

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

FABRÍCIO GALHARDO MÜLLER

RECUPERAÇÃO DA INTENSIDADE DE RETORNO DE LASER SCANNERS QUE  
UTILIZAM A TÉCNICA LIDAR NAS OCORRÊNCIAS DE EFEITO DE BORDA

SÃO LEOPOLDO  
2014



Fabício Galhardo Müller

RECUPERAÇÃO DA INTENSIDADE DE RETORNO DE LASER SCANNERS QUE  
UTILIZAM A TÉCNICA LIDAR NAS OCORRÊNCIAS DE EFEITO DE BORDA

Dissertação apresentada como requisito  
parcial para a obtenção do título de Mestre  
pelo Programa de Pós-Graduação em  
Computação Aplicada da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos — UNISINOS

Orientador:

Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Junior

São Leopoldo  
2014

M958r

Müller, Fabrício Galhardo.

Recuperação da intensidade de retorno de laser scanners que utilizam a técnica LIDAR nas ocorrências de efeito de borda / Fabrício Galhardo Müller. – 2014.

80 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2014.

"Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Junior."

1. Lasers – Aplicações científicas. 2. Sensoriamento remoto. 3. Efeito de borda. 4. LIDAR. 5. Nuvem de pontos. 6. Recuperação de intensidade. I. Título.

CDU 004

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

(Esta folha serve somente para guardar o lugar da verdadeira folha de aprovação, que é obtida após a defesa do trabalho. Este item é obrigatório, exceto no caso de TCCs.)



Àqueles que acreditam...

*O Milagre da Vida*

*Pode ser que um dia deixemos de nos falar...*

*Mas, enquanto houver amizade,*

*Faremos as pazes de novo.*

*Pode ser que um dia o tempo passe...*

*Mas, se a amizade permanecer,*

*Um de outro se há-de lembrar.*

*Pode ser que um dia nos afastemos...*

*Mas, se formos amigos de verdade,*

*A amizade nos reaproximará.*

*Pode ser que um dia não mais existamos...*

*Mas, se ainda sobrar amizade,*

*Nasceremos de novo, um para o outro.*

*Pode ser que um dia tudo acabe...*

*Mas, com a amizade construiremos tudo novamente,*

*Cada vez de forma diferente.*

*Sendo único e inesquecível cada momento*

*Que juntos viveremos e nos lembraremos para sempre.*

*Há duas formas para viver a sua vida:*

*Uma é acreditar que não existe milagre.*

*A outra é acreditar que todas as coisas são um milagre.*

— ALBERT EINSTEIN



## **AGRADECIMENTOS**

Meu interesse por melhorar minha qualificação técnica e científica vem dos tempos do final da minha graduação. Eu sempre quis fazer um mestrado e sempre tiveram pessoas que de uma forma ou outra acabaram por me incentivar ou participar ativamente, sendo, também, responsáveis por esta conquista. Portanto, gostaria de agradecer a todos que estiveram ao meu lado neste caminho: Muito obrigado!

Não posso deixar meu agradecimento especial àqueles que me ensinaram e me guiaram até aqui, especialmente: Luiz Gonzaga da Silveira Jr., João Ricardo Bittencourt, Luiz Paulo Luna de Oliveira, Marcelo Walter, Leandro Tonietto: Muito obrigado!

E, também, àqueles que trilharam todo o caminho ao meu lado, especialmente: Tania Maria Galhardo, Cláudio Mário Müller, Débora Schmidt, Róbson Gomes, Lucas Seewald, Leandro Motta Barros, Fábio Mierlo, Maurício Veronez, Leonardo Inocencio, Fabiane Bordin, Marcelo Kehl e, especialmente, Vanessa Viegas Viana: Muito obrigado!

Tão longe e tão perto, aos meu grandes amigos que, infelizmente, a distância não permite nos encontrarmos na mesma frequência de antigamente, mas que estão sempre do lado esquerdo do peito, Alberto Amaral Braga da Silva e Filipe Silvestrim: Muito obrigado pelo apoio e pela grande amizade que jamais se perderá!

Agradeço, também, à CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não seria feito.



*“Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez”.*  
(Jean Cocteau)



## RESUMO

Diversas áreas do conhecimento utilizam técnicas de coleta de dados espaciais com grande resolução e precisão. Em especial, a Geologia tem utilizado novos equipamentos para a automatização de levantamentos e mapeamentos geológicos. A coleta digital feita com lasers scanners terrestres registra não só posicionamento e cor, como também a intensidade de retorno do sinal emitido. Ao utilizar as informações de intensidade de retorno do laser, pode ocorrer o efeito de borda, que é quando o laser colide parcialmente com o alvo e parte do sinal é perdido ou, ainda, colide com outros objetos não desejados ao fundo. Esse efeito faz com que a intensidade de retorno seja uma intensidade incorreta, quando analisa-se a reflectância dos materiais que compõem o alvo escaneado. Para resolver este problema, um novo algoritmo foi desenvolvido utilizando os dados conhecidos do laser, como a posição e a divergência do sinal para recuperar a intensidade de retorno do pulso laser correta quando o efeito de borda é detectado nos dados coletados. Os resultados mostram que esta técnica é uma possível solução para recuperar a intensidade de retorno do pulso de acordo com a reflectância dos materiais que compõem o afloramento. Um estudo adicional é necessário para realizar a otimização do algoritmo e para realizar uma análise estatística das intensidades corrigidas.

**Palavras-chave:** Efeito de borda. Nuvem de pontos. Recuperação de intensidade. LIDAR.



## **ABSTRACT**

Several areas of knowledge use digital techniques to collect spacial data with higher resolution and precision. In special, Geology is using new equipments to automate geological surveys and mappings. The digital acquisition made with terrestrial laser scanners records not only the target's position and color, but also the return of the emitted signal's intensity. When using the laser's intensity return information, it may occur the edge effect, that is when the laser collides partially with the target and part of the signal is lost or, also, collides with other undesired objects in the background. This effect makes the laser's return intensity to be incorrect, when the reflectance of the materials that compose the target being analyzed. To solve this issue, a new algorithm was developed using the known data as the laser scanner's position and signal's divergence to recover the correct laser's intensity when an edge effect is detected in the collected data. The results show that this technique is a possible solution to recover the correct laser's return intensity according to the reflectance of the outcrop materials. Additional research is needed to optimize the algorithm and make a statistical analysis of the corrected laser intensity data.

**Keywords:** Edge effect. Point cloud. Intensity correction. LIDAR.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Princípio de funcionamento da técnica LIDAR . . . . .	31
Figura 2:	Princípios de medida da distância do laser com o alvo . . . . .	32
Figura 3:	Afloramentos geológicos, locais onde as rochas estão expostas na superfície do terreno . . . . .	33
Figura 4:	Afloramento Pedra Pintada, localizado no município de Caçapava do Sul, aproximadamente 330 km de Porto Alegre . . . . .	33
Figura 5:	Detalhe dos materiais que compõe o afloramento do Morro do Papaléo, localizado no município de Mariana Pimentel, aproximadamente 80 km de Porto Alegre . . . . .	34
Figura 6:	Exemplo de interpretação geológica de afloramentos . . . . .	36
Figura 7:	Laser Scanner Terrestre ILRIS 3D da Optech . . . . .	37
Figura 8:	Laser montado, pronto para escanear um alvo . . . . .	38
Figura 9:	Parser para conversão do formato próprio do laser para formatos conhecidos de nuvens de pontos e suas configurações . . . . .	39
Figura 10:	Laser posicionado em diferentes locais para que um afloramento possa ser completamente escaneado, no caso, como resultado cada seção (a), (b) e (c) gera um arquivo de escaneamento separado . . . . .	39
Figura 11:	Renderização do alvo onde há sobreposição dos pulsos laser, resultando em ruído na nuvem de pontos . . . . .	40
Figura 12:	Diâmetro do pulso do laser em relação a distância do objeto medido . . . . .	41
Figura 13:	A área vermelha é a borda de um alvo . . . . .	43
Figura 14:	Efeito de borda detalhado em folhas . . . . .	43
Figura 15:	Organização da mineração de dados . . . . .	44
Figura 16:	Exemplo de dados clusterizados em três grupos . . . . .	45
Figura 17:	Diagrama dos algoritmos de clusterização . . . . .	46
Figura 18:	Exemplos de <i>bounding volumes</i> : da esquerda para direita, <i>bounding box</i> , <i>bounding sphere</i> , <i>bounding capsule</i> , <i>bounding cylinder</i> . . . . .	46
Figura 19:	AABB envolvendo um conjunto de pontos 3D . . . . .	47
Figura 20:	Representações da <i>Quadtree</i> , visual e em árvore . . . . .	47
Figura 21:	Intensidades do local escaneado: (a) intensidades originais e (b) correção baseada em dados . . . . .	50
Figura 22:	Material utilizado no experimento de BURTON et al. (2011), onde (A) foto e (B) intensidade em <i>grayscale</i> . . . . .	51
Figura 23:	Objeto escaneado e clusterizado com o algoritmo k-means . . . . .	54
Figura 24:	Captura dos dados com o laser, onde parte dos pulsos não colidem com o alvo. . . . .	56

Figura 25: Diferentes resoluções de captura dos dados com o laser, onde (a) a distância entre os centros dos pulsos é maior que o diâmetro do pulso, (b) a distância entre os centros dos pulsos é menor que o diâmetro do pulso e (c) a distância entre os centros dos pulsos é igual ao diâmetro do pulso. . . . .	57
Figura 26: Ideia anterior utilizando uma <i>bounding sphere</i> como forma mais próxima ao formato do pulso laser . . . . .	58
Figura 27: Geração da AABB para verificar os pontos contidos nela . . . . .	59
Figura 28: Quadtree de nível 1 . . . . .	59
Figura 29: Quadtree posicionada no afloramento . . . . .	60
Figura 30: Quadtree com os pontos da nuvem inseridos . . . . .	60
Figura 31: Alvos do escaneamento: (a) suporte de cameras e (b) galho de goiabeira . . . . .	62
Figura 32: Alvos posicionados em cima do tripé: (a) suporte de cameras e (b) galho de goiabeira . . . . .	62
Figura 33: Tela do Mountain View sem afloramentos (1) e com afloramentos (2)	65
Figura 34: Diagrama de classes simplificado da estrutura de ferramentas, demonstrando como se adiciona as ferramentas ao Mountain View . . .	67
Figura 35: Ferramentas criadas e adicionadas ao Mountain View: (1) visualização das propriedades de uma camada de nuvem de pontos; (2) clusterização da nuvem de pontos baseada na intensidade de retorno do laser; (3) remoção de pontos da nuvem; (4) concatenação de pontos de diferentes camadas; (5) exportador da nuvem de pontos e (6) recuperação da intensidade de retorno do laser . . . . .	67
Figura 36: (a) Fluxograma do modelo antigo de utilização do Mountain View e (b) fluxograma do modelo atual de utilização do Mountain View . . .	68
Figura 37: Nuvem sintética clusterizada antes da recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. A linha amarela mostra os pontos da nuvem que foram determinados como efeito de borda. . . . .	70
Figura 38: Nuvem sintética clusterizada após a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. A linha amarela mostra os pontos da nuvem corrigidos pelo algoritmo. . . . .	71
Figura 39: Detalhe dos cantos da nuvem de pontos sintética, onde os resultados ficaram ruins. . . . .	72
Figura 40: Amostra de diferentes tipos de rochas fotografadas, capturadas pelo TLS e clusterizadas . . . . .	72
Figura 41: Amostra das rochas clusterizadas antes de efetuar a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser . . . . .	73

Figura 42: Amostra das rochas clusterizadas após a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser, conjunto de parâmetros menos exatos que àqueles utilizados no escaneamento . . . . .	73
Figura 43: Amostra das rochas clusterizadas após a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser, conjunto de parâmetros mais próximos que àqueles utilizados no escaneamento . . . . .	73
Figura 44: Árvore clusterizada antes da aplicação do algoritmo de recuperação da intensidade . . . . .	74
Figura 45: Árvore clusterizada após a aplicação do algoritmo de recuperação da intensidade . . . . .	75



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características técnicas do ILRIS 3D . . . . .	37
Tabela 2: Exemplo do formato de arquivo XYZ . . . . .	42
Tabela 3: Exemplo do formato de arquivo PTS . . . . .	42
Tabela 4: Configuração dos escaneamentos . . . . .	63
Tabela 5: Intensidades de retorno dos pulsos laser da nuvem sintética corrigidos pelo algoritmo . . . . .	71
Tabela 6: Número de pontos por grupo da nuvem de pontos da árvore antes de aplicar o algoritmo de recuperação da intensidade . . . . .	74
Tabela 7: Número de pontos por grupo da nuvem de pontos da árvore depois de aplicar o algoritmo de recuperação da intensidade . . . . .	74



## LISTA DE ABREVIATURAS

m metro(s)

mm milímetro(s)

rad radiano(s)

sec second(s)



## LISTA DE SIGLAS

AABB	Axis-Aligned Bounding Box
ALS	Airbone Laser Scanner
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LIDAR	Light Detection and Ranging
LST	Laser Scanner Terrestre
MP	Mega Pixel(s)
PRF	Pseudo Relevance Feedback
TLS	Terrestrial Laser Scanner
TOF	Time of Flight
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1 <b>Motivação</b>	28
1.2 <b>Objetivos</b>	28
1.2.1 <b>Objetivo Geral</b>	28
1.2.2 <b>Objetivos Específicos</b>	28
1.3 <b>Organização do Volume</b>	28
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS</b>	<b>31</b>
2.1 <b>Laser Scanner</b>	31
2.1.1 <b>Princípios de Medida de Distância do Laser Scanner</b>	31
2.1.2 <b>Aplicações do Laser Scanner</b>	33
2.1.3 <b>Laser Scanner ILRIS 3D</b>	35
2.1.4 <b>Captura de Dados com TLS</b>	37
2.1.5 <b>Divergência do Laser</b>	41
2.1.6 <b>Formato de Arquivo XYZ e PTS</b>	41
2.2 <b>Efeito de Borda</b>	42
2.3 <b>Clusterização</b>	44
2.4 <b>Axis-Aligned Bounding Box</b>	45
2.5 <b>Quadtree</b>	47
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>49</b>
3.1 <b>Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches</b>	49
3.2 <b>Lidar intensity as a remote sensor of rock properties</b>	51
3.3 <b>Simultaneous measurements of plant structure and chlorolphyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner</b>	51
<b>4 RECUPERAÇÃO DA INTENSIDADE DE RETORNO DO PULSO LASER NAS OCORRÊNCIAS DO EFEITO DE BORDA</b>	<b>53</b>
4.1 <b>Clusterização Aplicada à Intensidade de Retorno do Laser</b>	53
4.2 <b>Estimativa de Colisão do Pulso Laser</b>	56
4.3 <b>Limitações</b>	58
4.4 <b>Experimentos</b>	60
<b>5 IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS</b>	<b>65</b>
5.1 <b>Mountain View</b>	65
5.2 <b>Ferramentas no Mountain View</b>	66
5.2.1 <b>Edição e Limpeza da Nuvem de Pontos</b>	67

5.2.2	Clusterização da Nuvem de Pontos . . . . .	68
5.2.3	Recuperação da Intensidade do Laser . . . . .	69
<b>5.3</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diversas áreas do conhecimento têm utilizado técnicas digitais para a coleta de dados espaciais com grande resolução e exatidão. Em particular, a Geologia tem utilizado novos equipamentos para a automatização de levantamentos e mapeamentos geológicos (BUCKLEY et al., 2008). Uma das técnicas utilizadas para a captura de dados tridimensionais de afloramentos é *Light Detection And Ranging* (LIDAR). Esta técnica utiliza um laser aéreo - em inglês *Airbone Laser Scanner* (ALS) ou um laser *scanner* terrestre (LST) - em inglês *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) - capaz de capturar nuvens de pontos com informações sobre posicionamento (em coordenadas tridimensionais, x, y e z), que são os pontos que formam a superfície dos alvos, intensidade de retorno do sinal emitido (i) e cor (r, g e b), através de uma camera acoplada em seu sistema.

O armazenamento de informações espaciais por meio de um laser *scanner* tem se tornado cada vez mais popular devido à dificuldade de acesso a determinados afloramentos, ou à parte deles. Há a possibilidade de realizar interpretações nos afloramentos sem a necessidade de retornar ao local escaneado, reduzindo o custo e tempo de campo, e, no caso de um retorno, um planejamento de campo detalhado. E, para finalizar, o equipamento pode escanear de milhares a milhões de pontos por segundo (BURTON et al., 2011).

Foi demonstrado que a intensidade de retorno do laser pode ser usada como um sensor para detectar diferentes propriedades de rochas (BURTON et al., 2011) e, também, para segmentar os diferentes materiais existentes nos afloramentos ao aplicar algoritmos de clusterização nas informações de intensidade de retorno do laser (INOCENCIO et al., 2013). Assim, a intensidade de retorno do laser é uma informação importante para a análise qualitativa do afloramento, ou de outros alvos escaneados. Mas existe um problema na análise dos valores de intensidade de retorno do laser: o efeito de borda.

O efeito de borda ocorre quando um pulso emitido pelo laser *scanner* terrestre colide parcialmente no seu alvo e o restante se perde ou colide com um objeto no fundo. A colisão parcial com o alvo resulta em um retorno parcial da intensidade do laser. Fazendo com que a intensidade de retorno capturada pelo laser não seja a intensidade correta do material com o qual o laser colidiu.

Além disso, outras utilizações para o retorno de intensidade do laser tem sido estudadas em diferentes aplicações (HÖFLE; PFEIFER, 2007), como por exemplo em florestas. No caso do escaneamento de árvores e florestas, o problema do efeito de borda fica maior devido à quantidade de folhas e galhos que se sobrepõem, gerando os valores de intensidade de retorno incorretos (BORDIN et al., 2013).

## 1.1 Motivação

Como a utilização do laser *scanner* terrestre é, relativamente nova, ainda há diversas pesquisas a serem feitas para utilizá-los de forma mais precisa e em todo seu potencial. Até o momento poucos trabalhos foram realizados utilizando a intensidade de retorno do laser. Ainda mais falando especificamente do problema do efeito de borda existente no escaneamento de alvos com o laser. Assim, percebe-se uma oportunidade para realizar um trabalho novo na área.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo recuperar, removendo ou minimizando, o efeito de borda dos dados coletados através de um laser *scanner* terrestre, ou seja, recuperar o valor correto da intensidade de retorno do pulso laser.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, tem-se a) classificar a nuvem de pontos de forma a encontrar os pontos que formam o efeito de borda; b) definir o modelo matemático da recuperação da intensidade de retorno do pulso laser emitido; c) criar o algoritmo de recuperação da intensidade de retorno do pulso; e d) implementar este algoritmo e aplicá-lo em afloramentos para avaliação.

## 1.3 Organização do Volume

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 são definidos os conceitos básicos do trabalho, onde é analisado o Laser *Scanner* Terrestre. Os tópicos abordados são: exemplos de aplicações do laser, como é feita a aquisição das informações pelo laser, qual é a configuração técnica do equipamento utilizado neste trabalho, o que é e como ocorre a divergência do pulso laser e os formatos de arquivo que são gerados pelo equipamento. Além disso, é definido o que é o efeito de borda e a clusterização; no Capítulo 3 são descritos os trabalhos relacionados a este; no Capítulo 4 é explicado a técnica criada para a recuperação dos valores de intensidade do laser e os passos que foram seguidos durante a execução deste trabalho, demonstrando os experimentos feitos, as configurações dos experimentos e o modo como o problema foi resolvido; no Capítulo 5 o software no qual este trabalho foi desenvolvido, o *Mountain View*, é descrito. Assim como as funcionalidades existentes

e as ferramentas que este software possui. As ferramentas criadas e adicionadas são explicadas e o detalhamento da implementação do algoritmo desenvolvido neste trabalho é mostrado, assim como os resultados alcançados; e, por último, no Capítulo 6 é feita conclusão e a discussão sobre os resultados alcançados neste trabalho e as melhorias que podem ser abordadas em trabalhos futuros.



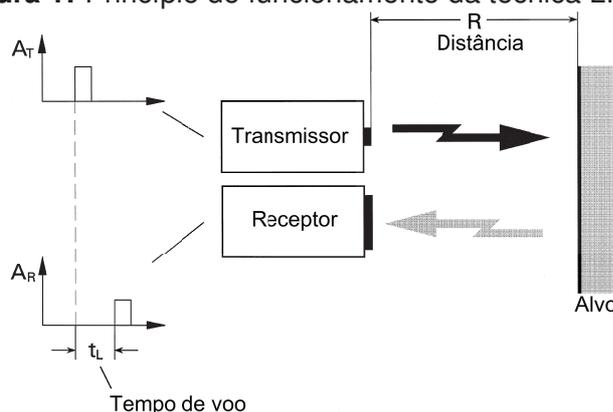
## 2 CONCEITOS BÁSICOS

Este capítulo detalha o laser *scanner*, o que é, quais são os tipos existentes, como ele funciona e onde ele é utilizado. Após é feito o detalhamento do laser utilizado neste trabalho, como é feita a captura de nuvens de pontos com o laser *scanner* e quais são informações disponíveis após um escaneamento. Também são descritos o efeito de borda e a clusterização utilizada nas nuvens de pontos.

### 2.1 Laser Scanner

O Laser *Scanner* é um equipamento para a aquisição de informações da superfície de alvos usando a tecnologia a laser. Esta técnica pode ser dividida em duas categorias: estática e dinâmica. A estática é quando o Laser *Scanner* é mantido em uma plataforma fixa durante o escaneamento e a dinâmica é quando o laser está fixado em uma plataforma móvel. O *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) é um equipamento, fixado no solo, que utiliza a técnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*) para realizar escaneamentos de alvos (Figura 1). O resultado de um escaneamento de objetos com um TLS é uma nuvem de pontos 3D que correspondem aos pontos da superfície do alvo escaneado. O *Airbone Laser Scanning* (ALS), que não será abordado neste trabalho, é um sistema aéreo e dinâmico de escaneamento, onde o laser é fixado em um veículo aéreo e a o escaneamento é feito durante a movimentação do veículo.

**Figura 1:** Princípio de funcionamento da técnica LIDAR



Fonte: Imagem adaptada de (WEHR; LOHR, 1999)

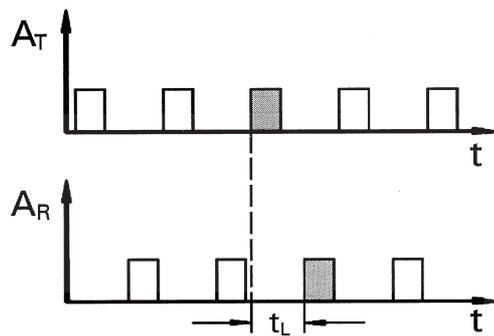
#### 2.1.1 Princípios de Medida de Distância do Laser Scanner

Os princípios da medida da distância do laser com o alvo são: por pulso, também chamado de tempo de voo, ou por onda contínua, também chamado de diferença de fase. O princípio de medida por pulso é quando o laser dispara um pulso laser,

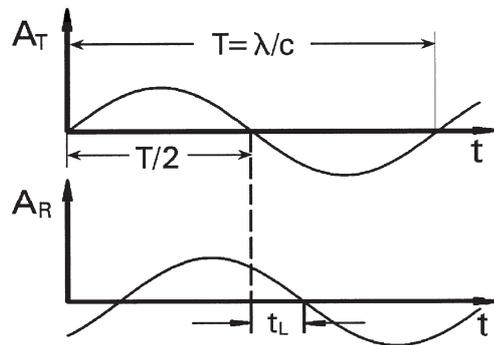
este pulso colide contra o alvo e é retornado para o laser que mede o tempo de voo. O princípio de medida por onda contínua é quando o laser emite constantemente uma onda senoidal. Esta onda colide contra o alvo e é retornada para o laser que mede a diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal retornado (WEHR; LOHR, 1999). A Figura 2 os princípios de medida da distância do laser com o alvo.

**Figura 2:** Princípios de medida da distância do laser com o alvo

**Pulso:**



**Onda contínua:**



Fonte: Imagem adaptada de (WEHR; LOHR, 1999)

Assim sendo, pode-se definir a distância dos pontos, que utiliza a técnica tempo de voo, através da fórmula:

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_L \quad (2.1)$$

, onde  $R$  é a distância do ponto,  $c$  é a velocidade da luz e  $t_L$  é o tempo de voo medido.

Para o caso da definição da distância dos pontos, utilizando a técnica de onda contínua, pode-se utilizar o seguinte cálculo:

$$t_L = \frac{\phi}{2\pi} \cdot T \quad (2.2)$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{\phi}{2\pi} \cdot T \quad (2.3)$$

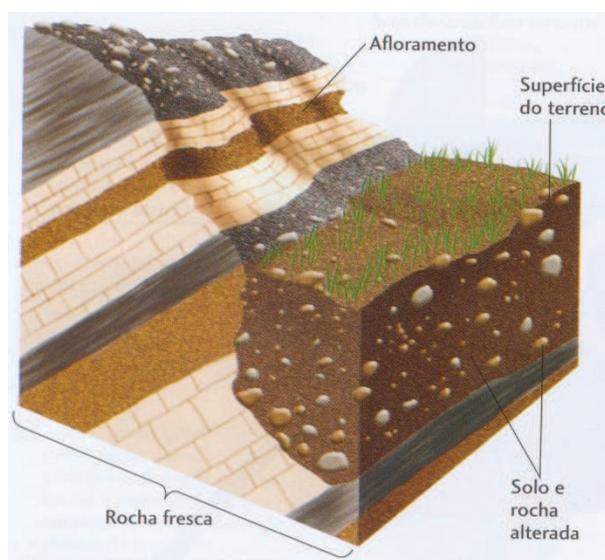
, onde  $R$  é a distância do pontos,  $c$  é a velocidade da luz,  $T$  é o período do sinal,  $t_L$  é

o *delay* do sinal e  $\phi$  é a diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal recebido.

### 2.1.2 Aplicações do Laser Scanner

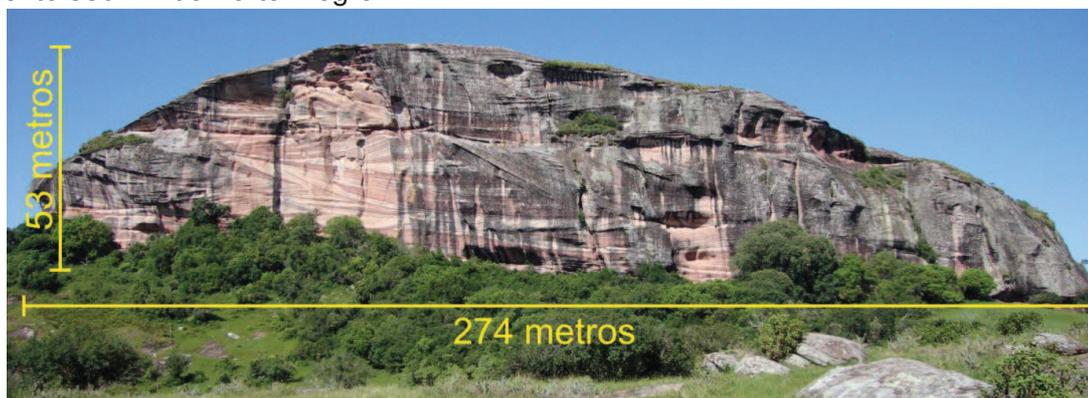
Para realizar o mapeamento geológico de regiões, como a formação da crosta terrestre, os geólogos precisam estudar as formações das rochas. Para isso, uma das fontes de informação são os afloramentos (Figura 3). Os afloramentos são rochas, ou parte de rochas, visíveis no solo (PRESS et al., 2006). Eles são formados pela ação da natureza (Figura 4) ou pela ação do homem, e neles são estudadas as formações rochosas e os materiais que os compõe (Figura 5).

**Figura 3:** Afloramentos geológicos, locais onde as rochas estão expostas na superfície do terreno



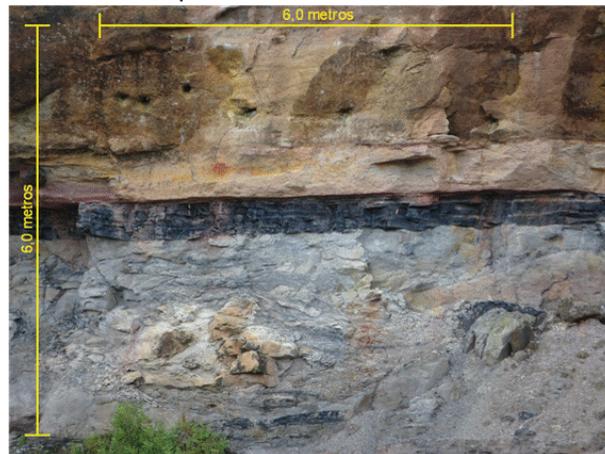
Fonte: (PRESS et al., 2006)

**Figura 4:** Afloramento Pedra Pintada, localizado no município de Caçapava do Sul, aproximadamente 330 km de Porto Alegre



Fonte: (INOCENCIO et al., 2013)

**Figura 5:** Detalhe dos materiais que compõe o afloramento do Morro do Papaléo, localizado no município de Mariana Pimentel, aproximadamente 80 km de Porto Alegre



Fonte: (INOCENCIO et al., 2013)

O laser *scanner* terrestre, também, está sendo estudado para realizar medições em alvos florestais, pois ele é um método de aquisição de dados não destrutivo (BORDIN et al., 2013). Assim, não é necessário o corte ou queima de árvores para o estudo da mesma. Além disso, a amostragem destrutiva é um processo caro e que resulta em amostras pouco significativas (BORDIN et al., 2013). Outros estudos recentes, são o estudo da estimativa de estoques de carbono da biomassa florestal (GARCIA et al., 2010) e o estudo de medições de estruturas vegetais e teor de clorofila em folhas (EITEL; VIERLING; LONG, 2010). Portanto, pode-se perceber que, ainda, a completa utilidade do laser *scanner* em alvos florestais ainda não está definida.

O laser *scanner* terrestre, também, é utilizado em diversas outras aplicações como: engenharia civil e mineração (OPTTECH, 2013), arqueologia (COREN et al., 2005), glaciologia (LUTZ; GEIST; STÖTTER, 2003), vulcanologia (MAZZARINI et al., 2007) and hidrologia (KLISE et al., 2009).

A utilização do Laser *Scanner* para análise de dados se dá devido uma variedade de vantagens em relação aos métodos tradicionais de análise, como (HODGETTS, 2013) descreve:

- *Captura de dados de áreas inacessíveis:* durante o trabalho de campo, o acesso a certas áreas é limitado por algum motivo. Pode ser devido à topografia do local (penhascos íngrimes) ou, ainda, por motivos de segurança (áreas perigosas). A precisão dos dados capturados pelo laser *scanner* permite um estudo detalhado do local sem que seja necessário o acesso físico aos locais;
- *Pontos de vista virtuais:* ver as informações em diferentes pontos de vista, com diferentes ângulos, e poder trocá-los rapidamente permite que geometrias e características sejam visualizadas que talvez não fossem vistas de um ponto de vista terrestre;

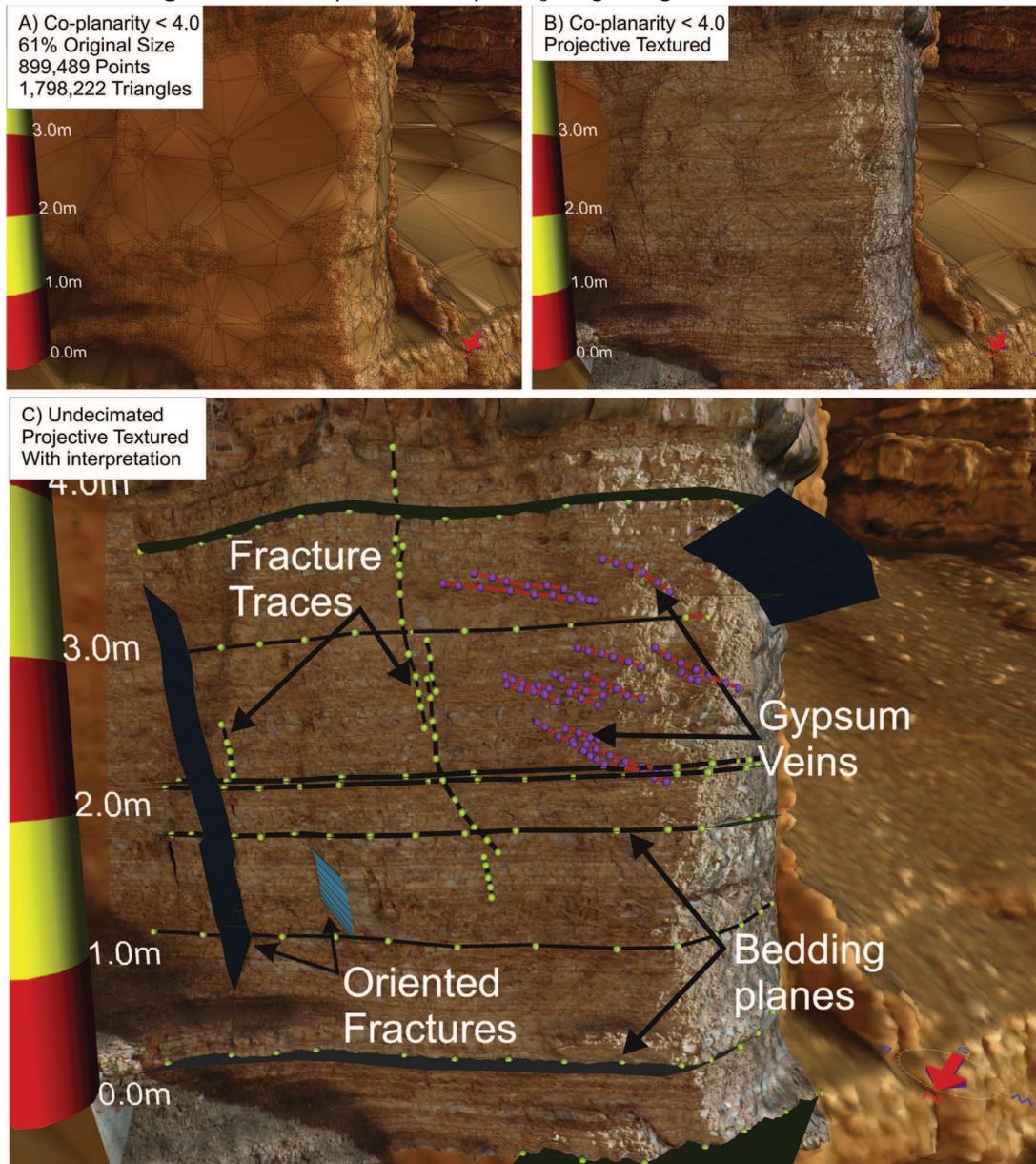
- *Maior tamanho de amostra*: no trabalho de campo os dados que, normalmente, são analisados são aqueles em que há o acesso físico das áreas estudadas, resultando em dados estatísticos limitados. Com os dados digitais é possível realizar o estudo de outras áreas, antes inacessíveis, aumentando as informações estatísticas do estudo;
- *Geração de novos atributos*: com os dados no formato digital é possível armazenar novas informações, ajudando na interpretação (Figura 6) e fornecendo base para uma análise automatizada;
- *Captura rápida de dados*: a coleta de dados com *Laser Scanner* varia a taxa a captura de pontos entre 10.000 e 1.000.000 (P20 Leica) pontos por segundo (com alcance maior que 1 km e resolução menor que 1.5 cm). Esta taxa de captura permite que grandes áreas sejam escaneadas rapidamente;
- *Melhor uso do tempo de trabalho de campo*: apesar da demora em certas capturas de dados, o uso dos dados digitais podem fazer com que o trabalho de campo seja feito de forma mais eficiente com a possibilidade de realizar interpretações e análises no laboratório (Figura 6);
- *Treinamento*: o trabalho de campo pode se tornar custoso e demorado, então para utilizar o tempo da melhor forma possível e diminuir os custos, o estudo de modelos digitais pode resultar em um melhor aproveitamento do trabalho de campo.

### 2.1.3 Laser Scanner ILRIS 3D

O laser *scanner* terrestre ILRIS 3D (Figura 7) é o equipamento utilizado neste trabalho. Ele utiliza a técnica de escaneamento LIDAR baseado na técnica de tempo de voo e foi desenvolvido pela empresa canadense Optech, apresentando as características técnicas listadas na Tabela 1 (OPTECH, 2013):

Este laser *scanner* possui um alcance máximo de 1.200 metros para objetos que possuem 80% de refletividade. Para objetos com 10% de refletividade, alcance máximo diminui para 400 metros. A distância mínima para realizar escaneamentos, de acordo com o manual do equipamento, é de 3 metros (sem inclusão de cor RGB). Apesar disso, testes foram realizados para determinar a mínima distância entre os alvos e o laser. Como resultado, pôde ser visto que a distância de 3 metros, diversos pontos não foram registrados pelo equipamento, ou seja, é necessária uma distância maior que 3 metros para que o equipamento não perca informações (BORDIN et al., 2013). A distâncias de 100 metros do alvo, o laser possui uma precisão linear de 7 milímetros e uma precisão angular de 8 milímetros. A divergência do laser de 170

**Figura 6:** Exemplo de interpretação geológica de afloramentos



Fonte: (HODGETTS, 2013)

$\mu$ rad faz com que a 100 metros de distância o diâmetro do laser seja de 22 milímetros. O laser utilizado pelo equipamento opera na faixa de 1.535  $\eta$ m (infravermelho) e é de classe 1 ou 1M. A classe 1 é um laser seguro para todas as condições normais de trabalho. Já a classe 1M é seguro para todas as condições de trabalho, exceto quando ele atravessa objetos de aumento, como microscópios ou telescópios. A câmera integrada possui uma resolução de 3.1 MP utilizada para definir as cores dos pontos na nuvem de pontos. Como a câmera é localizada fora do eixo central do equipamento, ao realizar escaneamentos onde a distância entre o alvo e o laser é pequena (distância menor que 35 ou 40 metros), ocorre um efeito de paralaxe nas cores dos pontos.

**Figura 7:** Laser Scanner Terrestre ILRIS 3D da Optech



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 1:** Características técnicas do ILRIS 3D

Parameter	ILRIS-3D
Range 80% reflectivity	1200 m
Range 10% reflectivity	400 m
Minimum range	3 m
Laser repetition rate (peak and effective PRF)	2500 to 3500 Hz
Efficiency (effective PRF/peak PRF)	100%
Raw range accuracy	7 mm @ 100 m
Raw range accuracy (averaged)	N/A
Raw angular accuracy	8 mm @ 100 m (80 $\mu$ rad)
Field of view	40°x 40°
Minimum step size	0.001146°(20 $\mu$ rad)
Maximum density (point-to-point spacing)	2 cm @ 1000 m
Rotational speed	0.001 to 20°/sec
Rotational step size (minimum)	0.001146°(20 $\mu$ rad)
Beam diameter ( $1/e^2$ )	22 mm @ 100 m
Beam divergence	0.009740°(170 $\mu$ rad)
Laser wavelength	1535 nm
Laser class	1 or 1M
Integrated camera	3.1 MP

Fonte: (OPTECH, 2013)

#### 2.1.4 Captura de Dados com TLS

Para realizar um escaneamento com o laser *scanner* ILRIS 3D, o laser *scanner* deve ser posicionado na frente do afloramento e ligado a um computador (Figura 8). O *software* fornecido pela desenvolvedora do laser deve ser aberto e se conectará ao equipamento através de uma rede (pode ser via cabo ou *wireless*). Após a conexão efetuada, deve-se definir as configurações do escaneamento e a área de captura de

dados. A área de captura de dados é feita através do *software* que tira uma foto da área em frente ao laser e selecionado-se regiões retangulares sobre a foto. Uma vez que as configurações e áreas de interesse tenham sido selecionados, deve-se determinar o início do processamento de captura pelo equipamento. O laser salva as informações da captura em formato de arquivo proprietário, assim, para a utilização em sistemas de visualização de nuvens de pontos, estes dados devem ser convertidos para formatos de arquivos conhecidos, como XYZ e PTS. Isto é feito através de outro *software*, também, fornecido pela empresa que desenvolveu o laser chamado *Parser* (Figura 9).

**Figura 8:** Laser montado, pronto para escanear um alvo

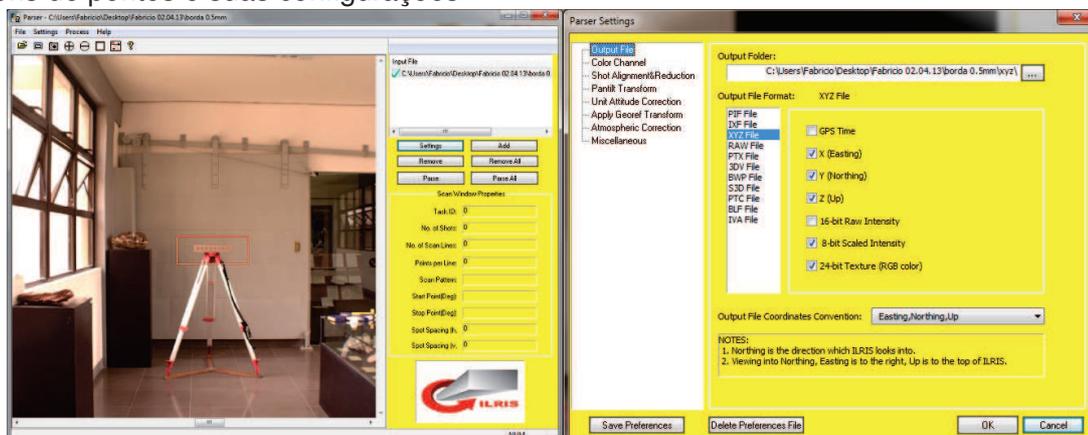


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em certos casos, para conseguir realizar a captura de um afloramento com uma largura maior que o equipamento permite realizar de uma só vez, deve-se realizar a captura do afloramento em seções separadas (Figura 10).

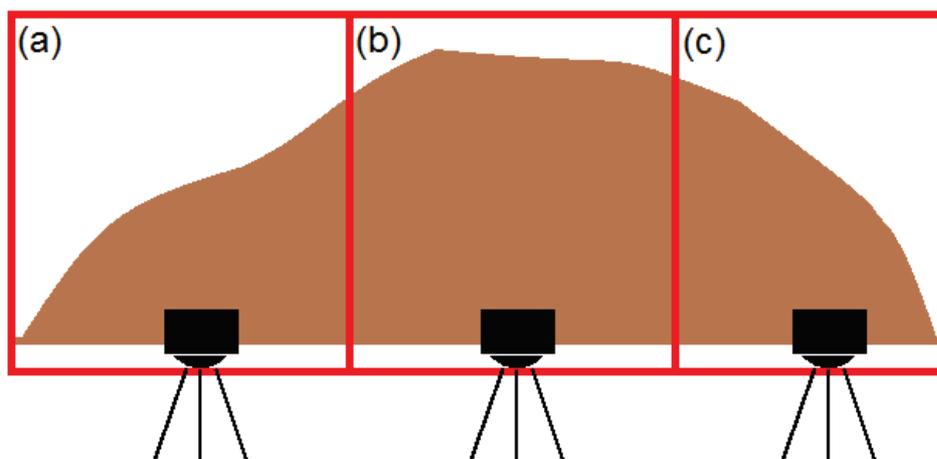
Todo escaneamento a ser realizado deve ser configurado levando-se em consideração as características técnicas do equipamento utilizado. Algumas destas configurações são: distâncias máxima e mínima do alcance do laser. Outras configurações devem ser realizadas levando em consideração as características do afloramento, como a reflectância dos materiais que compõe o afloramento. Isso deve-se ao fato de que o laser deve estar mais próximo de um alvo que possui uma menor

**Figura 9:** Parser para conversão do formato próprio do laser para formatos conhecidos de nuvens de pontos e suas configurações



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 10:** Laser posicionado em diferentes locais para que um afloramento possa ser completamente escaneado, no caso, como resultado cada seção (a), (b) e (c) gera um arquivo de escaneamento separado



Fonte: Elaborada pelo autor.

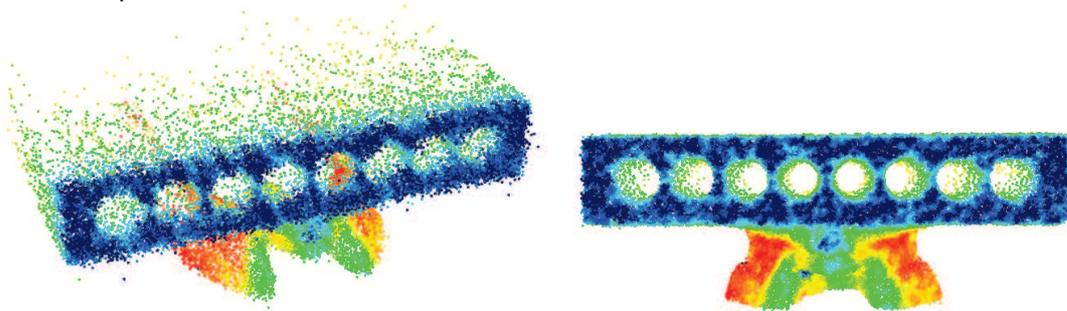
reflectância do que um alvo que possui uma maior refletância (SHAN; TOTH, 2009).

A configuração do espaçamento entre pontos é importante, pois quanto maior é a distância do equipamento do alvo, a divergência do laser altera a dimensão do pulso laser e, se ocorre uma sobreposição de pulsos, ocorre ruído nos dados capturados (Figura 11).

#### 2.1.4.1 Intensidade de Retorno do Pulso Laser

Os pulsos laser emitidos do laser *scanner* colidem com o alvo e retornam para o equipamento. Ao retornar para o equipamento, a intensidade de retorno do sinal é medida e armazenada. Esta medida é a intensidade ( $i$ ) de retorno do sinal. A

**Figura 11:** Renderização do alvo onde há sobreposição dos pulsos laser, resultando em ruído na nuvem de pontos



Fonte: Elaborada pelo autor.

intensidade de retorno é dependente da refletividade do alvo, da distância do alvo (por causa da divergência do laser, quanto maior a distância entre o alvo e o equipamento, o pulso torna-se maior e menos intenso) e das condições atmosféricas (como por exemplo, a presença de chuva) (HODGETTS, 2013). Isto significa que quanto maior é a distância entre laser e o alvo, o valor de intensidade de retorno do pulso laser tende a reduzir devido à divergência do laser. Existem trabalhos que propõem a correção da intensidade devido ao distanciamento do laser para o afloramento (HÖFLE; PFEIFER, 2007) e aplicado na área geológica, como a litologia (BURTON et al., 2011). Nos equipamentos atuais, essa informação é armazenada em uma estrutura de 8 e 16 bits. A intensidade de retorno do pulso laser tem sido utilizada como um sensor remoto das propriedades das rochas (HODGETTS, 2013), por exemplo.

#### 2.1.4.2 Cor

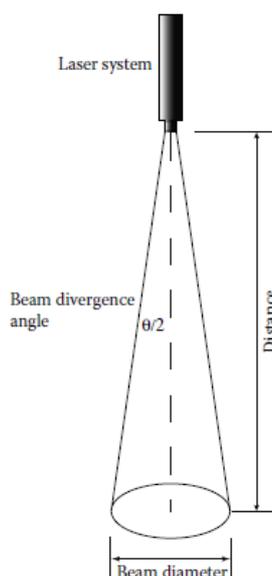
As cores dos pontos das nuvens de pontos escaneadas são obtidas por meio de uma câmera acoplada no laser *scanner*. Elas são definidas pelos coeficientes R (*Red*), G (*Green*) e B (*Blue*) para cada ponto da nuvem. Existem problemas ao se utilizar esta forma de aquisição de cores para os pontos, pois as fotografias dependem da resolução da câmera, das condições do tempo e da hora do dia em que foram tiradas (devido à iluminação). Portanto, pode-se afirmar que os problemas de se adquirir as informações de cor dos pontos das nuvens de pontos são os mesmos de se tirar uma fotografia no geral (HODGETTS, 2013). Outro problema que pode surgir é quando escaneia-se um alvo em diversas seções diferentes. Cada seção pode ser escaneada em um horário diferente do dia, ou em condições climáticas diferentes, fazendo com que a junção das nuvens de pontos capturadas resulte em mudanças abruptas das cores dos pontos das nuvens. Para resolver este tipo de problema, sugere-se realizar o processamento das fotografias antes da geração dos arquivos das nuvens de pontos

através do *Parser*<sup>1</sup>.

### 2.1.5 Divergência do Laser

O diâmetro do pulso de laser emitido pelo TLS tem uma relação direta com a distância do emissor até a colisão do mesmo com o objeto a ser medido (Figura 12).

**Figura 12:** Diâmetro do pulso do laser em relação a distância do objeto medido



Fonte: (POPESCU, 2011)

A divergência do laser pode ser definida na equação (2.4):

$$D = 2H \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.4)$$

onde  $D$  é o diâmetro do pulso,  $H$  é a distância entre o equipamento e o objeto escaneado e  $\theta$  é o ângulo de divergência do pulso.

### 2.1.6 Formato de Arquivo XYZ e PTS

Os formatos de arquivo XYZ e PTS são formatos conhecidos para os *softwares* de visualização de nuvens de pontos. O formato de arquivo XYZ armazena as informações dos pontos em formato texto, onde cada linha do arquivo é um ponto no espaço correspondente ao retorno de um pulso laser. Este formato permite até sete informações por linha: **x**, **y**, **z**, **i**, **r**, **g** e **b**, onde **x**, **y** e **z** são as coordenadas do ponto

<sup>1</sup>O Parser é um programa fornecido pela empresa do laser scanner utilizado para converter os dados internos capturados pelo laser para formatos conhecidos de nuvens de pontos, como **xyz** ou **pts**

no espaço, **i** é o valor da intensidade de retorno do laser (dado opcional) e **r, g e b** é a cor do ponto no espaço (dado opcional) (Tabela 2).

**Tabela 2:** Exemplo do formato de arquivo XYZ

<b>Linha</b>	<b>XYZ (x y z i r g b)</b>
1	26.330089 -8.319020 1.120000 185 252 254 255
2	26.334089 -8.341020 1.119000 127 255 255 253
3	26.330089 -8.321020 1.131000 163 252 254 255
4	26.344089 -8.347020 1.131000 105 255 254 255
5	26.348089 -8.902920 1.133000 137 115 138 122
6	26.341089 -8.945920 1.133000 211 119 129 156
:	:

Fonte: Elaborado pelo autor

O formato PTS, assim como o formato XYZ, armazena as informações dos pontos em formato, onde cada linha do arquivo é um ponto no espaço correspondente ao retorno de um pulso laser. Este formato permite até sete informações por linha: **x, y, z, i, r, g e b**, onde **x, y e z** são as coordenadas do ponto no espaço, **i** é o valor da intensidade de retorno do laser (dado opcional) e **r, g e b** é a cor do ponto no espaço (dado opcional) (Tabela 3). A diferença entre estes dois formatos de arquivo é que no formato PTS, obrigatoriamente, na primeira linha do arquivo há o número de pontos armazenados nele. Enquanto que no formato XYZ não existe esta informação.

**Tabela 3:** Exemplo do formato de arquivo PTS

<b>Linha</b>	<b>PTS (x y z i r g b)</b>
1	43879
2	26.330089 -8.319020 1.120000 185 252 254 255
3	26.334089 -8.341020 1.119000 127 255 255 253
4	26.330089 -8.321020 1.131000 163 252 254 255
5	26.344089 -8.347020 1.131000 105 255 254 255
6	26.348089 -8.902920 1.133000 137 115 138 122
:	:

Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.2 Efeito de Borda

A borda em alvos escaneados com um TLS é a própria borda do alvo (Figura 13). É onde os pulsos laser deixam de colidir com o alvo e começam a colidir com o fundo ou então os pulsos se perdem por não colidir em nada.

O efeito de borda é um efeito que ocorre quando o pulso laser colide parcialmente com o afloramento. Ele ocorre nas bordas de um afloramento e pode ser

**Figura 13:** A área vermelha é a borda de um alvo



Fonte: Elaborada pelo autor.

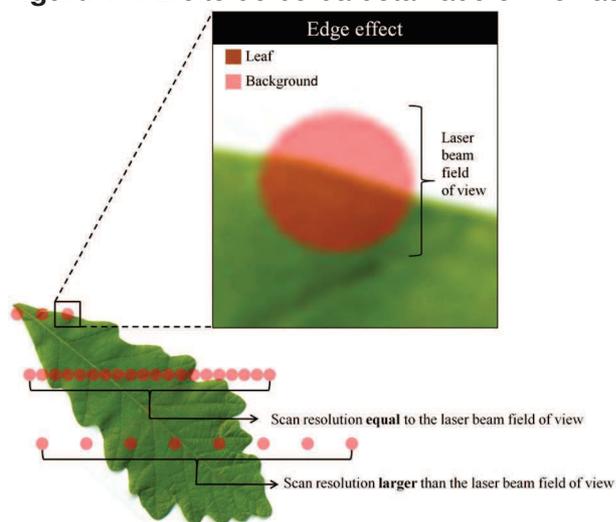
entendido como uma discrepância entre a intensidade de retorno do laser com a intensidade que deveria ser retornada.

O pulso laser que colide com o alvo possui um diâmetro proporcional à distância do laser com o alvo. Isto ocorre devido à divergência do laser. Assim, quanto maior é a distância do laser para o alvo, maior é o diâmetro do pulso no momento da colisão com o alvo (Figura 12).

O diâmetro do pulso resulta, nas bordas do alvo, uma colisão parcial do pulso laser e, portanto, somente parte da intensidade do pulso emitido retornará para ser medido e registrado pelo equipamento.

O efeito de borda da captura de uma folha por meio de um laser *scanner* terrestre pode ser visto na Figura 14, onde percebe-se que nas bordas da folha o laser colide parcialmente.

**Figura 14:** Efeito de borda detalhado em folhas



Fonte: (EITEL; VIERLING; LONG, 2010)

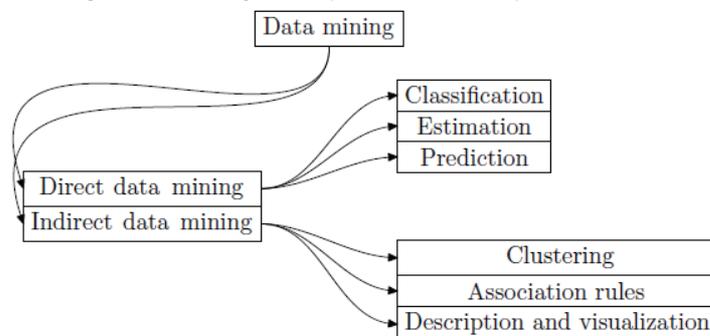
Um exemplo de problema que o efeito de borda traz é quando deseja-se determinar a quantidade de materiais diferentes que formam os afloramentos, já que a intensidade de retorno do pulso emitido pelo laser *scanner* é proporcional ao tipo de material com o qual ele colide. Isto deve-se ao fato de cada tipo de material possuir uma reflectância diferente. Já nas bordas, essa informação de reflectância e de material é perdido.

## 2.3 Clusterização

A clusterização faz parte da mineração de dados (Figura 15), ou do inglês *data mining*, o qual é um processo de exploração e análise de uma grande quantidade de dados com o objetivo de descobrir informações úteis. Como a clusterização pertence à mineração de dados indireta, o objetivo é encontrar relações entre os dados dada uma variável, ou mais de uma variáveis, de análise. Ou seja, a clusterização agrupa dados, em  $n$  diferentes grupos, dada uma variável de similaridade (GAN; MA; WU, 2007).

A clusterização, ou segmentação como também é chamada, é uma ferramenta importante para a mineração de dados, pois consegue identificar padrões ou tendências de uma massa de dados. Ela cria grupos de objetos, onde cada grupo contém objetos com características similares entre si (GAN; MA; WU, 2007). A clusterização pode ser confundida com classificação, mas na classificação os objetos são separados em classes pré-definidas, enquanto que na clusterização as classes são definidas posteriormente. Isto se deve ao fato de que a clusterização separa os objetos em grupos com características semelhantes, mas não é sabido antecipadamente quais características são essas.

**Figura 15:** Organização da mineração de dados



Fonte: (GAN; MA; WU, 2007)

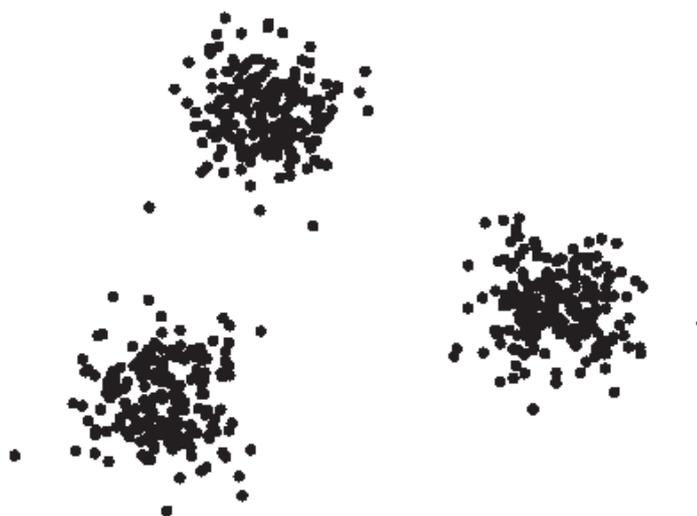
Não existe uma padronização para o vocabulário da clusterização. Diferentes palavras podem ser usadas para expressar a mesma coisa. Por exemplo, *data point*, *pattern case*, *observation*, *object*, *individual*, *item* e *tuple* são usados para definir um registro ou dado único de um conjunto de dados (GAN; MA; WU, 2007). Da mesma forma, para expressar a distância ou similaridades entre os dados de estudo, pode-se utilizar *similarity measures*, *similarity coefficients*, *dissimilarity measures* ou *distances*. Considerando dois objetos  $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$  e  $y = (y_1, y_2, \dots, y_d)$ , a distância euclidiana entre  $x$  e  $y$  pode ser calculada de acordo com a equação 2.5. Quanto menor a distância entre os objetos, ou seja, quando a diferença da medida de similaridade entre os objetos é pequena, mais similares os objetos são. E, portanto, objetos com

uma distância pequena pertencem a um mesmo grupo.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_j - y_j)^2} \quad (2.5)$$

Os termos *cluster*, *group* e *class* são usados para definir de forma intuitiva o grupo que é formado por dados similares. Todos os objetos de um cluster: a) compartilham as mesmas, ou parecidas, propriedades; b) possuem distâncias pequenas e grandes similaridades; c) possuem relações, ou dados relacionados, entre si; e d) são, claramente, diferentes do resto dos dados (que não pertencem ao grupo) (Figura 16).

**Figura 16:** Exemplo de dados clusterizados em três grupos



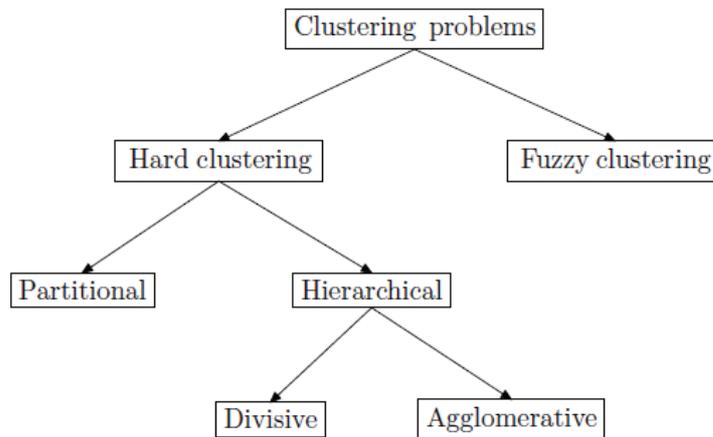
Fonte: (GAN; MA; WU, 2007)

Existem dois tipos básicos de algoritmos de clusterização (Figura 17): *Hard Clustering* e *Fuzzy Clustering*. Em *hard clustering* os dados, depois de agrupados, pertencem somente a um grupo. Já em *fuzzy clustering* os dados, depois de agrupados, podem pertencer a um ou mais grupos, onde para cada grupo há uma probabilidade associada.

A clusterização é utilizada em diferentes áreas, como saúde, pesquisa de mercado e segmentação de imagens, já que consegue processar e analisar grandes volumes de dados para reconhecer padrões e descobrir informações importantes daqueles dados, ou ainda, as relações entre eles (GAN; MA; WU, 2007).

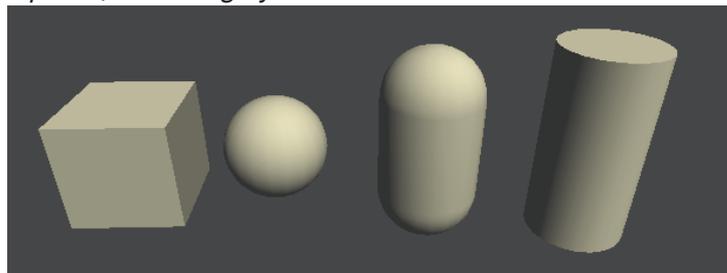
## 2.4 Axis-Aligned Bounding Box

As *bounding volumes* são volumes espaciais que envolvem um objeto ou um conjunto de objetos e são amplamente utilizadas para realizar a detecção de colisão

**Figura 17:** Diagrama dos algoritmos de clusterização

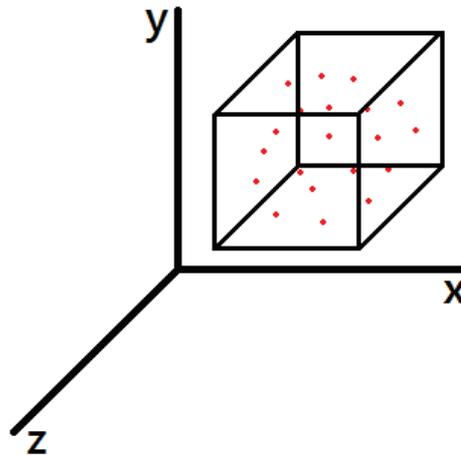
Fonte: (GAN; MA; WU, 2007)

entre objetos tridimensionais. A ideia de uma *bounding volume* é simplificar uma geometria complexa, tornando-a mais simples e diminuindo o custo do algoritmo dos testes de colisões (TU; YU, 2009). Existem diferentes tipos de *bounding volumes*, onde seus nomes são definidos de acordo com o formato da geometria. Uma *bounding sphere* tem o formato de uma esfera, uma *bounding capsule* tem o formato de uma capsula, um *bounding cylinder* tem o formato de um cilindro, entre outros formatos (Figura 18). Uma *bounding box* é uma *bounding volume* com o formato de uma caixa. E, por final, uma *axis-aligned bounding box* (AABB) é uma *bounding volume* com o formato de uma caixa que fica alinhada com os eixos coordenados, ou seja, a orientação da caixa é a mesma orientação dos eixos coordenados ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) (Figura 19). Para construir uma AABB em torno de um objeto, deve-se percorrer o objeto e encontrar o maior e menor  $x$ , o maior e menor  $y$  e o maior e menor  $z$ . Assim, o ponto médio de cada coordenada compõe o centro da *bounding box*. Outra forma de se construir uma *bounding box* é definindo um ponto (o centro da *bounding box*) e o comprimento de cada coordenada.

**Figura 18:** Exemplos de *bounding volumes*: da esquerda para direita, *bounding box*, *bounding sphere*, *bounding capsule*, *bounding cylinder*

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 19:** AABB envolvendo um conjunto de pontos 3D

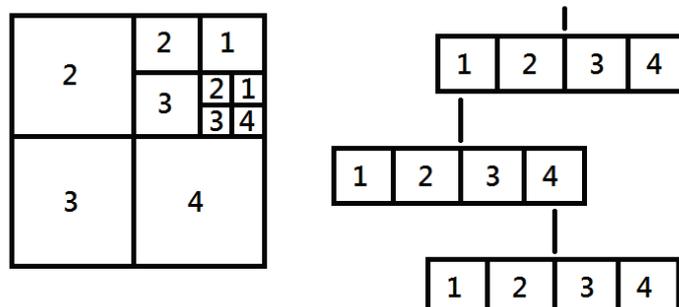


Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.5 Quadtree

*Quadtree* é uma estrutura de dados em árvore na qual todos seus nodos internos possuem quatro nodos filhos. Cada nodo da *quadtree* corresponde a um quadrado. Se esse nodo possui filhos, ele terá quatro nodos filhos que correspondem a quatro quadrantes do nodo pai (BERG et al., 2008). As *quadtrees* podem armazenar diferentes tipos de dados e a subdivisão dos quadrantes pode continuar enquanto houverem dados nos nodos filhos. Assim, é possível notar a natureza recursiva da *quadtree* (AGOSTON, 2004). A subdivisão dos nodos ocorre, sempre, dividindo o nodo pai em quatro quadrantes de tamanhos iguais (Figura 20), dividindo o nodo no meio, tanto horizontalmente, quanto verticalmente. As *quadtrees* possuem diversas aplicações em computação gráfica, tanto na parte de processamento de imagens, como representações e transformações em imagens (HUNTER; STEIGLITZ, 1979), quanto na visualização e processamento de objetos/modelos 3D, como o particionamento espacial e a triangulação de malhas (BERG et al., 2008).

**Figura 20:** Representações da *Quadtree*, visual e em árvore



Fonte: Elaborada pelo autor.



### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

A intensidade de retorno do pulso laser, medido através da colisão do pulso laser com o alvo, conforme visto na seção 2.1, é dependente de diversos fatores, como a distância entre o laser e o alvo (devido à divergência do sinal), as condições atmosféricas e a refletividade do alvo. Apesar do aumento da utilização de lasers *scanners* para o estudo em diversas áreas, existem poucos trabalhos relacionados à recuperação ou correção da intensidade de retorno do pulso laser, inclusive poucos trabalhos que utilizam a intensidade de retorno do pulso laser como dado bruto (BURTON et al., 2011).

#### 3.1 Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches

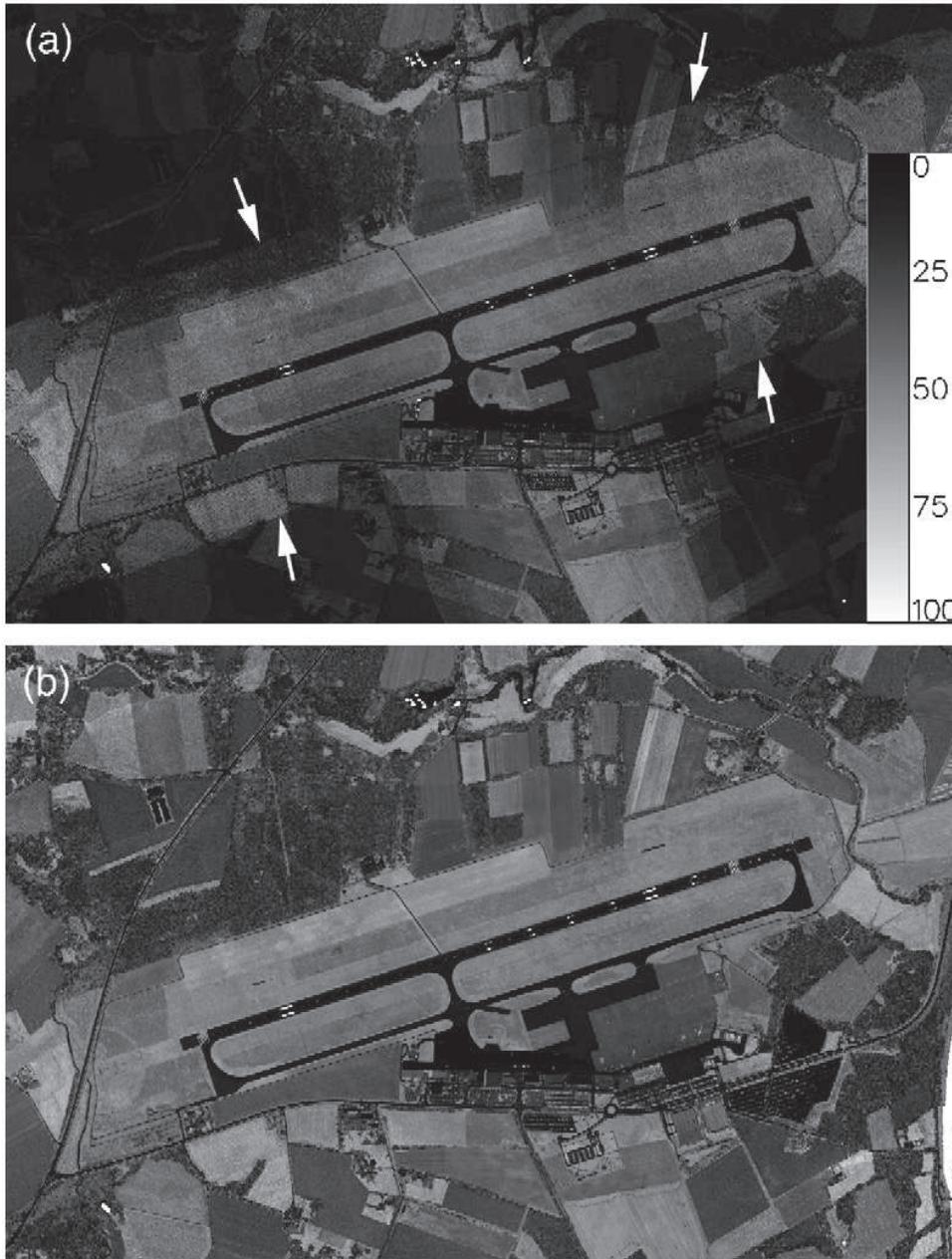
Sabendo que um dos fatores que implica diretamente na intensidade de retorno é a distância entre o laser e o alvo, o trabalho propõe a correção da intensidade de retorno do pulso laser baseado nesta distância. Foram desenvolvidos dois métodos diferentes para a correção da intensidade. O primeiro método, orientado a dados, é adequado para escaneamentos aéreos, onde diferentes altitudes são utilizadas para escanear uma mesma região. O segundo método, orientado a modelo, é baseado no princípio físico dos sistemas de radar. Para o modelo orientado a dados de correção da intensidade, assume-se que a intensidade é proporcional à refletividade do solo e proporcional à distância do laser com o solo, utilizando uma única função empírica, onde todos os efeitos físicos são os parâmetros. Já no método orientado a modelo a função utilizada é baseada no princípio físico dos sistemas de radar (HÖFLE; PFEIFFER, 2007).

Ambos os métodos apresentaram resultados similares, reduzindo a variação da intensidade de retorno do pulso laser. A principal diferença são os dados necessários. O método baseado em dados funciona somente se a captura de uma mesma área é feita em diversas altitudes. O método baseado no modelo físico manipula cada medida individualmente e bons resultados são encontrados se a energia inicial do pulso é conhecida. As intensidades corrigidas podem ser utilizadas para gerar imagens das intensidades com menor erro (Figura 21).

O trabalho de HÖFLE; PFEIFFER (2007) apresentou dois métodos independentes de correção da intensidade de retorno do pulso laser. O primeiro, baseado em dados, faz o ajuste a partir de um modelo empírico incluindo intensidade e distância (a maior variável que influencia o retorno do pulso laser). O segundo modelo, baseado no modelo, deriva da equação do radar, que descreve a perda da energia do pulso emitido. Ambos métodos de correção da intensidade alcançaram uma significativa

redução local da variação da intensidade, resultando no potencial de utilização da intensidade de retorno do laser a ser usado para a classificação de superfícies (HÖFLE; PFEIFER, 2007).

**Figura 21:** Intensidades do local escaneado: (a) intensidades originais e (b) correção baseada em dados



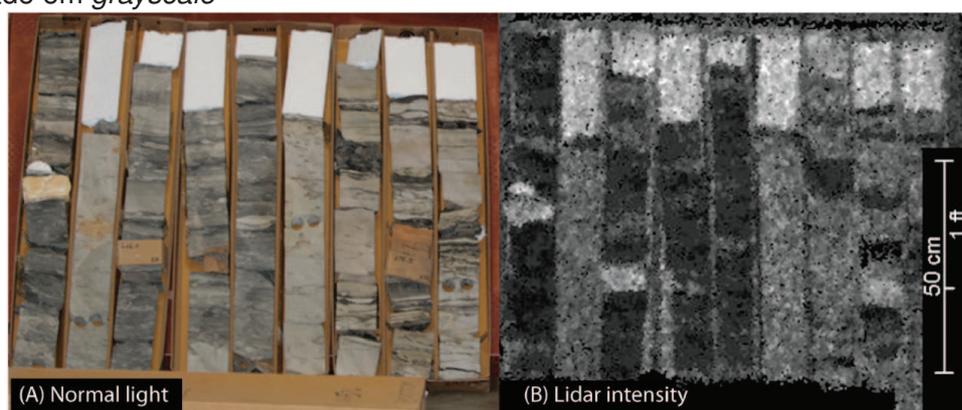
Fonte: (HÖFLE; PFEIFER, 2007)

Apesar de realizar a correção da intensidade de retorno do pulso laser, o trabalho de HÖFLE; PFEIFER (2007) tem por objetivo corrigir a intensidade de acordo com a distância entre o laser e o alvo. O efeito de borda não é tratado, portanto, o diferencial deste trabalho é recuperar, ou corrigir, a intensidade de retorno do pulso laser nas ocorrências do efeito de borda.

### 3.2 Lidar intensity as a remote sensor of rock properties

O trabalho de BURTON et al. (2011) diz que o uso da intensidade de retorno do pulso laser é pouco utilizado na classificação de superfícies, inclusive no mapeamento de afloramentos como um todo. Eles escanearam uma caixa com o material a ser estudado (Figura 22) e viram o comportamento das intensidades de retorno do laser.

**Figura 22:** Material utilizado no experimento de BURTON et al. (2011), onde (A) foto e (B) intensidade em *grayscale*



Fonte: (BURTON et al., 2011)

Os resultados obtidos no estudo mostram que a intensidade de retorno do pulso laser pode ser usado para o estudo das propriedades das rochas. A intensidade pode ser usada para distinguir as diferentes litologias (BURTON et al., 2011).

O trabalho de BURTON et al. (2011) não se enquadra diretamente na correção ou recuperação da intensidade de retorno do pulso laser, mas mostra a importância que esta informação tem e o pouco estudo que há em cima dela. Portanto, ainda há muitas possibilidades de estudo em cima da intensidade de retorno do pulso laser. Outra observação a ser feita é que eles utilizaram o mesmo laser *scanner* terrestre que a UNISINOS possui e que está sendo utilizado neste trabalho: o ILRIS 3D da Optech.

### 3.3 Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner

A estrutura e a clorofila das plantas afetam as taxas de fotossíntese. E é necessário um método para realizar as medidas dessas plantas. O objetivo do trabalho foi verificar se um laser *scanner* terrestre pode ser usado para realizar estas medidas, tanto estrutural quanto química, simultaneamente (EITEL; VIERLING; LONG, 2010).

O laser *scanner* terrestre realiza as medidas estruturais através da nuvem de pontos (x, y e z) e as medidas químicas através da intensidade de retorno do pulso la-

ser (i). Para que as medidas químicas sejam confiáveis, deve-se realizar as correções na intensidade de retorno do pulso laser, como por exemplo, uma vez que a distância entre o laser e o alvo implica na variação da intensidade (EITEL; VIERLING; LONG, 2010).

O estudo de EITEL; VIERLING; LONG (2010) mostra que é possível realizar medidas estruturais e químicas simultaneamente. As medidas estruturais realizadas foram a área da folha e o ângulo da folha e a medida química foi a clorofila A e B.

Neste trabalho é levantada a questão sobre o efeito de borda (Figura 14). É uma correção que deve ser feita da intensidade de retorno do pulso laser, mas que ainda não há nenhuma solução proposta.

## 4 RECUPERAÇÃO DA INTENSIDADE DE RETORNO DO PULSO LASER NAS OCORRÊNCIAS DO EFEITO DE BORDA

Este capítulo descreve a técnica desenvolvida para a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser em alvos escaneados através de um laser *scanner* terrestre.

### 4.1 Clusterização Aplicada à Intensidade de Retorno do Laser

O que se deseja é utilizar a clusterização para separar as diferentes intensidades de retorno do laser para que seja possível encontrar um grupo de intensidades que represente o efeito de borda. O resultado da clusterização, utilizando a intensidade de retorno do pulso laser como parâmetro, são grupos com intensidades semelhantes. Um destes grupos é o grupo do efeito de borda. O algoritmo de clusterização utilizado foi o k-means. Ele é um dos algoritmos mais utilizados e foi descrito por Macqueen em 1967. Este algoritmo é classificado como particional e não hierárquico (GAN; MA; WU, 2007). Ele é chamado de k-means, pois os dados são agrupados em  $k$  grupos, ou seja, é um algoritmo baseado em *centroids*. Onde cada *centroid* é o centro do grupo.

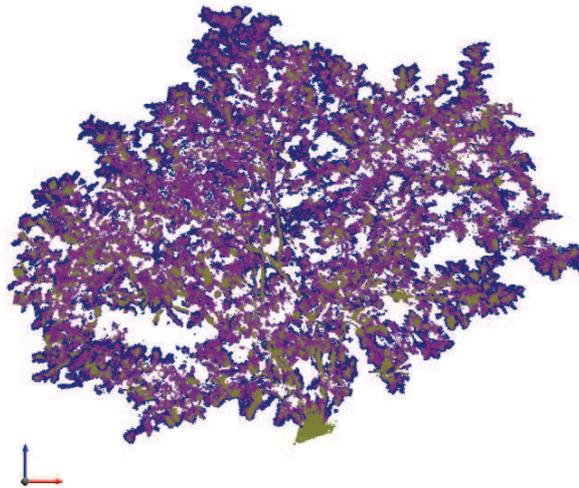
Inicialmente são sorteados  $k$  *centroids*, os centros dos grupos. Cada ponto existente na nuvem de pontos possui uma intensidade de retorno do pulso laser associada. Para cada ponto da nuvem é achado o *centroid* mais próximo. Neste caso, o *centroid* mais próximo é o que possui o valor da intensidade de retorno do laser mais parecido, ou similar, com a intensidade dos pontos. Assim, o ponto testado torna-se parte do grupo que possui o *centroid* mais próximo. Quando todos os pontos foram agrupados, os *centroids* são recalculados e deslocados para a posição do valor de intensidade média dos pontos que pertencem ao grupo. Uma vez que os *centroids* tenham mudado de posição, deve-se percorrer, novamente, os pontos da nuvem e verificar qual é o *centroid* mais próximo. Uma vez que os pontos mudaram de grupo, deve-se recalculá-los a posição dos *centroids*. Ou seja, o algoritmo entra em *loop* até que ele convirja. A convergência, normalmente, ocorre quando não há troca de grupos, mas ela pode ser determinada de outras formas, como determinar um número máximo de trocas de grupos, ou então um número máximo de iterações do algoritmo.

O fluxo do algoritmo segue os seguintes passos:

1. Sorteia-se  $k$  *centroids*.
2. Para cada ponto da nuvem de pontos, a distância entre o ponto e os *centroids* é calculada e o ponto é associado ao *centroid* de menor distância, ou seja, ao *centroid* mais próximo.

3. Quando todos os pontos foram associados à um *centroid*, as posições dos *centroids* são recalculadas de acordo com a posição média dos pontos que pertencentes à ele.
4. Repetem-se o passos 2 e 3 até chegar em uma convergência.

**Figura 23:** Objeto escaneado e clusterizado com o algoritmo k-means



Fonte: Elaborada pelo autor

Assim os  $k$  grupos de diferentes intensidades de laser são criados. Após aplicada a clusterização utilizando a intensidade de retorno do laser como parâmetro de divisão de grupos, pode-se visualizar na Figura 23, que um dos grupos existe somente nas bordas do objeto escaneado. Este grupo é composto pelos pontos que são considerados o efeito de borda. Então nestes pontos será aplicado o modelo de recuperação de intensidade de retorno do laser.

No Algoritmo 1,  $P$  é o conjunto de pontos da nuvem,  $C$  é o conjunto de *centroids*,  $n$  é o número de pontos,  $m$  é o número de *centroids* e *cam* é a estrutura que possui as informações e propriedades da camada.

Cada ponto é uma estrutura que possui a intensidade de retorno do laser e o *centroid* que o ponto pertence. Cada *centroid* é uma estrutura que possui a intensidade média de retorno do laser (utilizada como critério de distância), a quantidade de pontos que pertencem àquele grupo e soma e todas as intensidades do grupo.

Foi feita uma modificação no recálculo das posições dos *centroids* devido à quantidade de pontos que podem existir em uma nuvem de pontos. Para realizar o somatório, divide-se a intensidade pela soma da maior e menor intensidade e depois de calcular a média deste somatório, multiplica-se a intensidade pela soma da maior e

**Algorithm 1: K-means parcialmente modificado**


---

```

Input :  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ ,  $n, m$  e  $cam$ 
Output:  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 

1 //inicialização dos centroides
2 for  $i \leftarrow 0$  to  $m$  do
3   |  $temp \leftarrow \text{Random}(cam.maxIntensity, cam.minIntensity)$ 
4   |  $c_i.intensity \leftarrow temp$ 
5 end
6  $range \leftarrow cam.maxIntensity - cam.minIntensity$ 

7 //clusterização
8 while not Converged() do
9   //calcula as distâncias entre cada ponto e todos os centroides
10  //o centroid mais próximo é associado ao ponto
11  for  $j \leftarrow 0$  to  $n$  do
12    |  $point \leftarrow p_j$ 
13    |  $distance \leftarrow MAX\_INT$ 
14    | for  $i \leftarrow 0$  to  $m$  do
15      |  $dist \leftarrow \text{Distance}(point.intensity, c_i.intensity)$ 
16      | if  $dist < distance$  then
17        | |  $distance \leftarrow dist$ 
18        | |  $point.centroid \leftarrow c_i$ 
19      | end
20    | end
21  end

22 //recalcula a posição dos centroides
23 for  $j \leftarrow 0$  to  $n$  do
24   |  $centroid \leftarrow p_j.centroid$ 
25   |  $centroid.count \leftarrow centroid.count + 1$ 
26   |  $centroid.sum \leftarrow centroid.sum + (p_j.intensity/range)$ 
27 end
28 for  $i \leftarrow 0$  to  $m$  do
29   |  $centroid \leftarrow c_i$ 
30   |  $centroid.intensity \leftarrow (c_i.sum/c_i.count) * range$ 
31 end
32 end

```

---

menor intensidade para recuperar a intensidade média. Assim, os dados das variáveis não extravazam o máximo valor permitido pelo tipo de variável definido.

Utilizando o *k-means* a nuvem de pontos foi separada em diferentes grupos de intensidade, sendo que um grupo é o efeito de borda, onde a intensidade de retorno do laser é a intensidade medida, mas incorreta devido à colisão parcial do pulso laser com o alvo. Além dos pontos pertencentes ao grupo do efeito de borda, é necessário informações sobre o laser. As informações necessárias são: a) posicionamento do laser; b) espaçamento entre pulsos; e c) divergência do sinal (que é calculada em

relação à distância do alvo) .

Supondo que a relação entre a intensidade de retorno do pulso laser e o percentual de colisão do pulso seja linear, foi definida a Equação 4.1 para recuperar o efeito de borda.

$$vc = \frac{vm}{est} \quad (4.1)$$

onde  $vc$  é o valor corrigido de retorno da intensidade do laser,  $vm$  é o valor medido de retorno da intensidade do laser (valor capturado pelo equipamento) e  $est$  é a estimativa de colisão do laser com o afloramento  $\{est \in \mathbb{R}; 0 < est \leq 1\}$ .

## 4.2 Estimativa de Colisão do Pulso Laser

Para definir o valor real de retorno do laser, recuperando o efeito de borda, é necessário determinar a variável  $est$ , que é a estimativa de colisão do pulso laser com o afloramento (Figura 24), ou seja, o quanto do diâmetro do pulso realmente colidiu com o afloramento e retornou para o laser. Na Figura 24 cada círculo vermelho é um pulso laser que colidiu parcialmente com o alvo.

**Figura 24:** Captura dos dados com o laser, onde parte dos pulsos não colidem com o alvo.

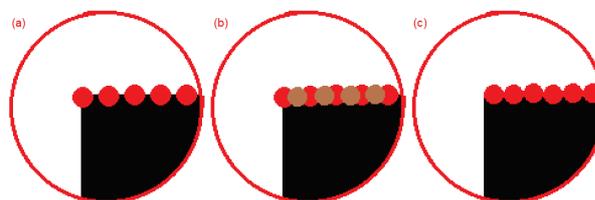


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para tanto é preciso analisar a captura dos dados do laser e as configurações possíveis dos escaneamentos. O pulso laser tem um diâmetro variável conforme a distância do equipamento ao alvo. Quanto maior a distância, maior é o diâmetro do pulso. Além disso, é possível configurar um escaneamento com diferentes resoluções, onde há três configurações possíveis: a) a distância entre os centros dos pulsos é maior que o diâmetro do pulso, resultando em uma perda de informações; b) a distância entre os centros dos pulsos é menor que o diâmetro do pulso, onde os pulsos se sobrepõem, resultando em ruídos na nuvem de pontos; e c) a distância entre os centros dos pulsos é igual ao diâmetro do pulso, sendo o melhor caso, onde não há perda de informações e nem a geração de ruídos na nuvem (conforme Figura 25).

A ideia inicial era utilizar uma *bounding sphere*, uma *bounding volume* com o formato de esfera, conforme descrito anteriormente, para simular de forma mais próxima da realidade o formato do pulso laser. Esta ideia foi descartada, pois ao inserir

**Figura 25:** Diferentes resoluções de captura dos dados com o laser, onde (a) a distância entre os centros dos pulsos é maior que o diâmetro do pulso, (b) a distância entre os centros dos pulsos é menor que o diâmetro do pulso e (c) a distância entre os centros dos pulsos é igual ao diâmetro do pulso.



Fonte: Elaborada pelo autor.

os pontos que colidem com a *bounding sphere* na *quadtree* de nível maior que um, os quadrantes dos cantos ficam com menos pontos (Figura 26). O que acontece é que utilizando uma *quadtree* de nível 1, utilizando uma *bounding sphere* para detectar os pontos próximos ao ponto analisado no algoritmo, todos os quadrantes tem uma área igual de perda (área verde da imagem (a) da Figura 26). Enquanto que em *quadtrees* de nível maior que 1 (imagem (b) da Figura 26), a área de perda é diferente para cada quadrante (área verde da imagem (c) da Figura 26). Portanto, para não haver perdas de pontos em áreas diferentes, o que resultaria em um percentual de colisão errôneo, foi escolhida a *axis-aligned bounding box* para realizar a detecção dos pontos próximos ao ponto analisado.

Considerando  $P$  o conjunto de pontos clusterizados e selecionados como efeito de borda e  $Q$  o conjunto de todos os pontos pertencentes à nuvem de pontos, deve-se, para cada um dos pontos do conjunto  $P$ , criar uma *Axis-Aligned Bounding Box* (AABB) centralizada num ponto  $a$ , onde  $a$  pertence à  $P$  e é o ponto que está sendo analisado. Após, deve-se verificar os pontos do conjunto  $Q$  que estão contidos na AABB (Figura 27). O tamanho da AABB é definido através da informação do espaçamento entre pontos (*spacing*) da coleta realizada, já que deve-se ter um número de pontos suficientes para realizar o cálculo do percentual de colisão. O conjunto de pontos contidos na AABB, chamado  $R$ , é inserido em uma *quadtree*, de nível  $n$  (a Figura 28 mostra uma *quadtree* de nível 1, a Figura 29 mostra a *quadtree* posicionada no ponto analisado e a Figura 30 mostra os pontos da nuvem inseridos nela). De acordo com o número de pontos existentes em cada quadrante da *quadtree*, é feita a relação de colisão, entre o pulso laser e o alvo sendo escaneado. Cada quadrante da *quadtree* tem um percentual de colisão em função do nível da *quadtree* (equação 4.2). Se  $n$  for de nível 1, significa que a *quadtree* possui 4 quadrantes. Neste caso, cada quadrante corresponde a 25% de colisão (na equação 4.2 existe o percentual de colisão de cada quadrante em função do nível da *quadtree*). O quadrante que tiver o maior número de pontos é considerado como 100% de colisão no valor do percentual total do quadrante. Em seguida, é feito o cálculo do percentual relativo dos outros

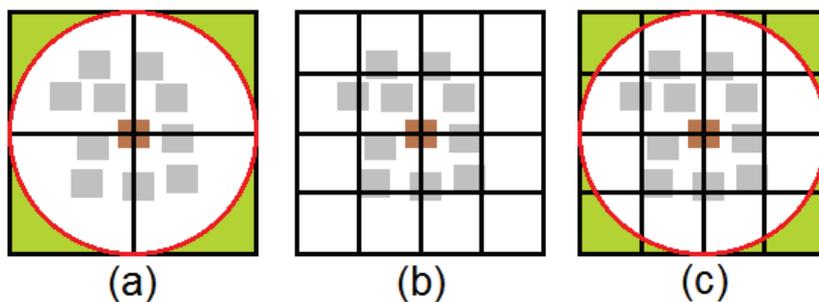
quadrantes em função do número de pontos existentes em cada. Se 100 pontos é 100% de colisão em um quadrante de 25% de colisão total, então a colisão final do quadrante vale 25%, 50 pontos é 50% de pontos do quadrante que possui o maior número de pontos e, por consequência, 50% de colisão em cima dos 25% de colisão do quadrante, que corresponde a 12.5% de colisão final do quadrante. Este cálculo é feito para cada quadrante e, por último, os percentuais de cada quadrante são somados para que defina-se o percentual de colisão entre o laser e o afloramento naquele ponto (algoritmo 2).

O algoritmo tem complexidade  $O(n^2)$ . No pior caso a maior parte dos pontos da nuvem são considerados pertencentes ao grupo do efeito de borda e para todos estes pontos, deve-se percorrer a nuvem inteira para determinar o percentual de colisão. No melhor caso, um percentual pequeno da nuvem de pontos é considerado efeito de borda, mas mesmo assim, para cada ponto do grupo do efeito de borda, deve-se percorrer todos os pontos da nuvem para determinar o percentual de colisão.

$$perc = \frac{1}{4^n} \quad (4.2)$$

, onde *perc* é o percentual de colisão e *n* é o nível da *quadtree*.

**Figura 26:** Ideia anterior utilizando uma *bounding sphere* como forma mais próxima ao formato do pulso laser



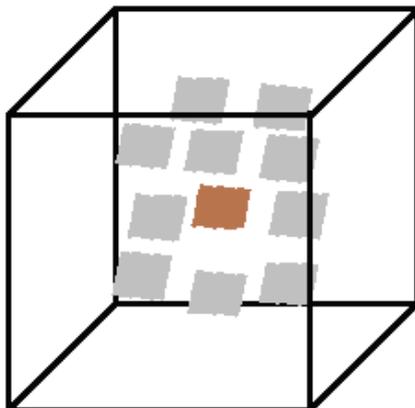
Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao realizar a recuperação da intensidade do pulso laser, qualquer análise que leva em consideração as intensidades de retorno dos pulsos laser, pode ser feita com maior precisão. Como, por exemplo, a análise dos diferentes tipos de materiais que compõem os alvos escaneados, como a segmentação das rochas que formam um afloramento e a segmentação de folhas e galhos que formam uma árvore.

### 4.3 Limitações

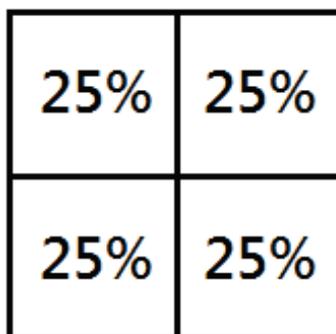
O algoritmo de recuperação da intensidade de retorno do laser necessita da posição do laser em relação à nuvem capturada e do espaçamento entre pontos da configuração da captura da nuvem, portanto somente as informações armazenadas

**Figura 27:** Geração da AABB para verificar os pontos contidos nela



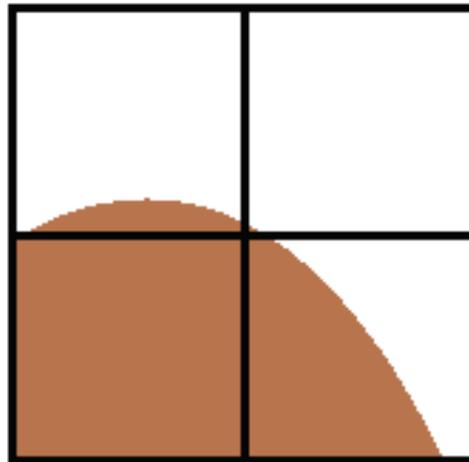
Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 28:** Quadtree de nível 1

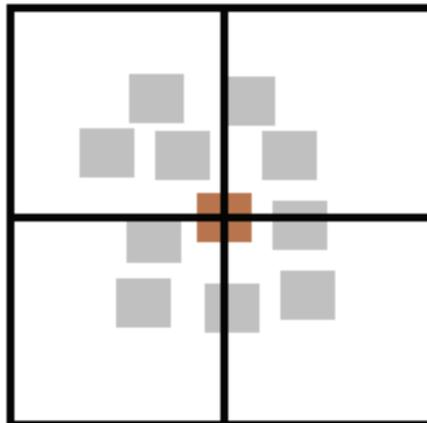


Fonte: Elaborada pelo autor.

nos arquivos de formato XYZ e PTS não são suficientes para realizar a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. Uma outra forma, seria utilizar a nuvem de pontos para descobrir a posição do laser, mas a descoberta da posição do laser não faz parte do escopo deste trabalho, assim como a descoberta do espaçamento entre os pontos da nuvem. Em determinados casos, uma nuvem de pontos pode ser formada por diversas capturas com o laser posicionado em diferentes lugares (Figura 10). Neste caso, a recuperação da intensidade proposta não é passível de uso. Cada seção deve ser recuperada separadamente e, em seguida, deve-se agrupar novamente as seções.

**Figura 29:** Quadtree posicionada no afloramento

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 30:** Quadtree com os pontos da nuvem inseridos

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 Experimentos

Foi utilizado o laser *scanner* terrestre ILRIS 3D para realizar a captura de nuvens de pontos. Foram feitos experimentos controlados de captura de nuvens de pontos através do TLS. Os alvos escolhidos foram uma árvore goiabeira, um galho de uma goiabeira e um suporte de cameras (Figura 31). A goibeira não consta na imagem, já que ela foi retirada pela UNISINOS. Este suporte de câmeras foi montado pelo autor deste trabalho para o posicionamento de diversas câmeras alinhadas. Ele foi utilizado devido ao seu formato que conta com bordas retas e curvas.

Todos os alvos, com exceção da árvore goiabeira, foram colocados em cima de

---

**Algorithm 2:** Recuperação da intensidade de retorno do pulso laser
 

---

```

Input :  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ ,  $n$  e  $spacing$ 
Output:  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 

1 // avalia o percentual de colisão para todos os pontos
2 // pertencentes ao grupo do efeito de borda
3 for  $\forall a \in P$  do
4   // a quadtree e a aabb criadas são de tamanho 10 vezes maior
5   // que o espaçamento de captura para se ter uma quantidade
6   // de pontos suficientes
7    $aabb \leftarrow \text{CreateAABB}(a.x, a.y, a.z, spacing)$ 
8    $quadtree \leftarrow \text{CreateQuadtree}(a.x, a.y, a.z, spacing, n)$ 
9   for  $\forall b \in Q$  do
10    | if  $b \subset aabb$  then
11    | |  $quadtree \leftarrow b$ 
12    | end
13  end
14  // o numero de pontos dos quadrantes são vetorizados
15  // e ordenados decrescentemente
16   $quads \leftarrow \text{Sort}(quadtree, n)$ 
17  // é armazenada a maior quantidade de pontos de um único
18  // quadrante e o percentual de colisão de cada quadrante
19   $highest = quads[0]$ 
20   $percPerQuad = \frac{100}{4^n}$ 
21  // calcula o percentual de colisão relativo entre os
22  // quadrantes através da quantidade de pontos existentes
23  // em cada quadrante
24   $sum = 0$ 
25  for  $\forall quad \in quads$  do
26  |  $sum+ = \frac{(quad * percPerQuad)}{highest}$ 
27  end
28  // sum é normalizado entre 0 e 1
29   $sum = \frac{sum}{100}$ 
30  // a intensidade é corrigida baseado no percentual de
31  // colisão do pulso laser e o alvo
32   $a.intensity = \frac{a.intensity}{sum}$ 
33 end

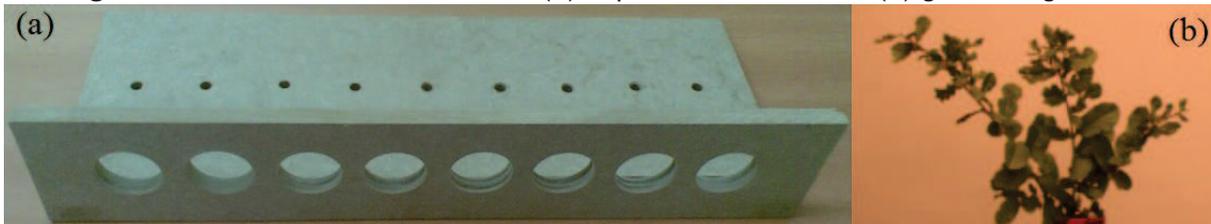
```

---

um tripé (Figura 32) e escaneados com as configurações de laser da Tabela 4. Após realizar a coleta dos dados com o laser, o dados foram convertidos para o formato XYZ. Juntamente com as informações disponíveis sobre o laser, foi definido um modelo matemático para a recuperação do valor de intensidade do laser. O escaneamento da goiabeira ocorreu anteriormente ao desenvolvimento deste trabalho, mas utilizada devido ao seu formato e verificação da existência do efeito de borda em alvos florestais completos e não somente em um galho.

A Tabela 4 mostra as configurações de escaneamento dos alvos. Os dois al-

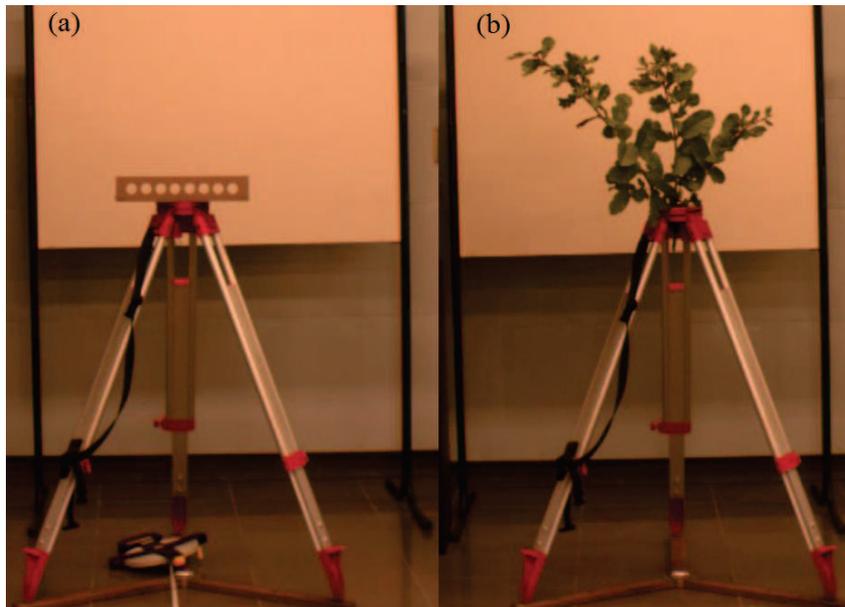
**Figura 31:** Alvos do escaneamento: (a) suporte de cameras e (b) galho de goiabeira



Fonte: Elaborada pelo autor.

vos, o suporte e o galho, foram posicionados a 5 metros e 10 metros de distância do laser. Nestas duas distâncias, foi variado o espaçamento do pulso laser para, após a exportação dos arquivos no formato XYZ e importação no *Mountain View* (Capítulo 5), visualizar e compreender os efeitos ocorridos na captura. Pôde-se visualizar os efeitos de borda (Figura 23) ao efetuar a clusterização dos pontos da nuvem utilizando a intensidade de retorno do pulso laser e o efeito de ruído (Figura 11) quando o espaçamento entre os centros dos pulsos laser é menor que o diâmetro destes pulsos.

**Figura 32:** Alvos posicionados em cima do tripé: (a) suporte de cameras e (b) galho de goiabeira



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, foi implementado este modelo no *Mountain View* (detalhado no Capítulo 5) e realizados os testes seguindo a seguinte premissa: Uma vez que para segmentar uma nuvem de pontos em que existe efeito de borda, precisa-se definir a quantidade de grupos desejada mais um, então recuperando os valores da intensidade do laser, não é mais necessário adicionar este grupo na segmentação. Ou, no caso de não ser possível eliminar o efeito de borda, a quantidade de pontos existentes no grupo do efeito de borda deve diminuir. Os resultados podem ser vistos no Capítulo 5.

**Tabela 4:** Configuração dos escaneamentos

<b>Alvo</b>	<b>Distância</b>	<b>Espaçamento</b>	<b>Pontos</b>	<b>Tempo (minutos)</b>
<b>Suporte</b>	5m	0.5mm	480.244	02:37
	5m	1.0mm	120.150	00:45
	5m	1.5mm	53.550	00:19
	5m	2.0mm	30.082	00:11
	5m	3.0mm	13.500	00:04
	5m	4.0mm	7.605	00:02
	5m	5.0mm	4.860	00:01
	5m	7.0mm	2.522	00:00
	5m	10.0mm	1.224	00:00
<b>Suporte</b>	10m	0.6mm	387.138	02:27
	10m	1.0mm	139.944	00:52
	10m	1.6mm	54.912	00:20
	10m	2.0mm	34.986	00:13
	10m	3.0mm	15.572	00:05
	10m	4.0mm	8.772	00:03
	10m	5.0mm	5.658	00:01
	10m	7.0mm	2.940	00:00
	10m	10.0mm	1.449	00:00
<b>Galho de goiabeira</b>	5m	0.5mm	2.408.423	37:53
	5m	1.0mm	602.910	04:42
	5m	1.5mm	268.082	02:25
	5m	2.0mm	150.876	01:31
	5m	3.0mm	67.122	00:25
	5m	4.0mm	37.846	00:14
	5m	5.0mm	24.157	00:08
	5m	7.0mm	12.325	00:04
	5m	10.0mm	6.120	00:02
<b>Galho de goiabeira</b>	10m	0.6mm	1.813.249	16:36
	10m	1.0mm	653.562	05:58
	10m	1.6mm	255.118	02:19
	10m	2.0mm	163.647	01:29
	10m	3.0mm	72.846	00:39
	10m	4.0mm	41.120	00:22
	10m	5.0mm	26.368	00:14
	10m	7.0mm	13.377	00:06
	10m	10.0mm	6.592	00:03

Fonte: Elaborada pelo autor.



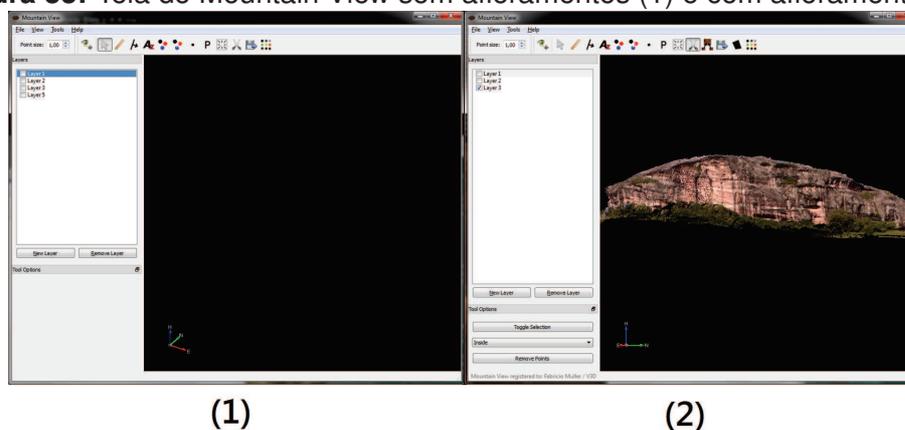
## 5 IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo detalha as implementações realizadas e as ferramentas utilizadas para o mesmo.

### 5.1 Mountain View

O Mountain View é um software desenvolvido pela empresa V3D em conjunto com o grupo de Visualização VIZLAB da UNISINOS para visualização e interpretação de afloramentos (Figura 33). Como este software foi desenvolvido com o intuito de visualizar uma grande quantidade de pontos, na casa de bilhões de pontos, e realizar a interpretação geológica de afloramentos, mas ele carece de algumas ferramentas necessárias para a preparação das nuvens de pontos para análise. Este software utiliza o conceito de ferramentas para o desenvolvimento de novas funcionalidades que trabalham diretamente com as nuvens de pontos importadas para ele. Portanto, as funcionalidades propostas por esta dissertação foram incorporadas neste software através de novas ferramentas. Não foram necessárias modificações no *core* da aplicação.

**Figura 33:** Tela do Mountain View sem afloramentos (1) e com afloramentos (2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como visto na Seção 2.1, os arquivos de formato XYZ e PTS são arquivos textos que contêm as informações das nuvens de pontos. Por serem arquivos textos, eles, geralmente, ocupam um grande espaço em disco para sua armazenagem. O *Mountain View* possui um formato de arquivos próprio que, além de diminuir o tamanho para armazenar os dados em disco, o acesso a estes arquivos é feito de forma rápida e sob demanda, fazendo com que a nuvem de pontos seja renderizada e carregada de forma progressiva e rápida. Cada arquivo importado para o software é importado para uma camada em separado.

## 5.2 Ferramentas no Mountain View

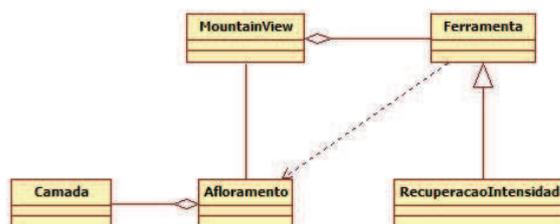
Ferramentas são funcionalidades adicionais criadas (Figura 34) que utilizam o *core* da aplicação. As funcionalidades do *core* são:

- *controle de camera*: o *Mountain View* possui um sistema de controle de câmera que permite que o usuário movimente a câmera no espaço 3D para a análise dos dados importados;
- *controle do pivot da câmera*: esta ferramenta permite a troca do pivot da câmera para controlar as rotações de visualização;
- *troca da cor de fundo*: como uma nuvem de pontos pode não preencher todo espaço de visualização, deve-se definir uma cor de fundo padrão. Em certos alvos, a troca dessa cor favorece a uma melhor visualização dos dados;
- *renderização de pontos*: esta ferramenta permite a renderização dos pontos baseada nas características dos pontos, como renderização por única cor, renderização por altura, renderização por retorno da intensidade do pulso laser e renderização pela cor do arquivo importado;
- *corte de visualização*: esta ferramenta permite que o usuário esconda uma parte selecionada do afloramento, visualizando somente a região de interesse, para uma melhor análise;
- *controle do tamanho dos pontos da nuvem*: para uma melhor visualização da nuvem de pontos, é possível aumentar ou diminuir o tamanho do ponto 3D no espaço;
- *controle de visibilidade de camadas de nuvens de pontos*: como diversos arquivos de nuvens de pontos podem ser importados para uma visualização agregada, existe a possibilidade de esconder e exibir cada nuvem de pontos independentemente, facilitando a interpretação dos dados pelos usuários;
- *visualização da nuvem de pontos*: a visualização é o sistema de carregar as informações do disco (armazenados segundo a importação dos dados dos arquivos XYZ e PTS) e mostrar para o usuário; e
- *importação da nuvem de pontos*: esta ferramenta importa os arquivos XYZ e PTS para o formato próprio do software

Outras ferramentas para análise geológica que encontram-se no *Mountain View* são: a) ferramenta de medida de distância e comprimento; b) ferramenta de análise

de planos (direção e mergulho); *c*) ferramenta de medida de azimute; e *d*) ferramenta de detalhe de pontos . Estas ferramentas não serão detalhadas por não fazerem parte do escopo do trabalho e, também, por não terem sido necessárias durante o trabalho.

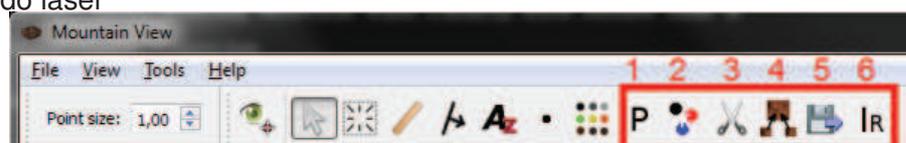
**Figura 34:** Diagrama de classes simplificado da estrutura de ferramentas, demonstrando como se adiciona as ferramentas ao Mountain View



Fonte: Elaborada pelo autor.

As novas ferramentas criadas, neste trabalho, e adicionadas no Mountain View (Figura 35) foram *a*) visualização das propriedades das camadas de nuvens de pontos; *b*) clusterização da nuvem de pontos (Capítulo 2.3); *c*) edição e limpeza da nuvem de pontos; *d*) exportação das nuvens de pontos para formatos conhecidos de arquivos de nuvens de pontos, como XYZ; e *e*) recuperação dos valores de intensidade do laser (Capítulo 4) .

**Figura 35:** Ferramentas criadas e adicionadas ao Mountain View: (1) visualização das propriedades de uma camada de nuvem de pontos; (2) clusterização da nuvem de pontos baseada na intensidade de retorno do laser; (3) remoção de pontos da nuvem; (4) concatenação de pontos de diferentes camadas; (5) exportador da nuvem de pontos e (6) recuperação da intensidade de retorno do laser



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além das ferramentas listadas acima, foram criadas outras ferramentas secundárias para auxiliar a visualização das informações sobre as camadas das nuvens de pontos. As informações agregadas na ferramenta de propriedade das camadas são: *a*) número de pontos que a camada contém; *b*) maior e menor *x*; *c*) maior e menor *y*; *d*) maior e menor *z*; e *e*) maior e menor valores de retorno de intensidade (*i*) do pulso laser .

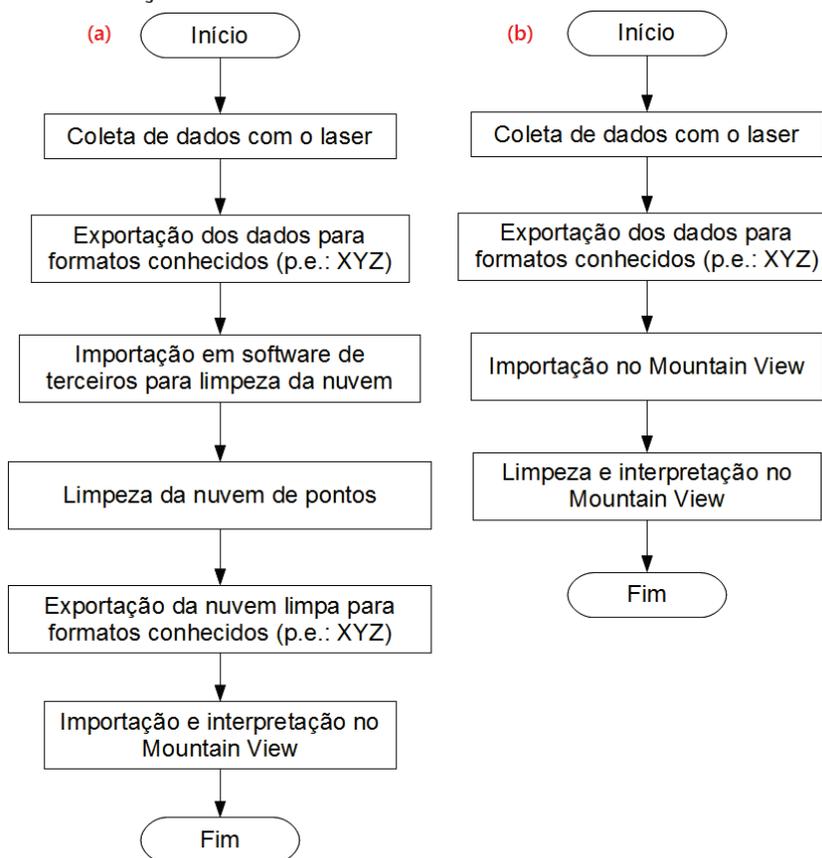
### 5.2.1 Edição e Limpeza da Nuvem de Pontos

Ao capturar dados com o laser e converter para os formatos conhecidos de nuvens de pontos, conforme explicado na seção 2.1.3, pontos não desejados podem ter

sido escaneados. Ou ainda, existe a necessidade de escanear uma região grande de uma só vez, como um afloramento inteiro, mas que será estudado em partes separadas. Levando em consideração as duas afirmativas acima, existe a necessidade de recortar e limpar uma nuvem de pontos capturada. Portanto, esta ferramenta foi criada para editar uma nuvem, recortando partes que serão estudadas em separado, e para limpar uma nuvem, removendo os pontos que não são desejados.

Além disso, esta ferramenta foi criada para que pudessem ser utilizados os dados brutos, capturados pelo laser e convertidos para o formato XYZ sem que houvesse a necessidade de passar as informações de posicionamento, intensidade e cor do afloramento por outro *software* intermediário que pudesse ocasionar alguma perda de informação, conforme o fluxograma do processo da Figura 36.

**Figura 36:** (a) Fluxograma do modelo antigo de utilização do Mountain View e (b) fluxograma do modelo atual de utilização do Mountain View



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.2 Clusterização da Nuvem de Pontos

Esta ferramenta é a que realiza a clusterização da nuvem de pontos baseado nas intensidades do laser. O usuário define a quantidade de grupos desejados, em

que os pontos da nuvem serão agrupados, e o *k-means* é executado realizando a separação dos grupos. Ela renderiza a nuvem de pontos de acordo com os grupos gerados (Figura 23).

### 5.2.3 Recuperação da Intensidade do Laser

Esta ferramenta é a que recupera os valores de intensidade do laser, corrigindo o efeito de borda. O algoritmo da recuperação da intensidade do laser foi visto no Capítulo 4.

Utilizar uma aplicação em desenvolvimento que possui diversas ferramentas prontas (e que serão necessárias para o desenvolvimento do trabalho, listadas anteriormente) é positivo, pois assim novas ferramentas agregam novas funcionalidades (que podem ser necessárias para outras pessoas e trabalhos) e é possível focar diretamente no problema que se quer resolver, sem a necessidade de criar tudo do zero.

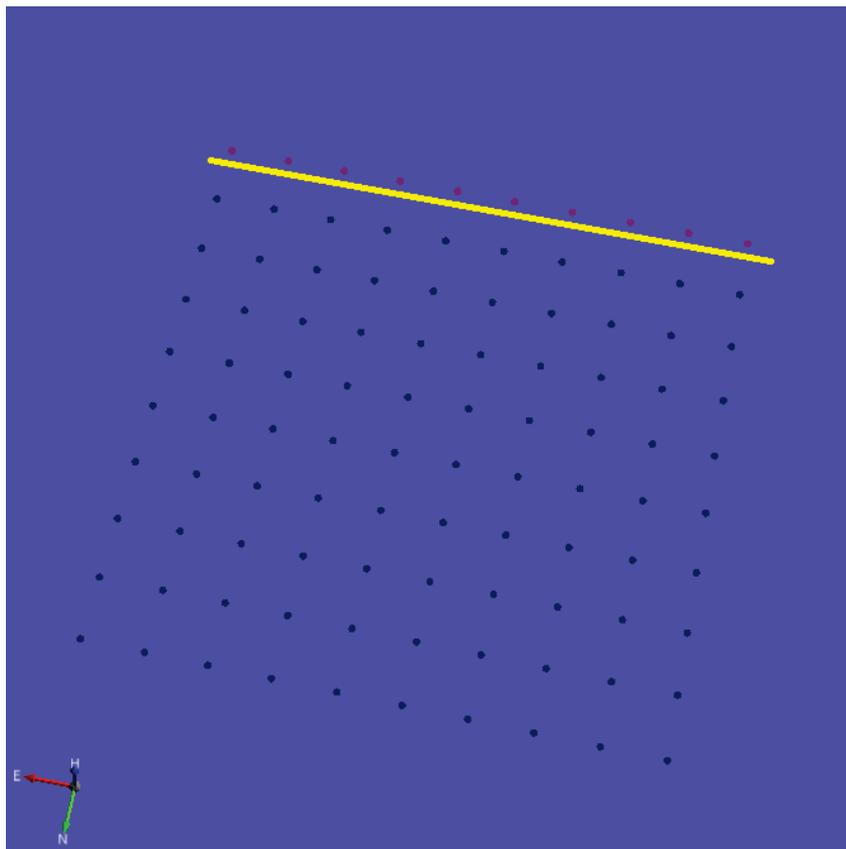
## 5.3 Resultados

Foram utilizados dois métodos para avaliar a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. Para o primeiro método foi criada uma nuvem de pontos sintética, onde todos os pontos possuem intensidade de retorno de valor 100. Apenas um subconjunto da nuvem possui intensidade de retorno de valor 50. Esta nuvem foi clusterizada (Figura 37) e os pontos foram divididos em dois grupos. Foi determinado que o grupo azul corresponde à intensidade correta, enquanto que o grupo lilás corresponde à intensidade do efeito de borda. Após rodar o algoritmo de recuperação do efeito de borda e clusterizar novamente a nuvem, todos os pontos da nuvem foram colocados em um único grupo (Figura 38). Ou seja, a intensidade de retorno do pulso foi corrigida em relação ao percentual de colisão. Os dados da nuvem sintética se encontram na Tabela 5.

Pode-se perceber que os pontos do efeito de borda que estão nos cantos da nuvem, tiveram um resultado ruim, pois a diferença entre o valor corrigido da intensidade é maior que a diferença do valor do efeito de borda e do valor correto da intensidade. Isto pode ser explicado da seguinte maneira: supondo que a nuvem sintética fosse um objeto quadrado (Figura 39) a colisão do pulso laser nos cantos do objeto faria com que a intensidade de retorno fosse menor que a intensidade dos pontos centrais, dado que o percentual de colisão nos cantos é menor que o percentual de colisão nos pontos centrais. No caso da Figura 39, pode-se perceber que a área em verde (parte do pulso laser que é perdido) do pulso laser no canto superior direito, é maior que no pulso laser no centro superior. Na nuvem sintética a linha de pontos que foi definida como efeito de borda possui todos os pontos com a mesma intensidade, o que em

um escaneamento real não aconteceria, pois os pontos dos cantos teriam uma intensidade menor que os pontos centrais. Ao mesmo tempo, percebe-se que utilizando a *quadtree* como estimativa de colisão dos pulsos laser, foi possível realizar uma estimativa mais perto da realidade, ou seja, nos cantos a estimativa de colisão é menor e no centro a estimativa de colisão é maior.

**Figura 37:** Nuvem sintética clusterizada antes da recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. A linha amarela mostra os pontos da nuvem que foram determinados como efeito de borda.

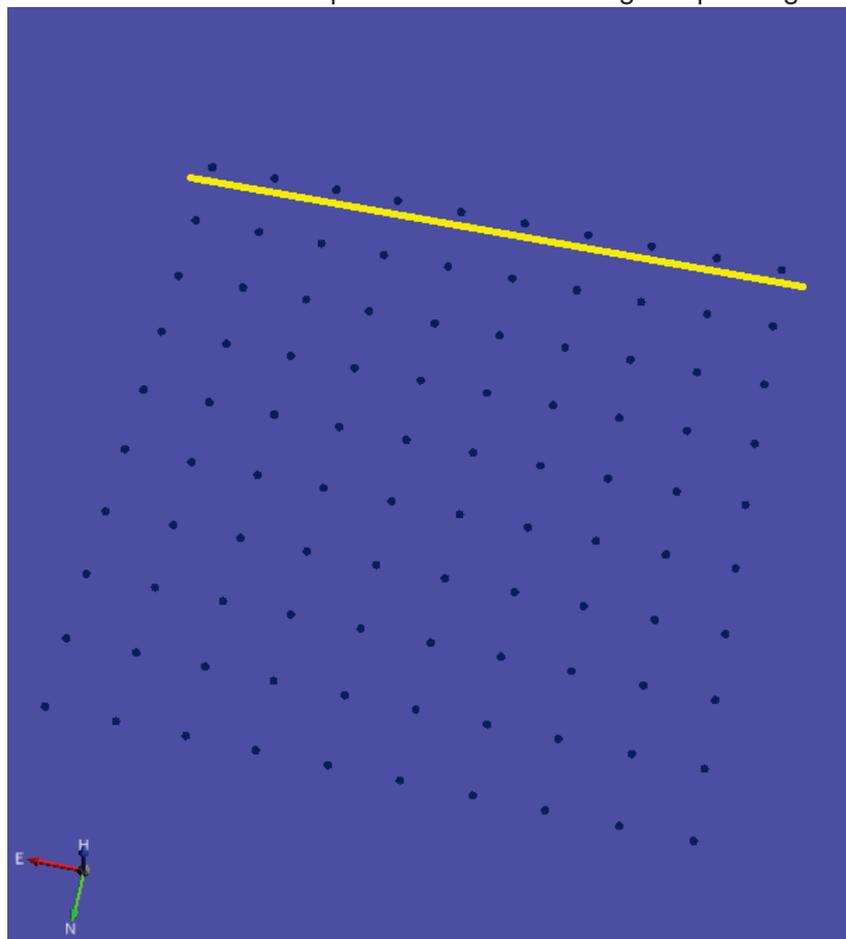


Fonte: Elaborada pelo autor.

O segundo método de avaliação do algoritmo foi utilizar uma nuvem de pontos real escaneada pelo TLS e aplicar o algoritmo de recuperação. Foi utilizada a nuvem de pontos do trabalho (INOCENCIO et al., 2013), onde diferentes tipos de rochas foram escaneadas por um TLS e onde o efeito de borda fica evidente após a clusterização da nuvem (Figura 40). Pode-se verificar na Figura 41 que, após a clusterização, existe uma borda em torno das rochas escaneadas. Inclusive, nota-se a perda das informações de intensidade da rocha mais a direita, pois tanto ela, quanto o efeito de borda foram clusterizados em um mesmo grupo.

Ao efetuar a recuperação do efeito de borda nesta nuvem de pontos, ainda percebe-se uma pequena borda (Figuras 42 e 43), onde seu tamanho é variável de acordo com os parâmetros passados para o algoritmo, ao redor dos objetos esca-

**Figura 38:** Nuvem sintética clusterizada após a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. A linha amarela mostra os pontos da nuvem corrigidos pelo algoritmo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

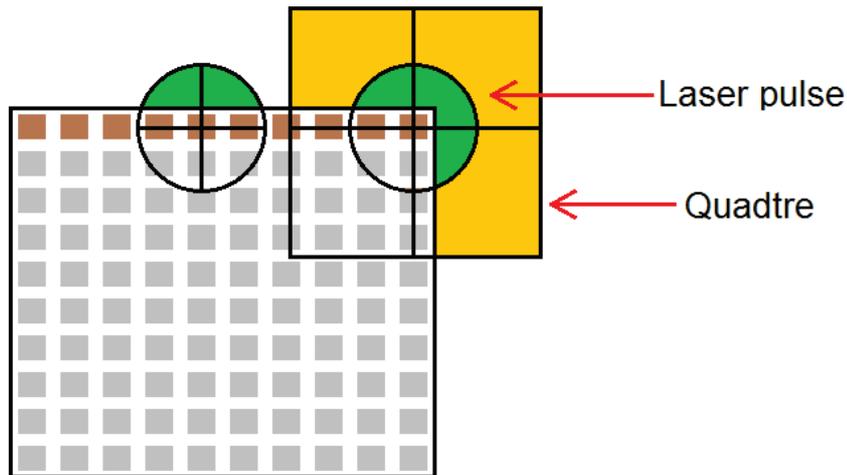
**Tabela 5:** Intensidades de retorno dos pulsos laser da nuvem sintética corrigidos pelo algoritmo

Original	Colisão	Intensidade Corrigida	Diferença (100)
50	30.8642%	162	62
50	34.7222%	144	44
50	34.7222%	144	44
50	46.2963%	108	8
50	55.5555%	90	10
50	50.9259%	98	2
50	43.6508%	114	14
50	39.6825%	126	26
50	30.8642%	162	62
50	30.5555%	163	63

Fonte: Elaborada pelo autor.

neados, mas as informações da intensidade de retorno do pulso laser estão mais plausíveis do que o escaneamento original (Figura 41). Na Figura 42 os parâmetros passados para o algoritmo foram menos exatos, ou seja, o espaçamento entre pon-

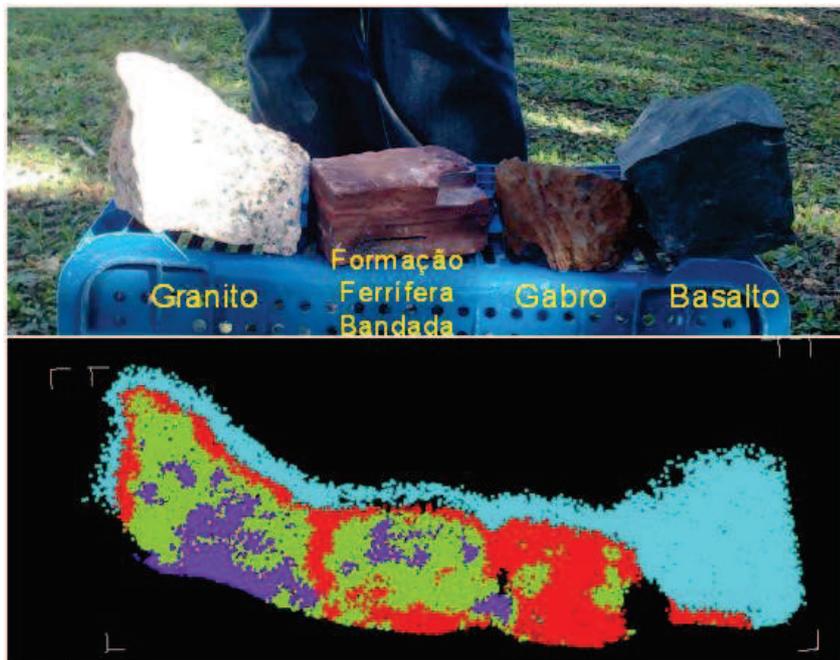
**Figura 39:** Detalhe dos cantos da nuvem de pontos sintética, onde os resultados ficaram ruins.



Fonte: Elaborada pelo autor.

tos foi maior que o do escaneamento e a *quadtree* foi de nível 1, enquanto que na Figura 43, os parâmetros passados foram mais exatos, ou seja, o espaçamento entre pontos foi mais próximo do escaneamento e a *quadtree* foi de nível 2.

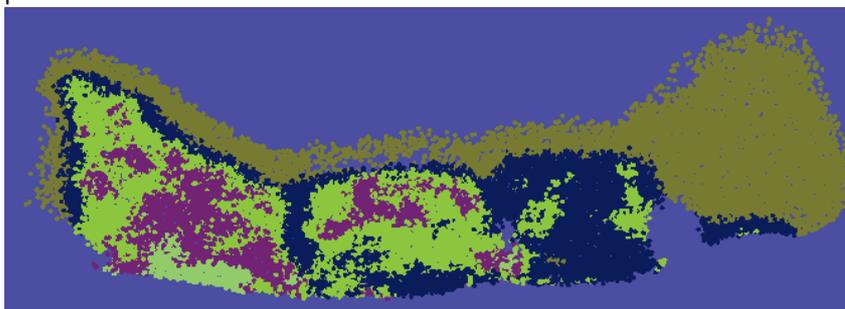
**Figura 40:** Amostra de diferentes tipos de rochas fotografadas, capturadas pelo TLS e clusterizadas



Fonte: (INOCENCIO et al., 2013)

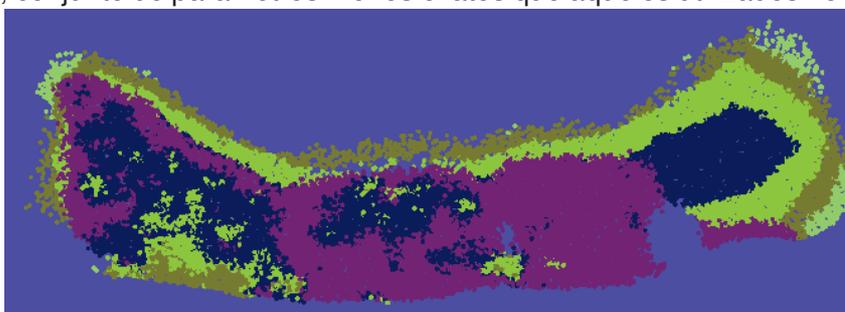
A nuvem de pontos da árvore foi clusterizada e, em seguida, recuperada a intensidade de retorno do pulso laser, utilizando o algoritmo elaborado neste trabalho. Foram escolhidos três grupos para a clusterização, um grupo foi escolhido representando as folhas, um grupo foi escolhido representando os caules e o último grupo foi

**Figura 41:** Amostra das rochas clusterizadas antes de efetuar a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser



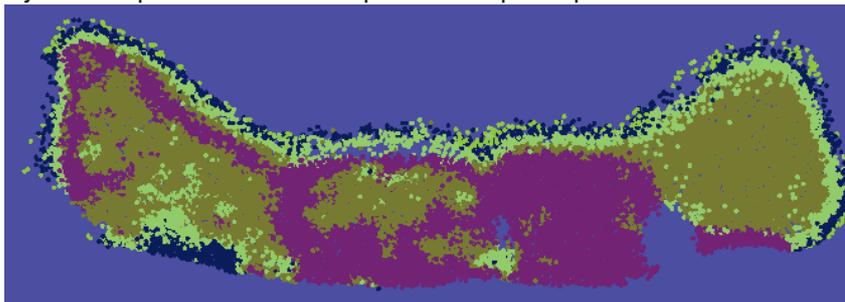
Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 42:** Amostra das rochas clusterizadas após a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser, conjunto de parâmetros menos exatos que àqueles utilizados no escaneamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 43:** Amostra das rochas clusterizadas após a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser, conjunto de parâmetros mais próximos que àqueles utilizados no escaneamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

escolhido representando o efeito de borda. Ou seja, um objeto com dois elementos (folhas e caules) foi clusterizado em três grupos adicionando o efeito de borda.

Após feita a clusterização, e antes de aplicar o algoritmo de recuperação da intensidade de retorno do pulso laser, foi feita a contagem de pontos existentes em cada grupo (Figura 44). O grupo do efeito de borda possuía 520.053 pontos, o grupo dos caules possuía 81.812 pontos e o grupo das folhas possuía 481.131 pontos (Tabela 6).

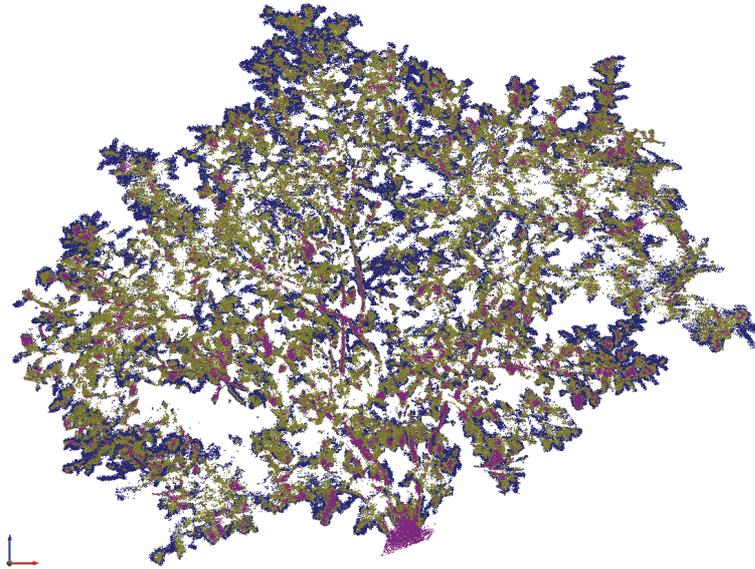
Após a contagem de pontos por cluster foi aplicado o algoritmo de recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. Em seguida, a nuvem foi clusterizada nova-

**Tabela 6:** Número de pontos por grupo da nuvem de pontos da árvore antes de aplicar o algoritmo de recuperação da intensidade

Grupo	Número de pontos
Borda	520.053
Caule	81.812
Folha	481.131

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 44:** Árvore clusterizada antes da aplicação do algoritmo de recuperação da intensidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

mente com os mesmos três grupos (Figura 45). O grupo do efeito de borda ficou com 250.844 pontos, o grupo dos caules ficou com 221.901 pontos e, por último, o grupo das folhas ficou com 610.251 pontos (Tabela 7).

**Tabela 7:** Número de pontos por grupo da nuvem de pontos da árvore depois de aplicar o algoritmo de recuperação da intensidade

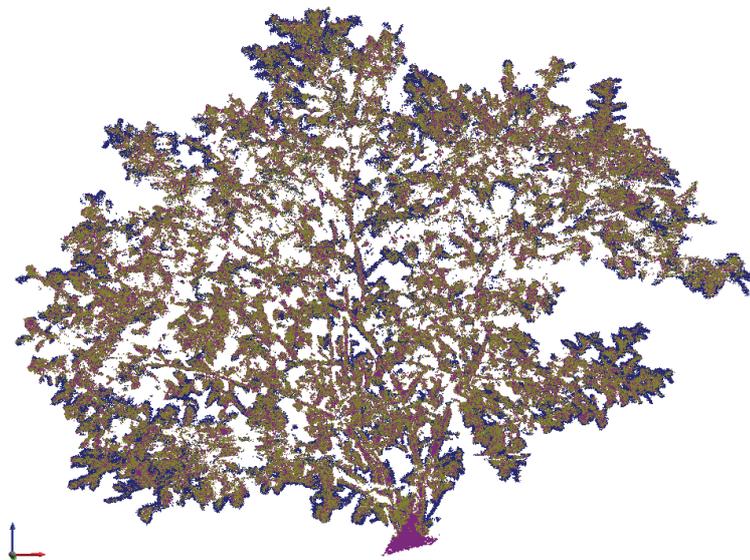
Grupo	Número de pontos
Borda	250.844
Caule	221.901
Folha	610.251

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os pontos do grupo do efeito de borda diminuíram enquanto que o número de pontos dos grupos de caules e de folhas aumentaram. Ocorrendo, exatamente, o que se esperava, não eliminando completamente o efeito de borda, mas diminuindo-o. O grupo do efeito de borda diminuiu aproximadamente 51,765%.

Os experimentos realizados em ambiente fechado descritos na Seção 4.4 foram

**Figura 45:** Árvore clusterizada após a aplicação do algoritmo de recuperação da intensidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

de grande valia para entender melhor a captura das nuvens de pontos com o laser *scanner* terrestre, mas não puderam ser utilizados para realizar a recuperação da intensidade de retorno do pulso laser. Isto se deve ao fato de que quando os alvos estão próximos do laser, as informações espectrais dos alvos são mascaradas pela força excessiva do pulso laser (INOCENCIO et al., 2013).



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi elaborado um algoritmo para recuperar o efeito de borda em alvos escaneados com *Terrestrial Laser Scanner*, removendo-o ou minimizando-o. O efeito de borda ocorre quando o pulso laser do scanner colide parcialmente com o afloramento, resultando em um valor de intensidade parcial, visto que parte do pulso se perde. Isto se torna um problema na análise qualitativa dos afloramentos, já que as informações espectrais dos alvos são perdidas devido ao efeito de borda. Assim, este é um problema existente e, ainda, não resolvido na análise de afloramentos.

A técnica nova para recuperar, ou minimizar, o efeito de borda da intensidade de retorno do pulso laser foi utilizada em uma nuvem sintética e em outra nuvem real para avaliá-la e, pelos resultados apresentados, conclui-se que através do algoritmo criado, é possível recuperar, ou minimizar, o efeito de borda. E, grande parte dos resultados alcançados só foram possíveis com os experimentos para entendimento da captura e utilização dos parâmetros corretos, tanto no momento da clusterização, quanto no momento da recuperação da intensidade.

Como este algoritmo proposto é novo, há a possibilidade de realizar melhorias. Para tanto, a implementação de um outro algoritmo de clusterização baseado em um método diferente do que de *centroids* (método do *k-means*) para avaliar as diferentes segmentações dos grupos de intensidades. A avaliação do algoritmo, que foi feito de duas formas. A primeira que analisa os resultados dos cálculos da recuperação possui poucos dados para ser significativa, ou seja, ainda deve-se utilizar uma nuvem de pontos maior e gerar dados estatísticos sobre os valores das intensidades. A segunda avaliação, sendo de forma empírica, apenas olhando o resultado da clusterização após a recuperação dos valores de intensidade, deve-se ser melhorada. Outras melhorias envolvendo o algoritmo, para minimizar a interação entre usuário e *software* seria utilizar a própria nuvem de pontos para descobrir a posição do laser, sem que o usuário precise informar manualmente. Ou, ainda, encontrar o número *k* que define a quantidade de grupos da clusterização das intensidades de retorno do laser, sem que o usuário necessite informar este valor. Ainda cabe a otimização do algoritmo criado.



## REFERÊNCIAS

- AGOSTON, M. K. **Computer graphics and geometric modeling**. [S.l.]: Springer, 2004.
- BERG, M.; CHEONG, O.; KREVELD, M. v.; OVERMARS, M. **Computational Geometry**: algoritms and applications. [S.l.]: Springer, 2008.
- BORDIN, F.; TEIXEIRA, E. C.; ROLIM, S. B. A.; TOGNOLIC, F. M. W.; VERONEZ, M. R.; SILVEIRA JUNIOR, L. G. da; SOUZA, C. F. N. de. Methodology for Acquisition of Intensity Data in Forest Targets Using Terrestrial Laser Scanner. **IERI Procedia**, [S.l.], v. 5, p. 238–244, 2013.
- BUCKLEY, S. J.; HOWELL, J. A.; ENGE, H. D.; KURZ, T. H. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. **Journal of the Geological Society**, London, v. 165, n. 3, p. 625–638, may 2008.
- BURTON, D.; DUNLAP, D. B.; WOOD, L. J.; FLAIG, P. P. Lidar intensity as a remote sensor of rock properties. **Journal of Sedimentary Research**, [S.l.], v. 81, p. 339–347, 2011.
- COREN, F.; VISINTINT, D.; PREARO, G.; STERAZI, P. Integrating LIDAR intensity measures and hyperspectral data for extracting of cultural heritage. In: ITALY-CANADA 2005 WORKSHOP ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, 2005. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2005.
- EITEL, J. U. H.; VIERLING, L. A.; LONG, D. S. Simultaneous measurements of plant structure and chlorophyll content in broadleaf saplings with a terrestrial laser scanner. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 114, n. 10, p. 2229–2237, 2010.
- GAN, G.; MA, C.; WU, J. **Data clustering**: theory, algorithms and applications. Philadelphia, PA: ASA-SIAM, 2007.
- GARCIA, M.; RIANO, D.; CHUVEICO, E.; DANSON, F. M. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**, [S.l.], v. 114, n. 10, p. 816–830, 2010.
- HÖFLE, B.; PFEIFER, N. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches. **Photogrammetry e Remote Sensing**, [S.l.], n. 62, p. 415–433, 2007.
- HODGETTS, D. Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: a review. **Marine and Petroleum Geology**, [S.l.], v. 46, p. 335–354, 2013.
- HUNTER, G. M.; STEIGLITZ, K. Linear Transformation of Pictures Represented by Quad Trees. **Computer Graphics and Image Processing**, [S.l.], v. 10, p. 289–296, 1979.
- INOCENCIO, L. C.; VERONEZ, M. R.; TOGNOLI, F. M. W.; SOUZA, M. K.; SILVA, R. M.; JUNIOR, L. G. S.; SILVEIRA, C. L. B. Spectral Pattern Classification in LIDAR Data for Rock Identification in Outcrops. **The Scientific World Journal**, [S.l.], 2013.

KLISE, K. A.; WEISSMANN, G. S.; MCKENNA, S. A.; NICHOLS, E. M.; FRECHETTE, J. D.; WAWRZYNIEC, T. F.; TIDWELL, V. C. Exploring solute transport and streamline connectivity using lidar-based outcrop images and geostatistical representations of heterogeneity. **Water Resources Research**, [S.l.], v. 45, n. 5, 2009.

LUTZ, E.; GEIST, T.; STÖTTER, J. Investigations of airborne laser scanning signal intensity on glacial surfaces—Utilizing comprehensive laser geometry modeling and orthophoto surface modeling (a case study: svartisheibreen, norway). In: ISPRS WORKSHOP ON, 2003. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003.

MAZZARINI, F.; PARESCHI, M. T.; FAVALLI, M.; ISOLA, I.; TARQUINI, S.; BOSCHI, E. Lava flow identification and aging by means of lidar intensity: mount etna case. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)**, [S.l.], v. 112, n. B2, 2007.

OPTECH. **ILRIS - Summary Specification Sheet**. Canadá, 2013. Disponível em: <[http://www.optech.ca/pdf/ILRIS\\_SpecSheet\\_110309\\_Web.pdf](http://www.optech.ca/pdf/ILRIS_SpecSheet_110309_Web.pdf)>. Acesso em: 04 abr. 2013.

POPESCU, S. C. Lidar Remote Sensing. In: ADVANCES IN ENVIRONMENTAL REMOTE SENSING: SENSORS, ALGORITHMS, AND APPLICATIONS, 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p. 57–84.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para Entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656 p.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning**: principles and processing. [S.l.]: CRC Press, 2009.

TU, C.; YU, L. Research on collision detection algorithm Based on AABB-OBB Bounding Volume. In: FIRST INTERNATIONAL WORKSHOP ON EDUCATION TECHNOLOGY AND COMPUTER SCIENCE, 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning — an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, [S.l.], v. 54, p. 68–82, 1999.