different particle sizes and waste biodegradation, landfills can suffer from vertical/horizontal displacements that can compromise its stability. Measurements are essential for monitoring these movements in municipal landfills for economic and safety reasons. Technological advances in recent years have changed the techniques and equipment used in topographic surveys. The use of aerophotogrammetry by unmanned aerial vehicles (RPA) can be an alternative for quick and effective monitoring to support strategic planning in landfills. This work was carried out with the objective of identifying settlements and alterations that show instability in the massifs of the Lages Municipal Landfill - SC through a temporal analysis with RPA. The aerial survey was carried out using the RVJET and 'Phantom 4 Advanced' platforms with the use of control points on the ground. As a result of these flights, periodic digital elevation models and orthomosaics were produced. From the time series, we monitored the components and possible points of instability in the massifs. The high speed of the displacements was observed only in the operation zone, which was expected due to the constant increase of waste and the low degree of settlement expected for the analyzed period. It is concluded that the landfill continues with uniform settlements and with stable deformation speeds, not exceeding the alert levels. The analysis of the settlement behavior over time may have been influenced by the excess of vegetation on the massifs. However, the use of unmanned aerial vehicles proved to be efficient for the environmental monitoring of landfills, enabling the construction of a database and various analyzes by visual inspections and the variation of the massif's quota. The RPA has great potential for use in the monitoring of landfills. This monitoring should be complementary to other instrumental analyzes, contributing even more to the understanding of the massifs' behavior over the years.

**Keywords:** Landfill. Monitoring. *Remotely-piloted aircraft*. RPA.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura mínima de um aterro sanitário. ....	20
Figura 2 - Curva teórica de recalques em aterros de resíduos sólidos ao longo do tempo. ....	22
Figura 3 - Esquema da movimentação dos marcos superficiais. ....	24
Figura 4 - Localização do aterro sanitário municipal de Lages .....	27
Figura 5 - Fluxograma da metodologia proposta para monitoramento com RPA. ....	29
Figura 6 - Distribuição dos marcos de referência no aterro. ....	30
Figura 7 - Exemplo de nuvem de pontos. ....	31
Figura 8 - Ortomosaico (a); Modelo Digital de Superfície (b); Modelo Digital de Terreno (c). .....	32
Figura 9 - Análise dos componentes em diferentes escalas de proximidade. ....	36
Figura 10 - Mapa planialtimétrico do levantamento aéreo do dia 13/02/2019. ....	37
Figura 11 - Incidências observadas no levantamento do dia 13/02/2019. ....	38
Figura 12 - Mudanças no uso da terra entre os dois primeiros levantamentos. ....	39
Figura 13 - Mudança no uso da terra entre os dois últimos levantamentos. ....	40
Figura 14 - Declividade do terreno no levantamento aéreo do dia 05/05/2018. ....	41
Figura 15 - Declividade do terreno no levantamento aéreo do dia 05/09/2018. ....	42
Figura 16 - Declividade do terreno no levantamento do dia 13/02/2019. ....	43
Figura 17 - Gráfico da distribuição de pontos em função do deslocamento ( $\Delta h$ ). ....	44
Figura 18 – Monitoramento de recalque entre os levantamentos do 05/05/2018 e 05/09/2018. .....	45
Figura 19 - Alterações nas cotas dos maciços entre 05/05/2018 e 05/09/2018. ....	45
Figura 20- Monitoramento de recalque entre os levantamentos do dia 05/09/2018 e 13/02/2018. .....	46
Figura 21 - Gráfico da distribuição dos pontos em função do deslocamento ( $\Delta h$ ). ....	47
Figura 22 - Deslocamento vertical negativo entre o levantamento 2 e 3. ....	48
Figura 23 - Alterações nas cotas dos maciços entre o segundo e terceiro levantamento. ....	49
Figura 24 - Gráfico da distribuição dos pontos em função da velocidade de deslocamento vertical (cm/dia). ....	50
Figura 25 - Distribuição das velocidades dos recalques entre 05/05/2018 e 05/09/2018. ....	51
Figura 26 - Gráfico da distribuição dos pontos em função da velocidade de deslocamento vertical (cm/dia). ....	51
Figura 27 - Localização das velocidades dos recalques entre 05/09/2018 e 13/02/2019. ....	52

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Grau de risco para taludes e maciços terrosos.....	24
Tabela 2 - Critérios gerais de ação para velocidades de recalques para aterros sanitários.....	24
Tabela 3 – Informações gerais sobre o aterro sanitário de Lages.....	28
Tabela 4 – Características dos três levantamentos aéreos realizados no aterro sanitário.....	32



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D - Tridimensional

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

GDS - *Ground sample distance*

GPS - *Global Positioning System*

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MDT- Modelo Digital do Terreno

MDS - Modelo Digital de Superfície

NBR - Norma Técnica Brasileira

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PNRS - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PPP - Posicionamento por Ponto Preciso

RPA - *Remotely-Piloted Aircraft*

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

RTK - *Real Time Kinematic*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

UTM - *Universal Transverse Mercator*





## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	Objetivo geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos .....	19
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	ATERROS SANITÁRIOS .....	20
2.1.1	Definições e conceitos .....	20
2.1.2	Instabilidade em aterros sanitários .....	21
2.2	MECANISMOS DE MONITORAMENTO EM ATERROS SANITÁRIOS .....	22
2.2.1	Inspeções visuais .....	23
2.2.2	Piezômetros .....	23
2.2.3	Marcos superficiais.....	23
2.3	AEROFOTOGRAMETRIA COM RPA .....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
3.1	MONITORAMENTO COM RPA.....	27
3.1.1	Análise dos componentes do aterro.....	33
3.1.2	Levantamento de incidências.....	33
3.1.3	Mudanças no uso da terra.....	33
3.1.4	Declividade do terreno .....	34
3.1.5	Deslocamentos verticais (recalques).....	34
3.1.6	Velocidade dos deslocamentos verticais .....	34
3.2	ÉPOCA E LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO .....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1	ANÁLISE DOS COMPONENTES DO ATERRO .....	36
4.2	LEVANTAMENTO DE INCIDÊNCIAS .....	37
4.3	MUDANÇAS NO USO DA TERRA.....	39
4.4	DECLIVIDADE .....	40
4.5	ALTERAÇÃO DE COTA NOS MACIÇOS.....	43
4.6	VELOCIDADE DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS .....	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>59</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados atualmente pelas administrações públicas é a disposição inadequada dos resíduos sólidos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), foi instituída em 2010 pela Lei nº 12.305 com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado desses resíduos (BRASIL, 2010). Entre as metas está a necessidade de substituição dos lixões a céu aberto por aterros sanitários como medida de proteção ambiental.

O aterro sanitário foi planejado como uma alternativa econômica e ambientalmente viável de disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (LOPES, 2017). Com o aumento da geração de RSU e consequente falta de local para disposição final adequada dos mesmos, as administrações públicas têm investido no aumento da capacidade física dos aterros (SHIMAZAKI, 2017). A construção de aterros mais altos e volumosos podem causar problemas de instabilidade físico-mecânica dos maciços, riscos de deslizamento e ruptura dos taludes. Além disso, o aterro tende a se deslocar devido a processos de compactação, compressibilidade - física, química e biodegradativa - e adensamento dos materiais (NETO, 2016).

Em 1991, aproximadamente 65 mil m<sup>3</sup> (metros cúbicos) de material se despreendeu do maciço do Aterro Sanitário de Bandeirantes, na cidade de São Paulo. Desde então, estudos, técnicas e cuidados relacionados a aterros sanitários evoluíram de forma expressiva no Brasil. (BENVENUTO, 2019). O monitoramento dessas áreas de deposição de resíduos é indispensável para a interpretação do histórico e previsibilidade da estabilidade estrutural dos aterros bem como os riscos ambientais e operacionais associados.

Cada aterro possui suas peculiaridades e o monitoramento periódico de todas as fases do empreendimento garante prognósticos mais seguros, podendo subsidiar planos de intervenção e contingência (BENVENUTO, 2019). A identificação e monitoramento de deslocamentos horizontais e verticais possibilita prever possíveis instabilidades e garantir a integridade física e aproveitamento da vida útil do aterro (ELK, 2019). Convencionalmente as análises superficiais nessas obras são feitas por instrumentos como estações totais e receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de alta precisão, juntamente com inspeções visuais em busca de pontos de erosão, trincas ou fissuras.

O veículo aéreo não tripulado (RPA) é uma ferramenta rápida de auxílio à tomada de decisão em diversas áreas de aplicação (LONGHITANO, 2010). O equipamento possibilita o planejamento flexível de pesquisa, monitoramento da superfície terrestre e coleta de informações em ambientes perigosos (ROSSI, 2018). O RPA fornece imagens

georreferenciadas que são compostas digitalmente em produtos de altíssima resolução e convertidos em modelos topográficos tridimensionais (KULLMANN, 2017). O tempo e a relação custo-benefício do RPA permitem repetir medições em intervalos regulares e monitorar as mudanças ocorridas entre diferentes medições (ROSSI, 2018). As análises dos levantamentos com RPA podem ser a base de referência para o monitoramento e controle em aterros (CHAIDAS, 2018).

O presente estudo objetivou identificar os componentes e instabilidades nos maciços do aterro sanitário de Lages, Santa Catarina, com uso de aeronaves remotamente pilotadas em substituição aos métodos tradicionais de monitoramento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Identificar e avaliar os componentes e possíveis áreas de instabilidade nos maciços do aterro sanitário de Lages (SC) com uso de veículo aéreo não tripulado.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Definir as etapas para o levantamento com RPA e aplicar o método de análise espacial nos dados gerados para fins de monitoramento no Aterro Sanitário Municipal de Lages/SC;
- Identificar possíveis recalques e instabilidades nos maciços que compõem o aterro e determinar a velocidade com que ocorrem;
- Verificar se o RPA substitui os métodos/instrumentos tradicionalmente utilizados para o monitoramento de instabilidades em aterros sanitários;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ATERROS SANITÁRIOS

#### 2.1.1 Definições e conceitos

O aterro sanitário é o espaço destinado para a disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, e deve seguir normas e critérios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente (ABNT, 1992). O aterro sanitário ainda é considerado a alternativa mais sustentável para a gestão de resíduos sólidos em diversos países (LOPES, 2017).

Segundo a NBR 8.419 (ABNT, 1992), o projeto de um aterro sanitário deve atender critérios e parâmetros específicos, além de componentes e práticas operacionais. Tais como a divisão das células, compactação e cobertura dos resíduos, sistema de drenagem de gás, sistema de drenagem pluvial, sistema de drenagem e tratamento do percolado, impermeabilização do solo, entre outros (DENARDIN, 2013). Os resíduos são depositados em superposição de camadas com as declividades dos taludes dessas pilhas projetadas ou adotadas de forma empírica (BEVENUTTO et. al., 2019). A Figura 1 apresenta a estrutura mínima de um aterro sanitário.

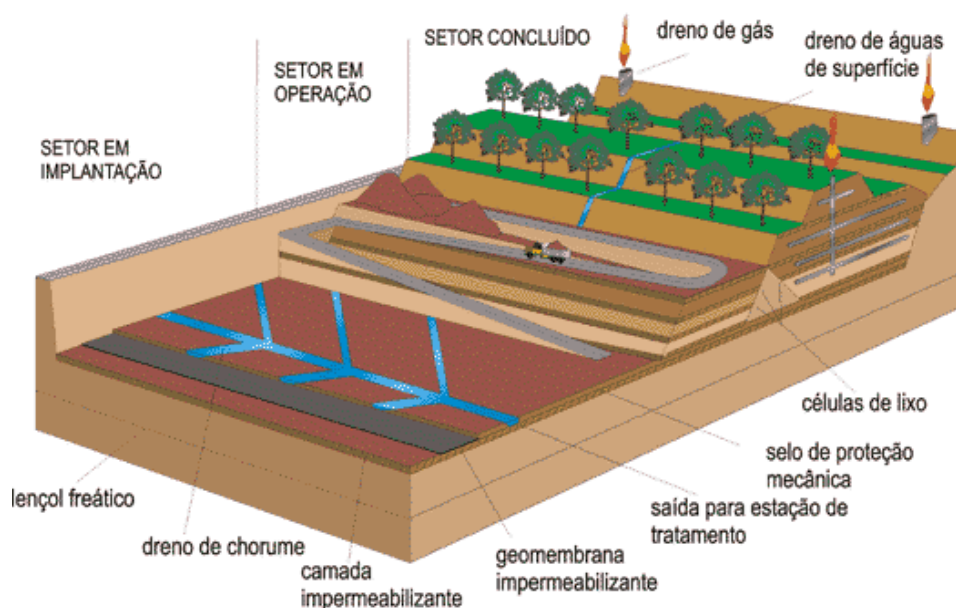


Figura 1 - Estrutura mínima de um aterro sanitário.

Fonte: IPT (2000).

No ano de 2018, os aterros sanitários no Brasil receberam aproximadamente 79 milhões de toneladas de resíduos, segundo o panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018). Em Santa Catarina, um estudo realizado pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES/SC), em 2012, mostrou que 100% dos municípios catarinenses destinavam seus RSU para aterros sanitários (SANTA CATARINA, 2018). Hoje existem 36 aterros sanitários no estado, os quais recebem os resíduos dos 295 municípios.

### **2.1.2 Instabilidade em aterros sanitários**

Os maciços de resíduos se caracterizam por serem instáveis devido a heterogeneidade dos materiais depositados. O maciço tende a se deslocar vertical (recalque) e horizontalmente ao longo do tempo, durante e após seu funcionamento, decorrentes dos processos de compactação e de compressibilidade física, reações químicas e biológicas, e do adensamento mecânico do tráfego de máquinas durante a deposição dos resíduos. Conhecer o comportamento das variáveis é fundamental para interpretar e prevenir comportamentos anômalos nos aterros (BENVENUTTO, et al., 2019).

A composição gravimétrica dos materiais é um fator que influencia na dinâmica dos aterros sanitários. No Brasil, a parcela de resíduo orgânico que vai parar nos aterros sanitários é de aproximadamente 50% (BEVENUTTO, 2011). Quanto maior o percentual de matéria orgânica maior será o deslocamento de massa devido ao processo de biodegradação dos materiais (ALCÂNTARA, 2014; NETO, 2016). A sobrecarga excessiva devido ao grande volume de resíduos depositados diariamente também é responsável por danos estruturais nos maciços.

Os recalques em aterros sanitários ao longo do tempo podem ser significativos, 30 a 40% em relação à espessura inicial do maciço (TEIXEIRA, 2015; LING et al, 1998). O aterro sanitário é projetado para uma vida útil média de 20 anos. Nos dez primeiros anos após seu fechamento é que ocorrem 90% dos recalques totais esperados (GRISOLIA; NAPOLEONI, 1996). Grisolia et al. (1995) descrevem os 5 estágios da variação volumétrica de aterros sanitários, conforme Figura 2.

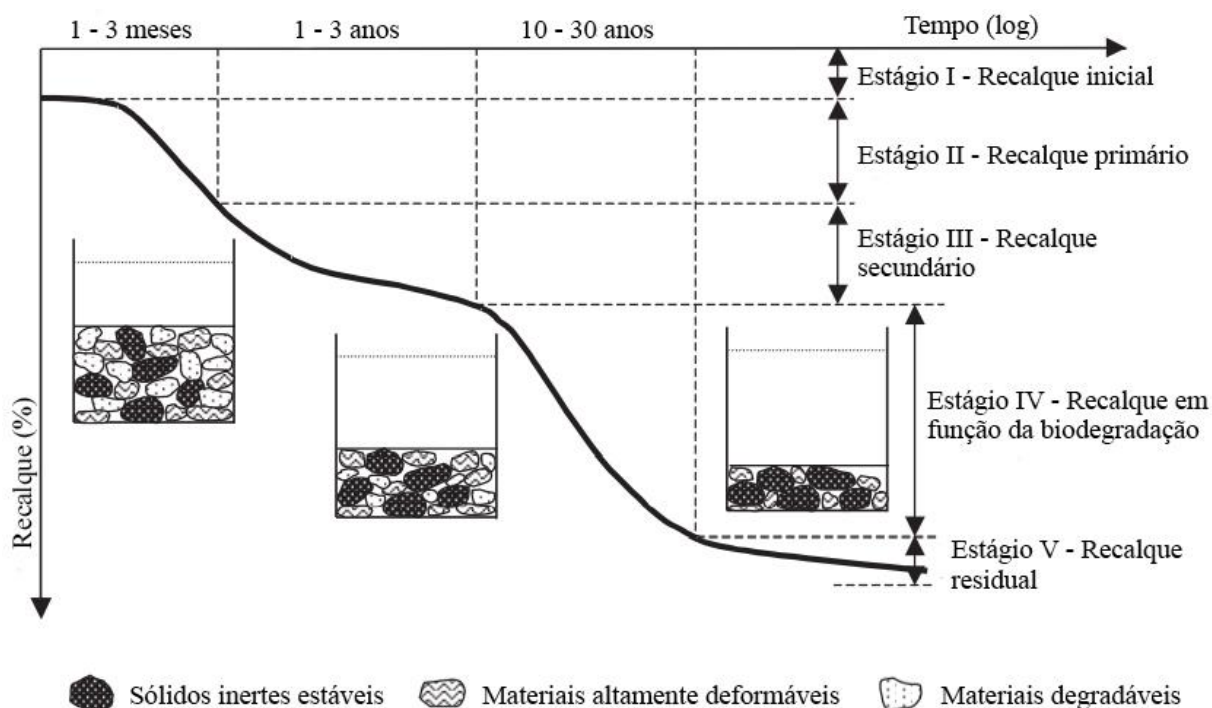


Figura 2 – Curva teórica de recalques em aterros de resíduos sólidos ao longo do tempo.  
 Fonte: Grisolia e Napoleoni (1995, apud Liu et al, 2006)

O recalque inicial (estágio I) está relacionado à compressão mecânica instantânea dos materiais e de materiais deformáveis. O recalque primário (estágio II) ocorre com a compressão contínua e rearranjo dos resíduos, sendo normalmente após 30 dias de deposição dos resíduos (SOWERS, 1973). O estágio secundário está associado a deformação mecânica e decomposição inicial da matéria orgânica. Já, o estágio IV e V ocorre recalque em função da decomposição e deformação residual mecânica e biológica. As deformações em aterros sanitários tendem a diminuir ao longo do tempo (Ling et al., 1998). As instabilidades podem ser antecipadas por inspeções visuais no aterro e instrumentações geotécnicas adequadas.

## 2.2 MECANISMOS DE MONITORAMENTO EM ATERROS SANITÁRIOS

Alterações geométricas e/ou deslocamentos podem evidenciar instabilidades nos maciços. Para manter as operações produtivas e seguras e evitar riscos devido ao colapso estrutural dos maciços, é essencial que seja realizado o monitoramento detalhado e preciso das superfícies dos aterros (GASPERINI, 2014). Segundo a norma brasileira NBR 11.682 (2009), esse acompanhamento pode ser realizado por inspeção e/ou instrumentação. O monitoramento dos deslocamentos superficiais dos taludes deve ser realizado por meio de levantamento topográfico (ABNT, 2009). Segundo Bevenuto et. al (2019), os dados de deslocamentos

topográficos e piezometria são complementares quando associados às inspeções de campo e evidenciam o real comportamento das massas de resíduos. Segundo Alcântara (2014), o acompanhamento dos recalques visa verificar se o deslocamento está numa faixa aceitável.

### **2.2.1 Inspeções visuais**

As inspeções a campo permitem observar a ocorrência de processos erosivos e trincas nos taludes, as condições dos sistemas de drenagem, disposição inadequada dos materiais, animais no local, entre outras incidências (ANDRADES, 2018). O mapeamento do comportamento dos componentes serve para avaliar se existe um padrão de ocorrências que possa indicar possíveis instabilidades nos maciços. Essas inspeções devem ser realizadas em conjunto com outras formas de monitoramento para avaliar os deslocamentos.

### **2.2.2 Piezômetros**

Os piezômetros têm a função de registrar e medir as pressões dos fluidos resultantes do sistema sólidos/líquidos/gases que se desenvolvem por decomposição da matéria, entradas e saídas de líquidos e gases no maciço ao longo do tempo (BENVENUTTO, 2011). O piezômetro permite medir as alterações internas do maciço.

### **2.2.3 Marcos superficiais**

Os marcos superficiais são estruturas de referência dispostas na superfície do aterro cuja função é monitorar os deslocamentos verticais e horizontais através de levantamento topográfico (ANDRADES, 2018). As análises são realizadas com base nos dados das leituras periódicas das coordenadas e cotas dos marcos e normalmente são coletadas com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de elevada precisão. Não existe norma ou regulamentação definida a respeito do número de instrumentos que devem ser instalados para a avaliação da estabilidade geotécnica do aterro sanitário. A Figura 3 mostra o posicionamento genérico de um marco superficial (medidor), bem como, o vetor que indica a sua movimentação resultante.



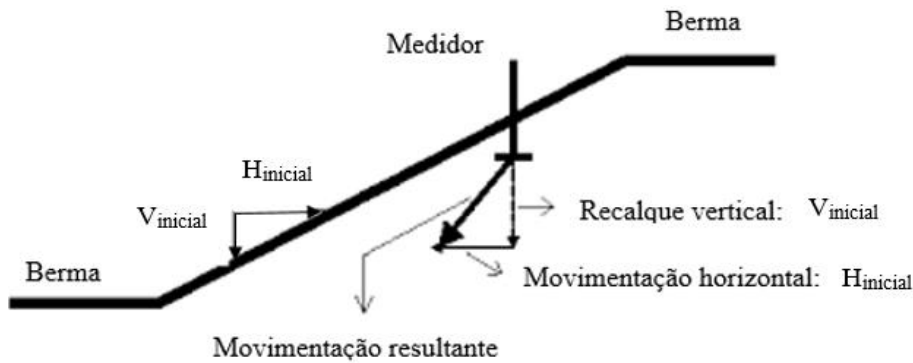


Figura 3 - Esquema da movimentação dos marcos superficiais.

Fonte: Silva (2010).

O entendimento da taxa de ocorrência dos recalques é de suma importância para avaliar o desempenho do projeto e garantir a sua integridade. A velocidade dos deslocamentos é a razão entre um deslocamento parcial e o número de dias entre as duas medições topográficas dos marcos superficiais (BOSCOV, 2008). A norma brasileira NBR 11.682, Estabilidade de Taludes (ABNT, 1991), determina valores de referência para o grau de risco dos deslocamentos verticais em função da velocidade de taludes e maciços terrosos, conforme Tabela 1. Onde  $v$  é a velocidade de deslocamento vertical média (cm/dia).

Tabela 1 - Grau de risco para taludes e maciços terrosos.	
Grau de risco	Velocidade média do deslocamento (cm/dia)
Alto	$> 2$
Médio	$0,1 < v < 2$
Baixo	$< 0,1$

Fonte: Adaptado de ABNT (1991).

Contudo, os deslocamentos em aterros sanitários ocorrem de forma muito mais elevada do que em maciços de solo, devido a heterogeneidade dos materiais (TEIXEIRA, 2015). Nesse sentido, Kaimoto (2008) sugeriu os valores de velocidade verticais para aterros sanitários, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios gerais de ação para velocidades de recalques para aterros sanitários.

Recalque (cm/dia)		
Atenção	Alerta	Intervenção
$2 < v < 4$	$4 < v < 10$	$v > 10$

Fonte: Adaptado de Kaimoto (2008) *apud* Benvenuto (2011).

### 2.3 AEROFOTOGRAMETRIA COM RPA

A necessidade de representação geográfica e de produtos que registrem e armazenem informações possibilitou o surgimento das tecnologias de sensoriamento remoto e de geoprocessamento. O sensoriamento remoto é uma técnica por meio da qual se pode obter informações de um determinado objeto, área ou fenômeno, indiretamente, por meio de análise de dados adquiridos sem contato direto com o objeto ou fenômeno (LILLESAND e KIEFER, 1987). A imagem de satélite, por exemplo, permite detectar e analisar uma alteração ambiental ocorrida em um local ou região ao longo do tempo.

O geoprocessamento, por outro lado, compreende um conjunto de técnicas que envolve concepção matemática e computacional que permite a aquisição, armazenamento e manipulação de informações geográficas de forma rápida e eficiente. Os instrumentos computacionais de geoprocessamento, chamados de sistema de informação geográfica (SIG), oferecem mecanismos que permitem combinar várias informações simultaneamente por meio de algoritmos que geram banco de dados geográficos, automatizam a produção de mapas (ASSAD e SANO, 1998) e suportam a análise espacial dos fenômenos, fornecendo fundamentos para medir, gerenciar, mapear e analisar o mundo real (LONGLEY, et. al, 2013).

A aerofotogrametria com sensores embarcados em aeronaves remotamente pilotadas para obtenção de imagens vem se tornando uma importante ferramenta de análise topográfica e caracterização do problema em diversas áreas de aplicação (CÂNDIDO et. al., 2015).

Em aterros sanitários, convencionalmente, as medições dos marcos superficiais são realizadas por meio de equipamentos que necessitam de maior tempo e deslocamento da equipe operacional, como estação total e receptores do Sistema de Navegação Global por Satélite - GNSS (MELLO, 2019). As aeronaves remotamente pilotadas (RPA), conhecidas popularmente como “*drones*”, são uma alternativa que permite aprimorar o processo de medição e obtenção de dados topográficos. O termo inglês *Remotely Piloted Aircraft* - RPA é adotado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018).

Os RPA são equipamentos de simples operação e manuseio que possibilitam o mapeamento de áreas de grandes extensões e/ou inacessíveis por meio terrestre (SERRA, 2014). Como fonte de dados topográficos, esse método reduz o tempo de trabalho em campo e possibilita levantar informações de qualidade e com alto grau detalhamento do terreno devido a malha de pontos gerados no processamento das imagens (CAMPITELI, 2016). Em seu interior, o equipamento possui dispositivos capazes de captar dados geográficos de maneira automatizada. Entre seus componentes estão: sensores de navegação, como o GNSS para

determinar a localização da aeronave e o link de rádio frequência que estabelece o controle da aeronave por meio da estação em solo.

A utilização de RPA na engenharia é importante para o monitoramento e inspeção de estruturas. Barragens, pontes e aterros, por exemplo, possuem algumas limitações de acesso dos técnicos responsáveis. A aplicação da fotogrametria permite obter o modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Digital da Superfície (MDS) e ortomosaicos, além de criar um registro fotográfico do local de estudo. Os produtos gerados podem ser utilizados na realização de inúmeras análises espaciais por meio do SIG. Sendo possível criar uma base de dados digital para o monitoramento e gestão de aterros (CHAIDAS, 2018).

Na literatura, estudos sobre as diversas vantagens, aplicabilidade e confiabilidade do método aerofotogramétrico já estão sendo difundidos. A escolha da melhor técnica de levantamento topográfico para cada estudo é determinada pelas necessidades de projeto e considerações de custo (SILVA, 2010).

Melo (2016) analisou a utilidade e desempenho do imageamento por RPA para a inspeção de segurança em canteiros de obras. Concluiu que o equipamento é capaz de fornecer informações para a identificação de atos e condições inseguras em obras, chegando a 87% de visualização. Com uma aeronave equipada com uma câmera óptica, Rossi (2018) mapeou deslizamentos de terra no vale do alto rio Arno na Toscana (Itália). Concluiu que os dados coletados permitiam a reconstrução e mapeamento precisos dos deslizamentos. Tucci (2019), testou a viabilidade do uso da fotogrametria para o monitoramento frequente de volume de pilhas de estoque de materiais. Concluiu que os resultados detectados com RPA alcançaram precisão adequada para os requisitos práticos do estudo de caso.

Em aterros sanitários, Chaidas (2018) demonstrou que os produtos gerados com uso da aeronave são eficientes para medir volumes já utilizados ou a serem preenchidos. Desta forma, podem ser usados para detecção de variação das cotas do maciço. Ao longo dos anos, as geotecnologias constituíram-se em uma ferramenta poderosa para avaliações, planejamento e implantação de soluções com relação à destinação final dos resíduos sólidos urbanos (Moraes et. al., 2010)

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÉPOCA E LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO

O levantamento de dados para o presente estudo foi realizado entre maio de 2018 e fevereiro de 2019 no aterro sanitário municipal de Lages, estado de Santa Catarina, localizado a aproximadamente 20 km do centro da cidade em uma via não pavimentada acessada pela BR-282 km 204, o aterro sanitário ocupa uma área total de 39,88 ha (Figura 4).

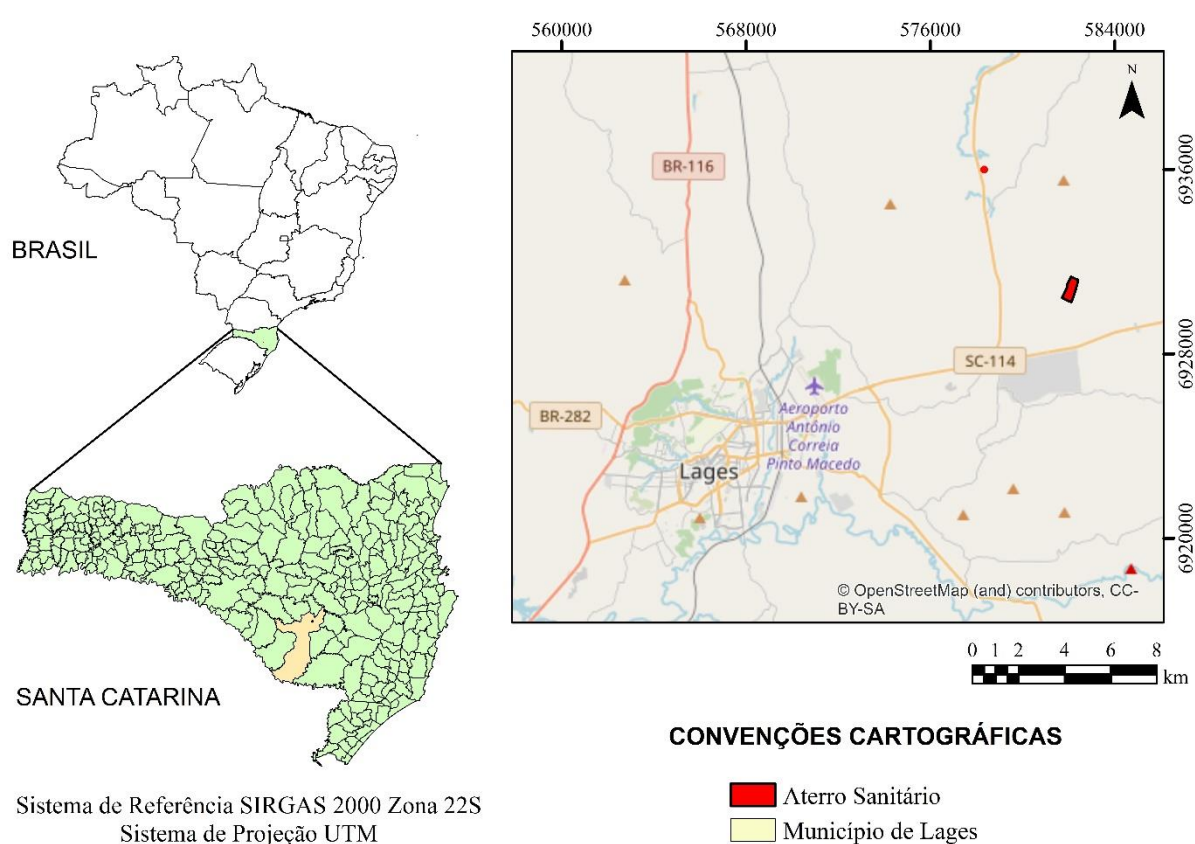


Figura 4 - Localização do aterro sanitário municipal de Lages

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O aterro do município recebe cerca de 140 toneladas de resíduos por dia proveniente de 12 municípios da região e possui atualmente 40% de sua totalidade disponível. A análise gravimétrica realizada pelo aterro sanitário municipal de Lages mostra que 36% do total de resíduo recebido é classificado como orgânico. Na Tabela 3 constam as informações gerais sobre o aterro sanitário do município de Lages, segundo dados levantados no Panorama de Resíduos Sólidos do Estado de Santa Catarina de 2017.

Tabela 3 – Informações gerais sobre o aterro sanitário de Lages.

Proprietário	Município de Lages
Operador	Serrana Engenharia Ltda
Região Integrada de RS	Região de Lages
Capacidade da vida útil	560.939,81 toneladas
Instalação de triagem de recicláveis	Não
Instalação de unidade de compostagem	Não
Municípios que depositam no aterro	Bom Retiro, Correia Pinto, Lages, Urupema, Urubici, São Joaquim, Capão Alto, Painei, Rio Rufino, Bom Jardim da Serra, São José do Cerrito e Ituporanga

Fonte: Adaptado do Panorama de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (2017).

### 3.2 MONITORAMENTO COM RPA

Como fator de segurança para aterros sanitários, essa metodologia foi proposta para monitorar as alterações ocorridas ao longo do tempo e identificar locais que evidenciem possíveis instabilidades nos maciços. O fluxograma da metodologia proposta é apresentado na Figura 5.

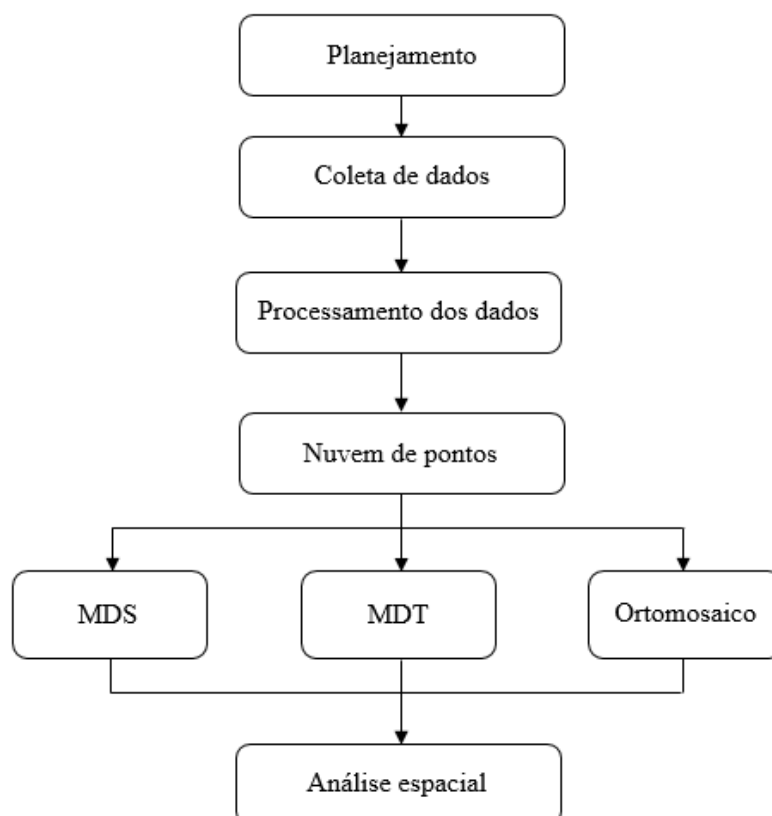


Figura 5 - Fluxograma da metodologia proposta para monitoramento com RPA.  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A etapa de planejamento, ainda no escritório, é fundamental para determinar número e local dos pontos de controle a serem instalados no aterro, o trajeto da aeronave, altura do voo, área a ser recoberta, quantidade de fotos, sobreposições lateral e longitudinal das fotos e o GSD (*Ground Sample Distance*) desejado. Na tradução literal, GSD significa “Distância de amostra do solo”, quanto menor for o GSD maior o nível de detalhamento e melhor definição dos objetos (DRONENG, 2016). As coletas foram realizadas em dias com pouca ou nenhuma nebulosidade e com o mínimo possível de ventos, conforme especificações exigidas para o equipamento.

Para a coleta dos dados topográficos, pontos de controle foram materializados por marcos superficiais distribuídos na área de estudo, com a finalidade de aumentar a confiabilidade e acurácia dos dados aerofotográficos. Esses pontos foram identificados,

também, por meio de cal virgem de modo que se tornassem aparentes e identificáveis nas imagens aéreas, com a finalidade de atribuir aquele ponto a mesma coordenada coletada em campo, este processo é chamado de identificação dos pontos homólogos.

As coordenadas terrestres desses pontos foram levantadas por receptores de sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de duas frequências (L1/L2) modelo Sokkia GRX1 pelo método *Real Time Kinematic* (RTK). Um vértice de referência, aqui denominado de BASE, foi implantado próximo a sede administrativa do aterro e sua coordenada foi processada pelo método de Posicionamento por Ponto Preciso (IBGE-PPP). Os dados GNSS coletados foram utilizados como ponto de controle e checagem no processamento dos dados do RPA. A Figura 6 ilustra a distribuição dos marcos implantados no aterro sanitário de Lages. As coordenadas de referência de todos os pontos de controle estão descritas no Apêndice A.

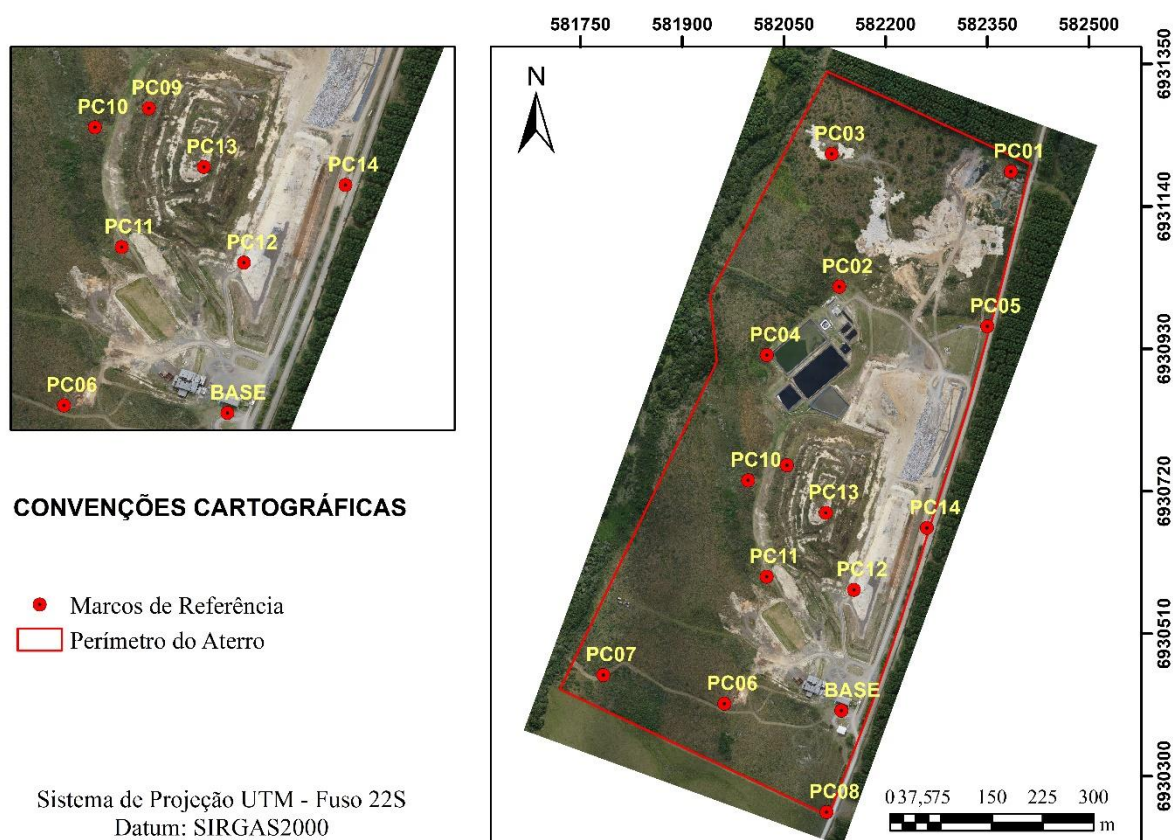


Figura 6 – Distribuição dos marcos de referência no aterro.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A captura das imagens aéreas do primeiro levantamento foi realizada com um RPA de asa fixa modelo RVJET. Estruturalmente fabricado em polietileno (isopor) e peso total de 3 kg, embarcado com uma câmera digital RGB 24 megapixels. O equipamento possibilita a execução de voos autônomos de até 90 minutos e recobrimento de áreas de até 1.000 hectares por voo.

Os demais levantamentos foram realizados com um Phantom 4 *Advanced*, desenvolvido pela DJI. O equipamento é um multirrotor com autonomia de voo de até 30 minutos. A câmera possui sensor CMOS de 20 megapixels de resolução (DJI, 2018). Ambos possuem sistema de navegação GNSS embarcado para gerenciamento das coordenadas de cada imagem na fototriangulação.

O processamento das imagens adquiridas pelo RPA e a geração dos produtos foi realizada em escritório com auxílio de um software especializado em processamento digital de imagens e fotogrametria. Inicialmente, foi realizada a seleção e filtragem das fotografias com a finalidade de eliminar as que não apresentavam qualidade suficiente e de reduzir possíveis erros no processamento dos dados. Essa etapa foi realizada manualmente. O alinhamento das imagens foi necessário para realizar a aerotriangulação e identificar os pontos homólogos por meio do algoritmo de coleta automática de pontos de amarração (LUZ, 2017).

Após esse alinhamento, as câmeras foram otimizadas e foi possível analisar e ajustar os erros do processamento. As precisões de escala de mapeamento do projeto tiveram como referência os valores validados pela Droneng (2018), onde o erro máximo esperado em planimetria (X e Y) é 1 a 1,5 x GSD e em altimetria (Z) 2 a 3 x GSD. Os produtos gerados nos levantamentos realizados possuem GSD médio de 3,4 cm/pixel.

Quando utilizados pontos de apoio em campo, a acurácia normalmente será relacionada ao GSD das imagens. Ou seja, relacionada com o grau de proximidade de uma estimativa com seu valor verdadeiro (NETO, 2016). Após a verificação de que os erros do alinhamento estavam dentro do limite do erro máximo esperado, iniciou-se o processo de obtenção da nuvem de pontos (Figura 7).

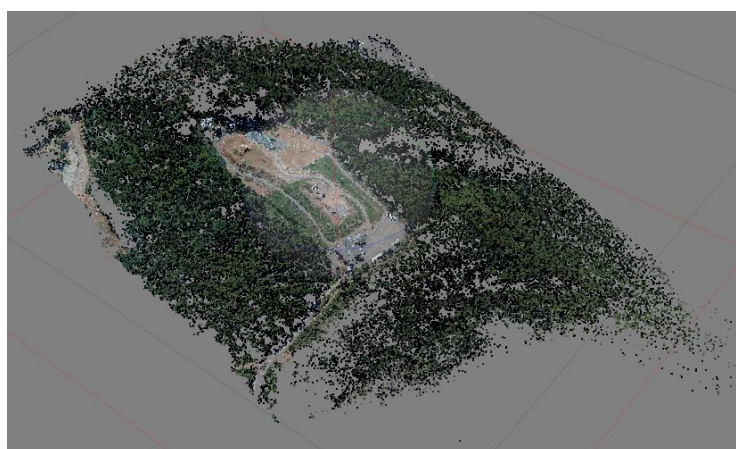


Figura 7 – Exemplo de nuvem de pontos.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).



Os dados gerados contêm uma grande densidade de pontos 3D, possibilitando a análise pontual do relevo do terreno. O MDE e ortomosaico foram criados a partir da nuvem de pontos original. Já para a criação do MDT foi realizada a classificação da nuvem de pontos, a qual visava a retirada de objetos que poderiam interferir nas análises, por exemplo, arbustos e árvores. E assim, obteve-se os produtos necessários para a realização das análises propostas neste estudo, conforme Figura 8. As características dos três levantamentos aéreos realizados para a coletas de dados estão descritas na Tabela 4.

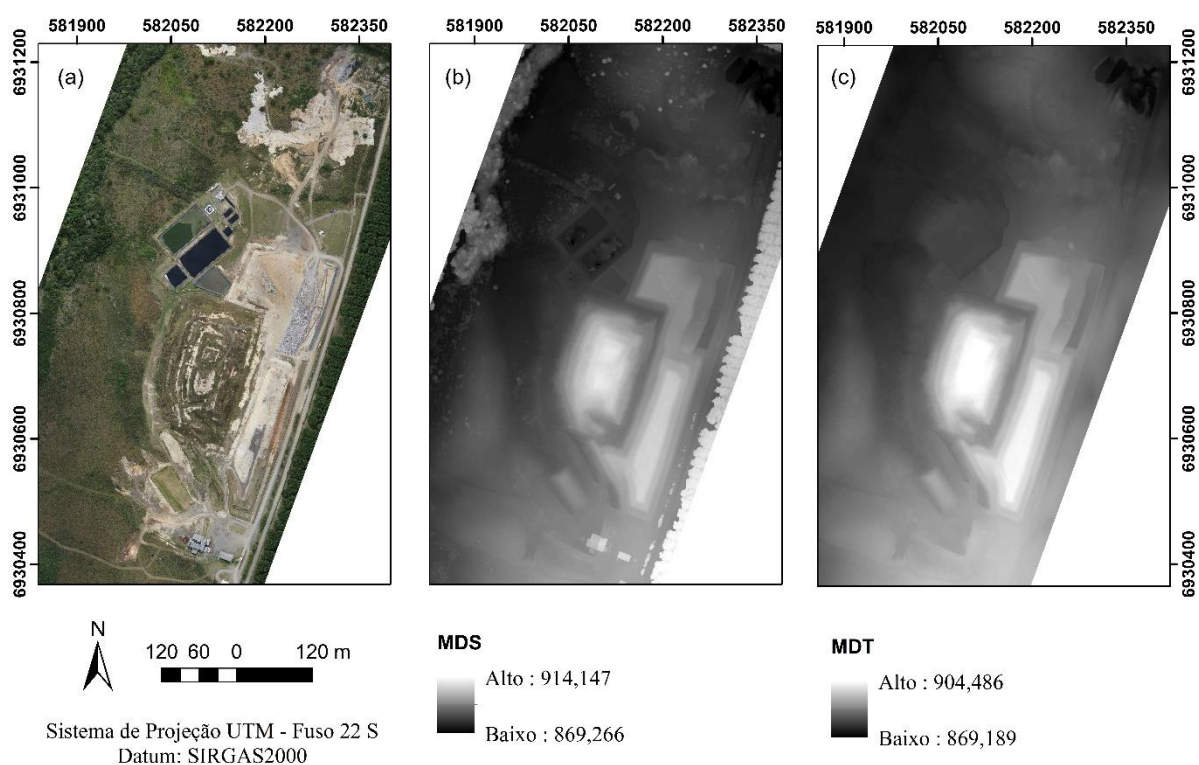


Figura 8 – Ortomosaico (a); Modelo Digital de Superfície (b); Modelo Digital de Terreno (c).  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 4 – Características dos três levantamentos aéreos realizados no aterro sanitário.

Características	Voo 1	Voo 2	Voo 3
Data do levantamento	05/05/2018	05/09/2018	13/02/2019
Modelo da Câmera	ILC-6000	FC-6310	FC-6310
Resolução da câmera	6000 x 4000	4864 x 3648	4864 x 3648
Distância focal da câmera	16 mm	8,8 mm	8,8 mm
Número de imagens	468	1.027	1.106
Altura do voo	158 m	122 m	125 m
Sobreposição longitudinal	80%	80%	80%
Sobreposição lateral	70%	70%	70%
Ground Sample Distance (GSD)	3,48 cm/pixel	3,42 cm/pixel	3,46 cm/pixel

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os dados obtidos nos levantamentos foram analisados e comparados entre si para detectar áreas que evidenciassem processos de instabilidade. A detecção e determinação dessas áreas foram avaliados de acordo com os seguintes critérios: interpretação visual em campo, análise e registro dos componentes do aterro, mudanças no uso da terra, determinação da declividade, locais de ocorrência de recalques e velocidades associadas.

### **3.2.1 Análise dos componentes do aterro**

Foram estabelecidas 18 classes de uso e ocupação da terra por meio da fotointerpretação realizada em SIG e confeccionado um mapa de visão geral do aterro no último levantamento, sendo denominadas: área de aterro; área disponível; balança; caixa d'água; caixa de passagem; corpo d'água; drenagem pluvial; dreno vertical; estação de tratamento; estradas; infraestruturas; maciço; poço de monitoramento; poste; posto de combustível; resíduos expostos; tubulação; vegetação.

### **3.2.2 Levantamento de incidências**

Incidências são fatos constados “*in loco*” capazes de agravar o grau de deslocamento do maciço, causar ou potencializar algum tipo de risco a saúde e ao meio ambiente. As imagens capturadas com RPA possuem alto grau de detalhamento o que possibilita realizar inspeções visuais no terreno por meio da análise dos ortomosaicos. Foram diagnosticados os riscos associados as principais incidências observadas, as quais foram validadas a campo.

### **3.2.3 Mudanças no uso da terra**

A detecção de mudanças no uso da terra mostra as variações entre os levantamentos aéreos. Essa análise é importante para o acompanhamento e monitoramento das frentes de serviço. A detecção de mudanças se deu por meio da comparação dos mapas e da tabela de atributos gerada da união e análise da vetorização entre os levantamentos e foi classificada em 3 grupos: suprimido onde são apontadas as áreas ou estradas retiradas entre um levantamento e outro; alterado - vinculada ao avanço da área de aterro em relação à área disponível, construção de estradas, e novas células; inalterado indica que não ocorreu alteração do uso do solo.

O processo de vetorização das feições e comparação das alterações foi realizado em ambiente SIG no software ArcGis® versão 10.5.1.

### 3.2.4 Declividade do terreno

As declividades dos taludes das pilhas de rejeitos podem influenciar na estabilidade dos maciços. A avaliação do tipo de relevo foi realizada por interpolação em ambiente SIG, por meio da ferramenta “*slope*”, tendo como base MDT de 1 metro de resolução. Foram adotadas quatro classes de declividade, sendo elas: 0-15; 15-25; 25-45 e maior de 45°. O limite estabelecido pelo aterro municipal de Lages é de 45°, valor esse referente a inclinação dos taludes dos maciços.

### 3.2.5 Deslocamentos verticais (recalques)

Com o objetivo de comparar os deslocamentos verticais de uma forma distribuída e igualitária para todo o aterro, foi construído um grid de pontos de 10x10m em toda área de maciço. Os valores das cotas foram extraídos do MDT com resolução espacial GSD de 1m levantados em dois períodos distintos. A diferença entre dois monitoramentos é dada pela Equação 1. Foi subtraído o valor de cota obtido em um levantamento pelo valor obtido no levantamento aéreo anterior. Os valores positivos apontam um aumento no nível do terreno, enquanto valores negativos apontam possíveis rebaixamentos do maciço.

$$\Delta h = h_n - h_{n-1} \quad (1)$$

Em que:

$\Delta h$ : diferença de cota entre dois levantamentos aéreos;

$n$ : último levantamento aéreo realizado;

$n-1$ : levantamento anterior ao último levantamento aéreo realizado.

Além disso, para avaliar as alterações das cotas do terreno entre um levantamento aéreo e outro foram utilizados os MDT com as cotas arredondadas para números inteiros. Desta forma, somente foram classificadas diferenças de cota superiores a 1m.

### 3.2.6 Velocidade dos deslocamentos verticais

Para quantificar o grau de criticidade em que esses deslocamentos ocorrem foi realizada a análise da velocidade diária conforme critérios gerais de ação para aterros sanitários

proposto por Kaimoto (2008). Os valores de discrepância das cotas ( $\Delta h$ ) foram divididos pelo número de dias entre um levantamento aéreo e outro. Os valores  $\pm 2$  cm/dia foram considerados o valor limite, pois enquadraram-se em grau de risco alto e que necessitam de no mínimo atenção, segundo classificação da ABNT 1991 e de Kaimoto (2008), respectivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DOS COMPONENTES DO ATERRO

A aproximação dos objetos permitiu identificar os componentes do aterro 18 classes para fins de monitoramento e acompanhamento do desenvolvimento de obras. Na Figura 9, é possível observar que na escala 1:500 pode-se facilmente identificar os resíduos expostos, o veículo compactador, estradas, geomembranas de PEAD e outros detalhes da superfície do terreno. Na escala 1:50 é possível visualizar nitidamente um dos dutos de gás que compõe o maciço.

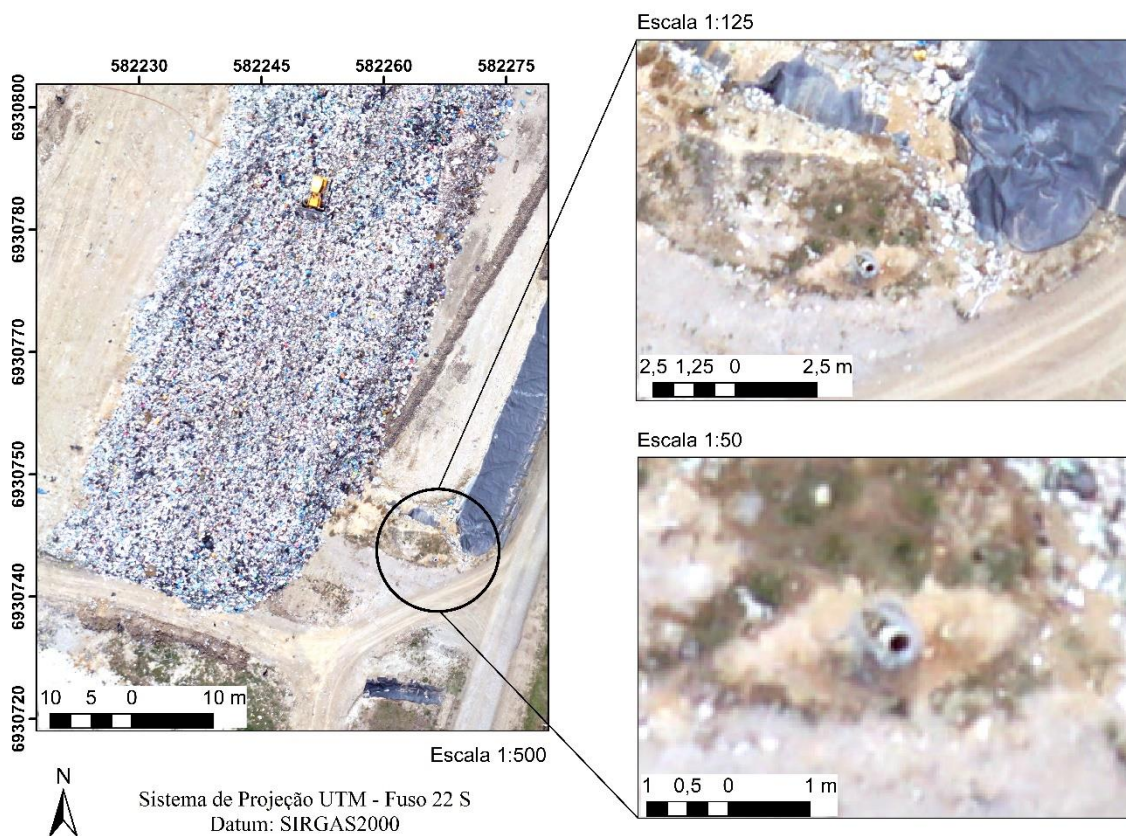


Figura 9 – Análise dos componentes em diferentes escalas de proximidade.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A análise do mosaico de ortofotos permite identificar e quantificar os componentes do aterro sanitário com alto grau de visibilidade, além da possibilidade de realizar medições diretas de distâncias e áreas (SILVA, 2017). Com o monitoramento é possível criar uma base de dados da evolução da obra, qualitativa e quantitativamente, como por exemplo, a área ocupada pelo maciço e o número de instrumentos e componentes no projeto.



Distribuídos pelos 83.609 m<sup>2</sup> de área de maciço estão: 58 drenos verticais de gás, 4 postos de monitoramento dos percolados, 892 m<sup>2</sup> de sistema de drenagem pluvial, 9.925 m<sup>2</sup> do sistema de estação de tratamento dos efluentes (ETE), 3.470 m de estrada e 997 m<sup>2</sup> de edificações, entre outros componentes. Na Figura 10 pode-se observar o mapa planialtimétrico do levantamento aéreo realizado no dia 13 de fevereiro de 2019.

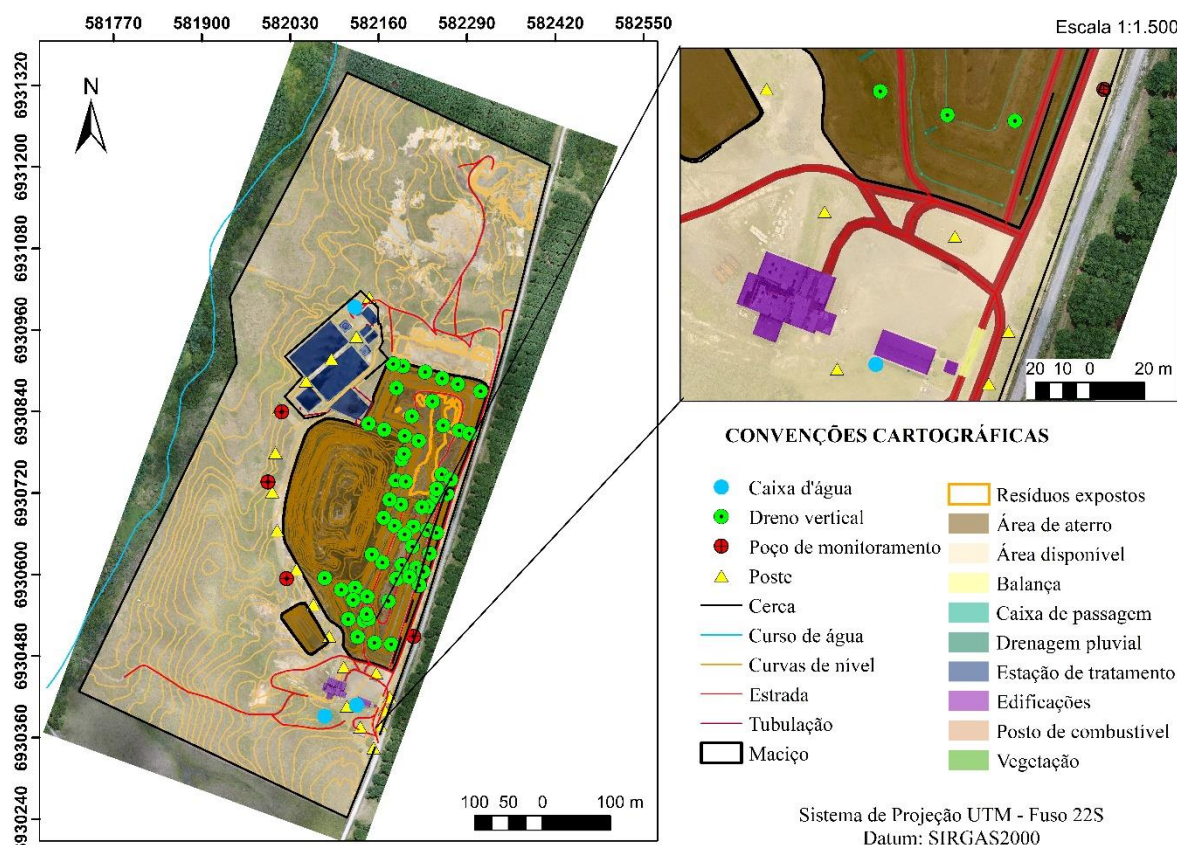


Figura 10 – Mapa planialtimétrico do levantamento aéreo do dia 13/02/2019.  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

## 4.2 LEVANTAMENTO DE INCIDÊNCIAS

Por meio das imagens obtidas por RPA foi possível detectar e monitorar as principais incidências ocorridas no período estudado e os potenciais riscos associados a atividade. Essas análises são de fácil identificação nos ortomosaicos gerados e podem auxiliar na tomada de decisão imediata. Foram avaliados locais com excesso de vegetação sobre o maciço, geomembranas expostas, acúmulo de lixiviados, inexistência de cobertura vegetal nos taludes, processos erosivos e área com resíduos expostos e resíduos fora do local de deposição. Na

Figura 11 é possível observar as incidências que ocorreram no levantamento do dia 13/02/2019. Não houve mudanças significativas nas análises anteriores.

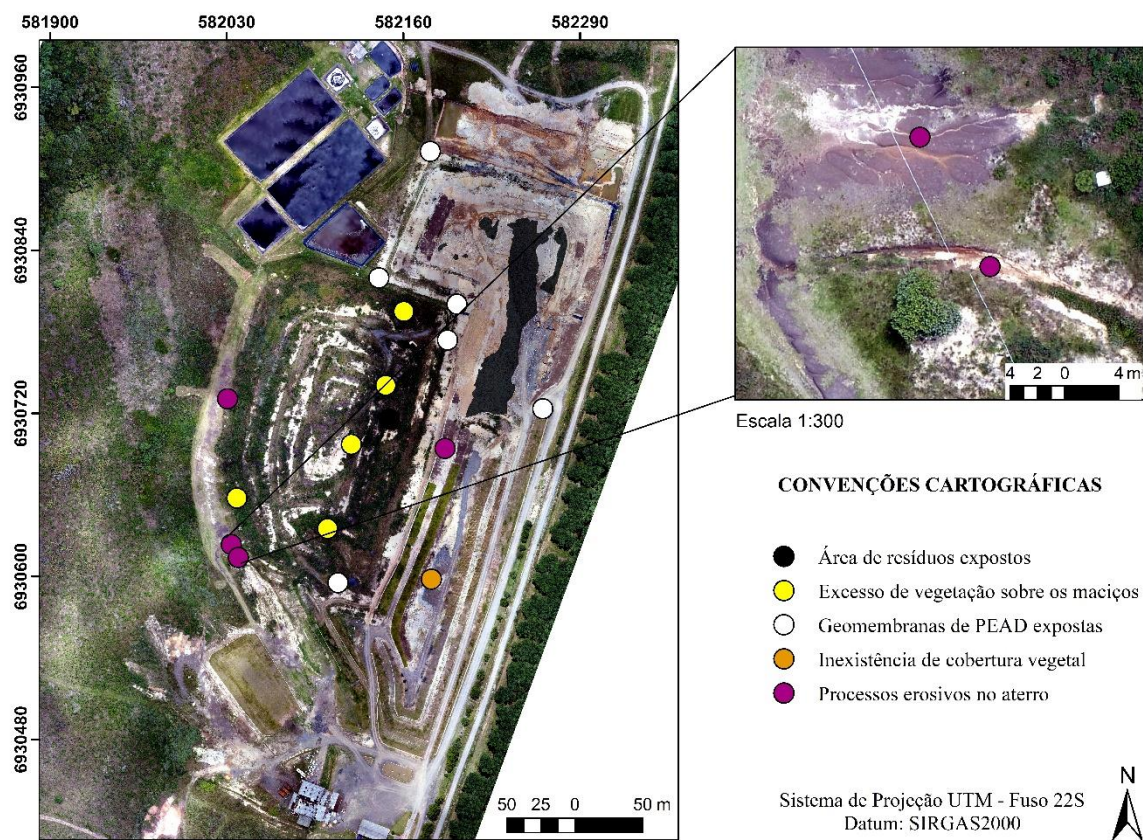


Figura 11 –Incidências observadas no levantamento do dia 13/02/2019.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A cobertura vegetal pode auxiliar ou interferir nos processos erosivos. A vegetação atua como proteção do solo frente a ação das gotas da chuva, por exemplo. Locais com inexistência ou pouca vegetação são mais suscetíveis a erosão do que locais em que o solo contém cobertura vegetal (COSTA, Y. T. e RODRIGUES, S. C., 2015). Os pontos de erosão (em destaque na Figura 11) estão localizados fora do maciço e são referentes a drenagem pluvial do terreno. Sendo assim, não evidenciam instabilidades no maciço.

A inexistência de vegetação foi observada apenas no maciço recém finalizado e não há indícios de erosões no local. A área de resíduos expostos é referente aos recentes depósitos de materiais, os quais serão cobertos por uma camada de terra após a conclusão das operações. As geomembranas aparentes estão localizadas na célula em operação e não representam problema ao aterro por estarem localizadas na área de borda da célula.

A identificação de irregularidades auxilia na tomada de decisão imediata por parte dos gestores, permitindo uma análise rápida e precisa do local. Deve-se ficar atento a essas



incidências, pois locais com excesso de vegetação podem diminuir a veracidade dos dados coletados e locais de erosão ou fissuras podem evidenciar deslocamentos nos maciços.

#### 4.3 MUDANÇAS NO USO DA TERRA

As mudanças de uso da terra são analisadas por meio do ortomosaico gerado com os dados do RPA. As principais alterações foram referentes as estradas de acesso aos maciços, implantação de uma nova célula, e a ampliação de uma das lagoas da estação de tratamento de efluentes (ETE). As alterações ocorridas entre 05/05/2018 e 05/09/2018 (Figura 12), foram referentes ao início da implantação (em azul) da nova célula, de 2.681 m<sup>2</sup>, e a alteração ou supressão (em vermelho) de algumas estradas de acesso ao maciço central em operação.

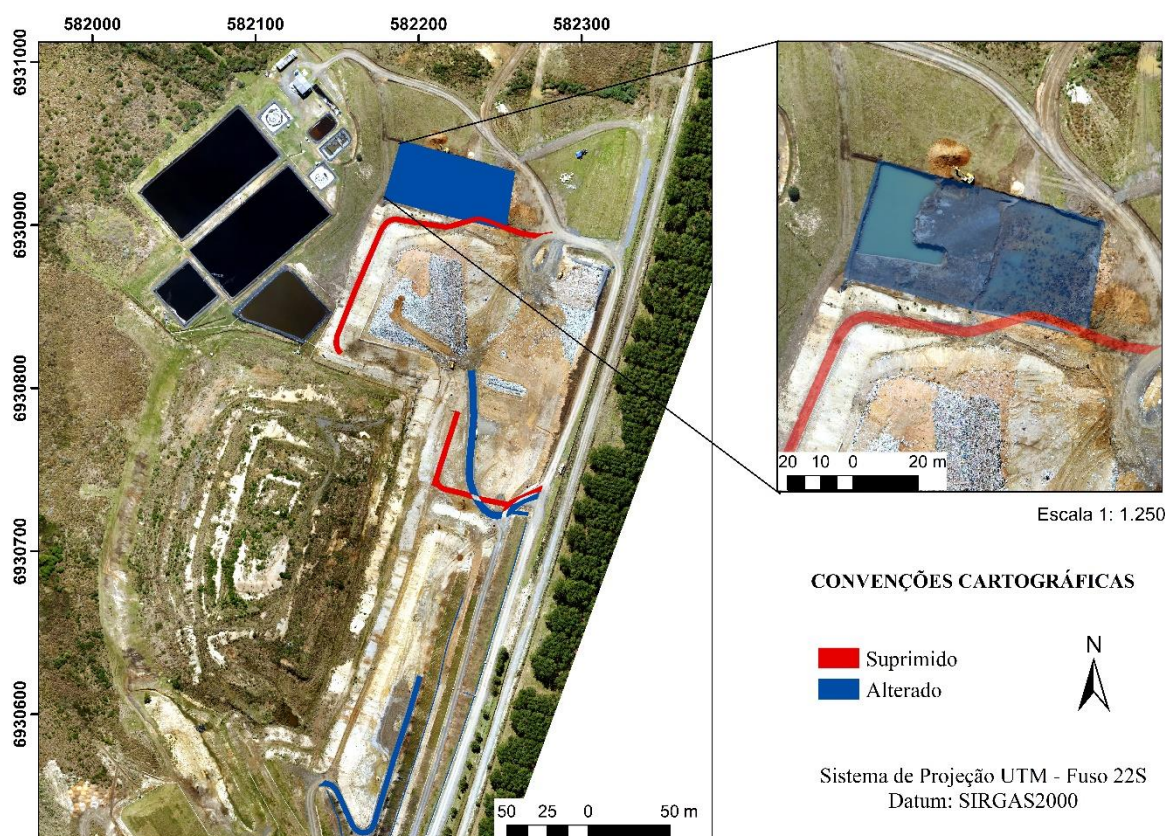


Figura 12 – Mudanças no uso da terra entre os dois primeiros levantamentos.  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No período de 05/09/2018 a 13/02/2019, ocorreu a expansão da nova célula e ampliação de uma das lagoas da ETE, além da supressão e acréscimo de algumas estradas (Figura 13). Houve um aumento de 2.459 m<sup>2</sup>, referente a expansão da nova célula e 260,80 m<sup>2</sup> da lagoa da ETE.



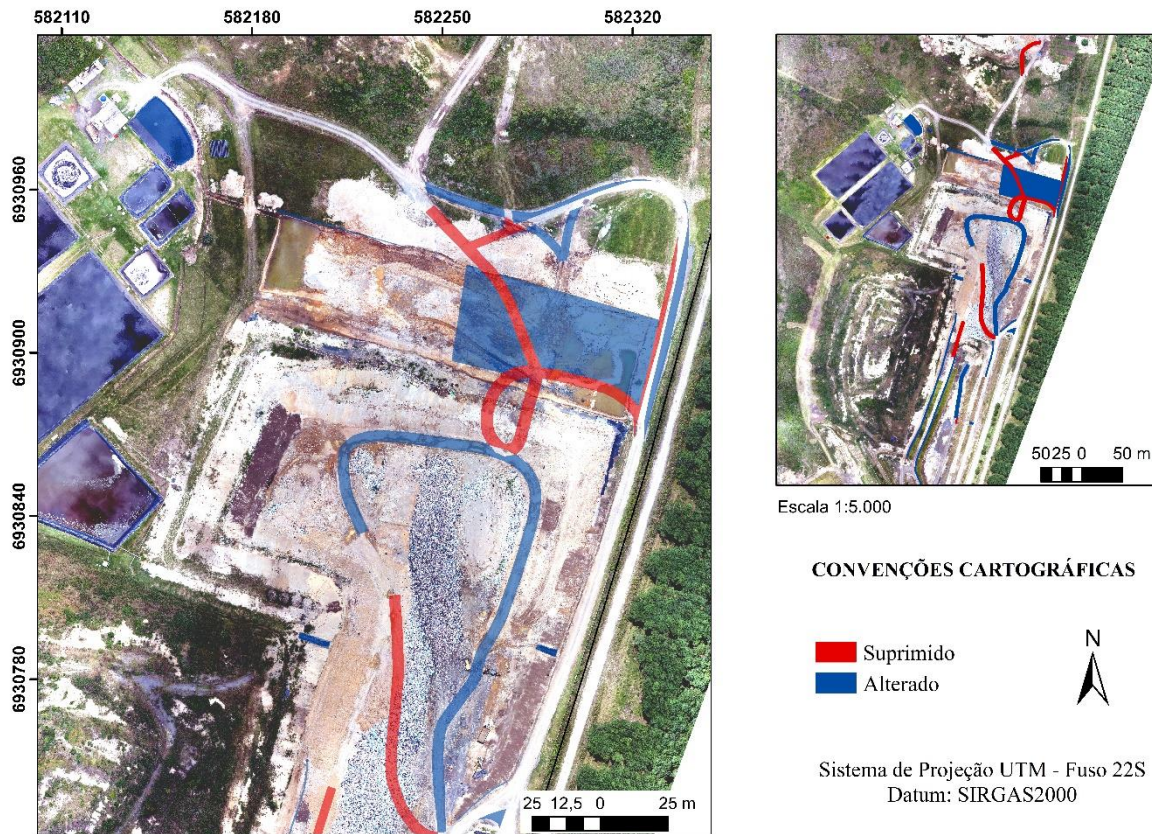


Figura 13 – Mudança no uso da terra entre os dois últimos levantamentos.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O ortomosaico permitiu detectar as principais mudanças no uso da terra e criar um memorial de obras executadas no aterro durante o período de estudo. Essas análises são importantes ferramentas de gestão e monitoramento para a equipe administrativa do aterro, uma vez que possibilitam avaliar e gerenciar as novas frentes de serviço, identificar problemas estruturais, realizar intervenções rápidas e delimitar rotas de fuga. Além disso, essa análise permite obter um registro das alterações tornando possível modelar as características típicas que ocorrem no aterro ao longo do tempo. Essa análise pode vir a substituir os métodos tradicionais de inspeção da superfície do terreno. Contudo, cada caso deve ser avaliado separadamente e as inspeções a campo não devem ser dispensadas até a validação da técnica.

#### 4.4 DECLIVIDADE

Os levantamentos realizados com RPA são rápidos e com grande qualidade espacial quando comparados a topografia convencional possibilitando o monitoramento da inclinação dos taludes. A partir da derivação do modelo digital do terreno foi gerada a declividade do terreno para cada levantamento realizado. Locais com maiores declives são mais favoráveis a

sofrer erosão que áreas planas, pois declives mais acentuados favorecem a concentração e aumento da velocidade do escoamento superficial (OLIVEIRA et al, 2018; COSTA, Y. T. e RODRIGUES, S.C, 2015). Locais com processos erosivos podem evidenciar instabilidades nos maciços.

Inclinações de taludes acima do recomendado pode comprometer a estabilidade dos maciços e gerar graves problemas no aterro. O levantamento do dia 05/05/2018 apontou a existência de quatro pontos com declividade acima de  $45^\circ$  (coloração vermelha) no maciço já desativado (Figura 14). Foi constatado que essa declividade é relacionada ao excesso de vegetação no local, o qual é fator de geração de erro de leitura em levantamentos periódicos, o que pode interferir nas análises de superfície.

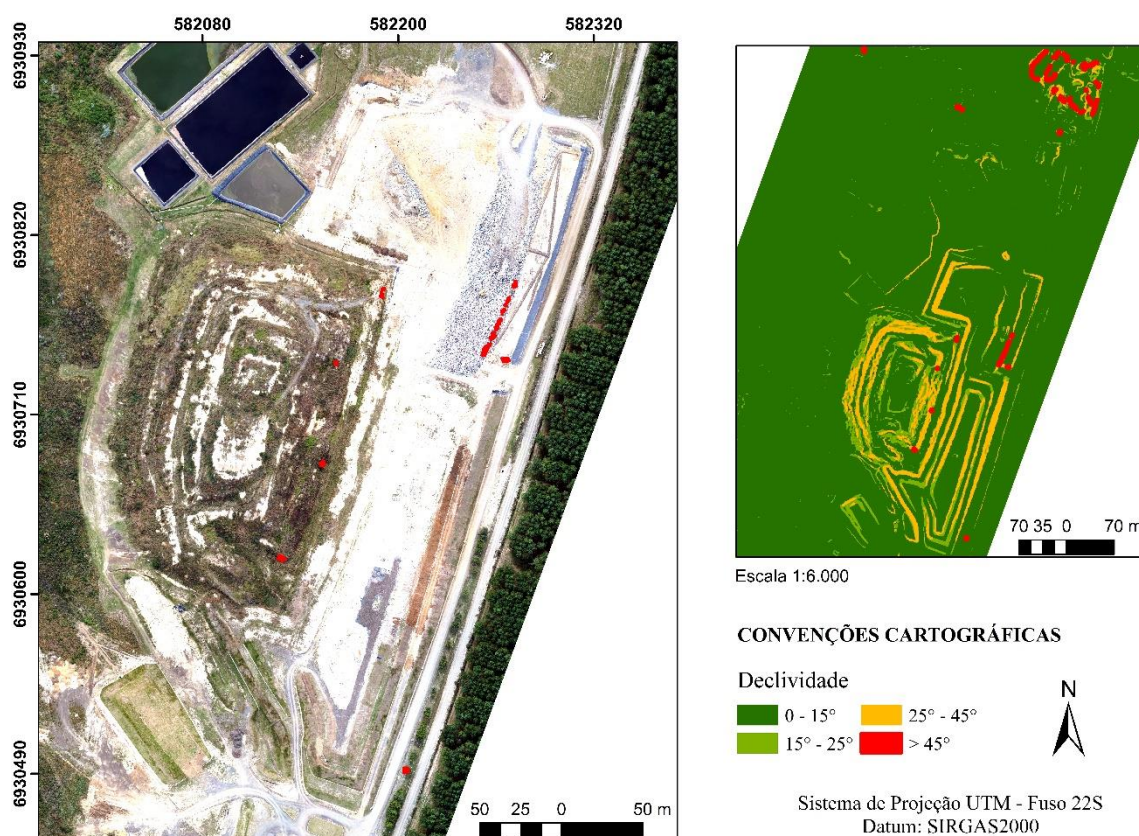


Figura 14 – Declividade do terreno no levantamento aéreo do dia 05/05/2018.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No maciço em operação foram constatados pontos acima de  $45^\circ$ , sendo esses referentes à pilha de resíduos expostos que ainda estava sendo manipulada. Os demais pontos estavam fora da área do maciço e eram referentes ao próprio relevo do terreno ou ao local de retirada de material para cobertura das células do maciço.



No levantamento do dia 05/09/2018 (Figura 15) não foram constatadas declividades acima do limite estabelecido pelo aterro, no maciço antigo e no maciço em operação. Os demais pontos, assim como no primeiro levantamento, situavam-se fora da área do maciço e no local de implantação da nova célula, onde estava ocorrendo escavação do terreno. Para a realização do segundo levantamento foi realizada a limpeza do terreno, com a finalidade de diminuir os erros na obtenção dos dados.

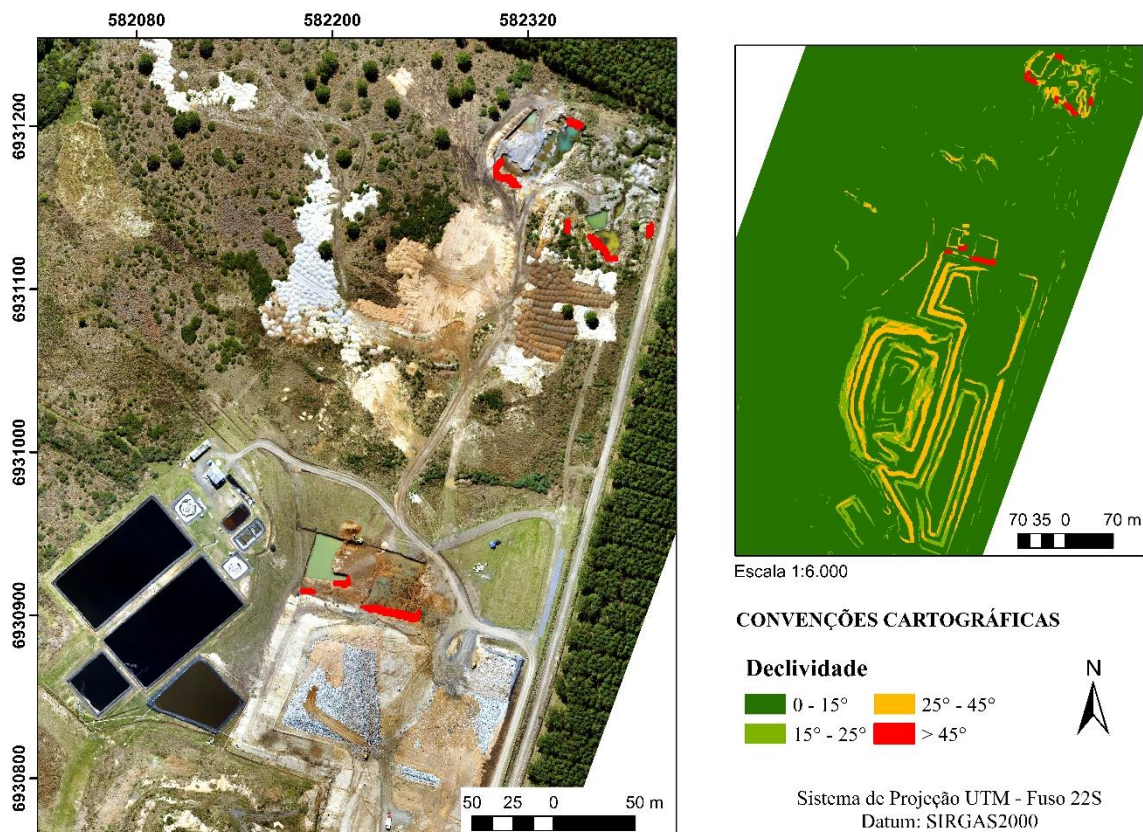


Figura 15 - Declividade do terreno no levantamento aéreo do dia 05/09/2018.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Na análise do dia 13/02/2019 (Figura 16), além dos pontos encontrados fora da área do maciço, houve a ocorrência de declividade acima do limite permitido no local de ampliação da nova célula, e em um ponto na camada de resíduos na célula em operação, os quais provavelmente seriam corrigidos ao longo da finalização dos trabalhos.

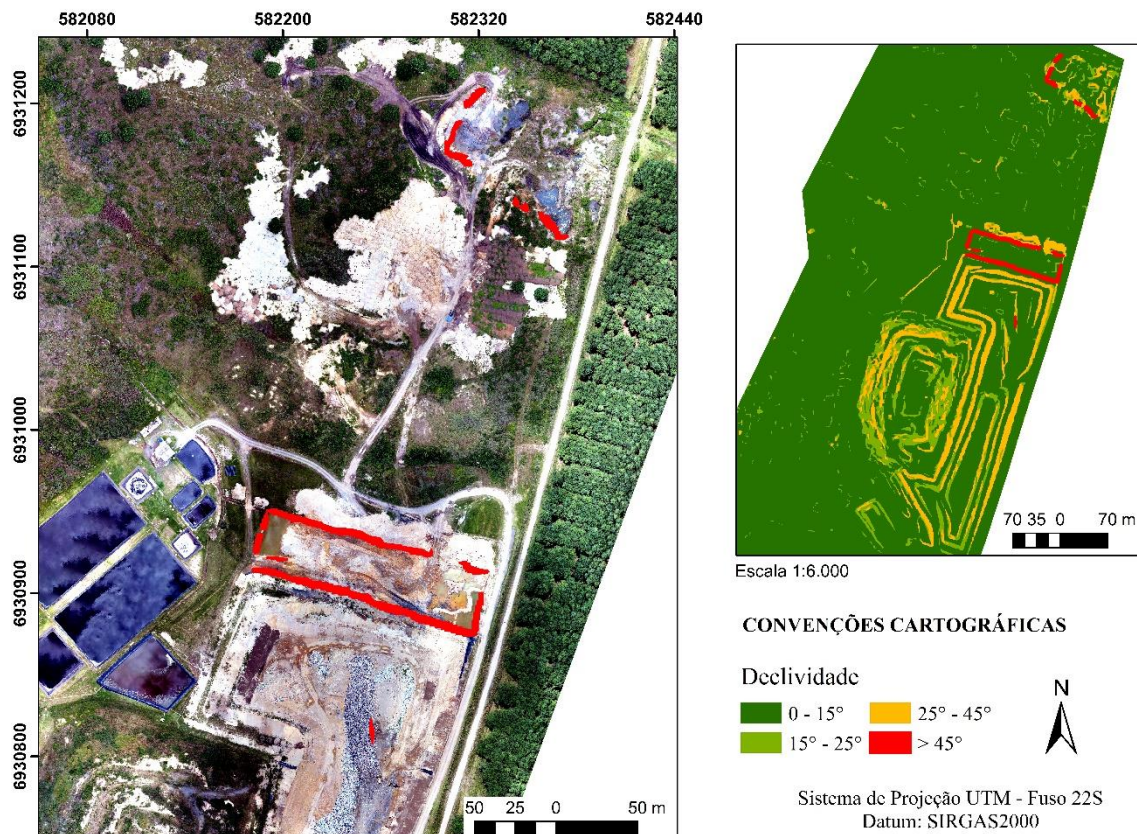


Figura 16 - Declividade do terreno no levantamento do dia 13/02/2019.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

De modo geral, os taludes observados apresentavam declividade dentro do padrão pré-estabelecido pelos gestores do aterro municipal de Lages, com inclinação de até 45° (em amarelo). Segundo Brito et. al (2016) locais com declividade acima do estabelecido (45°) têm maior predisposição a erosão e deslizamentos de material, pois apresentam alta energia potencial superficial. É de suma importância que os valores da declividade nos taludes do aterro não ultrapassem o valor estabelecido de 45°.

#### 4.5 ALTERAÇÃO DE COTA NOS MACIÇOS

O monitoramento do projeto de construção e da geometria do aterro é uma forma de garantir a segurança e maximizar o volume de resíduos que o maciço pode receber, tornando possível acompanhar a evolução dos taludes e identificar problemas. Os produtos gerados do RPA possibilitam obter uma malha densa de pontos tridimensionais e maior compreensão da área de estudo.

Com a diferença dos valores das cotas altimétricas (eixo Z) obtidas entre dois levantamentos aéreos foi possível analisar a movimentação vertical da superfície do terreno. O

gráfico da Figura 17 representa o deslocamento vertical dos 839 pontos amostrados dentro do grid de cotas gerado para os levantamentos do dia 05/05/2018 e 05/09/2018.

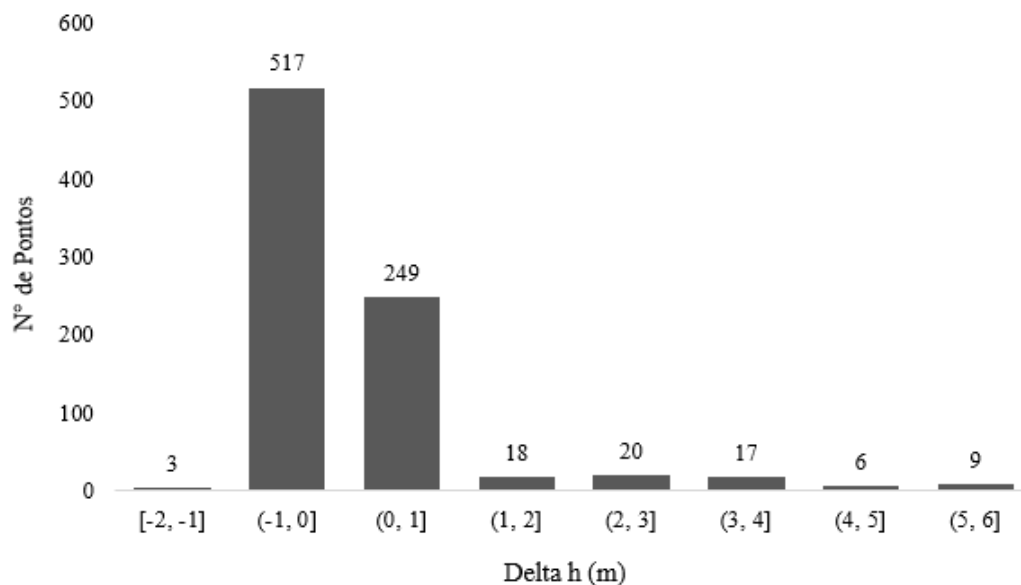


Figura 17 - Gráfico da distribuição de pontos em função do deslocamento (delta h).

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A amplitude de variação da malha de cotas no terreno foi estratificada em 10 classes no intervalo de - 1 m a + 1 m. Na Figura 18 é possível constatar que os pontos representados em tons de vermelho (redução no valor de cota entre os dois levantamentos) estão localizados predominantemente em áreas de maciços já finalizados. Já os pontos com coloração azul escuro representam aumento no valor das cotas maior que 1 m ( $> 1$ ), e estão localizados na área de descarte inicial dos materiais no maciço ainda em operação. Já os pontos com coloração azul claro representam aumento no valor das cotas maior que 1 m ( $> 1$ ), e estão localizados na área de descarte inicial dos materiais no maciço ainda em operação.

Em 66% da área amostrada, não foi diagnosticada diferença de cota, admitindo-se o intervalo mínimo igual a 1m. Do primeiro para o segundo levantamento foi realizado uma limpeza no terreno para evitar erros de processamento que pode ter ocasionado essa redução no valor das cotas sobre o maciço. Na Figura 19 pode-se observar as alterações nas cotas dos maciços que variaram em uma amplitude de -3 a 7 metros.



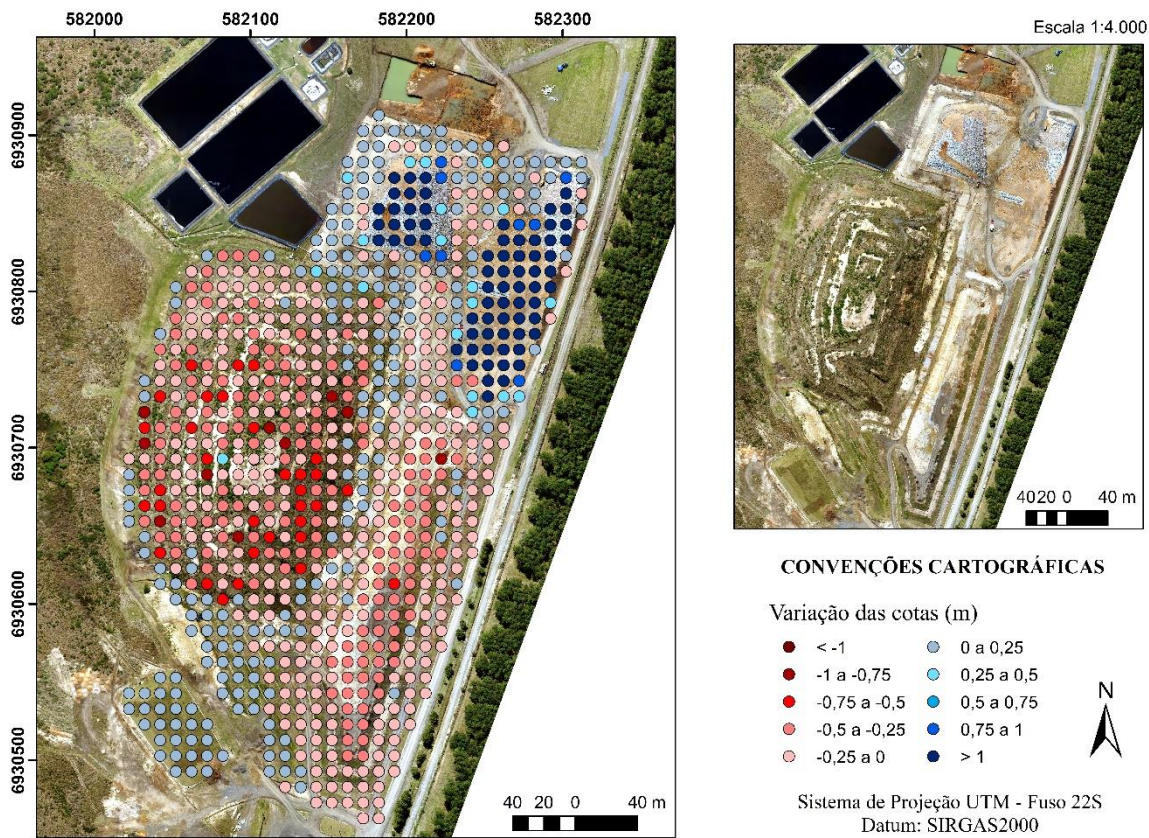


Figura 18 – Monitoramento de recalque entre os levantamentos do 05/05/2018 e 05/09/2018.  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

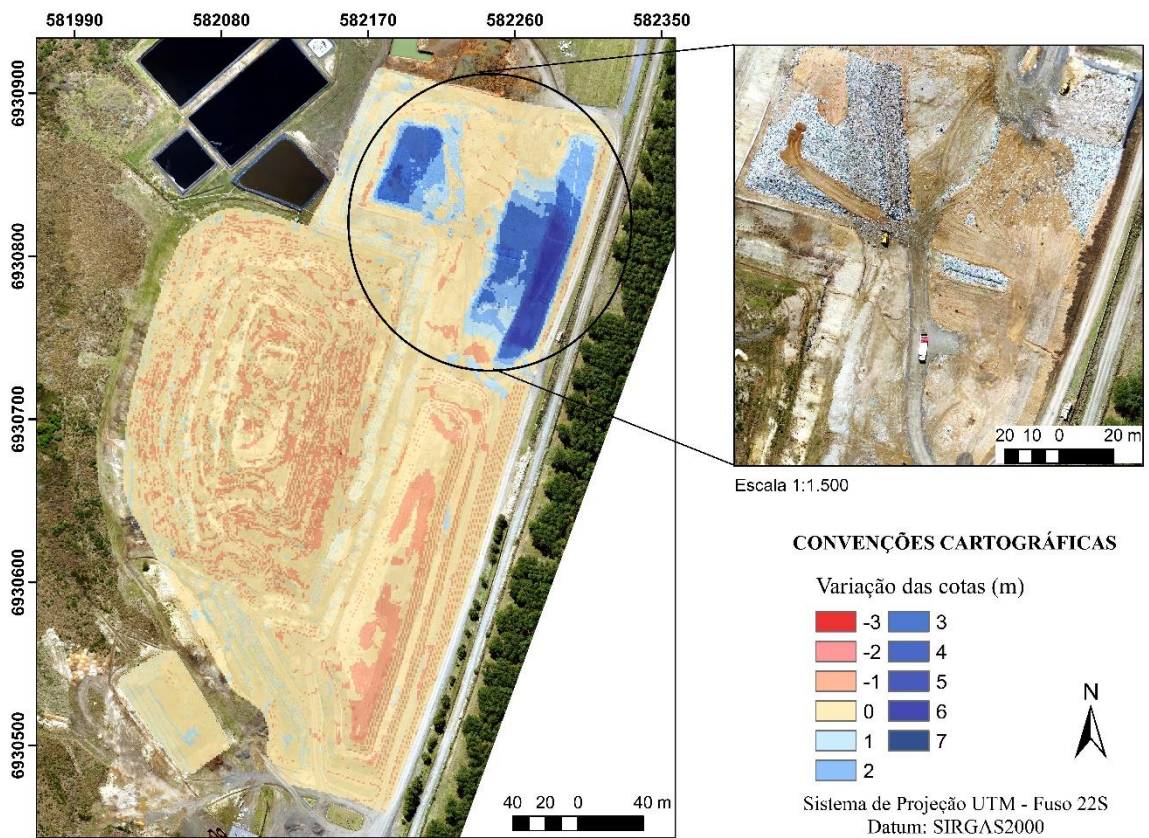


Figura 19 - Alterações nas cotas dos maciços entre 05/05/2018 e 05/09/2018.  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).



Já a análise da diferença de cotas entre os levantamentos do dia 05/09/2018 e 13/02/2019 aponta diversos pontos com coloração azuladas sobre o maciço desativado. Constatou-se que esse valor está relacionado principalmente ao crescimento da vegetação sobre o terreno. Do segundo para o terceiro levantamento não foi realizado nenhuma intervenção na vegetação sobre o maciço. Os demais pontos acima de 1 m estão localizados na área de aterramento dos resíduos na célula em execução (Figura 20).

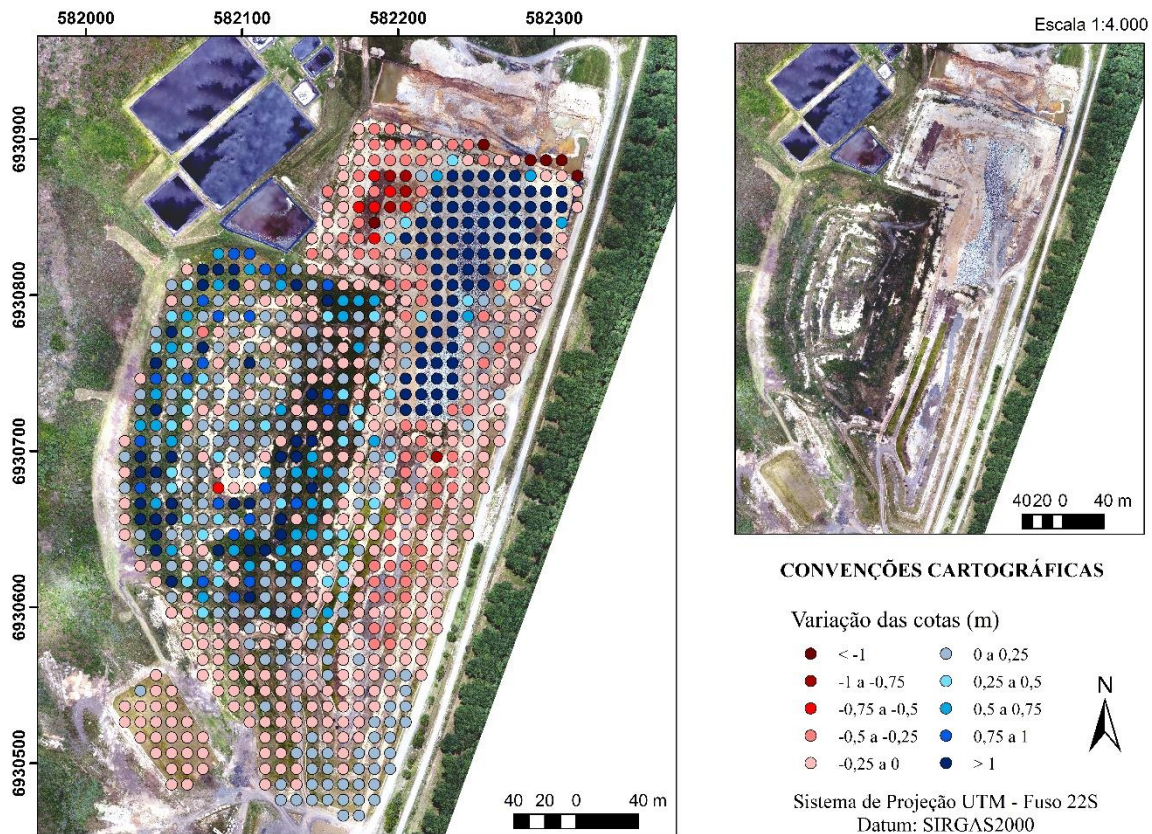


Figura 20- Monitoramento de recalque entre os levantamentos do dia 05/09/2018 e 13/02/2018.  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

As alterações ocorridas no intervalo de tempo analisado foram referentes, principalmente a cobertura e à movimentação dos resíduos sólidos, e crescimento excessivo da vegetação no maciço antigo. A variação da cota teve amplitude entre -5,06 m e 6,72 m. O gráfico da Figura 21 mostra a distribuição do deslocamento vertical de todos os 834 pontos amostrados dentro do grid de cotas.

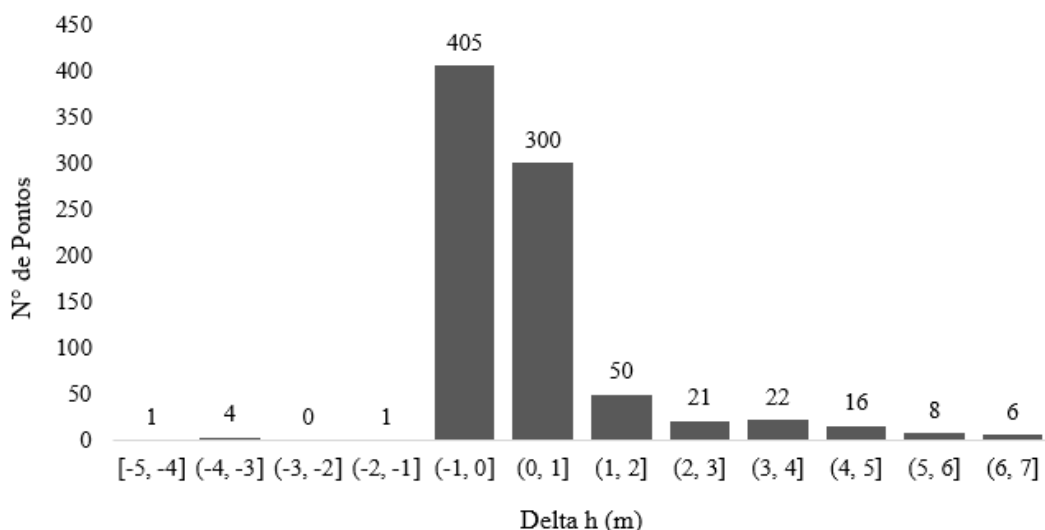


Figura 21 - Gráfico da distribuição dos pontos em função do deslocamento (delta h).  
 Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Analisando os dados pode-se observar que 423 pontos (50,71%) sofreram deslocamento vertical positivo, em que o valor de cota aumentou do primeiro para o segundo levantamento. Destes pontos, 300 (35,9%) estão compreendidos em um intervalo de 0 a 1m e relacionados principalmente a existência de vegetação sobre o maciço. Do total de pontos, 14,7% tiveram variação de cota superior a 1 m e estão relacionados ao processo de aterramento dos resíduos sólidos destinados ao aterro, à construção de novas estruturas e ao crescimento excessivo de vegetação na célula já finalizada do aterro sanitário.

O deslocamento vertical negativo foi observado em 411 pontos (49,29%), e está relacionado ao rebaixo do maciço, à existência de vegetação sobre os maciços e processos operacionais no aterro. Destes pontos, 405 (48,56% do total) estão compreendidos no intervalo de 0 a -1 m. A Figura 22 apresenta a localização desses pontos sobre o ortomosaico georreferenciado.



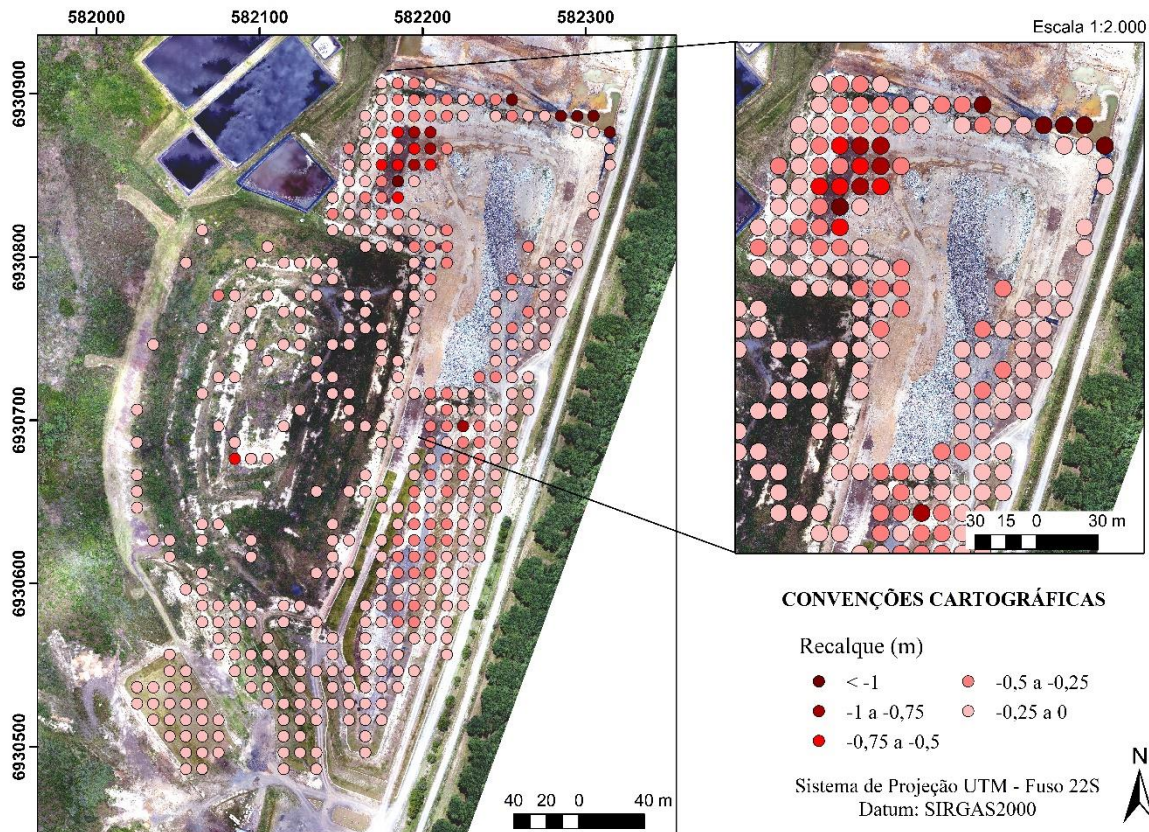


Figura 22 – Deslocamento vertical negativo entre o levantamento 2 e 3.

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Por meio da avaliação da redução volumétrica pode-se analisar o comportamento e das células de resíduos. A Figura 23 demonstra de forma geral os locais onde ocorreram a variação de cotas, com amplitude de até -5 m a 7 m. Todavia em 84,7% da área amostrada, não foi diagnosticada diferença de cota, admitindo-se o intervalo mínimo igual a 1m.

A variação de cota positiva sobre o maciço (azul claro) pode ser recorrente ao crescimento da vegetação. Foi possível observar que o MDT gerado por meio da classificação manual da nuvem de pontos não conseguiu eliminar a vegetação no local analisado. Desta forma, para o monitoramento dos maciços utilizando o RPA é recomendado a limpeza do terreno para melhor visualização e validação dos dados coletados, pois a vegetação interfere na delimitação dos valores das cotas.

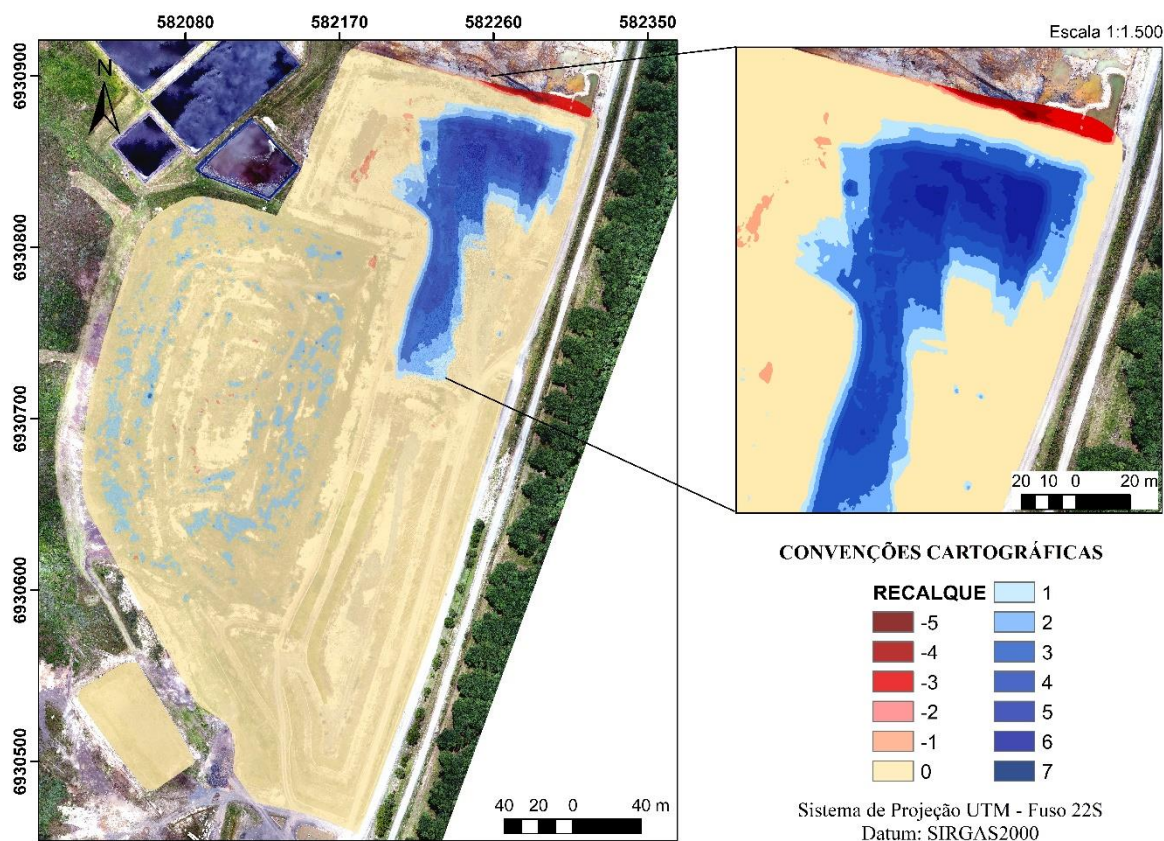


Figura 23 - Alterações nas cotas dos maciços entre o segundo e terceiro levantamento.

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Os resultados obtidos pelas 3 análises apontam que não houve recalques significativos nos maciços. As maiores diferenças nas cotas são referentes a locais de deposição imediata dos resíduos e escavação da nova célula. Pela existência de matéria orgânica e um ambiente anaeróbico há formação de biogás, lixiviados, reações bioquímicas e infiltrações de chuva (BENVENUTO, 2019). Por esse motivo, vale salientar que os dados de deslocamentos gerados por RPA são complementares aos demais instrumentos de análise que evidenciam o comportamento das massas de resíduos.

#### 4.6 VELOCIDADE DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Teixeira (2018) estudou os deslocamentos de um período de 5 anos e meio do Aterro Sanitário de Minas do Leão (RS) e verificou que as velocidades de deformação eram entre 0,35 e 0,7 cm.dia<sup>-1</sup> nos os meses iniciais do monitoramento. Esse valor tende a diminuir ao longo dos anos.

Seguindo os valores adotados por Kaimoto (2008) e pela norma brasileira NBR-11682, Estabilidade de Taludes (ABNT, 1991), determinou-se nesse estudo os limites para velocidades

com valores  $\pm 2$  cm/dia. As velocidades de deslocamento entre os levantamentos do dia 05/05/2018 e 05/09/2018 estão representados no gráfico da Figura 24. A taxa de recalque entre os dois levantamentos foi calculada para 123 dias e o maior valor encontrado foi de 4,92 cm/dia, em locais de deposição de novos resíduos. De forma geral, pode-se observar que os valores ficam abaixo do limite estabelecido ( $\pm 2$  cm/dia)

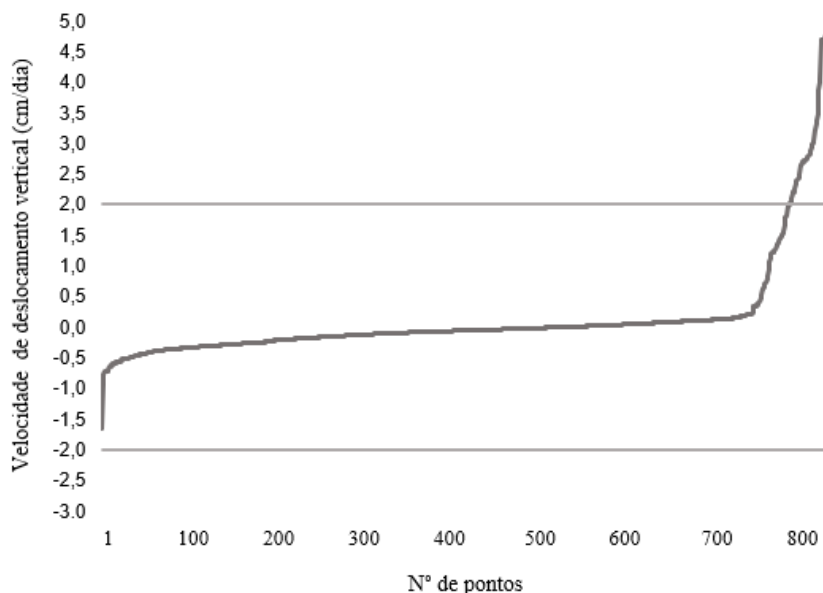


Figura 24 - Gráfico da distribuição dos pontos em função da velocidade de deslocamento vertical (cm/dia).  
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os locais com velocidades entre 2 cm/dia e 4 cm/dia (amarelo) necessitam de atenção e valores acima de 4 cm/dia (vermelho) representam alerta, segundo o critério estabelecido por Kimioto. Pode-se notar que esses pontos continuam sendo referentes as frentes de serviço, não evidenciando grandes recalques nos maciços. Os locais que apresentaram deslocamentos com velocidades superiores a  $\pm 2$  cm/dia estão localizados no maciço em operação e escavação da célula em construção ao lado, conforme Figura 25.



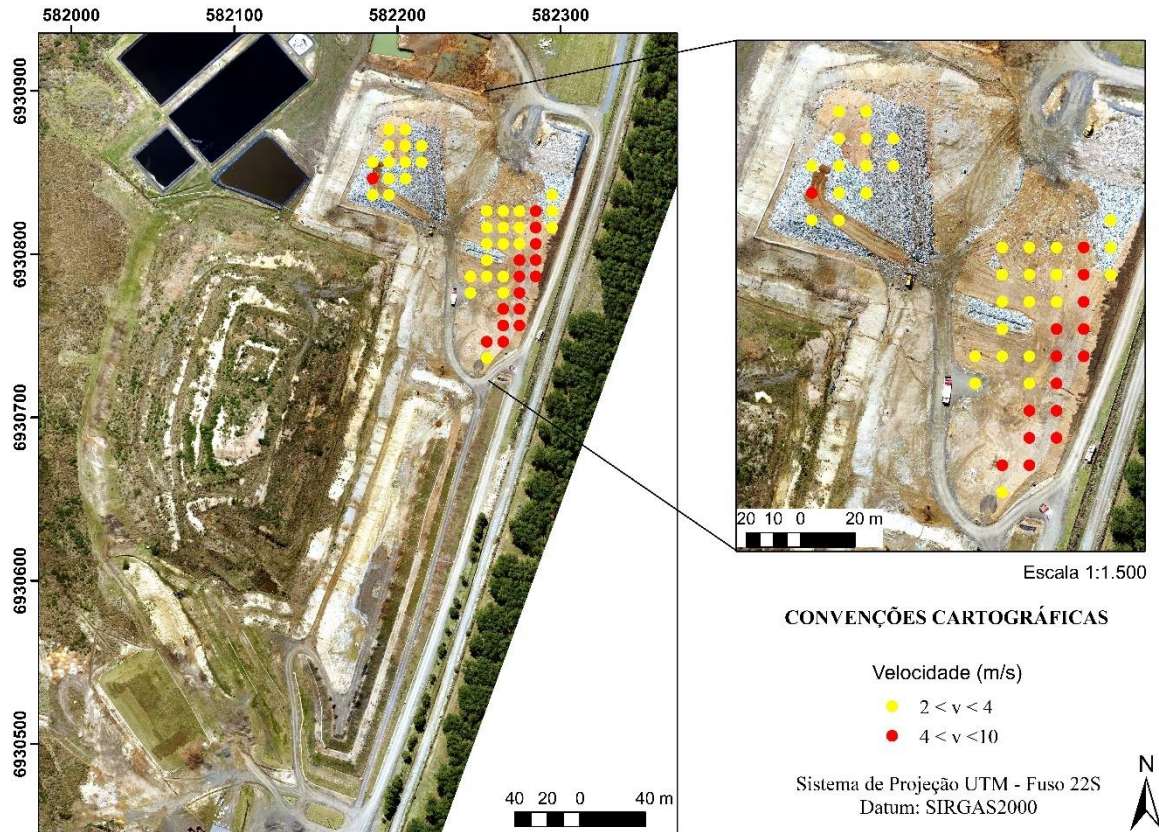


Figura 25 – Distribuição das velocidades dos recalques entre 05/05/2018 e 05/09/2018.  
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A velocidade de deslocamento entre os levantamentos do dia 05/09/2018 e 13/02/2019 (161 dias entre um levantamento e outro) estão representados no gráfico da Figura 26. O valor máximo de velocidade de deslocamento atingido foi de 4,17 cm/dia. As velocidades acima do limite estabelecido estão distribuídas conforme Figura 27.

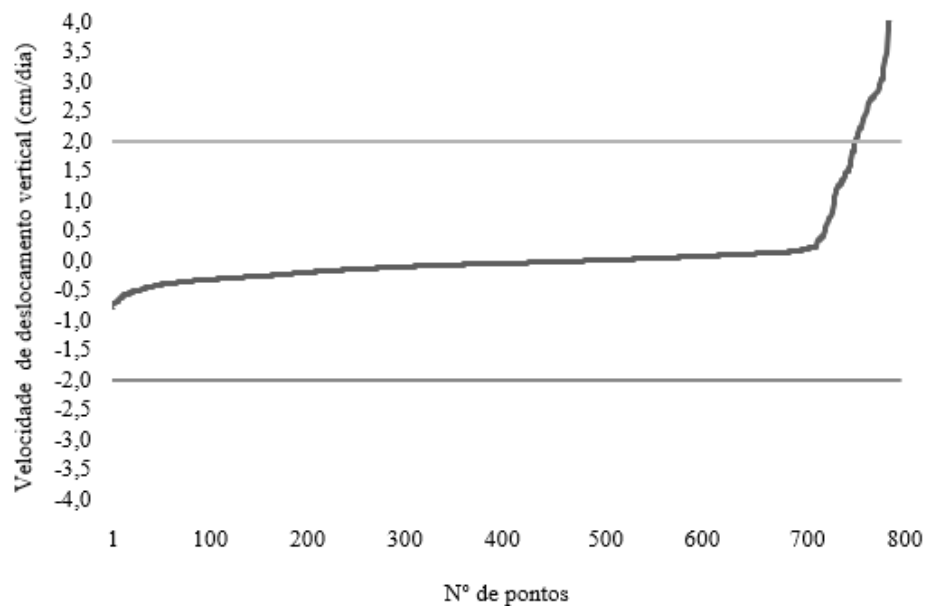


Figura 26 - Gráfico da distribuição dos pontos em função da velocidade de deslocamento vertical (cm/dia).  
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

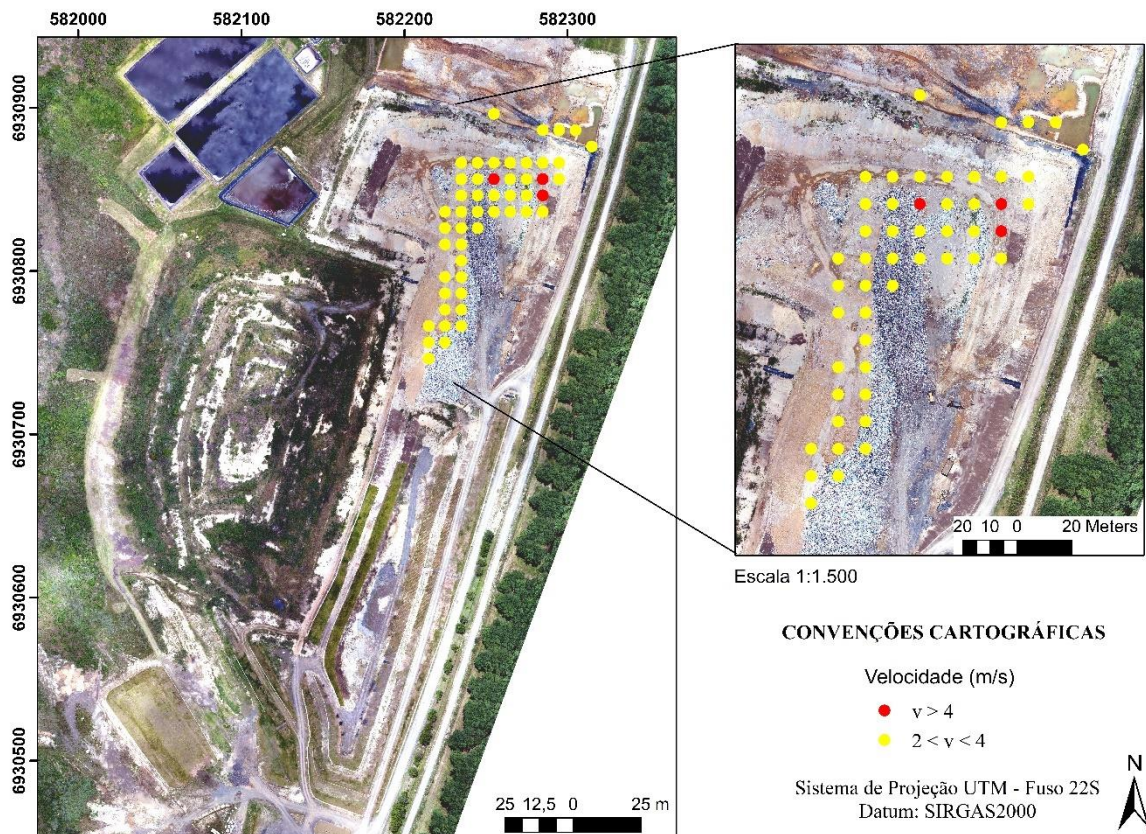


Figura 27 – Localização das velocidades dos recalques entre 05/09/2018 e 13/02/2019.

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Os resultados deste estudo evidenciam que em ambas as análises os valores acima do limite são justificados pela deposição diária dos resíduos na área e escavação para implantação da nova célula. Embora seja um trabalho preliminar, pode-se aferir que não houve deslocamentos significativos nos maciços já finalizados. Contudo, as conclusões a respeito de instabilidades não são realizadas exclusivamente por meio de dados topográficos. Neste sentido deve-se usar os dados coletados por RPA como complemento aos demais instrumentos de análise, como por exemplo, o piezômetro.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O monitoramento ambiental e gestão de riscos de desastres é essencial em aterros sanitários de resíduos sólidos. Os levantamentos realizados com RPA foram rápidos e com grande qualidade espacial quando comparados à topografia convencional, a qual necessita de mais horas a campo. As suas vantagens são principalmente em relação a velocidade, a capacidade de pesquisar sem ter que acessar o próprio local e a quantidade de informações por meio da fotointerpretação que pode ser armazenada.

Embora este equipamento tenha um elevado potencial de aplicação, não permite o monitoramento das condições internas do maciço, como por exemplo poro-pressão - medidos pelos piezômetros e essenciais em maciços instáveis - e nem a análise dos deslocamentos horizontais e suas velocidades. Desta forma, deve-se utilizar essa técnica juntamente com as demais metodologias de análise geotécnica para obter o objetivo de tornar a obra mais segura e previsível. Outra dificuldade encontrada foi referente aos locais com vegetação densa, recomenda-se que seja realizado a limpeza do terreno para a obtenção de dados mais próximos ao real.

O monitoramento permite identificar e quantificar os componentes do aterro por possuir alto grau de visibilidade, monitorar as incidências, a evolução da obra, declividades do terreno, pontos de erosão, ocorrência e velocidade de recalques. A análise de incidências permitiu identificar locais com excesso e ausência de vegetação e pontos de erosão no terreno. Locais com excesso de vegetação podem interferir na veracidade dos dados e locais com ausência podem sofrer processos de erosão do solo, por esse motivo recomenda-se a limpeza do terreno para as análises. Em relação aos recalques, os resultados mostraram que o aterro de Lages apresentou velocidade de recalque dentro dos limites estabelecidos no estudo. Houve valores de recalque elevados apenas nos locais temporários de disposição dos resíduos, não ultrapassando os níveis sugeridos. Sendo assim, não é necessário intervir nas atividades do aterro.

O RPA serve como suporte ao monitoramento de aterros sanitários, podendo ser utilizado como complemento às análises por gestores para contribuir no planejamento e no processo de tomada de decisões. Acredita-se que o estudo e a aplicação dessas aeronaves no monitoramento de aterros sanitários se desenvolvam nos próximos anos aprimorando as técnicas de análise do comportamento do maciço. A análise dos dados históricos do RPA, se validado, pode permitir a previsão da ocorrência de desastres no aterro. A continuidade do

monitoramento do aterro de Lages possibilitará conclusões substanciais sobre o comportamento dos maciços a longo prazo.

Os dados podem ser analisados por meio de testes estatísticos de tendência e precisão e classificados conforme PEC-PCD. Recomenda-se para estudos futuros que os produtos gerados pelo RPA sejam avaliados e validados para o padrão PEC-PCD. Essa análise não se aplicou a esse trabalho, pois todos os pontos coletados a campo foram utilizados para o alinhamento das imagens. Deve-se deixar pontos de *check* para realizar as análises estatísticas. Sugere-se, ainda estimar as perdas de solo nesses aterros por meio do uso da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) para avaliar a suscetibilidade de um solo em sofrer erosão. A erodibilidade do solo (fator K) não é definido para aterros sanitários e pode ser determinada por meio de experimentos em campo ao longo do tempo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Rio de Janeiro, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **ANAC: Regras da ANAC para uso de drones entram em vigor**. 2018. Disponível em: <[http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release\\_drone.pdf](http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf)>. Acesso em 11 de set. 2019.

ANDRADES, S. A. **Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta**. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ASSAD, E.D.; SANO, E.E. **Sistemas de informações geográficas (Aplicações na Agricultura)**. 2.ed. Brasília: SPI/EMBRAPA-CPAC, 1998. 434 p.

BENVENUTO, C. et al. Instrumentação Geotécnica e Monitoramento da Estabilidade de Aterros Sanitários. **Revista Limpeza Pública**, edição 101, p. 21-31. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2019.

BENVENUTO, C. Monitoramento geotécnico e a estabilidade dos aterros sanitários. **Revista Limpeza Pública**, São Paulo, Edição 77, n. 2, p.28-45. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2011.

BORSATO, M. V. N. Vantagens da aerofotogrametria por drone na obtenção de dados topográficos em estudos de lixões e aterros sanitários. In: **VII SINGEP – São Paulo – SP – Brasil**, 2018.

BRASIL. Lei nº 12.305/2012. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA/SRHU. 104 p.

BRITO, M. M. et al. Análise dos Fatores Condicionantes de Movimentos de Massa. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.9, n.68, p. 1853-1872, 2016.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008. v. 1. 248p.

CAMPITELI, M. **Aprenda a gerar curva de nível perfeita**. 2016. Disponível em: <<http://blog.droneng.com.br/geracao-das-curvas-de-nivel-atraves-da-malha-de-triangulos/>>. Acesso em: 8 abri. 2020.



CÂNDIDO, A. K. A. A.; SILVA, N. M.; PARANHOS FILHO, A. C. 2016. Imagens de Alta Resolução Espacial de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) no Planejamento do Uso e Ocupação do Solo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.38, n.1, p.147-156, 2016.

CHAIDAS K. et al. The use of UAS for 3D mapping of Municipal Landfill. **11th International Congress of the Hellenic Geographical Society**, Lavrion, Greece, 2018.

COSTA, Y. T.; RODRIGUES, S. C. Relação entre cobertura vegetal e erosão em parcelas representativas de cerrado. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.9, n.2, 2015.

DENARDIN, G. P. **Estudo de recalques dos aterros sanitários da Central de Resíduos de Recreio – Minas do Leão/RS**. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

DRONENG. **Acurácia e precisão no mapeamento aéreo. Artigo Revista DroneShow News**. 2019. Disponível em: <<https://pt.calameo.com/read/0006468840b9b9458fe1a?page=13>>. Acesso em: 05 abr. 2020.

DRONENG. **E-book Case Mapeamento Aéreo Urbano Multirotor e Asa Fixa**. 2018. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/50295061/e-book-case-mapeamento-aereo-urbano-multirotor-e-asa-fixa>>. Acesso em: 25 mai. 2020.

ELK, A. G. P. V.; CORREA, L. R.; RITTER, E. Análise de recalques em longo prazo no vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. **Eng. Sanit. Ambient**, v.24, n.3, p.547-557, 2019.

JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **São Carlos: EMBRAPA**, p.109-134, 2014. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114264/1/CAP-8.pdf>>. Acesso em: 10 de ago. 2019.

FARIAS, R. M. de S. **Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem estatística e experimental**. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: **1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis – Brasil**, Tomo II, 1994, p.41-48.

GASPERINI, D. et al. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills. **Int. J. Environmental Technology and Management**, v.17, n.1, 2014.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. Deformability of waste and settlements of sanitary landfills. In: **Iswa World Congress on Waste Management**. 1995.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters. In: **International Congress on Environmental Geotechnics**, 2., Osaka, v. 2, p. 641-646, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

KAIMOTO, L. S. A. **Curso de treinamento sobre Aterros Sanitários – Monitoramento geotécnico e ambiental de Aterros**. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2009.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 2. Ed. New York: J. Wiley, 1987, 850p.

LING, H. I. et al. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v.124, p.21-28, 1998.

LONHITANO, G. A. **VANTs para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LONGLEY, P. A.; et. al. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. Porto Alegre: Bookman, 3 ed. 540 p. 2013.

LUZ C. C; ANTUNES, A.F.B.; RATTON, P. Aplicabilidade da tecnologia VANT na atualização de bases de dados cartográficos - Estudo de caso: sistema cárstico do rio João Rodrigues. **Boletim Paranaense de Geociências**, v.73, n.1, p.34 – 45, 2017.

MELO, R. R. S. **Diretrizes para inspeção de segurança em canteiros de obra por meio de imageamento com veículo aéreo não tripulado (VANT)**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia - UFBA, Salvador, 2016.

MELLO, C. Uso de VANT como ferramenta auxiliar na gestão integrada de aterros sanitários. In: **IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade**, 2017.

NETO, C. L. **A análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários**. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2016.

OLIVEIRA F. F. et al. Processos erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes. **Rev. Bras. de Iniciação Científica (RBIC)**, v. 5, n.3, p. 60-83, 2018.

ROSSI, G. et al. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. **Landslides**, v.15, p. 1045–1052, 2018.

SANTA CATARINA. **Elaboração do Plano Estadual de Santa Catarina: Panorama dos Resíduos Sólidos no Estado**, v. 1. Florianópolis, 2017.

SANTA CATARINA. **Plano estadual de resíduos sólidos de Santa Catarina: contrato administrativo n. 012/2016**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável, Diretoria de Saneamento e Meio Ambiente. Florianópolis: SDS, 2018.

SERRA, L. A. O. **O potencial dos UAV para atualização de cartografia municipal**. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

SILVA, F. H. R. **Aplicação de modelos numéricos para estimativa de recalques de uma célula do Aterro Sanitário de Belo Horizonte**. 105p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2010.

SILVA, A. C; et al. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LIDAR. **Boletim de Ciência Geodésicas**, v.22, n. 1, 2016.

SILVA, D. F. S. **Avaliação do alcance de deslizamentos em função da geometria da encosta**. 193p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2017.

SHIMAZAKI, L. R. **Análise de estabilidade de aterros sanitários de resíduos sólidos antigos**. 113 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SILVEIRA, C. S.; SILVA, V. V. Dinâmicas de regeneração, degeneração e desmatamento da vegetação provocadas por fatores climáticos e geomorfológicos: uma análise geoecológica através de SIG. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p.1025-1034, 2010.

SOWERS, G.F. **Foundation problems in sanitary landfills**. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 94, n. 1, p. 103-115, 1968.

TEIXEIRA, M. C. **Previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários/ estudo de caso: Central de Resíduos de Recreio – Minas do Leão/RS e São Leopoldo/ RS**. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TUCCI, G. et al. Monitoring and Computation of the Volumes of Stockpiles of Bulk Material by Means of UAV Photogrammetric Surveying. **Remote Sensing**, v. 11, 2019.

## APÊNDICE A

- Coordenadas dos pontos de controle e localização de referência.

Ponto	Coordenadas (m)			Localização
	N	E	Z	
1	6931191,264	582385,133	875,442	Canto superior direito do perímetro sob um morro de pedras
2	6931021,525	582131,879	877,014	Entrada da ETE. Lado direito da cerca
3	6931217,201	582120,934	878,054	Morro no canto superior esquerdo do perímetro
4	6930920,603	582025,166	878,743	Entre a Lagoa de tratamento e a cerca da ETE
5	6930963,095	582350,339	880,503	Cerca da lateral direita do aterro
6	6930406,627	581962,384	890,495	Próximo ao galpão
7	6930449,115	581783,723	876,846	Canto esquerdo inferior do perímetro.
8	6930246,957	582113,124	898,778	Cerca do canto inferior direito do perímetro.
9	6930758,272	582054,568	887,075	No talude da célula desativada.
10	6930736,085	581997,374	878605	Ponto de monitoramento 03
11	6930593,894	582024,800	884086	Ponto de monitoramento 02
12	6930574,528	582153,638	897,657	Estrada do início do maciço pequeno
13	6930688,195	582112,069	903,813	Sob o maciço desativado
14	6930665,777	582261,201	886,972	Entre a célula em execução e a cerca na lateral direita do aterro
15	6930572,366	582155,248	898,657	Estrada do início do maciço pequeno, próximo ao PC12

- Diferença de posição entre os pontos de controle

DIFERENÇA DE POSIÇÃO ENTRE OS PONTOS DE CONTROLE												
LEVANTAMENTO 05/05/2018				LEVANTAMENTO 05/09/2018				DIFERENÇAS				
PONTO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	ALTITUDE (m)	PONTO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	ALTITUDE (m)	DX (cm)	DY (cm)	DZ (cm)	DXY (cm)	DXYZ (cm)
BASE	6930396,48	582134,929	894,72	BASE	6930396,48	582134,929	894,72	0,00	0	0	0,00	0,00
PC01	6931191,264	582385,133	875,442	PC01	6931191,27	582385,133	875,419	-0,60	0	2,3	0,60	2,38
PC02	6931021,525	582131,879	877,014	PC02	6931021,528	582131,887	876,982	-0,30	-0,8	3,2	0,85	3,31
PC03	6931217,201	582120,934	878,054	PC03	6931217,207	582120,934	878,043	-0,60	0	1,1	0,60	1,25
PC04	6930920,603	582025,166	878,743	PC04	6930920,594	582025,161	878,724	0,90	0,5	1,9	1,03	2,16
PC05	6930963,095	582350,339	880,503	PC05	6930963,093	582350,339	880,507	0,20	0	-0,4	0,20	0,45
PC06	6930406,627	581962,384	890,495	PC06	6930406,671	581962,364	890,487	-4,40	2	0,8	4,83	4,90
PC07	6930449,115	581783,723	876,846	PC07	6930449,129	581783,723	876,817	-1,40	0	2,9	1,40	3,22
PC08	6930246,957	582113,124	898,778	PC08	6930246,952	582113,124	898,764	0,50	0	1,4	0,50	1,49
PC09	6930758,272	582054,568	887,075	PC09	6930758,254	582054,57	887,065	1,80	-0,2	1	1,81	2,07
PC10	6930736,085	581997,374	878,605	PC10	6930736,083	581997,368	878,61	0,20	0,6	-0,5	0,63	0,81
PC11	6930593,894	582024,8	884,086	PC11	6930593,902	582024,786	884,08	-0,80	1,4	0,6	1,61	1,72
PC12	6930574,528	582153,638	897,657	PC12	6930574,529	582153,638	897,532	-0,10	0	12,5	0,10	12,50
PC13	6930688,195	582112,069	903,813	PC13	6930688,193	582112,056	903,747	0,20	1,3	6,6	1,32	6,73
PC14	6930665,777	582261,201	886,972	PC14	6930665,787	582261,215	886,91	-1,00	-1,4	6,2	1,72	6,43

DIFERENÇA DE POSIÇÃO ENTRE OS PONTOS DE CONTROLE												
LEVANTAMENTO 05/09/2018				LEVANTAMENTO 13/02/2019				DIFERENÇAS				
PONTO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	Altitude (m)	PONTO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	Altitude (m)	DX (cm)	DY (cm)	DZ (cm)	DXY (cm)	DXYZ (cm)
BASE	6930396,48	582134,929	894,72	BASE	6930396,48	582134,929	894,72	0,00	0	0	0,00	0,00
PC01	6931191,27	582385,133	875,419	PC01	6931191,282	582385,095	875,412	-1,20	3,8	0,7	3,98	4,05
PC02	6931021,528	582131,887	876,982	PC02	6931021,536	582131,893	876,994	-0,80	-0,6	-1,2	1,00	1,56
PC03	6931217,207	582120,934	878,043	PC03	6931217,197	582120,922	878,032	1,00	1,2	1,1	1,56	1,91
PC04	6930920,594	582025,161	878,724	PC04	6930920,587	582025,178	878,717	0,70	-1,7	0,7	1,84	1,97
PC05	6930963,093	582350,339	880,507	PC05	6930963,095	582350,343	880,478	-0,20	-0,4	2,9	0,45	2,93
PC06	6930406,671	581962,364	890,487	PC06	6930406,611	581962,389	890,488	6,00	-2,5	-0,1	6,50	6,50
PC07	6930449,129	581783,723	876,817	PC07	6930449,137	581783,717	876,815	-0,80	0,6	0,2	1,00	1,02
PC08	6930246,952	582113,124	898,764	PC08	6930246,956	582113,127	898,769	-0,40	-0,3	-0,5	0,50	0,71
PC09	6930758,254	582054,57	887,065	PC09	6930758,296	582054,567	887,037	-4,20	0,3	2,8	4,21	5,06
PC10	6930736,083	581997,368	878,61	PC10	6930736,069	581997,358	878,591	1,40	1	1,9	1,72	2,56
PC11	6930593,902	582024,786	884,08	PC11	6930593,882	582024,783	884,062	2,00	0,3	1,8	2,02	2,71
PC12	6930574,529	582153,638	897,532	PC12 <sup>1</sup>	6930572,366	582155,248	898,657	216,30	-161	-112,5	269,64	292,17
PC13	6930688,193	582112,056	903,747	PC13	6930688,21	582112,056	903,708	-1,70	0	3,9	1,70	4,25
PC14	6930665,787	582261,215	886,91	PC14	6930665,787	582261,207	886,904	0,00	0,8	0,6	0,80	1,00

<sup>1</sup> O marco implantado sobre o ponto de controle PC 12 necessitou ser retirado pela operação do aterro devido a obras de drenagem, sendo substituído pelo PC15.

DIFERENÇA DE POSIÇÃO ENTRE OS PONTOS DE CONTROLE												
LEVANTAMENTO 05/05/2018				LEVANTAMENTO 13/02/2019				DIFERENÇAS				
PONTO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	Altitude (m)	PONTO	COORDENADA N (m)	COORDENADA E (m)	Altitude (m)	DX (cm)	DY (cm)	DZ (cm)	DXY (cm)	DXYZ (cm)
BASE	6930396,48	582134,929	894,72	BASE	6930396,48	582134,929	894,72	0,00	0	0	0,00	0,00
PC01	6931191,264	582385,133	875,442	PC01	6931191,282	582385,095	875,412	-1,80	3,8	3	4,20	5,17
PC02	6931021,525	582131,879	877,014	PC02	6931021,536	582131,893	876,994	-1,10	-1,4	2	1,78	2,68
PC03	6931217,201	582120,934	878,054	PC03	6931217,197	582120,922	878,032	0,40	1,2	2,2	1,26	2,54
PC04	6930920,603	582025,166	878,743	PC04	6930920,587	582025,178	878,717	1,60	-1,2	2,6	2,00	3,28
PC05	6930963,095	582350,339	880,503	PC05	6930963,095	582350,343	880,478	0,00	-0,4	2,5	0,40	2,53
PC06	6930406,627	581962,384	890,495	PC06	6930406,611	581962,389	890,488	1,60	-0,5	0,7	1,68	1,82
PC07	6930449,115	581783,723	876,846	PC07	6930449,137	581783,717	876,815	-2,20	0,6	3,1	2,28	3,85
PC08	6930246,957	582113,124	898,778	PC08	6930246,956	582113,127	898,769	0,10	-0,3	0,9	0,32	0,95
PC09	6930758,272	582054,568	887,075	PC09	6930758,296	582054,567	887,037	-2,40	0,1	3,8	2,40	4,50
PC10	6930736,085	581997,374	878,605	PC10	6930736,069	581997,358	878,591	1,60	1,6	1,4	2,26	2,66
PC11	6930593,894	582024,8	884,086	PC11	6930593,882	582024,783	884,062	1,20	1,7	2,4	2,08	3,18
PC12	6930574,528	582153,638	897,657	PC12 <sup>1</sup>	6930572,366	582155,248	898,657	216,20	-161	-100	269,56	287,51
PC13	6930688,195	582112,069	903,813	PC13	6930688,21	582112,056	903,708	-1,50	1,3	10,5	1,98	10,69
PC14	6930665,777	582261,201	886,972	PC14	6930665,787	582261,207	886,904	-1,00	-0,6	6,8	1,17	6,90

<sup>1</sup> O marco implantado sobre o ponto de controle PC 12 necessitou ser retirado pela operação do aterro devido a obras de drenagem, sendo substituído pelo PC15.