



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Área de Concentração: Geologia Sedimentar

Linha de Pesquisa: Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica

CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES ESPECTRAIS EM DADOS
LIDAR PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ROCHAS EM
AFLORAMENTOS

Leonardo Campos Inocencio

São Leopoldo
Junho de 2012.

LEONARDO CAMPOS INOCENCIO

**CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES ESPECTRAIS EM DADOS LIDAR
PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ROCHAS EM AFLORAMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração: Geologia Sedimentar, Linha de Pesquisa: Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez

SÃO LEOPOLDO
Junho de 2012.

158c Inocencio, Leonardo Campos
Classificação de padrões espectrais em dados LIDAR para a identificação de rochas em afloramentos / por Leonardo Campos Inocencio. -- São Leopoldo, 2012.

60 f. : il. color. ; 30 cm.

Com: artigo "Spectral pattern classification in LIDAR data for rock identification in outcrops".

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, RS, 2012.
Orientação: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez, Ciências Exatas e Tecnológicas.

1.Geologia. 2.Laser scanner terrestre. 3.Técnica LIDAR. 4.Classificação de padrões espectrais. 5.Modelos digitais de afloramentos. I.Veronez, Maurício Roberto. II.Título.

CDU 55
528.5

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252


A dissertação de Mestrado

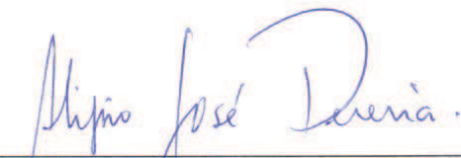
**"CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES ESPECTRAIS EM DADOS LIDAR PARA A
IDENTIFICAÇÃO DE ROCHAS EM AFLORAMENTOS"**


apresentada por **LEONARDO CAMPOS INOCENCIO**,

foi aceita e aprovada como atendimento parcial aos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM GEOLOGIA pela seguinte banca examinadora:


Prof.^a. Dr.^a. Ana Paula Camargo Larocca
Universidade de São Paulo


Dr. Alipio Pereira
Petróleo Brasileiro S.A.


Prof. Dr. Mauricio Roberto Veronez
Presidente da Banca Examinadora
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

São Leopoldo, 01 de agosto de 2012.

Dedicatória

Dedico à minha família pelo apoio, aos colegas do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital (LASERCA) e a todos da V3D pelo esforço dispendido no programa K-Clouds.

Agradecimentos

Ao orientador Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez.

Aos técnicos do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital - LASERCA/UNISINOS pelo suporte nas atividades.

À UNISINOS, pela concessão da bolsa Milton Valente de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geologia da UNISINOS.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro aos projetos NEAP (Núcleo de Estratigrafia Aplicada, Convênio 16 – SAP 4600242459) e “Mapeamento 3D Georreferenciado de Afloramentos Utilizando uma Técnica LIDAR (Light Detection And Ranging)”, (Termo de Cooperação 0050 0044869. 08.4 - SAP: 4600285973), ambos financiados pela Rede Tecnológica em Sedimentologia e Estratigrafia.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), por meio do projeto "Modelos Digitais de Afloramentos como ferramenta na análise e interpretação geológica" (Edital 01/2010 - Processo 10/0477-0).

RESUMO

O presente estudo visou o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para a detecção e classificação de diferentes respostas espectrais em nuvens de pontos obtidas a partir de escâner a *laser* terrestre (*Laser Scanner* Terrestre) com o intuito de identificar a presença de diferentes rochas em afloramentos e a geração de um Modelo Digital de Afloramento. A ferramenta para a classificação de padrões espectrais, denominada K-Clouds, foi desenvolvida com base em análise de agrupamentos (*clusters*), que a partir de uma indicação do número de classes fornecido pelo usuário através da análise de um histograma dos dados, realiza a classificação da nuvem de pontos. Os dados classificados podem então ser interpretados por geólogos para uma melhor compreensão e identificação das rochas presentes no afloramento. Além da detecção de diferentes rochas, verificou-se que é possível detectar pequenas alterações nas características físico-químicas das mesmas, como aquelas causadas por intemperismo e variação composicional.

Palavras-chave: *Laser Scanner* Terrestre, LIDAR, Modelo Digital de Afloramento, Classificação de Respostas Espectrais, Análise de Agrupamentos.

ABSTRACT

The present study aimed to develop and implement a method for detection and classification of spectral signatures in point clouds obtained from Terrestrial Laser Scanner in order to identify the presence of different rocks in outcrops and to generate a Digital Outcrop Model. To achieve this objective, a software based on cluster analysis was created, named K-Clouds. This software was developed through a partnership between UNISINOS and the company V3D. This tool was designed to, beginning with an analysis and interpretation of a histogram from a point cloud of the outcrop and subsequently indication of a number of classes provided by the user, process the intensity return values. This classified information can then be interpreted by geologists, to provide a better understanding and identification from the existing rocks in the outcrop. Beyond the detection of different rocks, this work was able to detect small changes in the physical-chemical characteristics of the rocks, as they were caused by weathering or compositional changes.

Keywords: Terrestrial *Laser* Scanner, LIDAR, Digital Outcrop Model, Spectral Classification, *Cluster* Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Princípio de funcionamento do método Tempo de Vôo	12
Figura 2 – Princípio de funcionamento do método Diferença de Fase	13
Figura 3 – Laser Scanner Ilris 3D em operação em afloramento	14
Figura 4 – Localização das áreas de estudo	18
Figura 5 – Detalhe de uma das faces do afloramento Morro do Papaléo utilizada para testes com o classificador	19
Figura 6 – Área de estudo B – Afloramento Pedra Pintada	20
Figura 7 – Teste inicial com amostras a 60 metros do scanner	22
Figura 8 – Interface do Programa K-Clouds (Parceria V3D/UNISINOS)	26
Figura 9 – Nuvem de Pontos classificada das amostras	28
Figura 10 – Histograma de intensidade da nuvem de pontos - Área de Estudo A	29
Figura 11 – Nuvem de Pontos classificada do afloramento Papaléo	29
Figura 12 – Histograma de intensidade da nuvem de pontos - Área de Estudo B	30
Figura 13 – Nuvem de Pontos do afloramento Pedra Pintada classificada	31

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	09
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 - <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE	12
2.1.1 - Optech Iiris3D	13
2.2 - <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE EM ESTUDOS GEOLÓGICOS	15
2.3 - CLASSIFICAÇÃO	16
3 - ÁREA DE ESTUDO	18
4 - MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 - DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS DE TRABALHO	21
4.2 - LEVANTAMENTOS DAS ÁREAS DE ESTUDO E PREPARAÇÃO DOS DADOS ...	23
4.3 - PROGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO K-CLOUDS	25
5 - RESULTADOS	27
6 - CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
APÊNDICE A – ARTIGO CIENTÍFICO SUBMETIDO PARA O ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING	40

1 - INTRODUÇÃO

A Geologia, assim como outras ciências, usufrui de avanços tecnológicos para desenvolver cada vez mais os seus métodos de trabalho e ampliar os conhecimentos específicos da sua área de estudo. Continuamente são desenvolvidos novos equipamentos e métodos para subsidiar essas aplicações e, dentre todos os equipamentos e sistemas desenvolvidos nos últimos anos, os sistemas de varredura e perfilamento a *laser* vêm se consolidando como uma das mais eficazes tecnologias de aquisição de dados geoespaciais.

A coleta automatizada de dados expandiu-se rapidamente nos últimos anos, alinhada com os avanços tecnológicos realizados nas áreas de levantamentos e mapeamentos (Buckley *et al.*, 2008). A utilização desses equipamentos para estudos geológicos foi um passo natural e lógico, tendo em vista que a obtenção e utilização de dados provenientes de afloramentos é a principal fonte para os trabalhos de geologia de superfície.

Os sistemas de varredura e perfilamento a *laser*, também conhecidos como *Laser Scanner* Terrestre, possuem algumas características que se aplicam de forma importante em finalidades geológicas tais como a rápida aquisição de dados de um determinado afloramento a distâncias que podem alcançar 2 quilômetros, a definição da resolução espacial, ou seja, o espaçamento entre os pontos coletados a um determinada distância e o alto nível de precisão do levantamento.

Os equipamentos disponíveis atualmente no mercado são capazes de realizar o levantamento e coleta de milhares (sistema de tempo de voo) a até milhões (sistema de diferença de fase) de pontos por segundo e alguns dispõem da capacidade de gravar a intensidade do pulso de retorno do *laser* para cada posição X/Y/Z (Bellian *et al.*, 2005). A intensidade de retorno do *laser* e o alcance do equipamento estão diretamente relacionados a alguns fatores que afetam o funcionamento do sistema. Entre esses fatores pode-se citar a potência do pulso emitido e a refletividade dos alvos.

A relação entre a refletividade dos alvos e a intensidade do *laser* emitido é diretamente proporcional ao alcance do *Laser Scanner*, ou seja, se um determinado

alvo possui 10% de refletividade, o equipamento deverá estar muito mais próximo do que um alvo que possui 90% de refletividade (Petrie & Toth, 2009).

Da mesma forma que outros sistemas de sensoriamento remoto ativo, os sistemas de *Laser Scanner* possuem somente um comprimento de onda, ou seja, a intensidade do retorno se baseia na interação do *laser* de comprimento de onda específico com o alvo. Essa interação pode ser analisada por meio de técnicas de interferometria, que é o estudo dos fenômenos causados por interferência nas ondas de luz, que, nesse caso, é a interação entre o comprimento de onda do *laser* e as características físico-químicas dos alvos (Hariharan, 2007).

Na medida em que utilizamos um sistema *Laser Scanner* para executar o levantamento de um afloramento, obtemos não apenas suas características espaciais, como feições e volumes, mas podemos também obter dados adicionais que podem permitir um maior entendimento desse afloramento.

Em sua maioria, cada equipamento de *Laser Scanner* Terrestre gera um formato próprio de arquivo dos dados coletados. Porém, esses arquivos possuem similaridades em relação às informações contidas. Os arquivos baseiam-se em uma estrutura onde são armazenadas as coordenadas dos pontos no espaço (X, Y e Z) ou coordenadas UTM (N, E e Altura Elipsoidal), o valor de intensidade de retorno do pulso *laser* (i) e, caso haja disponibilidade, os valores provenientes da câmera fotográfica digital (RGB) tanto interna ou externa, gerando uma sequência (X,Y,Z,i,R,G,B).

As informações espaciais são comumente utilizadas para cálculos de volume e identificação de feições geométricas. Os dados RGB auxiliam na identificação visual de feições e propiciam uma melhor compreensão dos objetos levantados com o *laser*, porém quando se trata dos valores de intensidade de retorno do pulso *laser*, existe uma falta de aplicações específicas para a utilização dessa informação, que pode fornecer variações das características físico-químicas dos alvos.

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para classificação de padrões espectrais em dados LIDAR para a identificação de rochas em afloramentos com características litológicas distintas. A viabilidade do método ocorreu por meio da implantação de um algoritmo de análise de agrupamentos conhecido como *k-means*. A escolha desse algoritmo se deu pela

separação das respostas espectrais de rochas com características distintas, tanto químicas e/ou físicas. Isso permitiu classificar os padrões de resposta espectral e, dessa maneira, identificar rochas e feições presentes nos afloramentos. Esse classificador foi incorporado ao rol de ferramentas do programa Mountain View (parceria V3D/UNISINOS), que permite visualizar, editar e processar dados provenientes de *Laser Scanner* Terrestre e com aplicação principal voltada para a modelagem tridimensional de afloramentos.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - LASER SCANNER TERRESTRE

Os sistemas de varredura e perfilamento a *laser*, neste caso terrestre, consistem basicamente em um instrumento de medição baseado em *laser* que consegue medir ângulos verticais, horizontais e distâncias com um alto padrão de precisão e velocidade, por meio de um sistema de espelhos ou prismas móveis que permitem o mapeamento de feições topográficas de um alvo.

Esses sistemas podem possuir diversos métodos para a obtenção das distâncias, sendo os métodos de Tempo de Vôo (*Time of Flight* – TOF) (Fig. 1) e Diferença de Fase (*Phase Shift* - PS) os mais difundidos. No método de Tempo de Vôo o instrumento envia um pulso *laser* de alta intensidade em direção ao alvo, medindo o tempo entre o envio e o recebimento do pulso de retorno e dividindo por 2 para o cálculo da distância.

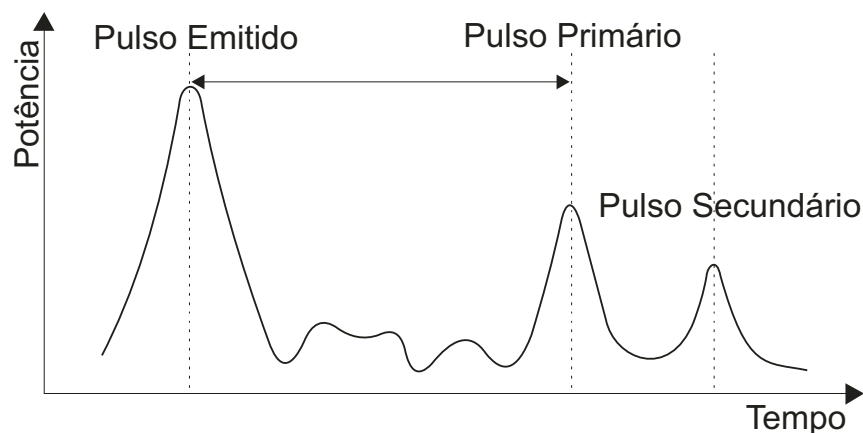


Figura 1: Princípio de funcionamento do método Tempo de Vôo. Modificado de San Jose Alonso *et al* (2011)

No método de Diferença de Fase o instrumento envia um feixe *laser* ajustado com uma onda harmônica e a distância é calculada por meio da comparação da diferença das ondas transmitidas e recebidas (Ergün, 2011) (Fig. 2).

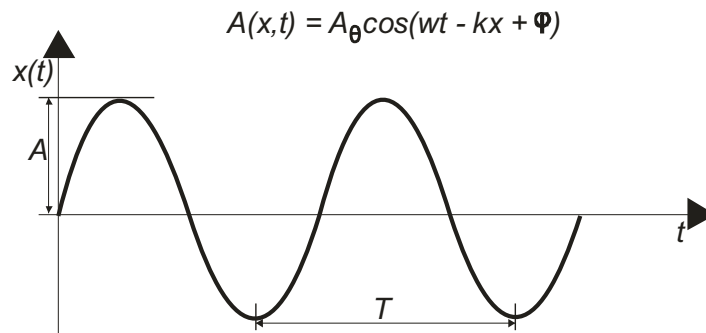


Figura 2: Princípio de funcionamento do método Diferença de Fase. Modificado de San Jose Alonso *et al* (2011)

Ambos os métodos de aquisição de dados possuem pontos positivos e negativos, devido ao tipo de método aplicado para a aquisição de dados. Os equipamentos que utilizam a tecnologia de diferença de fase tendem a coletar mais pontos no mesmo intervalo de tempo, da ordem de milhões de pontos por segundo, enquanto que os de pulso restringem-se a milhares de pontos por segundo, porém, possuem um alcance reduzido, de 80 a 120 metros contra até 2 quilômetros em alguns equipamentos de pulso. Outro fator a ser considerado é que a operação de equipamentos de fase em condições de grande insolação pode reduzir o alcance do equipamento.

Todos os elementos acima devem ser levados em consideração no momento de selecionar o equipamento mais adequado ao tipo de trabalho a ser realizado, sendo neste caso, a aplicação voltada para modelagem tridimensional de afloramentos.

2.1.1 – Laser Scanner Iiris 3D

O *laser scanner* terrestre Iiris3D (Fig.3), desenvolvido pela empresa canadense Optech apresenta as seguintes características técnicas descritas abaixo (Optech, 2009):

- Alcance variável entre 400 metros, para objetos com refletância de 10%, e 1200 metros, para objetos com 80% de refletância, tendo um alcance mínimo de 3 metros;
- Possui uma precisão linear de 7 milímetros e uma precisão angular de 8 milímetros, ambos a uma distância de 100 metros do equipamento;

- A divergência de seu *laser*, de $0,00974^\circ$, faz com que, em uma distância de 100 metros do equipamento, o diâmetro do raio *laser* emitido seja de 2,2 centímetros;
- O seu *laser* de classe 1, seguro para o olho humano, opera em uma frequência de 1535 nm, ou seja, na faixa do infravermelho médio;
- O Ilris 3D opera no modo de janela, ou seja, em cada posição do equipamento ele possui um campo de visada de 20° em todas as direções, perfazendo uma janela total de $40^\circ \times 40^\circ$.
- Possui integrada uma câmera digital de 3.1 Mpixel, localizada fora do eixo central do equipamento, o que causa uma distorção de paralaxe em objetos localizados a menos de 35 a 40 metros do equipamento.



Figura 3: *Laser Scanner Ilris 3D* em operação em afloramento.

2.2. LASER SCANNER TERRESTRE EM ESTUDOS GEOLÓGICOS

A representação digital nos estudos geológicos evoluiu a partir de estudos com imagens de satélite LANDSAT, de modelos digitais de terrenos conjugados com processamento de imagens (e.g., Arnot *et al.*, 1997) e de técnicas de aerofotointerpretação conjugada com os sistemas de navegação global (GNSS) (e.g., Maerten *et al.*, 2001). Nos últimos dez anos vêm crescendo o uso de tecnologias de mapeamento digital, em especial com o uso de *laser scanner* terrestre e equipamentos de levantamento topográfico, integrados com os sistemas de navegação por satélite e de informações geográficas (Xu *et al.*, 2000, 2001; Alfarhan *et al.*, 2008), que substituem com inúmeras vantagens os mosaicos fotográficos (fotomontagens), rotineiramente utilizados na interpretação de afloramentos de grandes dimensões.

O uso do *Laser Scanner* Terrestre em estudos de afloramentos vem se expandindo em função da facilidade na aquisição de dados georreferenciados de forma precisa, rápida e automatizada. Sua utilização para esse fim começou há cerca de uma década (Bellian *et al.*, 2002), mas somente nos últimos anos o número de artigos científicos aumentou significativamente. Os temas de interesse são variados, com destaque para as abordagens metodológicas (Bellian *et al.*, 2005; Enge *et al.*, 2007; Buckley *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2008; White & Jones, 2008), estudos de análogos de reservatórios (Pringle *et al.*, 2004; Phelps & Kerans, 2007; Fabuel-Perez *et al.*, 2009; Kurtzman *et al.*, 2009; Rotevatn *et al.*, 2009; Verwer *et al.*, 2009; Enge & Howell, 2010; Fabuel-Perez *et al.*, 2010), de rochas fraturadas (Bellian *et al.*, 2007; Olariu *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2009; Zahm & Hennings, 2009), de estabilidade de taludes (Nagalli *et al.*, 2011), de taxas de erosão (Wawrzyniec *et al.*, 2007), de modelos sísmicos sintéticos (Janson *et al.*, 2007); na visualização de patrimônios geológicos (Bates *et al.*, 2008); na determinação do sentido do fluxo de lavas basálticas (Nelson *et al.*, 2011) no ensino em geologia (McCaffrey *et al.*, 2008, 2010) e na interpretação geológica de afloramentos (Ferrari *et al.*, 2012).

2.3 - CLASSIFICAÇÃO

O termo classificação pode ser definido como um arranjo real ou ideal, associando aquilo que é similar e separando aquilo que é diferente, tendo como objetivos principais manter e formar conhecimento, analisar e relacionar a estrutura de determinados fenômenos (Mirkin, 1996). Se aplicarmos essa definição para a geologia, especificamente em classificação de afloramentos, torna-se claro que o primeiro e principal elemento a ser identificado e classificado são as rochas presentes no local. Tal informação visa expandir o conhecimento do geólogo com relação aos elementos presentes no afloramento, permitindo uma maior compreensão dos processos e dos materiais existentes.

Em processamento digital de imagens, diferentes classificadores são consagrados, sejam eles aplicados a uma finalidade específica ou aplicados a uma finalidade genérica, ou mesmo permitindo seu uso para aplicações em uma ferramenta de classificação que seja ao mesmo tempo específica e genérica, sendo abordados a seguir.

Trabalhos como os desenvolvidos por Brodu & Lague (2012) e Franceschi *et al* (2009), visam aplicar métodos distintos de classificação em dados de *Laser Scanner* Terrestre para extração de informações. Essas ferramentas de classificação, sejam elas simples ou complexas, permitem que os grandes volumes de dados (da ordem de milhares a milhões de pontos) provenientes dos levantamentos realizados com *laser*, possam ser processados de maneira relativamente rápida e confiável.

Nas diversas metodologias para classificação de dados, o agrupamento de dados (*clustering*), também chamado de análise de *cluster*, análise de segmentação, análise de taxonomia, ou classificação não supervisionada, é um método de criação de grupos de objetos que em um primeiro momento realiza o agrupamento de todos os objetos que possuem um grande grau de similaridade entre si, sempre garantindo que objetos muito diferentes não pertençam ao mesmo agrupamento (*cluster*).

As técnicas de agrupamento de dados são muitas vezes confundidas com classificação, em que objetos são atribuídos a classes pré-definidas. No agrupamento de dados, as classes também devem ser definidas (Gan *et al*, 2007).

Comparados com outros tipos de algoritmos de classificação, os algoritmos baseados em *clusters* são muito eficientes para a classificação de grandes bases de dados e dados multidimensionais (Gan *et al*, 2007).

O classificador k-means, inicialmente descrito por MacQueen (1967), é um classificador de *cluster* que realiza um processo de particionamento de uma população N em k classes. Essas partições representam de forma satisfatória a variação interna ocorrida dentro de cada classe. Além do descrito acima, o classificador *k-means* é facilmente programável e computacionalmente econômico, sendo capaz de processar grandes volumes de dados em aplicações como agrupamento por similaridade, predição não-linear, aproximação de distribuições multivariadas e testes não paramétricos, entre outros (MacQueen, 1967).

Tais funcionalidades tornam-se adequadas para uso em aplicações ligadas a geologia, onde as áreas de estudo podem ser compreendidas em poucos metros ou mesmo vários quilômetros. Esta variabilidade de escala, juntamente com o tipo de separação de dados realizado pelo classificador *k-means*, que é capaz de exibir padrões discretos de variação, permite uma compreensão adequada dos dados.

3 - ÁREAS DE ESTUDO

Para o presente trabalho foram selecionadas duas áreas de estudo, localizadas nos municípios de Mariana Pimentel e Caçapava do Sul, ambos no Estado do Rio Grande do Sul (Fig. 4). Além das áreas de estudo também foram realizados testes iniciais com amostras para a definição do método de trabalho a ser utilizado no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital (LASERCA) da Unisinos.

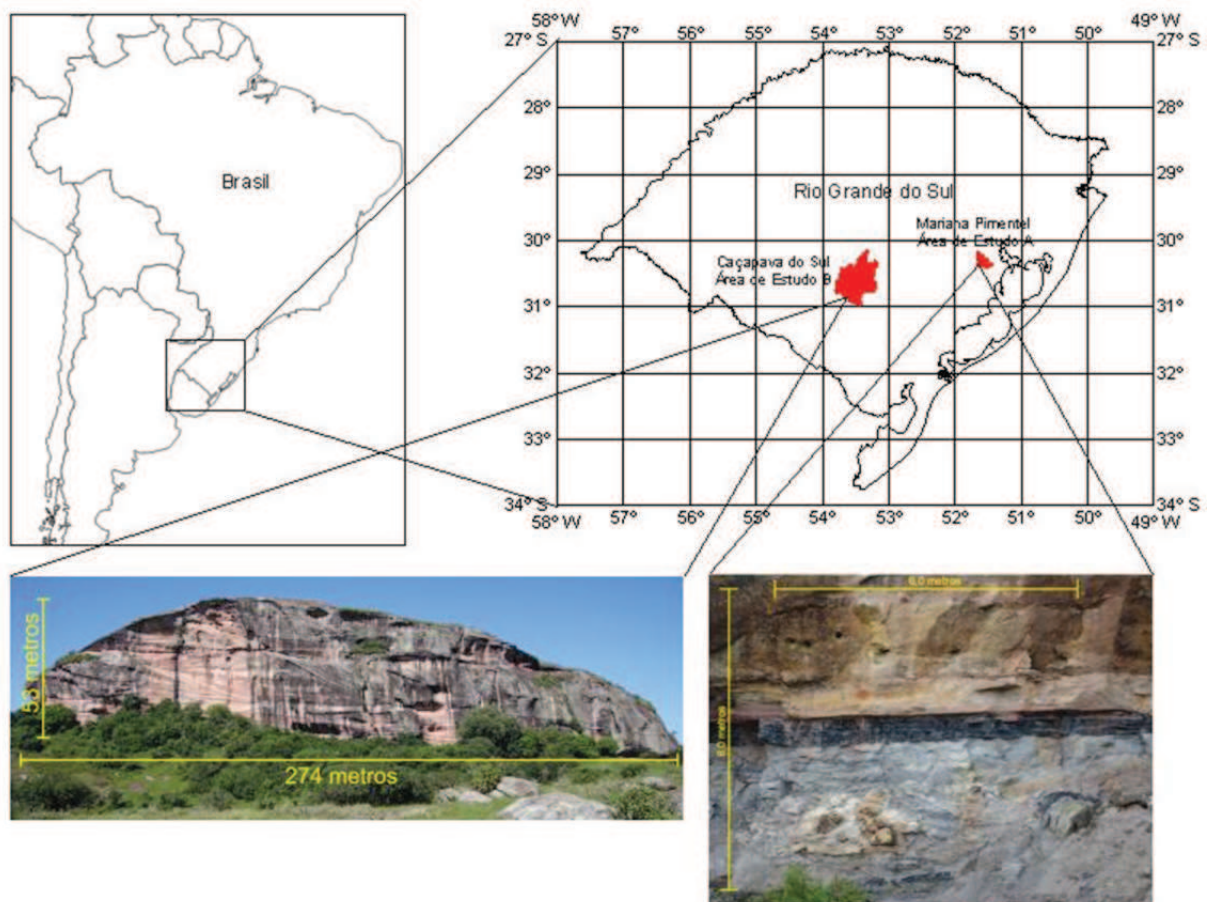


Figura 4: Localização das áreas de estudo.

A área de estudo A localiza-se no município de Mariana Pimentel, a aproximadamente 80 km de Porto Alegre com acesso pela Rodovia BR-116 e após por estradas municipais e particulares. Nesse local encontra-se o afloramento denominado Morro do Papaléo nas coordenadas: Latitude $30^{\circ}18'29,56''$ S e Longitude $51^{\circ}38'35,26''$ W. Gr. (SIRGAS 2000). Esse afloramento da Formação Rio Bonito, de idade permiana, foi escolhido por sua sucessão sedimentar ter rochas

distintas, como diamictito, pelito carbonoso e arenito, respectivamente da base para o topo. Em uma das faces do afloramento foi selecionada uma área de aproximadamente 36 metros quadrados (6m x 6m) para testes do classificador desenvolvido (Fig. 5).

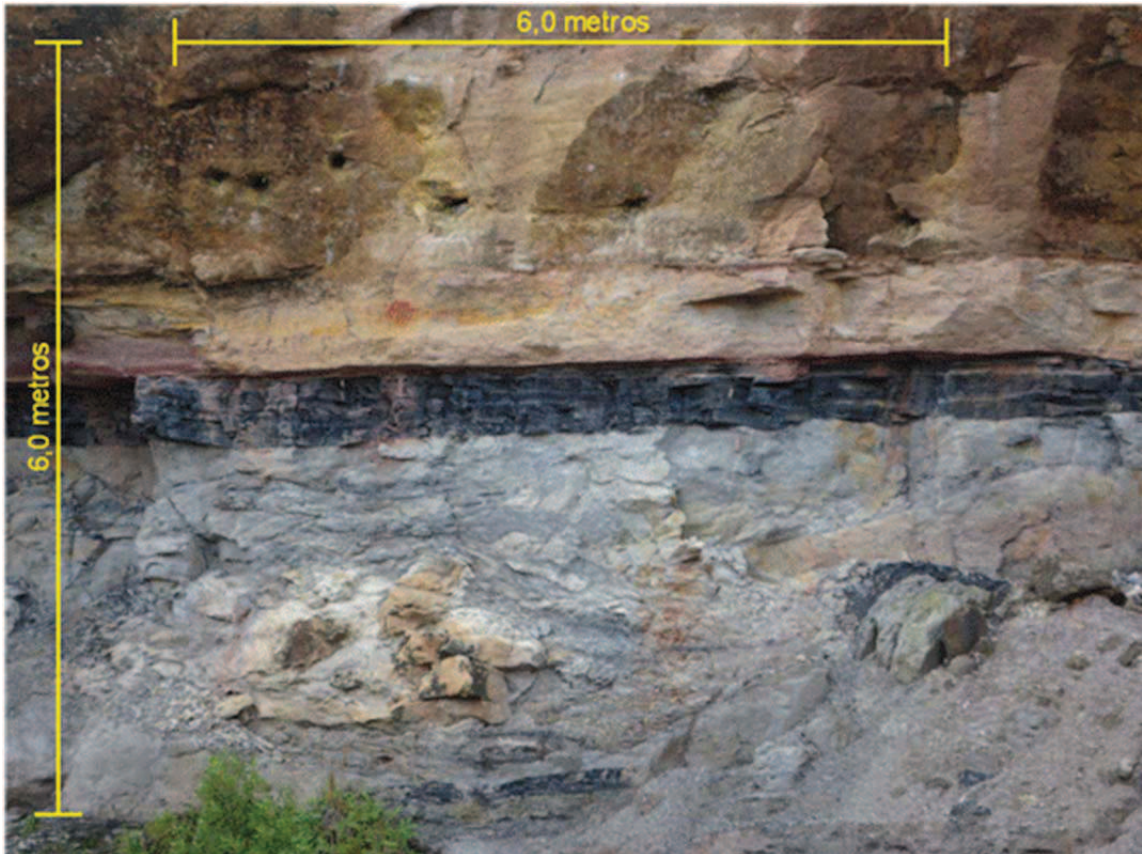


Figura 5: Detalhe de uma das faces do afloramento Morro do Papaléo utilizada para testes com o classificador.

A área de estudo B localiza-se no município de Caçapava do Sul, a aproximadamente 330 km de Porto Alegre com acesso pelas Rodovias BR-290, BR-392 e RS-625. Nesse local situa-se o afloramento denominado Pedra Pintada, nas coordenadas: Latitude 30°53'56,22" S e Longitude 53°21'37,17" W. Gr. (SIRGAS 2000). Este afloramento pertence à Aloformação Pedra Pintada e é formado por arenitos finos a médios, bem selecionados, constituídos de grãos bem arredondados e com alta esfericidade, estruturados em sets com estratificação cruzada de até 15 m de espessura (Paim *et al*, 2010). Neste afloramento foi selecionada uma extensão de aproximadamente 165 m da face principal do afloramento, no lado sul (Fig. 6).

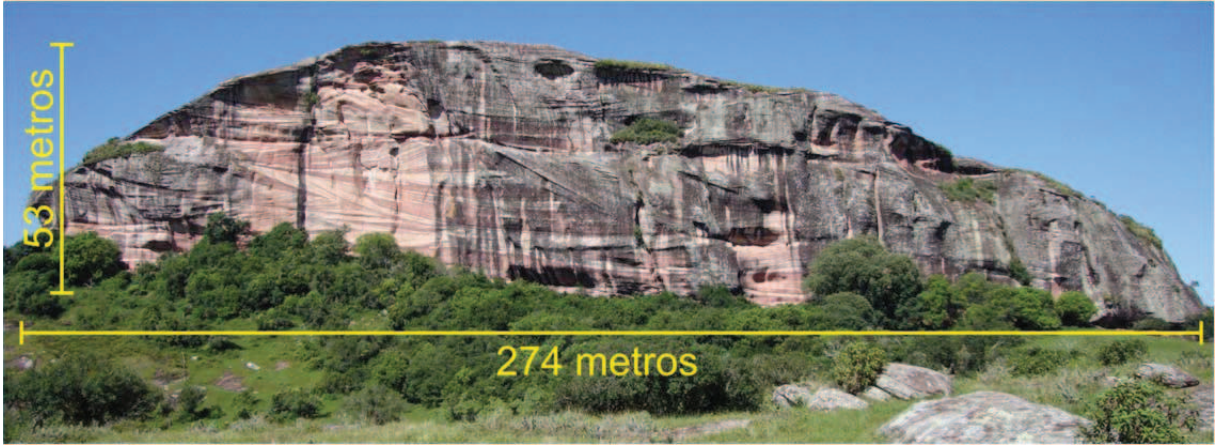


Figura 6: Área de estudo B – Afloramento Pedra Pintada.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

A operação de equipamentos de *laser scanner* terrestre pode ser descrita como uma atividade simples, mas que apresenta detalhes importantes e requer um conhecimento específico da finalidade de uso para permitir um total aproveitamento da capacidade do equipamento. Características básicas como alcance, tanto mínimo quanto máximo, comportamento espectral dos alvos de interesse e resolução ideal a ser utilizada são elementos indispensáveis no planejamento para a obtenção de dados tridimensionais de afloramentos, incluindo os dados utilizados para a classificação espectral.

4.1 - DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE TRABALHO

Os testes iniciais aqui descritos objetivaram a determinação da capacidade do equipamento utilizado em fornecer dados viáveis para o processamento espacial e espectral, bem como, após a análise dos dados disponíveis, a definição da metodologia de trabalho a ser utilizada. Para tal, amostras de diversas rochas foram colocadas sobre uma bancada localizada a aproximadamente 6 metros de distância do equipamento *laser scanner*. Essas amostras foram imageadas com uma alta resolução, aproximadamente 1 milímetro de distância entre os pontos. Entre as rochas utilizadas encontravam-se amostras de granito, arenito, basalto, diamictito e pelito carbonoso.

A primeira característica ressaltada a partir do levantamento das amostras foi o enorme ruído apresentado no levantamento. Em uma análise visual inicial torna-se difícil a identificação correta das amostras, sendo que o ruído não é direcional, e sim aleatório. Testes subsequentes comprovaram que a realização de levantamentos com resoluções inferiores a 1 centímetro com o equipamento Iiris 3D apresentavam ruídos devido ao diâmetro do pulso *laser* emitido.

A segunda característica ressaltada no levantamento das amostras foi com relação aos valores de intensidade de retorno das rochas. Esperava-se que as amostras apresentassem assinaturas espectrais totalmente distintas, o que não aconteceu. Tal situação deve-se ao fato de o equipamento Iiris 3D ter sido projetado

para levantamentos a longas distâncias, de até 1200 metros em um objeto com 90% de refletância, o que, em levantamentos com distâncias reduzidas, torna seu *laser* intenso demais, causando uma resposta que não pode ser diferenciada com relação a diferentes rochas.

Em trabalhos que utilizam valores de intensidade de retorno do *laser* como elemento de estudo (e.g., Burton *et al.*, 2011), em geral, tende-se a manter uma distância mínima de aproximadamente 60 metros entre o equipamento e o alvo a ser levantado para evitar a superexposição do alvo. Este fator pode acabar por limitar de forma negativa a viabilidade de aplicação desta técnica em afloramentos que não disponham dessas condições, como por exemplo, em cavernas e cânions estreitos.

Após a impossibilidade de processamento dos dados levantados na sala, optou-se por levar o equipamento e as amostras para o pátio interno da universidade, mantendo-se uma distância aproximada de 60 metros. As amostras foram colocadas sobre um suporte plástico e foi realizado o levantamento. Nesse segundo teste, desde o início do mesmo foi possível verificar que a esta distância os resultados iniciais obtidos atestavam a possibilidade de processamento dos valores de intensidade das amostras (Fig. 7).

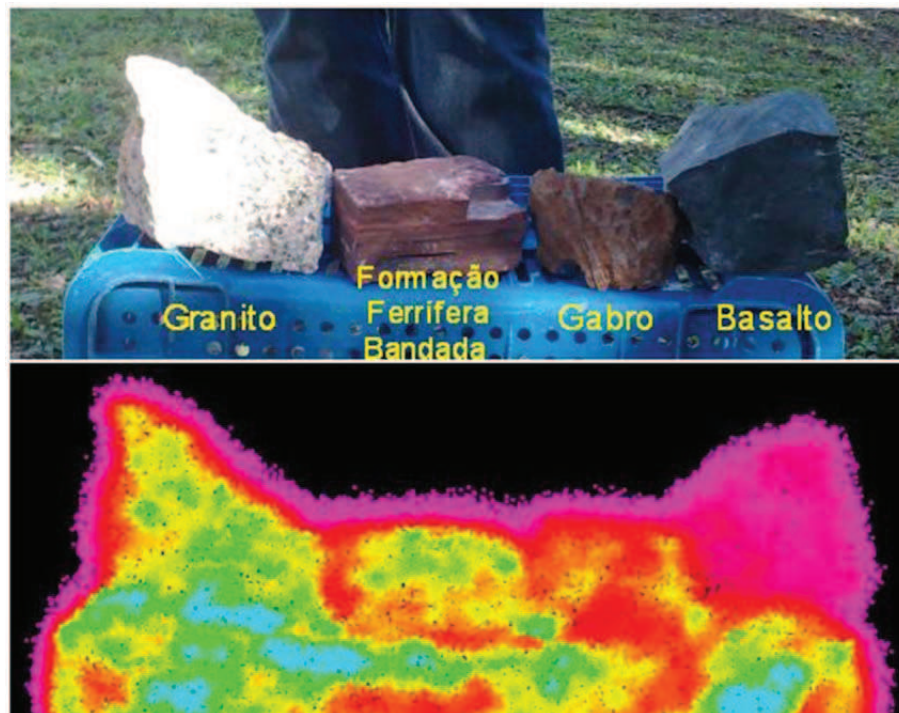


Figura 7: Teste inicial com amostras a 60 metros do *scanner*.

Outro detalhe importante identificado na realização do levantamento das amostras foi a presença de um ruído com níveis de cinza próximos aos valores mínimos encontrados na nuvem de pontos ao redor do conjunto do suporte e das amostras. Tal característica ocorreu devido a divergência do *laser*, que em uma distância de 100 metros, o pulso abrange um círculo com diâmetro de 2,2 centímetros. Se levarmos em consideração que o espaçamento utilizado para esse levantamento foi de 1 milímetro e que a distância média entre o *laser* e os alvos foi de 60 metros, podemos inferir que nas bordas dos alvos ocorre um fenômeno onde, devido ao tamanho do pulso *laser* ser maior que o detalhamento selecionado, um percentual cada vez menor desse pulso retorna o sinal, até o momento onde o mesmo cessa totalmente, ocasionando uma área de baixo retorno.

4.2 - LEVANTAMENTOS DAS ÁREAS DE ESTUDO E PREPARAÇÃO DOS DADOS

As áreas de estudo A e B já haviam sido imageadas em períodos distintos em projetos realizados junto ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Unisinos e os dados estavam disponíveis para utilização no LASERCA (Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital), o que simplificou os processos de estudo e seleção das mesmas.

A utilização dessas informações ratifica uma característica fundamental para os trabalhos que geram dados de *laser scanner*, especificamente por permitir que após a obtenção inicial das nuvens de pontos, diversos novos processamentos ou utilização de diferentes técnicas podem ser realizados sem correremos o risco de causar danos ou perda dos dados. Essa característica garante um registro histórico do afloramento, que permite o seu uso independente de condições severas de intemperismo ou destruição do mesmo.

As nuvens de pontos provenientes de ambos os levantamentos foram pré-processadas no programa PARSEr para a conversão do formato bruto BLK do Ilris 3D para um formato XYZ que pode ser importado pela maioria dos programas de processamento de nuvens de pontos. Os dados de intensidade do afloramento Papaléo foram exportados como dados brutos em 16 níveis de cinza e do afloramento Pedra Pintada com 256 níveis de intensidade. Apesar das diferentes

escalas de saída dos dados de intensidade nos afloramentos, os mesmos não apresentaram impossibilidades de utilização para o processamento dos valores de retorno.

Após o pré-processamento das nuvens de pontos, as mesmas foram importadas no programa Polyworks (Inovx), programa específico para processamento de dados provenientes de *laser scanner*. No Polyworks foram removidos todos os elementos alheios ao afloramento, como vegetação, elementos provenientes de ação antrópica (lixo, restos de materiais, etc.) e quaisquer outros pontos que não são originalmente pertencentes às feições do afloramento.

O levantamento da área de estudo A, Morro do Papaléo no município de Mariana Pimentel, foi realizado com um espaçamento médio de 3 centímetros entre os pontos, obtidos a uma distância média de 47,5 metros. Devido às condições encontradas no local, não foi possível a instalação do *laser scanner* a uma distância superior, porém, os dados coletados são passíveis de processamento para uso de sua intensidade.

Foram realizadas 8 estações na área de estudo a fim de se obter o afloramento em sua totalidade, porém selecionou-se uma área de aproximadamente 36 metros quadrados (6m x 6m) em um local ideal onde se encontravam todas as principais fácies presentes no local.

O levantamento da área de estudo B, Pedra Pintada no município de Caçapava do Sul, foi realizado com um espaçamento médio de 4 centímetros a uma distância média de aproximadamente 232 metros entre o equipamento e a face do afloramento. As condições encontradas no local permitiam a instalação do *laser scanner* em uma distância adequada para a coleta de dados passíveis de permitir processamento dos valores de intensidade.

Neste local, a face principal do afloramento possui uma extensão de aproximadamente 274 metros, sendo que foi selecionada uma área reduzida com uma extensão de aproximadamente 165 metros a fim de permitir uma maior agilidade nos testes e processamentos realizados.

As nuvens de pontos, em ambas as áreas de estudo, foram processadas para a geração de histogramas de distribuição do comportamento espectral das

rochas existentes nos afloramentos para auxiliar no processo de escolha do número de classes a serem classificadas.

4.3 - PROGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO K-CLOUDS

Atualmente no meio acadêmico, os processamentos dos valores de intensidade dos dados de *laser scanner* são realizados em programas convencionais de processamento digital de imagens. Visando a disseminação de uma metodologia específica para utilização de *laser scanner* em afloramentos, foi desenvolvido um programa específico para o processamento das nuvens de pontos por meio da aplicação do algoritmo de classificação por *cluster k-means* (MacQueen, 1967; Alsabti, 1998):

função k-means ()

Inicializar k protótipos (w_1, \dots, w_k) sendo que $w_j = i_l, j \in \{1, \dots, k\}, l \in \{1, \dots, n\}$

Cada *cluster* C_j é associado com protótipo w_j

Repetir

para cada vetor de entrada i_l , onde $l \in \{1, \dots, n\}$,

faça

Atribua i_l para *cluster* C_{j^*} com protótipo mais próximo w_{j^*}

(ex: $|i_l - w_{j^*}| \leq |i_l - w_j|, j \in \{1, \dots, k\}$)

para cada *cluster* C_j , onde $j \in \{1, \dots, k\}$, *faça*

Atualizar o protótipo w_j para ser o centroide de todas as amostras atualmente em C_j , para que

$$w_j = \sum_{i_l \in C_j} i_l / |C_j|$$

Compute a função de erro:

$$E = \sum_{j=1}^k \sum_{i_l \in C_j} |i_l - w_j|^2$$

Até que E não mude significativamente ou não haja mudança de agrupamentos

Esse programa, denominado K-Clouds (Fig. 8), realiza a importação dos dados das nuvens de pontos, previamente exportados para os formatos TXT ou PTS, provenientes dos levantamentos dos afloramentos e, por aplicação do classificador *k-means*, realiza a classificação dos pontos em um número “k” de classes, definido pelo usuário.

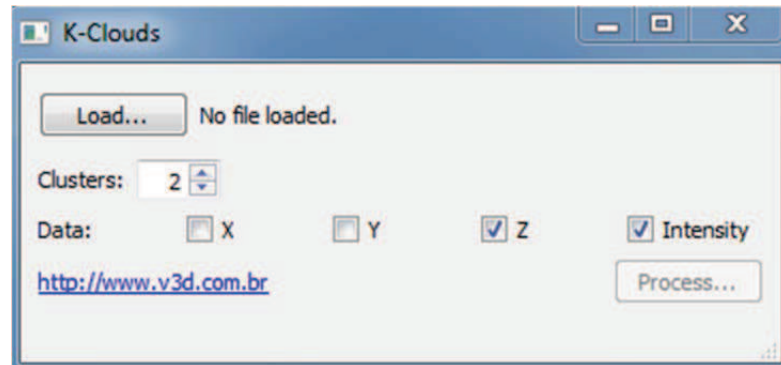


Figura 8: Interface do Programa K-Clouds (Parceria V3D/UNISINOS).

A saída de dados se dá por meio de um arquivo em formato XYZRGB onde cada classe “k” apresenta uma codificação RGB exclusiva, com a finalidade de facilitar a identificação das classes. Estes dados podem então ser importados em programas que suportam nuvens de pontos e quantificados de acordo com a necessidade do usuário, principalmente permitindo aos geólogos a geração de analogias entre as cores utilizadas pelo sistema e as características físico-químicas do afloramento, de maneira a possibilitar a identificação das rochas presentes, bem como apresentar características que podem vir a complementar os estudos desenvolvidos no local.

5. RESULTADOS

Na fase de testes iniciais com amostras tornou-se claro que as características do equipamento utilizado o impedia de ser operado de maneira próxima aos alvos com finalidade de utilização dos valores de intensidade de retorno devido ao pulso emitido ser excessivamente forte, mascarando a assinatura espectral dos alvos. Esta característica foi solucionada através da tomada de informações a distâncias próximas ou superiores a 50 metros.

Outra característica que pode ser comprovada com este levantamento foi a relação entre dados e ruído encontrada. Na medida em que se reduz o espaçamento médio entre os pontos durante o levantamento, acresce-se uma quantidade significativa de ruído, ou seja, de pontos coletados com distâncias maiores ou menores do que a distância real entre o emissor do *laser* e a face real do alvo. Devido a esta característica e à dificuldade de se realizar uma filtragem dos dados, a escolha do espaçamento correto entre os pontos torna-se, juntamente com a utilização de uma distância adequada entre o *laser* e o alvo, um elemento fundamental para um desfecho positivo ou negativo do trabalho.

Os dados provenientes dos testes iniciais foram processados utilizando-se o programa K-Clouds, sendo que foram solicitadas a geração de 4 classes distintas de rochas, sendo uma classe para cada amostra de rocha utilizada. Os resultados obtidos mostram uma grande diferenciação entre a amostra de basalto (localizada a direita) e as demais amostras (Fig. 9).

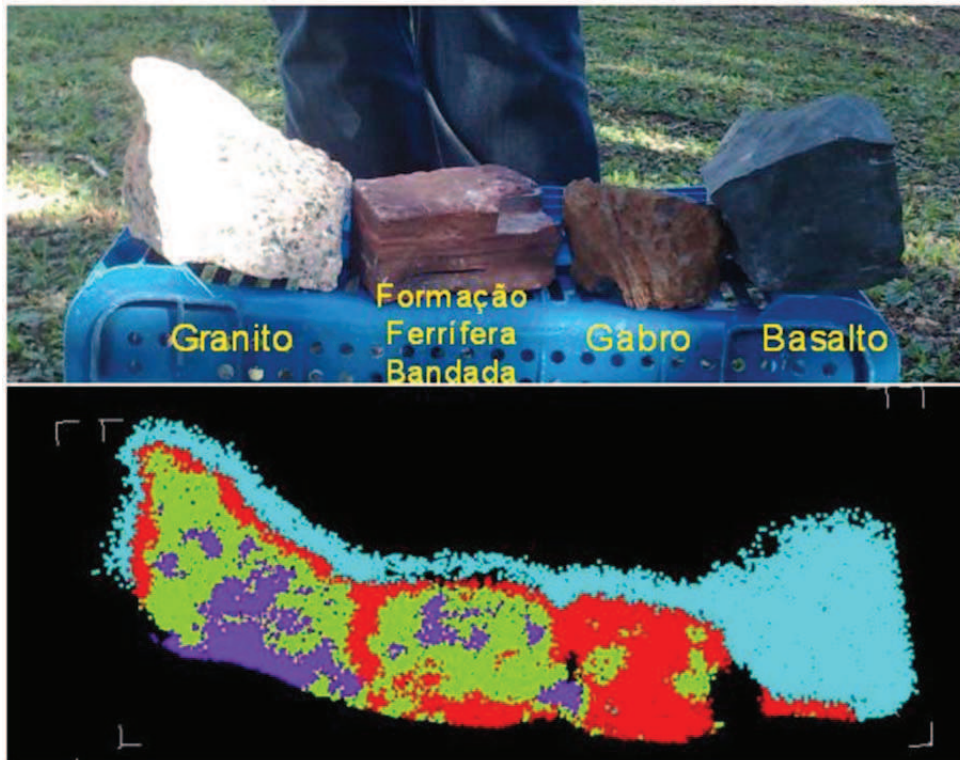


Figura 9: Nuvem de Pontos classificada das amostras.

Comparado com as demais amostras, a amostra de basalto, devido a sua baixa refletividade e alta capacidade de absorção de energia devido a sua tonalidade escura, apresenta um baixo retorno do pulso laser emitido. Estas características tornaram sua identificação simples por parte do classificador.

As áreas externas das amostras sofreram com o efeito negativo do diâmetro do *laser* com relação a resolução utilizada e por esse motivo, por apresentar valores de intensidade baixos, estes pontos foram equivocadamente colocados na mesma classe da amostra de basalto, mas passíveis correção para quantificação e análise. As demais amostras apresentaram diferenciações menores com relação a uma assinatura espectral específica se comparadas com a amostra de basalto, porém se realizarmos uma análise da quantidade de pontos de cada classe em cada amostra, também podemos diferenciar as demais rochas.

Na área de estudo A, o afloramento do Morro Papaléo, a nuvem de pontos resultante, com aproximadamente 51 mil pontos, foi processada para a geração de um histograma de distribuição do comportamento espectral das rochas existentes no afloramento (Fig. 10).

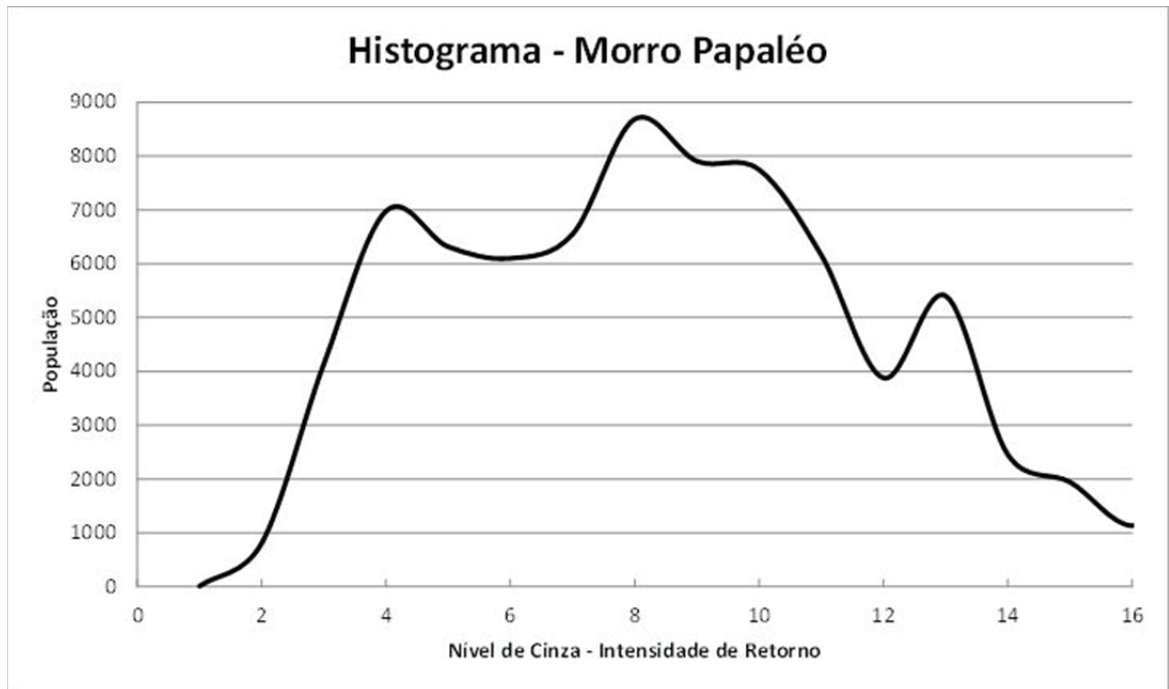


Figura 10: Histograma de intensidade da nuvem de pontos - Área de Estudo A

Após a análise do histograma, concluiu-se que a nuvem de pontos poderia ser classificada em 6 classes de intensidade de retorno ($k = 6$) baseando-se no comportamento espectral da distribuição de intensidade dos dados (Fig. 11).

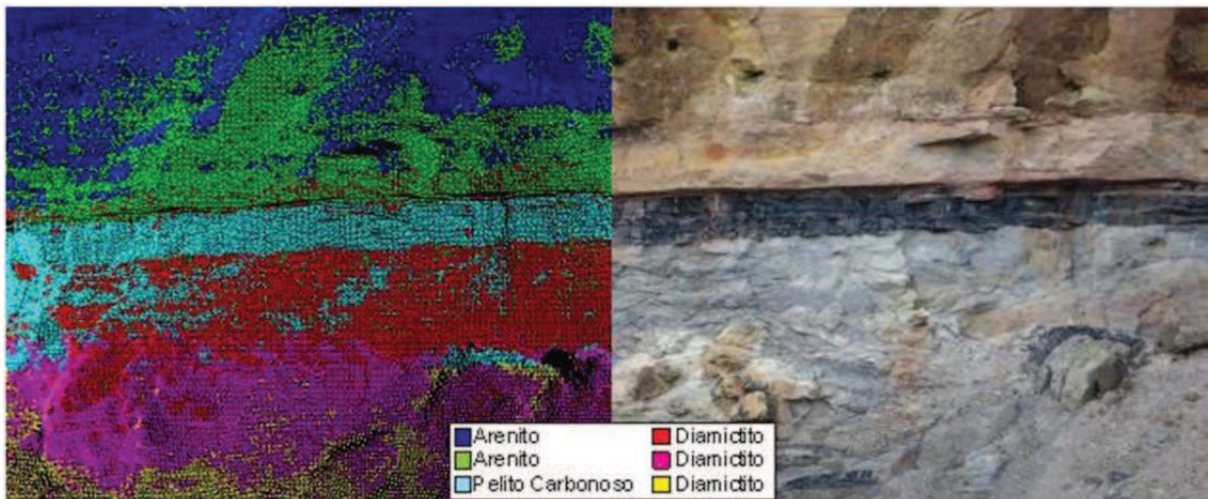


Figura 11: Nuvem de Pontos classificada do afloramento Papaléo.

Em uma comparação direta e visual da nuvem classificada com a imagem de referência do local, infere-se que o classificador foi capaz de identificar e separar a camada de pelito carbonoso existente na porção central do afloramento (cor

ciano). Acima da camada de pelito carbonoso, na porção superior do afloramento, o arenito existente foi separado em duas classes, nas cores azul escuro e verde. As partes classificadas na cor azul escuro apresentam uma tendência a ser um arenito com maior grau de meteorização, enquanto que as partes classificadas na cor verde tendem a ser um arenito com menor grau de meteorização.

Na parte inferior ao pelito carbonoso, o programa distinguiu três características distintas no diamictito existente, onde se apresenta uma tendência a uma rocha menos meteorizada próximo ao pelito carbonoso (cor vermelha) e uma meteorização maior na base da camada (cores margenta e amarela). Evidencia-se também que na parte inferior esquerda da área de estudo, existe um pequeno bloco de pelito carbonoso proveniente da camada principal que foi identificado na classificação com sucesso (cor ciano).

Na área de estudo B, o afloramento Pedra Pintada, com aproximadamente 2,6 milhões de pontos, da mesma forma que na área de estudo A, foi processado para a geração de um histograma de distribuição do comportamento espectral das rochas existentes no afloramento (Fig. 12).

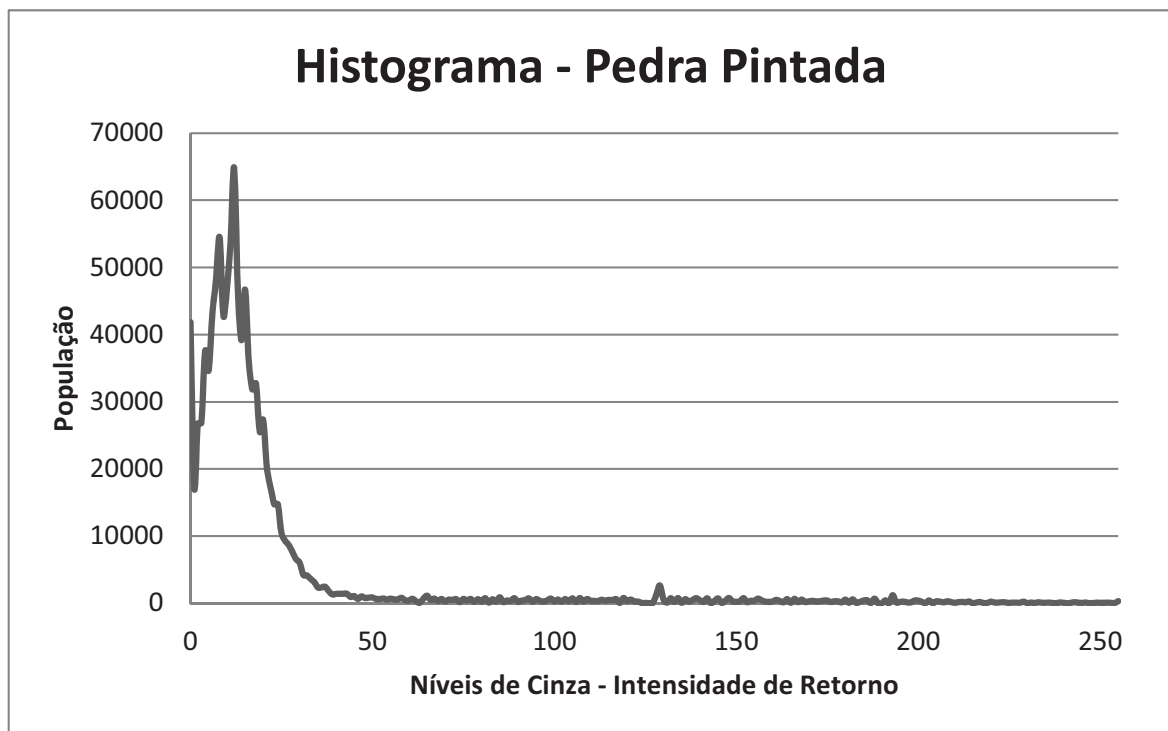


Figura 12: Histograma de intensidade da nuvem de pontos - Área de Estudo B

Após a análise do histograma, concluiu-se que a nuvem de pontos poderia ser classificada em 3 classes de intensidade de retorno ($k = 3$) baseando-se no comportamento espectral da distribuição de intensidade dos dados. Em ambos os casos, juntamente com os dados provenientes do histograma, fotografias dos locais auxiliaram na determinação do número de classes a ser utilizado.

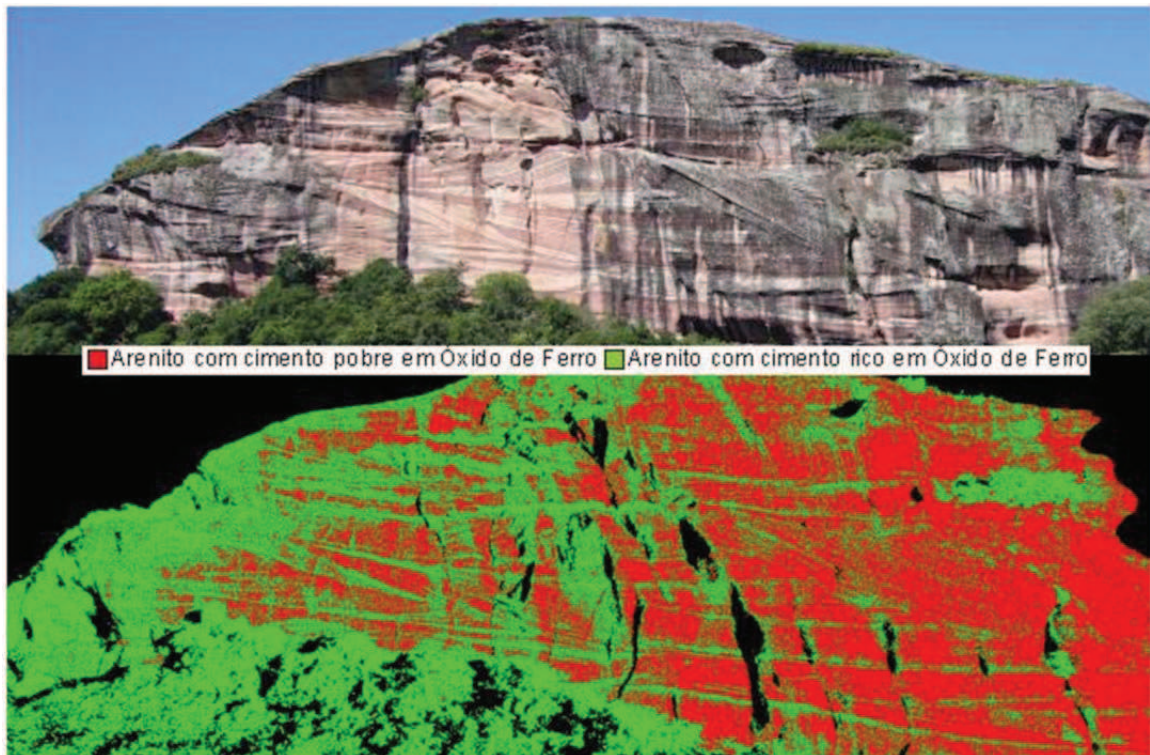


Figura 13: Nuvem de Pontos do afloramento Pedra Pintada classificada.

A utilização de apenas 3 classes de dados neste afloramento deve-se, além da análise do histograma de intensidade, a separação das diferentes áreas com relação à concentração de óxido de ferro presente, o que caracteriza-se pela tonalidade mais ou menos avermelhada presente no afloramento.

Na nuvem de pontos classificada, torna-se possível a identificação das estruturas deposicionais, bem como a identificação das áreas com maior ou menor concentração de óxido de ferro. As áreas classificadas na cor verde referem-se a maiores concentrações de óxido de ferro enquanto as áreas em vermelho referem-se a menores concentrações deste composto no cimento da rocha.

Outro fator a ser considerado é que devido ao comprimento de onda de 1535 nanômetros do *laser scanner* Iiris 3D, na faixa do infravermelho médio, ocorre uma

pequena penetração do *laser* em áreas da rocha que são afetadas por líquens ou outros elementos de intemperismo, o que permitiu que a classificação espectral não sofresse interferência desses elementos. A comparação da foto com a classificação espectral revela nitidamente que as estruturas sedimentares do afloramento são visíveis mesmo em áreas com qualidade de exposição inferior.

Esta característica torna-se fundamental se considerarmos que devido a condições climáticas adversas em alguns afloramentos, a presença destes elementos é constante e que em condições normais ou com o uso de equipamentos com outros comprimentos de onda, como na faixa do visível, por exemplo, tal levantamento e classificação não seriam possíveis.

6. CONCLUSÕES

A utilização de equipamentos de *Laser Scanner Terrestre* para aplicações em Geologia e Modelagem Tridimensional de Afloramentos é uma tendência tecnológica que encontra cada vez mais seu lugar entre as diversas técnicas geológicas clássicas já consolidadas. Equipamentos cada vez mais modernos, com maior alcance, maior qualidade e precisão espacial dos dados e tempos menores para coleta das informações tornam o uso dos sistemas de *Laser Scanner Terrestre* uma ferramenta viável e confiável na execução dos trabalhos.

A classificação de padrões espectrais de intensidade de retorno do pulso *laser* para aplicações geológicas é uma área que ainda não possui grandes desenvolvimentos e pesquisas específicas que visam o estabelecimento e a consolidação de metodologias de trabalho. Neste contexto, o desenvolvimento do programa K-Clouds, através do uso do classificador de cluster *k-means* fornece uma ferramenta simples e prática para ser inserida dentro do fluxo de trabalho de profissionais da área de Geologia. Porém, da mesma maneira, outras áreas que utilizam os dados provenientes de equipamentos de *Laser Scanner Terrestre* podem fazer uso desta metodologia.

A aplicação deste programa para classificação dos valores de intensidade de nuvens de pontos provenientes de afloramentos apresentou resultados de forma coerente e satisfatória, sendo capaz de identificar diferenças físico-químicas entre diversas rochas presentes nos afloramentos, ou mesmo pequenas alterações da composição química relacionada à presença localizada do cimento com óxido de ferro encontrado em níveis específicos do afloramento Pedra Pintada.

Fica claro também que o classificador *k-means* é adequado para esta finalidade, devido a suas características gerais que se adaptam bem as mais variadas tarefas e finalidades, tanto de forma específica como de forma genérica. Esta ferramenta de classificação possui um enorme potencial para desenvolvimento, sendo que seu código-fonte poderá ser otimizado para a redução do tempo gasto durante o processamento das informações, bem como a melhoria, de uma forma geral, da interface com o usuário.

Uma das melhorias previstas para o programa é a utilização de outros classificadores além do *k-means*, possibilitando novos resultados para diferentes rochas, bem como a aplicação de classificadores específicos para determinadas rochas, como rochas carbonáticas. Outro elemento a ser desenvolvido na interface com o usuário é a apresentação automática do histograma da intensidade de retorno do pulso *laser*, visando facilitar a compreensão do usuário e facilitando o processo de escolha do número correto de classes definidas pelo usuário para melhorar os resultados obtidos pelo classificador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfarhan, M., White, L., Tuck, D., Aiken, C. **Laser rangefinders and ArcGIS combined with three-dimensional photorealistic modeling for mapping outcrops in the Slick Hills, Oklahoma, Geosphere**, vol. 4, n. 3, p. 576–587, 2008.
- Alsabti, K., Ranka, S. Singh, V. An Efficient K-Means Clustering Algorithm. **In: First Workshop on High Performance Data Mining, Orlando, Florida, 1998.**
- Arnot, M.J.; Lewis, J.M.; Good, T.R. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale out-crop data. **Journal of Sedimentary Research**, v. 67, p. 984-987, 1997.
- Bates, K. T., Rarity, F., Manning, P. L., Hodgetts, D., Vila, B., Oms, O., Galobart, A., Gawthorpe, R. L.. **High-resolution LiDAR and photogrammetric survey of the Fumanya dinosaur tracksites (Catalonia): implications for the conservation and interpretation of geological heritage sites.** Journal of the Geological Society, v. 165, n. 1, p. 115–127, 2008.
- Bellian, J. A., Jennette, D. C., Kerans, C., Gibeaut, J., Andrews, J., Yssldyk, B., And Larue, D., **3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology.** 2002. Disponível em <http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>. Acesso em: 21 mar 2011.
- Bellian, J. A.; Kerans, C.; Jennette, D. C. **Digital Outcrop Models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling.** Journal of Sedimentary Research, Vol. 75, nº 2, Março, pp. 166-176, 2005
- Bellian, J. A., Beck, R., Kerans, C. **Analysis of hyperspectral and lidar data: Remote optical mineralogy and fracture identification,** Geosphere, v. 3, n. 6, p. 491-500, 2007.
- Brodu, N., Lague, D. **3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 62, p. 121-134, 2012.
- 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, Vol. 165, pp. 625-638, 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. v. 81, p. 339-347, 2011

Enge, H. D., Buckley, S. J., Rotevatn, A., Howell, J. A. **From outcrop to reservoir simulation model: workflow and procedures.** *Geosphere*, v. 3, n. 6, 469-490, 2007.

Enge, H. D., Howell, J. A. **Impact of deltaic clinothems on reservoir performance: Dynamic studies of reservoir analogs from the Ferron Sandstone Member and Panther Tongue, Utah.** *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 94, n. 2, 139-161, 2010.

Ergün, B. **Terrestrial Laser Scanner Data Integration in Surveying Engineering.** In: Wang, C. *Laser Scanning, Theory and Applications.* InTech, 2011.

Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J. **A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco,** *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, n. 6, p. 795-827, 2009.

Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J. **Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology - workflow and implications for geological modelling: Oukaimeden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco).** *Petroleum Geoscience*, v. 16, n. 2, p. 133-154, 2010.

Ferrari, F., Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Inocencio, L. C., Paim, P. S. G., Silva, R. M. da. **Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando laser scanner terrestre.** *Geociências, UNESP*, v. 31, n. 1, p. 79-91, 2012

Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S., **Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (6), p. 522–528, 2009.

Gan, G., Ma, C., and Wu, J., **Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications.** SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, VA, 2007.

Hariharan, P. **Optical Interferometry.** 2^a Ed. Elsevier, 2003.

Hariharan, P. **Basics of Interferometry.** 2^a Ed. Elsevier, 2007.

Hodgetts, David. **LiDAR in the Environmental Sciences: geological applications.** In: Heritage, G. L.; Large, A. R. G. *Laser Scanning for the Environmental Sciences.* West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 2009

Janson, X., Kerans, C., Bellian, J. A., Fitchen, W. **Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas.** *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 91, n. 10, p. 1405-1436, 2007.

Jones, R. R., Mccaffrey, K. J. W., Imber, J., Wightman, R., Smith, S. A. F., Holdsworth, R. E., Clegg, P., Paola, N. D. E., Healy, D., Wilson, R. W. **Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues.** Geological Society of London Special Publications, v. 309, n. 1: p. 87-98, 2008.

Jones, R. R., Kokkalas, S., Mccaffrey, K. J. W. **Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR) - The Arkitsa fault, central Greece, as a case study.** Geosphere, v. 5, n. 6: p. 465-482, 2009.

Kurtzman, D., El Azzi, J. A., Lucia, F.J., Bellian, J., Zahm, C., Janson, X. **Improving fractured carbonate-reservoir characterization with remote sensing of beds, fractures, and vugs.** Geosphere, v. 5, n. 2: p. 126-139, 2009.

MacQueen, J. B. **Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations**, Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, 1:281-297, 1967.

Maerten, L., Pollard, D. D., Maerten, F. **Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, Central Utah.** Journal of Structural Geology, v. 23, n. 4, p. 585-592, 2001.

McCaffrey, K. J. W., Feely, M., Hennessy, R., Thompson, J. **Visualization of folding in marble outcrops, Connemara, western Ireland: An application of virtual outcrop technology.** Geosphere, v. 4, n. 3, p. 588-599, 2008.

Mirkin, Boris. **Mathematical classification and clustering.** Kluwer Academic Publishers, 1996.

Nagalli, A., Fiori, A. P., Nagalli, B. **Método para Aplicação de Escâner a Laser Terrestre ao Estudo da Estabilidade de Taludes em Rocha.** Revista Brasileira de Geociências, v. 41, n. 1, p. 56-67, 2011.

Nelson, C. E., Jerram, D. A., Hobbs, R. W., Terrington, R., Kessler, H. **Reconstructing flood basalt lava flows in three dimensions using terrestrial laser scanning.** Geosphere, v. 7, n. 1, p. 87-96, 2011.

Olariu, M. I., Ferguson, J. F., Aiken, C. L. V., Xu, X. **Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas.** Geosphere, v. 4, n. 1, p. 247-259, 2008.

Paim, P. S. G.; Fallgatter, C.; Silveira, A. S. Guaritas do Camaquã, RS - Exuberante cenário com formações geológicas de grande interesse didático e turístico. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C. R. G.; Fernandes, A. C. S.; Berbert-Born, M.; Sallun Filho, W.; Queiroz, E. T.; (Eds.), Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio076/sitio076.pdf>, 2010.

Petrie, Gordon; Toth, Charles K. **Terrestrial Laser Scanners**. In: Shan, Jie & Toth, Charles K (org.) **Topographic Laser Ranging and Scanning: principles and processing**. Boca Ratón: CRC Press, 2009.

Phelps, R. M., Kerans, C. **Architectural Characterization and Three-Dimensional Modeling of a Carbonate Channel Levee Complex: Permian San Andres Formation, Last Chance Canyon, New Mexico, USA**. *Journal of Sedimentary Research*, v. 77, n. 11, p. 939-964, 2007.

Pringle, J. K., Westerman, A. R., Clark, J. D., Drinkwater, N. J., Gardiner, A. R. **3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK**. *Petroleum Geoscience*, v. 10, p. 343–352, 2004.

Rotevatn, A., Buckley, S. J., Howell, J. A., Fossen, H. **Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study**, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, n. 3, p. 407-427, 2009.

San Jose Alonso, J. I., Rubio, J. M., Martin, J. J. M., Fernández, J. G. **Comparing time-of-flight and phase-shift. The survey of the Royal Pantheon in the Basilica of San Isidoro (León)**. ISPRS Workshop '3D-ARCH 2011' 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Trento, Italy, Março – 2011.

Scherer, C. M. S., **Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil**. *Sedimentology*, Vol. 49, pp. 97–116, 2002.

Verwer, K., Merino-Tome, O., Kenter, J. A. M., Della Porta, G. **Evolution of a High-Relief Carbonate Platform Slope Using 3D Digital Outcrop Models: Lower Jurassic Djebel Bou Dahar, High Atlas, Morocco**. *Journal of Sedimentary Research*, v. 79, n. 6, p. 416-439, 2009.

Wawrzyniec, T. F., McFadden, L. D., Ellwein, A., Meyer, G., Scuderi, L., Mcauliffe, J., Fawcett, P. **Chronotopographic analysis directly from point-cloud data: A method for detecting small, seasonal hillslope change, Black Mesa Escarpment, NE Arizona**. *Geosphere*, v. 3, n. 6, p. 550-567, 2007.

White, P. D., Jones, R. R. **A cost-efficient solution to true color terrestrial laser scanning**. *Geosphere*, v. 4, n. 3, p. 564-575, 2008.

Xu, X., Aitken, C. L. V., Bhattacharya, J. B., Davies, R. K., Carbeanu, R. M., Nielsen, K. C., Mcmechan, G. A., Abdelsalam, M. G. **Creating virtual 3-D outcrop. The Leading Edge**, v. 19, p. 197-202, 2000.

Xu, X., Bhattacharya, J. B., Davies, R. K., Aitken, C. L. V. **Digital Geologic Mapping of the Ferron Sandstone, Muddy Creek, Utah, with GPS and Reflectorless Laser Rangefinders**, *GPS Solutions*, v. 5, p. 15-23, 2001.

Zahm, C. K., Hennings, P.H. **Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming**, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 93, n. 11, p. 1427-1446, 2009.

APÊNDICE A – ARTIGO CIENTÍFICO SUBMETIDO PARA O ISPRS JOURNAL OF
PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING

SPECTRAL PATTERN CLASSIFICATION IN LIDAR DATA FOR ROCK IDENTIFICATION IN OUTCROPS

Leonardo Campos Inocencio¹, Mauricio Roberto Veronez¹², Francisco Manoel Wohnraht Tognoli¹, Marcelo Kehl de Souza¹, Reginaldo Macedônio da Silva¹, Luiz Gonzaga da Silveira Jr.³⁴, César Leonardo Blum Silveira⁴,

¹ PPGeo – Geology Graduate Program – UNISINOS

² LASERCA – Laboratory of Remote Sensing and Digital Cartography – UNISINOS

³ PIPCA – Applied Computer Science Graduate Program - UNISINOS

⁴ V3D

ABSTRACT

The present study aimed to develop and implement a method for detection and classification of spectral signatures in point clouds obtained from Terrestrial Laser Scanner in order to identify the presence of different rocks in outcrops and to generate a Digital Outcrop Model. To achieve this objective, a software based on cluster analysis was created, named K-Clouds. This software was developed through a partnership between UNISINOS and the company V3D. This tool was designed to, beginning with an analysis and interpretation of a histogram from a point cloud of the outcrop and subsequently indication of a number of classes provided by the user, process the intensity return values. This classified information can then be interpreted by geologists, to provide a better understanding and identification from the existing rocks in the outcrop. Beyond the detection of different rocks, this work was able to detect small changes in the physical-chemical characteristics of the rocks, as they were caused by weathering or compositional changes.

Keywords: Laser Scanning, LIDAR, Spectral, Classification, Algorithms, Geology, Surveying, Method.

1 - INTRODUCTION

Geology, like other sciences, enjoys technological advances to increasingly develop their methods and enhance the expertise of their field of study. New equipment and methods are in constant development to support these applications and from all of this equipment and systems developed in recent years, the laser scanning and profiling has been consolidated as one of the most effective technology for geospatial data acquisition.

The automated data collection has expanded rapidly in recent years in line with the technological advances made in the areas of surveying and mapping (Buckley et al., 2008). The use of such equipment for geological studies was a natural and logical step, considering that the collection and use of data from outcrops is the main source for the works of surface geology.

The digital representation in geological studies evolved from LANDSAT satellite imagery, digital terrain models in conjunction with image processing (i.e., Arnot et al., 1997) and aerial photos interpretation techniques combined with the Global Navigation Satellite System (GNSS) (i.e., Maerten et al., 2001). Over the past decade the use of digital mapping technologies have increased, in particular with the use of Terrestrial Laser Scanner surveying and other systems integrated with satellite navigation and geographic information (Xu et al., 2000, 2001; Alfarhan et al., 2008),

which replace with many advantages photographic mosaics, routinely used in the interpretation of large outcrops.

The laser scanning and profiling systems, also known as Terrestrial Laser Scanner (TLS), have some characteristics that apply significantly for geological purposes, such as the fast acquisition of data of a particular outcrop in distances that can reach 2 km, the high definition of the spatial resolution, i.e. the spacing between the points collected at a certain distance and high degree of accuracy of the survey.

The use of TLS in outcrop studies is expanding due to the ease of acquisition of georeferenced data in an accurate, fast and automated way. Its use for this purpose began about a decade ago (Bellian et al., 2002), but only in recent years the number of scientific papers has increased significantly. Topics of interest are varied, with emphasis on the methodological approaches (Bellian et al., 2005; Enge et al., 2007, Buckley et al., 2008, Jones et al., 2008, White & Jones, 2008), reservoirs analogues studies (Pringle et al., 2004, Phelps & Kerans, 2007; Fabuel-Perez et al., 2009; Kurtzman et al., 2009; Rotevatn et al., 2009; Verwer et al., 2009; & Enge Howell, 2010; Fabuel-Perez et al., 2010) of fractured rocks (Bellian et al., 2007; Olariu et al., 2008, Jones et al., 2009; Zahm & Hennings, 2009), slope stability (Nagalli et al., 2011), erosion rates (Wawrzyniec et al., 2007), synthetic seismic models (Janson et al., 2007), geological heritage (Bates et al., 2008), determining the direction of basaltic lava flow (Nelson et al., 2011) geology education (McCaffrey et al., 2008, 2010) and outcrop interpretation (Ferrari et al., 2012).

The equipment available on the market are able to conduct the survey and collection of thousands (Time-of-Flight) up to millions (Phase) of points-per-second and some have the ability to record the intensity of the pulse return for each position of the laser X/Y/Z (Bellian et al., 2005). The intensity of the return pulse from the laser and the equipment range are directly related to factors that affect the working of the system. Among these factors we can mention the power of the emitted pulse and the reflectivity of the targets.

The relation between the reflectivity of the targets and the intensity of the laser beam emitted is directly proportional to the range of the Laser Scanner. If a target has 10% reflectivity, the equipment should be closer than a target that has 90% reflectivity (Petrie & Toth, 2009).

As other active remote sensing systems, the TLS have only one wavelength, as the intensity of the return pulse is based on the interaction of the laser's specific wavelength with the target. This interaction may be analyzed using interferometry techniques, which are the study of phenomena caused by the interfering within the light waves, which in this case, are the interaction between the laser wavelength and the physical-chemical characteristics of the targets (Hariharan, 2007).

As we use a TLS to survey an outcrop, we collect not only their spatial characteristics, such as features and volumes, but we also obtain additional data that may allow a greater understanding of the outcrop.

In most cases, each TLS equipment generates its own file format for archiving of the collected data. However, these files have similarities concerning the information stored. These files are based on a structure which stores the points coordinates in space (X, Y and Z) or UTM coordinates (N, E and height), the intensity value of the return laser pulse (i) and if there is availability, the values from the digital camera (RGB) either internal or external, generating the sequence X, Y, Z, I, R, G, B.

The spatial information is commonly used for volume calculations and identification of geometric features and the RGB data assist in identifying visual features and provide a better understanding of the objects surveyed with the TLS, but when it comes to the intensity values of the return laser pulse, there is a lack of specific applications designed to transform this data in information, which can detect variations in the physical-chemical characteristics of the targets.

Thus, the main objective of this study was to develop a method for classification of spectral patterns in LIDAR (Light Detect and Range) data for the identification of rocks in outcrops with distinct lithology.

The validation of this method occurred through the use of a cluster analysis algorithm known as k-means. The choice of this algorithm was given by the obtained separation of the spectral responses of rocks with different characteristics, both chemical and/or physical. This allowed us to classify the patterns of spectral response and, thus, identify rocks and features present in the outcrops. This classifier tool will be incorporated in the software Mountain View (partnership V3D/UNISINOS), which allows the user view, edit and process data from TLS, and the main application is focused on Digital Outcrop Modeling (DOM).

2 - TERRESTRIAL LASER SCANNER

The Laser Scanning and Profiling Systems, in this case terrestrial, basically consist of a measuring instrument based on laser that can measure vertical angles, horizontal angles and distances with a high standard of accuracy and speed by means of a mobile mirrors or prisms system that allow the mapping of topographical features on targets.

These systems have different methods for measure distances, and the Time-of-Flight (TOF) (Fig. 1) and Phase Shift (PS) are the most widespread. In the Time of Flight method the instrument sends a high-intensity laser pulse toward the target and measure the time between sending and receiving the pulse returns, divides the value by 2 to calculate the distance.

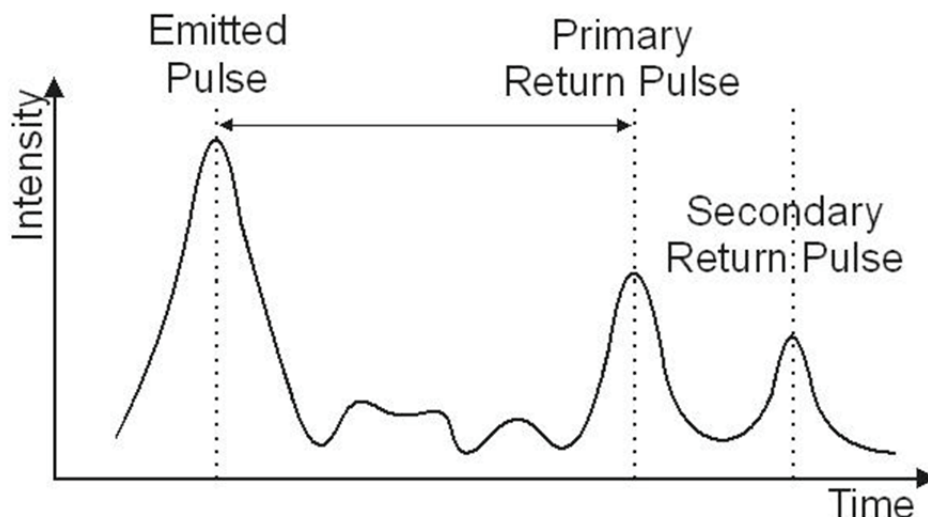


Fig. 1. Time-of-Flight measurement system operation principle, where the distance is calculated dividing by 2 the time elapsed between the emitted pulse and the primary or secondary return pulse. Modified from San Jose Alonso *et al* (2011)

In the Phase Shift method, the instrument emanate a laser pulse fitted within a harmonic wave and the distance is calculated by comparing the difference of the transmitted and received waves (Ergün, 2011) (Fig. 2).

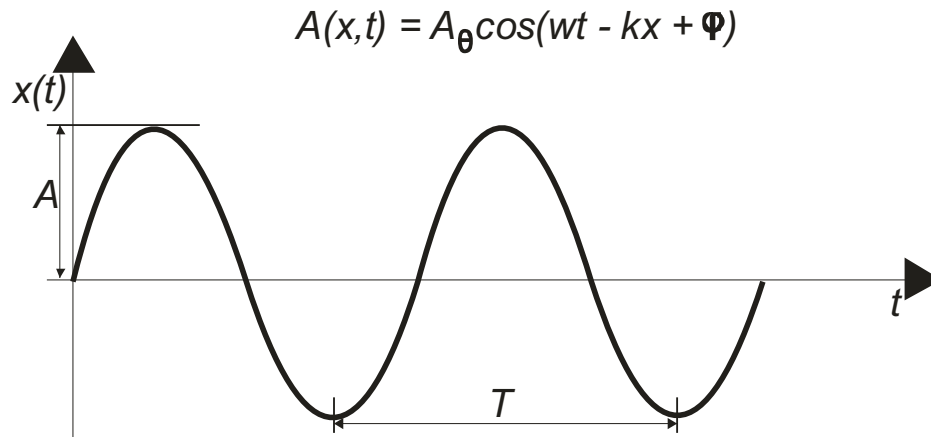


Fig. 2. Phase Shift measurement system operation principle, where the distance is calculated comparing the phase difference between the emitted pulse and the return pulse. Modified from San Jose Alonso *et al* (2011)

Both methods of data acquisition have strengths and weaknesses due to the method applied. The equipment that uses the Phase Shift technology tend to collect more points per second at the same time interval, millions of points per second, while the Time-of-Flight collects thousands of points per second. However, the phase shift scanners have a reduced range that varies between 80 to 120 meters, against up to two kilometers in some Time-of-Flight equipment. Another element to consider is that the operation of Phase Shift equipment in conditions of high insolation can reduce the range of the equipment.

All the elements quoted above must be taken into consideration when selecting the most suitable technology to perform the work, in which case, Digital Outcrop Modeling.

3 – CLASSIFICATION

The term classification is defined as an actual or ideal arrangement, relating what is similar and separating what is different, having as main objectives to maintain and build knowledge, analyze and relate the structure of certain phenomena (Mirkin, 1996). If we apply this definition to geology, specifically in outcrops classification, it becomes clear that the first and main elements to be classified and identified are the rocks on site. This information is intended to expand the knowledge of the geologists regarding the elements present in the outcrop, allowing a greater understanding of existing processes and materials.

In digital image processing, different classifiers are well established, as they are applied to specific purposes or applied to general purpose, or even allowing their use for applications in a classification tool that is both specific and generic.

Works such as those developed by Brodu & Lague (2012) and Franceschi *et al* (2009) are intended to implement different methods of classification in TLS data for extracting information. These classification tools, whether simple or complex, allow large volumes of data (in order of thousands to millions points) from the surveys carried out by TLS, can be processed relatively quickly and reliably.

In the various methods for data classification, data clustering, also called cluster analysis, segmentation analysis, taxonomic analysis, or unsupervised classification, is a method of creating groups of objects that at first performs the grouping of all objects that have a high degree of similarity, always ensuring that very different objects do not belong to the same group (cluster).

The data clustering techniques are often confused with classification, in which objects are assigned to predefined classes, but in data clustering, the classes must also be defined (Gan et al, 2007). Compared with other types of sorting algorithms, clusters based algorithms are very efficient for classification of large databases and multidimensional data (Gan et al, 2007).

The classifier k-means, first described by MacQueen in 1967, is a cluster classifier that performs a process of partitioning of a population "N" into "k" classes. These partitions represent satisfactorily the internal variability occurred within each class. Besides the described above, the k-means classifier is easily programmable and computationally economical, being able to process large volumes of data in applications such as grouping by similarity, predicting non-linear approximation of multivariate distributions and nonparametric tests, among others (MacQueen, 1967). These features become suitable for use in applications related to Geology, where the study areas can be located inside a few meters or along several kilometers. This scale variability, together with the type of data separation carried out by the classifier k-means, which is capable of displaying discrete patterns of variation, allows a proper understanding of the data.

4 - STUDY AREAS

For the present work were selected two study areas, in the cities of Mariana Pimentel and Caçapava do Sul, both in the of Rio Grande do Sul state (Fig. 3). Beyond the study areas, were also carried out initial tests on rock samples to define the work method to be used in the Laboratory of Remote Sensing and Digital Cartography (LASERCA) in Unisinos.

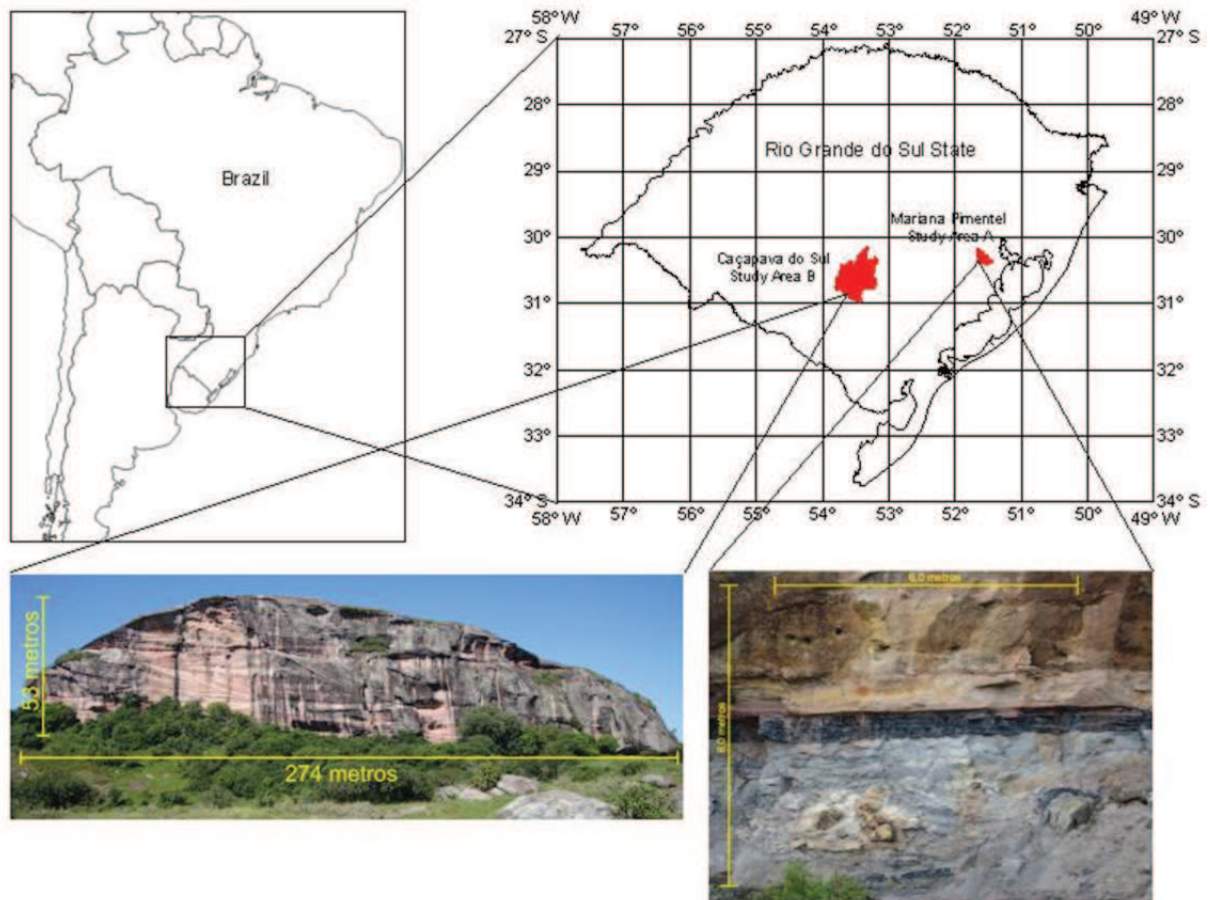


Fig. 3. Localization of the study areas in Mariana Pimentel (A) and Caçapava do Sul (B).

The study area A is located in the municipality of Mariana Pimentel, approximately 80 km from Porto Alegre with access from the highway BR-116 and after municipal and private roads. In this place is located the outcrop called “Morro do Papaléo” at coordinates: Latitude $30^{\circ}18'29,56''$ S and Longitude $51^{\circ}38'35,26''$ W. Gr. (SIRGAS 2000). This outcrop, in the Rio Bonito Formation, of Permian age, was chosen by its distinct sedimentary rocks succession as diamictite, carbonaceous pelite and sandstone, respectively from bottom to top. In the west face of the outcrop was selected an area of approximately 36 square meters (6m x 6m) for testing the developed classifier (Fig. 4).

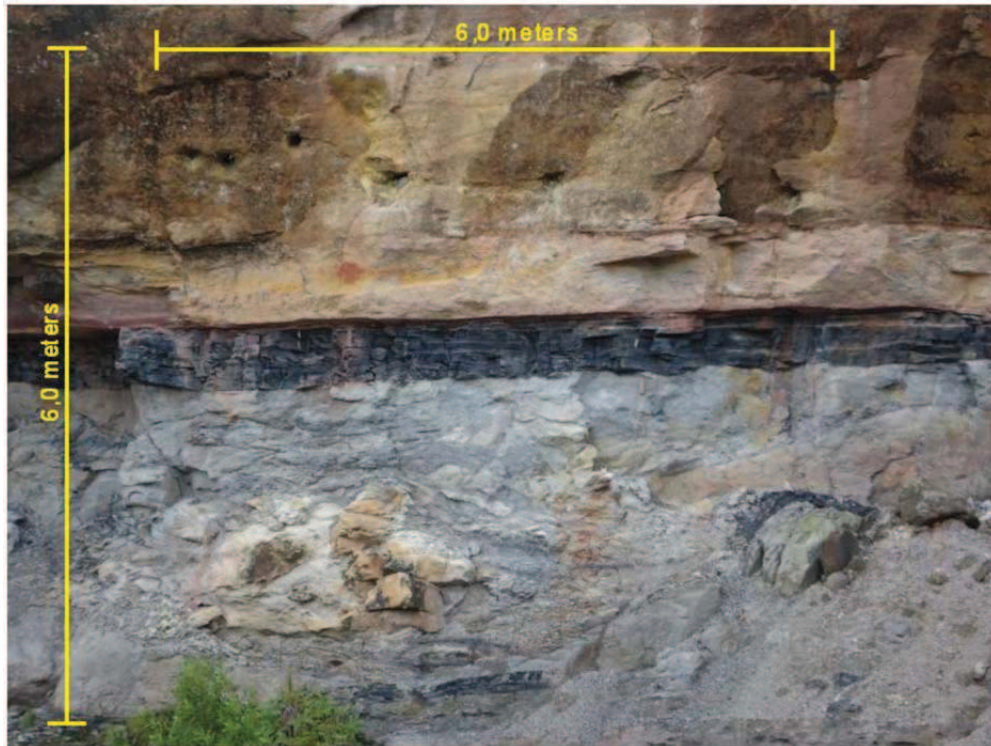


Fig. 4. Study Area A, Morro do Papaléo outcrop, Rio Bonito Formation. From the base to top we can identify the diamictite (light gray, bottom part), the carbonaceous pelite (black, in the middle part) and the sandstone (light and medium brown, top part)

The study area B is located in the municipality of Caçapava do Sul, approximately 330 km from Porto Alegre with access by Highway BR-290, BR-392 and RS-625. In this place is located the outcrop called “Pedra Pintada” in coordinates: Latitude 30°53'56,22” S and Longitude 53°21'37,17” W. Gr (SIRGAS 2000). This outcrop belongs to the Pedra Pintada Alloformation and consists of fine to medium sandstone, well sorted, composed of well-rounded grains with high sphericity, structured in sets of cross-stratification up to 15 m thick (Paim et al, 2010). In this outcrop were selected an area with 165 meters in length from the main face of the outcrop in the south side (Fig. 5).



Fig. 5. Study Area B, Pedra Pintada outcrop, Pedra Pintada Alloformation. The name of this outcrop has its origin due the different tones of reddish stratification levels. The red color came from different concentrations of iron oxide present in the cement of the sandstones.

5 - MATERIALS AND METHODS

The operation of TLS equipment can be described as a simple activity, but presents several details and requires specific knowledge of the purpose of use to allow a total capacity utilization of the equipment. The planning of basic features such as range, both minimum and maximum, expected spectral behavior of the targets of interest and optimal resolution to be used are indispensable for obtaining three-dimensional outcrop data, mainly data capable of being use for spectral classification.

5.1 – ILRIS 3D LASER SCANNER

The Ilris 3D Terrestrial Laser Scanner developed by Canadian company Optech has the following technical characteristics described below (Optech, 2009):

Table 1. Ilris 3D Terrestrial Laser Scanner Technical characteristics.

Range	up to 1200 m
Minimum Range	3 meters
Linear Accuracy	7 mm at 100 m
Angular Accuracy	8 mm at 100 m
Beam Diameter	2,2 cm at 100 m
Laser Repetition Rate	2000 points per second
Laser Class	Class 1 (eye safe)
Wavelength	1535 nm (Infrared)
Field of View	40° x 40°
Digital Camera	Integrated, 3.1 MPixel

5.2 - DEFINITION OF THE WORK METHOD

The Initial tests described here aimed to determine the ability of the TLS equipment available to provide viable data for spatial and spectral processing, and, after reviewing the available data, the methodology of work to be used. Some rock samples were placed on a bench located approximately 6 m from the laser scanner device. These samples were surveyed with a high resolution of approximately 1 mm between the points. Among the rock samples used were granite, sandstone, basalt, carbonaceous pelite, diamictite, banded iron formation and gabbro.

The first feature highlighted from the survey of the samples was the huge noise obtained. In an initial visual analysis becomes difficult to correct identify the face of the samples as the noise is random. Subsequent tests proved that surveys carried out with the Ilris 3D TLS in resolutions higher than 1 cm presented noise due to the diameter of the emitted laser pulse.

The second feature highlighted in the samples survey was related to the intensity values of return from the rocks. It was expected that the samples would exhibit completely different spectral signatures, which did not happen. This situation was due to the fact that the Ilris 3D equipment have been designed for long distance surveys, up to 1200 meters on an object with 80% reflectance, which, in surveys in short distances, makes the laser pulse too intense, giving a response that cannot be used to differentiate rocks.

In works using intensity values of the laser pulse return as the element of study (i.e., Burton et al., 2011), in general, tends to maintain a minimum distance of approximately 60 meters between the equipment and the surveyed target to be to

avoid overexposure of the target. This factor can present a negative limit in the feasibility of this technique in outcrops which do not this minimum distance, as in caves and narrow canyons.

After the failure of processing the data gathered in the room, the equipment and samples were carried to the inner courtyard of the university, keeping a distance of 60 meters between the equipment and the samples. The samples were placed on a plastic holder and the survey was conducted. In this second test, since the beginning of the survey it was possible to see that at this distance, the initial results obtained attested the possibility of processing the intensity values of the samples (Fig. 6).

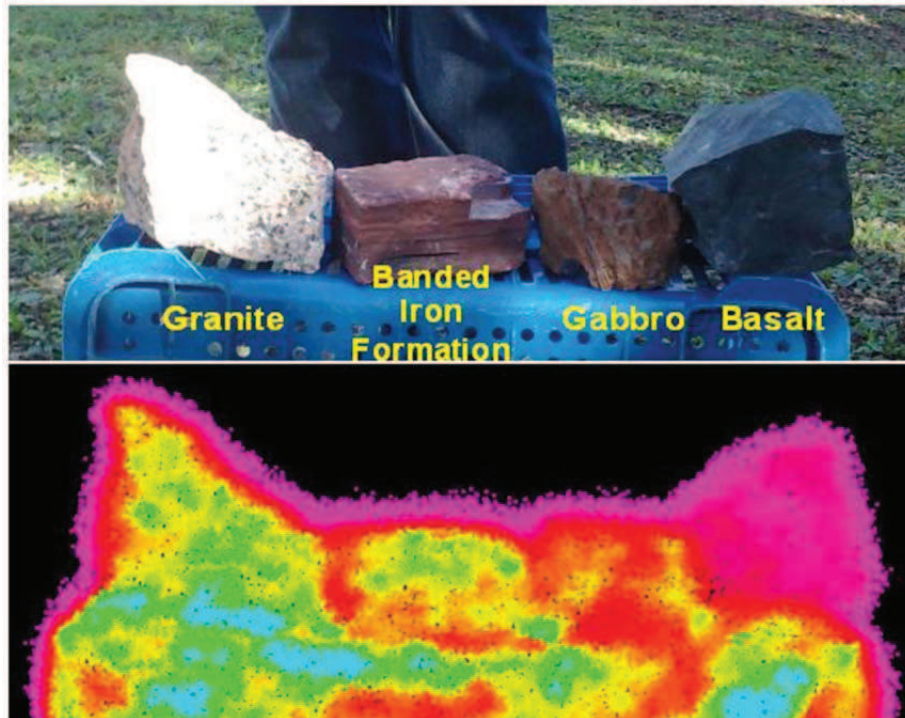


Fig. 6. Initial survey with rock samples, 60 meters apart from the scanner. The unusual magenta points around the samples are the edge effect.

Another key component identified in the survey of the samples was the presence of noise that presents a low gray level near to the minimum values found in the point cloud, around the bracket assembly and samples. This feature was due to the divergence of the laser, which in a distance of 100 meters, covers a circle with 2,2 cm in diameter. If we consider that the spacing between points used for this survey was 1 mm and the average distance between the laser and the targets was 60 meters, we can infer that in the edges of the targets, due to the size of the laser pulse, an increasingly smaller percentage of the pulse returns, until the moment it ceases altogether, causing an area of low return (Fig. 7)

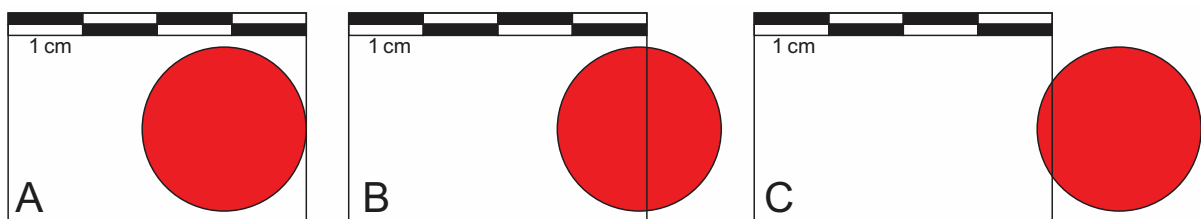


Fig. 7. Edge effect in the targets, using the Iiris 3D divergence (2,2 cm at 100 m) and 1 cm space between the points. A: The laser pulse in full incidence on the target. B: The laser pulse with almost 50% incidence on the target, obtaining a second response from part of the pulse outside the target. C: The laser pulse with only 10% of incidence in the target, obtaining an extremely low intensity primary point and a stronger second response.

5.3 - DATA PREPARATION

The study areas A and B had already been surveyed in previously in projects conducted by the Graduate Program in Geology in Unisinos and the data were available for use in the LASERCA, which simplified the processes of study and selection of the areas.

The use of this data confirms a key feature for the jobs that generate point cloud data, specifically to allow that after the initial data collection, new processes or use of different techniques can be performed without running the risk of damage or data loss. This feature provides a historical record of the outcrop, which allows their use independent of harsh conditions of weathering or destruction.

The point clouds from both surveys were pre-processed in the PARSER software, for convert the Iiris 3D raw format BLK to a XYZIRGB format that can be imported by most programs of point cloud processing. The intensity data of the Morro do Papaléo outcrop were exported as 16 gray levels and the Pedra Pintada outcrop with 256 gray levels of intensity. Despite the different ranges of output intensity data in the outcrops, they showed no use impossibilities for the processing of return values.

After the pre-processing of the point clouds, they were imported in the software Polyworks (Inovx), specific software for processing data from TLS. In Polyworks were removed all extraneous elements from the outcrop, such as vegetation, elements from anthropic action (garbage, waste materials, etc.) and any other elements that are not part of the features of the outcrop.

The survey of the study area A, Morro do Papaléo, in the city of Mariana Pimentel, was performed with an average spacing of 3 cm between the points, obtained at an average distance of 48 meters. Due to the conditions found at the site, it was not possible to install the equipment over a longer distance. However, the data collected presented the right characteristics to be processed for use of its intensity. A total of 8 stations were performed in the study area in order to obtain the entirely outcrop, but were selected an area of approximately 36 square meters (6m x 6m) in an ideal location where they were all major facies of the outcrop on site.

The survey of the study area B, Pedra Pintada, in the city of Caçapava do Sul, was performed with an average spacing of 4 cm at an average distance of approximately 232 meters between the equipment and the face of the outcrop. The conditions found at the site allowed the installation of the equipment at a distance suitable for the collection of data which allow processing of intensity values.

At this location, the main face of the outcrop has a length of approximately 274 meters, where we selected a smaller area with a length of approximately 165 meters in order to allow greater flexibility in the experiments and tests.

The point clouds in both study areas were processed to generate histograms of the spectral distribution of rocks in the outcrops to assist in the process of choosing the number of classes to be classified.

5.4 - K-CLOUDS CLASSIFICATION PROGRAM

Currently, the process of the intensity values of the laser scanner data is performed in conventional software for digital image processing. Aiming to spread a specific method for use of TLS in outcrops, a program was developed specifically to process point clouds by applying the clustering classification algorithm k-means (MacQueen, 1967; Alsabti, 1998).

This software, named K-Clouds (Fig. 8), developed in partnership between V3D and UNISINOS, import data from point clouds, previously exported to TXT or PTS file format, from the surveyed outcrops, and by applying the k-means algorithm performs the classification of the point cloud in "k" classes, defined by the user.

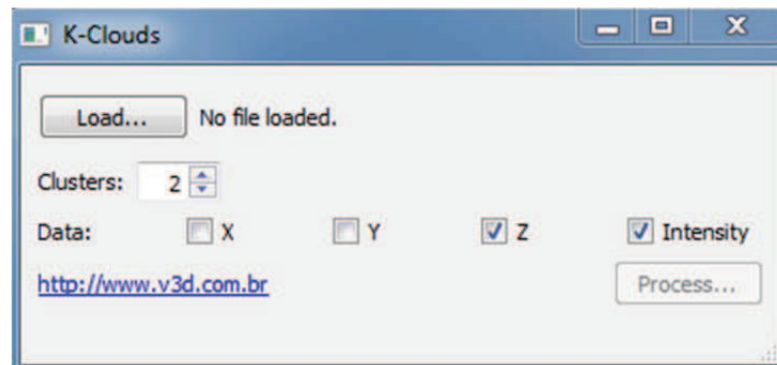


Fig. 8. K-Clouds interface. The software allows the user to define the number of clusters to generate and if only the intensity values will be considered, or the spatial values from the points (X, Y and Z coordinates) will be part of the classification process as well.

The information is exported through a file in XYZRGB format where each class "k" has a unique RGB encoding, in order to ease the identification of each class. This information can then be imported into software that support point cloud and quantified according to the user's needs, especially allowing geologists to generate analogies between the colors used by the system and the physic-chemical characteristics of the outcrop, in order to allow the identification of the rocks present in the outcrop and put in evidence characteristics that may complement the studies carried out on site.

6 - RESULTS AND DISCUSSION

In the initial testing phase with the samples, became clear that the equipment used couldn't be operated so close to the targets with the purpose of using the intensity values of return due to his extremely strong laser pulse, masking the spectral signature of the targets. This issue has been solved by collecting data at distances close to or greater than 50 meters.

Another feature that could be proved with this survey was the relationship between data and noise found. As we improve the resolution of the survey reducing the space between the points, we add a significant amount of noise, points dislocated from the actual position of the target. Because of this feature and the difficulty of carrying out a data filtering, the selection of the proper space between the points becomes, with the use of an adequate distance between the equipment and the target, a key element for a positive or negative work outcome.

Data from the initial test were processed using the K-Clouds software and were selected four ($k = 4$) distinct classes of rocks, one class for each rock sample used.

The results show a large difference between the basalt sample (located to the right) and the other samples (Fig. 9).

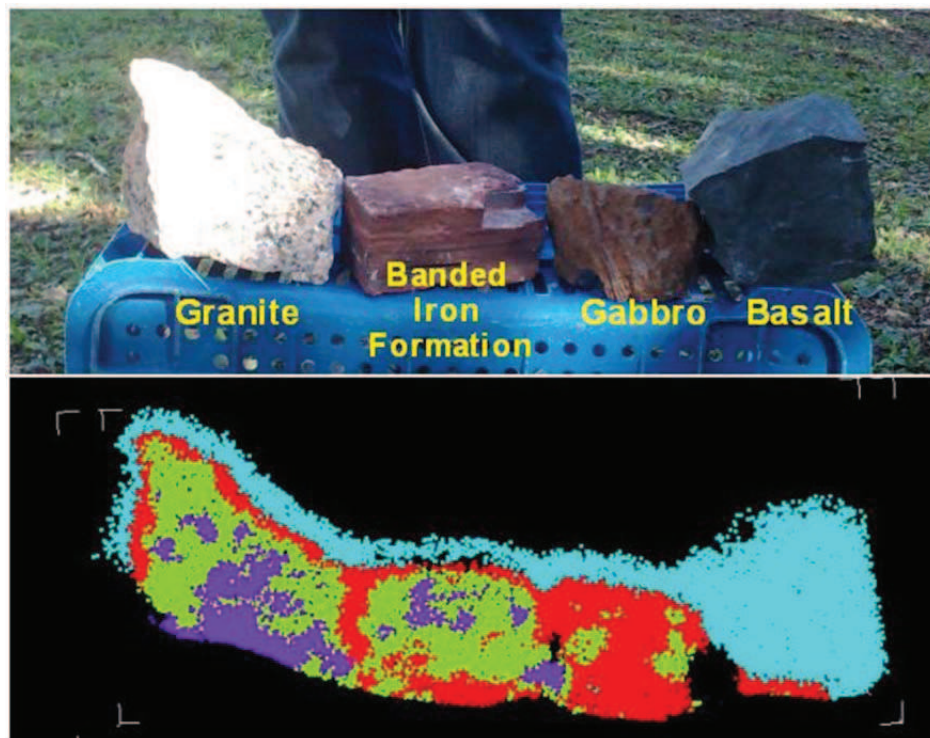
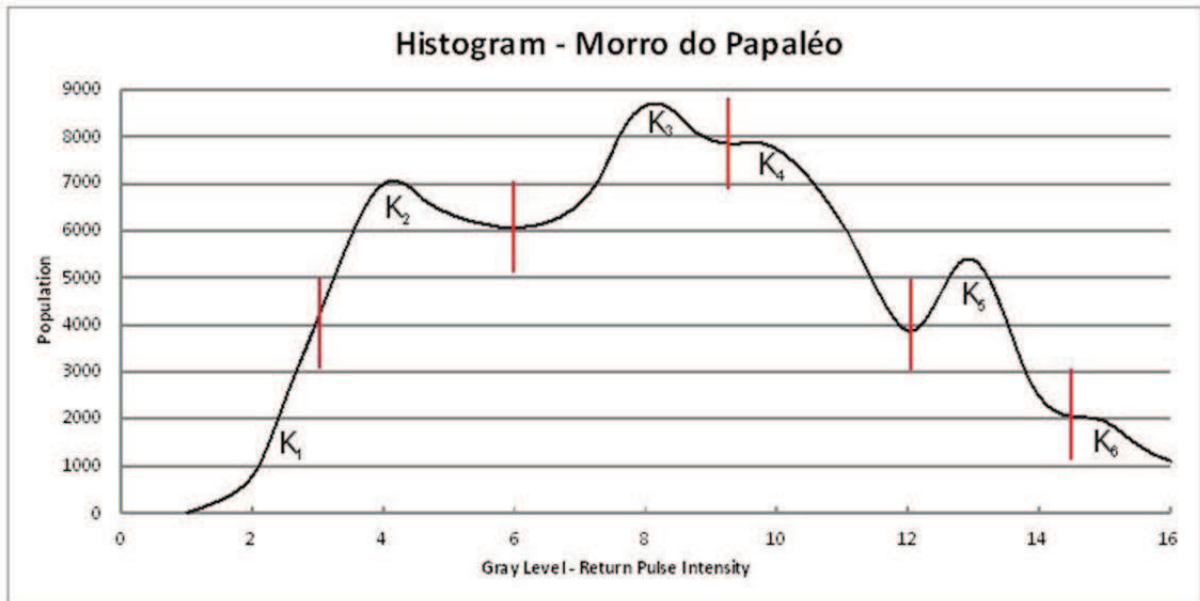


Fig. 9. Classified Point Cloud from the rock samples. The basalt sample (cyan – class 1) is easily recognizable, as the edge effect above all samples, but the other samples need a specific analysis to be identified. The granite is formed by 50% of class 2 (green), 40% of class 3 (purple) and 10% of class 4 (red); the banded iron formation is formed by 70% of class 2, 15% of class 3 and 15% class 4; the gabbro is formed by 85% of class 4 and 15% class 2.

Compared with the other samples, the basalt, due to its low reflectivity and high capacity of energy absorption due to its dark tint, presented a low return of the laser pulse emitted. These features made their identification easier by the classifier.

The external areas of the samples were subjected to the edge effect from the diameter of the laser and high resolution, providing low intensity return values. These points were wrongly placed within the same class of the basalt sample. The other samples showed minor differences regarding a specific spectral signature compared with the sample of basalt, but if we make an analysis of the amount of points from each class in the samples, we can differentiate the rocks. The granite is formed by 50% of class 2 (green), 40% of class 3 (purple) and 10% of class 4 (red); the banded iron formation is formed by 70% of class 2, 15% of class 3 and 15% class 4; the gabbro is formed by 85% of class 4 and 15% class 2.

In the study area A, Morro do Papaléo outcrop, the resulting point cloud with about 51,000 points was processed to generate a histogram of the spectral distribution from the rocks available in the outcrop (Graph. 1).



Graph. 1. Histogram from the return intensity values from the Morro do Papaléo outcrop. The red vertical lines separate the clusters that were user defined and applied in the K-Clouds software.

After the histogram analysis, the point cloud were classified into six classes of intensity return ($k = 6$) based on the spectral distribution of the intensity data (Fig. 10).

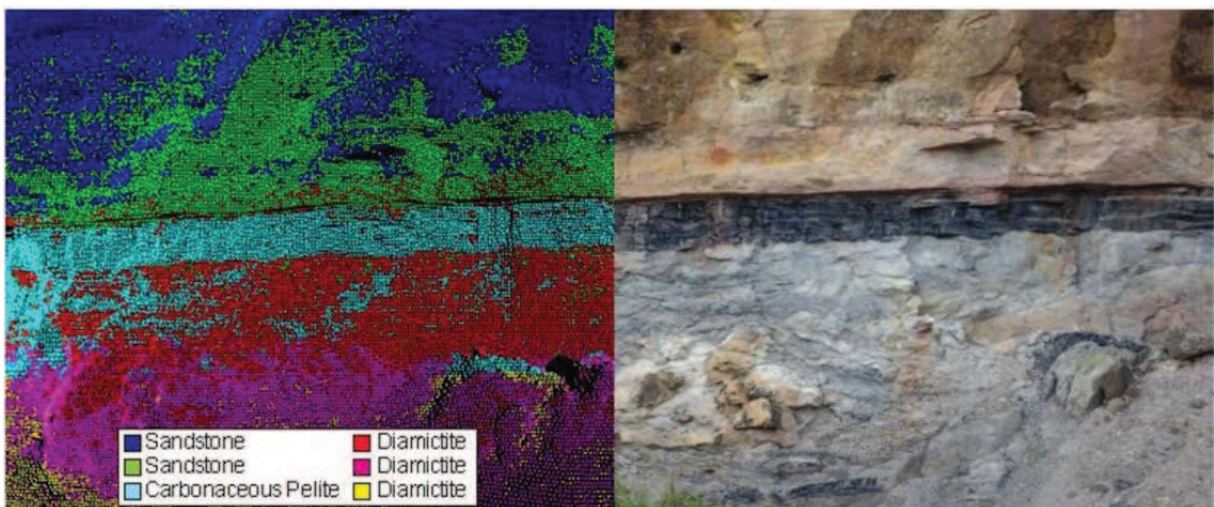
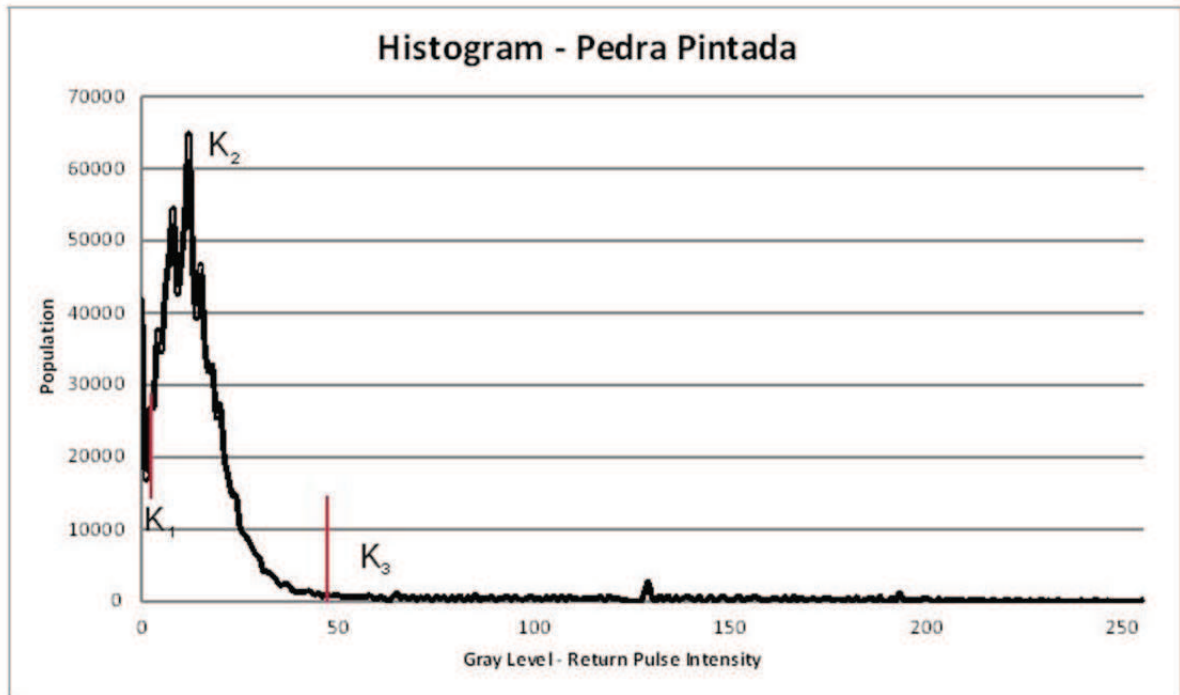


Fig. 10. Comparison between the classified point cloud (left) and the reference image from the outcrop (right).

In a direct visual comparison of the classified point cloud with the reference image of the site, it can be concluded that the classifier was able to identify and separate the carbonaceous pelite layer in the central portion of the outcrop (cyan). Above the carbonaceous pelite layer in the upper portion of the outcrop, the existing sandstone was separated into two classes, the colors dark blue and green. The parts placed in the dark blue exhibit a tendency to be sandstone with higher degree of weathering, while the parts placed in the green tend to be sandstone with lower degree of weathering.

At the bottom of the carbonaceous pelite, the program identified three distinct features in the diamictite, which has a tendency to be a less weathered rock near the carbonaceous pelite (red) and a more weathered rock near the base layer (magenta and yellow). It is also evident in the lower right portion of the study area, a small block of carbonaceous pelite detached from the main layer which was successfully identified (cyan).

In the study area B, the Pedra Pintada outcrop, with approximately 2.6 million points, were processed in the same manner as the study area A to generate a histogram of the spectral distribution of the existing rocks in the outcrop (Graph. 2).



Graph. 2. Histogram from the return intensity values from the Pedra Pintada outcrop. The red vertical lines separate the clusters that were user defined and applied in the K-Clouds software.

After the histogram analysis, it was defined that the point cloud should be classified into three classes of intensity return ($k = 3$) based on the spectral distribution of the intensity data (fig. 11). In both cases, along with the data from the histogram, a photo from the site assisted in determining the number of classes to be used.

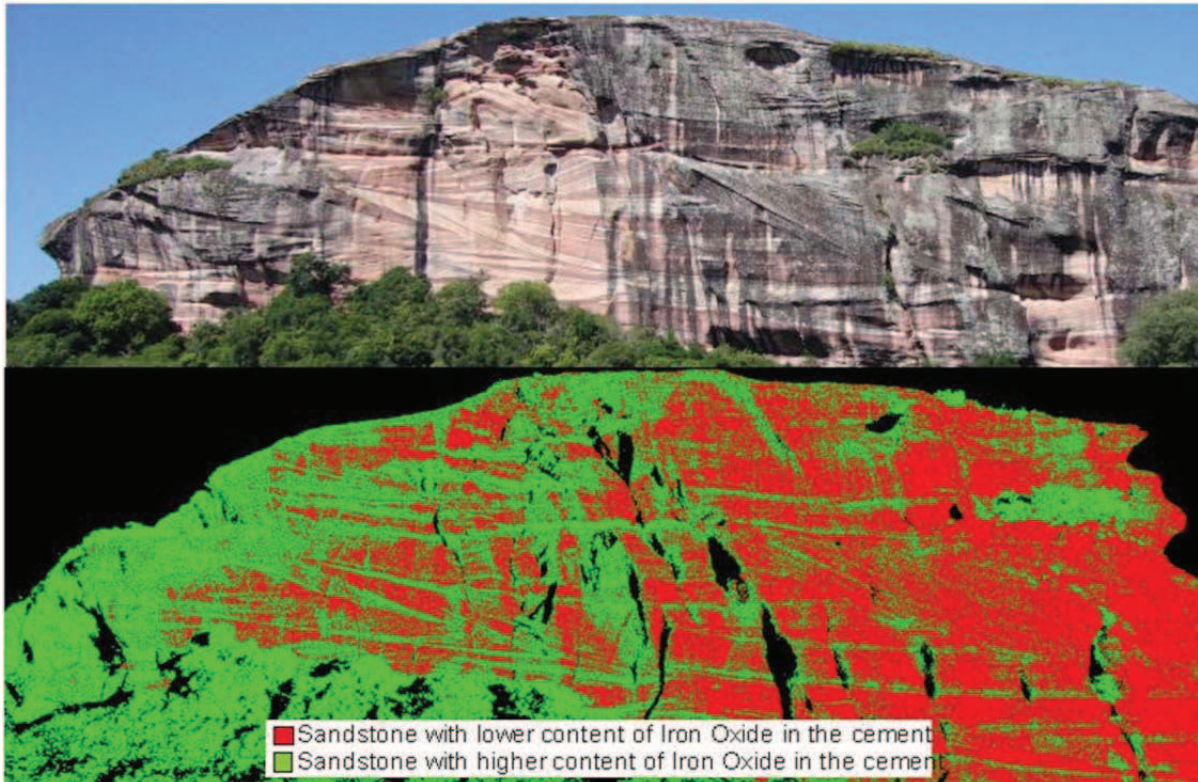


Fig. 11. Comparison between the classified point cloud (bottom) and the reference image from the outcrop (top).

The use of only three classes of information in this outcrop, in addition with the analysis of the histogram, is based on the separation of the different areas from the outcrop concerning the iron oxide concentration present, which is clearly characterized by the different levels of reddish hue present in the outcrop.

In the classified point cloud it is possible to identify the depositional structures, as well as identify areas with greater or lesser concentration of iron oxide. The green points refer to higher concentrations of iron oxide and the red area refers to lower concentrations of this compound in the cement of the stone.

Another factor to consider is that due to the wavelength of 1535 nanometers from the Ilris 3D, in the mid-infrared range, there is a small penetration of the laser in areas where the rock is affected by lichens or other elements of weathering, which allowed the spectral classification does not suffer interference from these elements. The comparison of the photo with the spectral classification clearly shows that the sedimentary structures of the outcrop are visible even in areas with lower quality of exposure.

This feature becomes important we consider that due to adverse weather conditions in some outcrops, the presence of these elements is constant and under normal conditions or with the use of equipment with other wavelengths, as in the visible range, for example, this survey and classification would not be possible.

7. CONCLUSIONS

The use of Terrestrial Laser Scanner for applications in Geology and Digital Outcrop Modeling is a technological trend that increasingly sees its place among the various classical geologic techniques already established. Modern equipment, with longer

range, higher quality, better spatial accuracy of the data and reduced time for collection of data make the use of Terrestrial Laser Scanner a viable and reliable tool in the execution of works.

The classification of spectral patterns of intensity from the laser pulse return for geological applications is an area that needs more developments and specific research aimed to establish and consolidate work methods. In this context, it is clear that the development of the K-Clouds software, through the use of k-means cluster classifier provides a simple and practical tool to be inserted within the workflow geology professionals. However, other areas that use data from Terrestrial Laser Scanner can use these methods.

The application of this program to classify the intensity values of point clouds from outcrops presented consistent results, being able to identify differences between several rocks presented in outcrops, or even changes in chemical composition related to the presence of cement with iron oxide found in specific levels of the Pedra Pintada outcrop.

It is also clear that the k-means classifier is suitable for this purpose through his general characteristics that are well adapted to various tasks and goals, both specifically and generically. This classification tool has huge potential for development, and its source code can be optimized to reduce the time spent processing the information, and improving, in general, the user interface.

One of the improvements planned for the program is the use of other classifiers in addition to the k-means, providing new results for different rocks, as well as the application of binders specific to certain rocks, such as carbonate rocks. Another element to be developed in the user interface is the automatic display of the histogram from the intensity of returned laser pulse in order to ease the user understanding and simplify the process of choosing the correct number of user-defined classes to improve the results obtained by the classifier.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Geology Graduate Program of the Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS and LASERCA (Laboratory of Remote Sensing and Digital Cartography) technicians of this university for providing support for the fieldwork. This project was financially supported by PETROBRAS through the projects NEAP (16 – SAP 4600242459) and “Mapeamento 3D Georreferenciado de Afloramentos Utilizando uma Técnica LIDAR” (0050 0044869. 08.4 – SAP: 4600285973) and FAPERGS, project “Modelos Digitais de Afloramentos como ferramenta na análise e interpretação geológica” (ARD – Process 10/0477-0).

REFERENCES

Alfarhan, M., White, L., Tuck, D., Aiken, C. Laser rangefinders and ArcGIS combined with three-dimensional photorealistic modeling for mapping outcrops in the Slick Hills, Oklahoma. *Geosphere*, vol. 4, n. 3, p. 576–587, 2008.

Alsabti, K., Ranka, S. Singh, V. An Efficient K-Means Clustering Algorithm. In: *First Workshop on High Performance Data Mining*, Orlando, Florida, 1998.

Arnot, M.J.; Lewis, J.M.; Good, T.R. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale out-crop data. *Journal of Sedimentary Research*, v. 67, p. 984-987, 1997.

Bates, K. T., Rarity, F., Manning, P. L., Hodgetts, D., Vila, B., Oms, O., Galobart, A., Gawthorpe, R. L.. High-resolution LiDAR and photogrammetric survey of the Fumanya dinosaur tracksites (Catalonia): implications for the conservation and interpretation of geological heritage sites. *Journal of the Geological Society*, v. 165, n. 1, p. 115–127, 2008.

Bellian, J. A., Jennette, D. C., Kerans, C., Gibeaut, J., Andrews, J., Yssldyk, B., And Larue, D., 3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology. 2002. Disponível em <http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>. Acesso em: 21 mar 2011.

Bellian, J. A.; Kerans, C.; Jennette, D. C. Digital Outcrop Models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 75, nº 2, Março, pp. 166-176, 2005

Bellian, J. A., Beck, R., Kerans, C. Analysis of hyperspectral and lidar data: Remote optical mineralogy and fracture identification, *Geosphere*, v. 3, n. 6, p. 491-500, 2007.

Brodu, N., Lague, D. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 62, p. 121-134, 2012.

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*, Vol. 165, pp. 625-638, 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*. v. 81, p. 339-347, 2011

Enge, H. D., Buckley, S. J., Rotevatn, A., Howell, J. A. From outcrop to reservoir simulation model: workflow and procedures. *Geosphere*, v. 3, n. 6, 469-490, 2007.

Enge, H. D., Howell, J. A. Impact of deltaic clinothems on reservoir performance: Dynamic studies of reservoir analogs from the Ferron Sandstone Member and Panther Tongue, Utah. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 94, n. 2, 139-161, 2010.

Ergün, B. Terrestrial Laser Scanner Data Integration in Surveying Engineering. In: Wang, C. *Laser Scanning, Theory and Applications*. InTech, 2011.

Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated

succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, n. 6, p. 795-827, 2009.

Fabuel-Perez, I., Hodgetts, D., Redfern, J. Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology - workflow and implications for geological modelling: Oukaimeden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco). *Petroleum Geoscience*, v. 16, n. 2, p. 133-154, 2010.

Ferrari, F., Veronez, M. R., Tognoli, F. M. W., Inocencio, L. C., Paim, P. S. G., Silva, R. M. da. Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando laser scanner terrestre. *Geociências, UNESP*, v. 31, n. 1, p. 79-91, 2012

Franceschi, M., Teza, G., Preto, N., Pesci, A., Galgaro, A., Girardi, S., Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (6), p. 522–528, 2009.

Gan, G., Ma, C., and Wu, J., *Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications*. SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, VA, 2007.

Hariharan, P. *Optical Interferometry*. 2^a Ed. Elsevier, 2003.

Hariharan, P. *Basics of Interferometry*. 2^a Ed. Elsevier, 2007.

Hodgetts, David. *LiDAR in the Environmental Sciences: geological applications*. In: Heritage, G. L.; Large, A. R. G. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 2009

Janson, X., Kerans, C., Bellian, J. A., Fitchen, W. Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 91, n. 10, p. 1405-1436, 2007.

Jones, R. R., Mccaffrey, K. J. W., Imber, J., Wightman, R., Smith, S. A. F., Holdsworth, R. E., Clegg, P., Paola, N. D. E., Healy, D., Wilson, R. W. Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues. *Geological Society of London Special Publications*, v. 309, n. 1: p. 87-98, 2008.

Jones, R. R., Kokkalas, S., Mccaffrey, K. J. W. Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR) - The Arkitsa fault, central Greece, as a case study. *Geosphere*, v. 5, n. 6: p. 465-482, 2009.

Kurtzman, D., El Azzi, J. A., Lucia, F.J., Bellian, J., Zahm, C., Janson, X. Improving fractured carbonate-reservoir characterization with remote sensing of beds, fractures, and vugs. *Geosphere*, v. 5, n. 2: p. 126-139, 2009.

MacQueen, J. B. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press, 1:281-297, 1967.

Maerten, L., Pollard, D. D., Maerten, F. Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, Central Utah. *Journal of Structural Geology*, v. 23, n. 4, p. 585-592, 2001.

McCaffrey, K. J. W., Feely, M., Hennessy, R., Thompson, J. Visualization of folding in marble outcrops, Connemara, western Ireland: An application of virtual outcrop technology. *Geosphere*, v. 4, n. 3, p. 588-599, 2008.

Mirkin, Boris. *Mathematical classification and clustering*. Kluwer Academic Publishers, 1996.

Nagalli, A., Fiori, A. P., Nagalli, B. Método para Aplicação de Escâner a Laser Terrestre ao Estudo da Estabilidade de Taludes em Rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 1, p. 56-67, 2011.

Nelson, C. E., Jerram, D. A., Hobbs, R. W., Terrington, R., Kessler, H. Reconstructing flood basalt lava flows in three dimensions using terrestrial laser scanning. *Geosphere*, v. 7, n. 1, p. 87-96, 2011.

Olariu, M. I., Ferguson, J. F., Aiken, C. L. V., Xu, X. Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. *Geosphere*, v. 4, n. 1, p. 247-259, 2008.

Paim, P. S. G.; Fallgatter, C.; Silveira, A. S. Guaritas do Camaquã, RS - Exuberante cenário com formações geológicas de grande interesse didático e turístico. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C. R. G.; Fernandes, A. C. S.; Berbert-Born, M.; Sallun Filho, W.; Queiroz, E. T.; (Eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio076/sitio076.pdf>, 2010.

Petrie, Gordon; Toth, Charles K. *Terrestrial Laser Scanners*. In: Shan, Jie & Toth, Charles K (org.) *Topographic Laser Ranging and Scanning: principles and processing*. Boca Ratón: CRC Press, 2009.

Phelps, R. M., Kerans, C. Architectural Characterization and Three-Dimensional Modeling of a Carbonate Channel Levee Complex: Permian San Andres Formation, Last Chance Canyon, New Mexico, USA. *Journal of Sedimentary Research*, v. 77, n. 11, p. 939-964, 2007.

Pringle, J. K., Westerman, A. R., Clark, J. D., Drinkwater, N. J., Gardiner, A. R. 3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK. *Petroleum Geoscience*, v. 10, p. 343-352, 2004.

Rotevatn, A., Buckley, S. J., Howell, J. A., Fossen, H. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, n. 3, p. 407-427, 2009.

San Jose Alonso, J. I., Rubio, J. M., Martin, J. J. M., Fernández, J. G. Comparing time-of-flight and phase-shift. The survey of the Royal Pantheon in the Basilica of San Isidoro (León). *ISPRS Workshop '3D-ARCH 2011' 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, Trento, Italy, Março – 2011.

Verwer, K., Merino-Tome, O., Kenter, J. A. M., Della Porta, G. Evolution of a High-Relief Carbonate Platform Slope Using 3D Digital Outcrop Models: Lower Jurassic Djebel Bou Dahar, High Atlas, Morocco. *Journal of Sedimentary Research*, v. 79, n. 6, p. 416-439, 2009.

Wawrzyniec, T. F., McFadden, L. D., Ellwein, A., Meyer, G., Scuderi, L., Mcauliffe, J., Fawcett, P. Chronotopographic analysis directly from point-cloud data: A method for detecting small, seasonal hillslope change, Black Mesa Escarpment, NE Arizona. *Geosphere*, v. 3, n. 6, p. 550-567, 2007.

White, P. D., Jones, R. R. A cost-efficient solution to true color terrestrial laser scanning. *Geosphere*, v. 4, n. 3, p. 564-575, 2008.

Xu, X., Aitken, C. L. V., Bhattacharya, J. B., Davies, R. K., Carbeanu, R. M., Nielsen, K. C., Mcmechan, G. A., Abdelsalam, M. G. Creating virtual 3-D outcrop. *The Leading Edge*, v. 19, p. 197-202, 2000.

Xu, X., Bhattacharya, J. B., Davies, R. K., Aitken, C. L. V. Digital Geologic Mapping of the Ferron Sandstone, Muddy Creek, Utah, with GPS and Reflectorless Laser Rangefinders, *GPS Solutions*, v. 5, p. 15-23, 2001.

Zahm, C. K., Hennings, P.H. Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, n. 11, p. 1427-1446, 2009.