

# VISUALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE AFLORAMENTOS UTILIZANDO LASER SCANNER TERRESTRE

Fabiano FERRARI <sup>1</sup>, Maurício Roberto VERONEZ <sup>1,2</sup>,  
Francisco Manoel Wohnrath TOGNOLI <sup>1</sup>, Leonardo Campos Inocêncio <sup>1</sup>,  
Paulo Sergio Gomes PAIM <sup>1</sup>, Reginaldo Macedonio da SILVA <sup>1</sup>

(1) Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos / UNISINOS. Av. Unisinos, 950 – Bairro Cristo Rei. CEP 93022-000. São Leopoldo, RS. Endereços eletrônicos: ferrari@ferraritopografia.com.br; veronez@unisinos.br; fognoli@unisinos.br; lcinocencio@unisinos.br; ppaim@unisinos.br; macedoniors@yahoo.com  
(2) Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital – LASERCA, Universidade do Vale do Rio dos Sinos / UNISINOS. Av. Unisinos, 950 – Bairro Cristo Rei. CEP 93022-000. São Leopoldo, RS. Endereço eletrônico: veronez@unisinos.br

## Introdução

*Scanner a Laser* Terrestre em Estudos Geológicos

Área de Estudo

Métodos

Aquisição

Estruturação da Rede de Apoio Geodésico

Imageamento com *Scanner a Laser* Terrestre

Processamento

Interpretação do Modelo Digital de Afloramento

Resultados e Discussões

Conclusões

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O sistema LIDAR obtém nuvens de pontos georreferenciadas que podem ser convertidas em Modelos Digitais de Afloramentos (MDAs). A modelagem digital de afloramentos é uma técnica recente, que necessita de pesquisas para o desenvolvimento de procedimentos e ferramentas que permitam superar as dificuldades impostas pelo grande volume de dados e realizar interpretações geológicas diretamente no MDA de forma rápida e eficiente. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi estabelecer uma sequência de métodos envolvendo a aquisição e o processamento de nuvens de pontos e a visualização e interpretação de feições geológicas em um MDA. O Afloramento Pedra Pintada, localizado em Caçapava do Sul-RS, foi imageado a partir de 7 estações e a nuvem totalizou 17 milhões de pontos, convertida em um MDA após processamento. Dificuldades nesse processo ocorreram em razão do grande volume de dados, da ausência de recursos de otimização de processamento e da limitação no gerenciamento de banco de dados. A estruturação de uma rede de apoio geodésica foi fundamental para que as nuvens de pontos estivessem associadas a um único referencial geodésico. A técnica de ortorretificação permitiu sobrepor fotografias de alta resolução do afloramento à nuvem de pontos, o que agregou qualidade na visualização, na identificação de feições geológicas e na interpretação do MDA. O desenvolvimento de aplicativos eficientes de visualização tridimensional, com ferramentas específicas de interpretação geológica, é a etapa subsequente da pesquisa. Isso permitirá a ampliação do uso dessa técnica para estudos geológicos e aumentará a qualidade dos dados obtidos de afloramentos.

**Palavras-chave:** LIDAR; Ortorretificação, Visualização Tridimensional, Interpretação de Afloramentos; Pedra Pintada; Bacia do Camaquã.

**ABSTRACT** – *F. Ferrari, M.R. Veronez, F.M.W. Tognoli, L.C. Inocêncio, P.S.G. Paim, R.M. da Silva – Visualization and interpretation of digital models of outcrops using terrestrial laser scanner.* The LIDAR system acquires georeferenced clouds with thousand-to-million of points which can be converted in digital outcrops models (DOMs). This technique is still a novelty for applied studies in Geology and requires more research and development. Specific workflows and tools are necessary to handle the huge amount of data and to perform fast and efficient geological interpretations directly on the DOMs. Thus, the main goal of this work was establish a workflow approaching acquisition and processing of point clouds, and visualization and interpretation of the models. The Pedra Pintada outcrop, located in Caçapava do Sul-RS, was imaged from seven different stations and the cloud reached 17 million of points, converted in a DOM after processing. Difficulties occurred due to the huge amount of data, the lack of optimization resources for processing and limitation of the database management. The support given by a geodetic network was fundamental to associate the point clouds with a unique geodetic reference system. The orthorectification technique has permitted overlie high resolution digital photographs onto the point cloud in order to increase the visual quality and, consequently, the identification of geological features and the interpretation of the DOM. The development of an efficient tridimensional visualization software with specific tools for geological interpretation is the ensuing step of the work. This will allow widen the utilization of this technique for geological purposes and will increase the quality of the data acquired from outcrops.

**Keywords:** LIDAR; Orthorectification, Tridimensional Visualization, Outcrop Interpretation; Pedra Pintada; Bacia do Camaquã.

## INTRODUÇÃO

Pesquisas na área de modelagem geológica cada vez mais incorporam métodos de geração de modelos tridimensionais, de forma a favorecer a visualização, a parametrização e a interpretação. Esses modelos têm potencial para incrementar a qualidade da interpretação geológica, mas ainda necessitam de pesquisas que envolvam diferentes áreas do conhecimento, como a Geologia, Cartografia e Informática. Com o avanço tecnológico em *hardware* e *software*, ocorreu uma melhoria significativa na aquisição e processamento de dados. Atualmente, estão disponíveis no mercado vários equipamentos e aplicativos, como aqueles associados a técnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*) na qual enquadra-se o *scanner a laser* terrestre (*Terrestrial Laser Scanner*). No entanto, a simples utilização desses equipamentos e aplicativos não é suficiente para solucionar problemas geológicos, sendo necessárias pesquisas que integrem e otimizem as etapas de aquisição, processamento, visualização e interpretação.

Uma comparação que pode ser usada é a da Fotogrametria, que evoluiu com a substituição de máquinas fotográficas tradicionais de filmes e de processos mecânicos para as máquinas digitais de alta resolução. Com o desenvolvimento de aplicativos de processamento, a Fotogrametria passou a ter aplicações

em Geomorfologia, Glaciologia e Geologia (Baltsavias et al., 2001; Enge et al., 2007). Outra técnica que evoluiu rapidamente foi o georreferenciamento de informações geológicas por meio do Sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Tal sistema vem permitindo de uma maneira mais eficiente, tanto em exatidão quanto em ganho de tempo, integrar diferentes produtos geológicos em um único sistema de referência, garantindo uma maior integridade nos processos de geração de modelos geológicos tridimensionais (Pringle et al., 2004; Thurmond et al., 2005; White & Jones, 2008).

Modelos digitais tridimensionais têm aplicações diversas e sua utilização vem crescendo no cenário geológico mundial, em especial aqueles obtidos a partir de *scanner a laser* terrestre. No Brasil, ainda são poucos os estudos que discutem as vantagens, os métodos de trabalho e as aplicações dessa ferramenta (Freire, 2006; Barchik et al., 2007; Wutke & Centeno, 2007; Teixeira, 2008; Centeno et al., 2010; Jacobi et al., 2010; Nagalli et al., 2011). Nesse contexto, é indispensável desenvolver e implementar procedimentos e métodos para a modelagem digital de afloramentos (MDAs) com o uso de *scanner a laser* terrestre. Esse trabalho contribui para sistematizar as atividades de aquisição e processamento de nuvens de pontos, além da visualização e interpretação de MDAs.

## SCANNER A LASER 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 vem crescendo o uso de tecnologias de mapeamento digital, em especial com o uso de *scanner a laser* 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.

A ferramenta *scanner a laser* terrestre é capaz de capturar centenas de milhões de pontos georreferenciados. Para definir coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, o equipamento emite pulsos laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso atinge o objeto e parte da energia do pulso volta para o equipamento. Com base no tempo envolvido entre a emissão e o retorno do pulso, é possível

medir a distância entre o sensor e o objeto. Tendo-se um ponto com coordenadas conhecidas na fonte do pulso, pode-se calcular a coordenada de cada ponto obtido pelo *scanner a laser* terrestre. Com base nesse princípio simples, o estudo de afloramentos ganha um novo impulso com a possibilidade de quantificação de dados antes estimados ou mesmo ignorados em razão da impossibilidade de acesso.

O uso da tecnologia LIDAR em estudos de afloramentos vem se expandindo em função da facilidade na aquisição de dados georreferenciados de forma precisa, rápida e automatizada, em especial com a utilização de sistemas terrestres. 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) e no ensino em geologia (McCaffrey et al., 2008, 2010).

## ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de Caçapava do Sul, região central do Rio Grande do Sul, há aproximadamente 300 km de Porto Alegre (Figura 1). O acesso a partir da capital se dá pelas rodovias BR-290, BR-153 e RS-625, essa última próxima à localidade de Minas do Camaquã. O Afloramento Pedra Pintada (Figura 2) foi escolhido como objeto desse estudo em razão de sua excelente exposição. As faces íngremes e relativamente pouco vegetadas no seu entorno, a existência de áreas amplas próximas ao afloramento, a presença de estruturas sedimentares com dimensões métricas e a existência de superfícies estratigráficas nítidas foram as principais características consideradas para o imageamento.

O afloramento 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 & Scherer, 2003; Paim et al., 2010). Níveis sílticos e argilosos com espessuras centimétricas a milimétricas podem ocorrer no interior dos *sets*, por vezes associados a gretas de contração (Paim & Scherer, 2003). Tais arenitos representam fácies eólicas associadas a campos de dunas simples e compostas de formato crescente cuja migração ocorria no sentido NE, enquanto os intervalos síltico-argilosos são interpretados como produtos de inundações flúvio-lacustres, que representam afogamentos periódicos desse paleodeserto (Paim & Scherer, 2003, 2007; Paim et al., 2010).

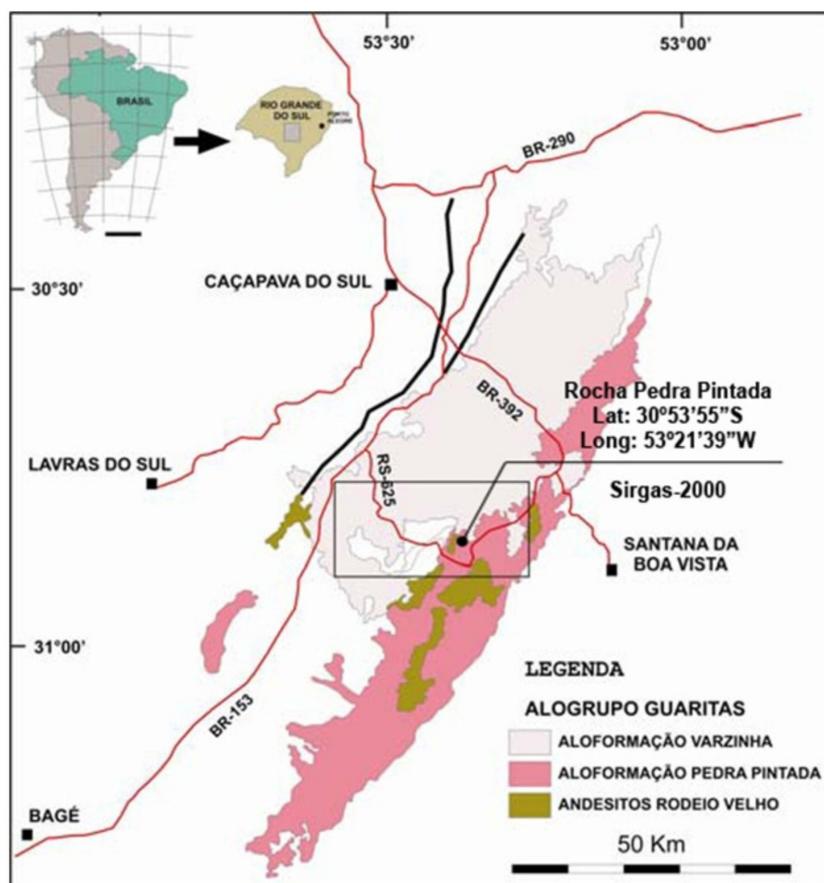


FIGURA 1. Localização da Rocha Pedra Pintada, Caçapava do Sul-RS. Fonte: Paim et al. (2010).



**FIGURA 2.** Fotomontagem de uma das faces da Pedra Pintada ajustada com *software* de edição de imagens.

## MÉTODOS

Apesar do grande potencial do *scanner a laser* terrestre como ferramenta de aquisição e visualização de dados geológicos, os métodos para a utilização dessa ferramenta são variados e podem interferir positiva ou negativamente no processo de geração de modelos digitais de afloramentos. Faz-se necessário descrever minuciosamente o fluxo de trabalho a ser executado nas atividades de interesse, principalmente no que tange à coleta e processamento dos dados. Em função do tipo de aplicação deve-se planejar a atividade de aquisição como forma de otimizar os resultados pretendidos.

As características técnicas de um sistema LIDAR são importantes para definir as aplicações em estudos geológicos. Os principais elementos que devem ser considerados são o alcance, a precisão e os recursos em imagem. O correto posicionamento do equipamento em relação ao objeto, o georreferenciamento das estações de imageamento, a iluminação adequada do afloramento e a definição da resolução necessária para a visualização e interpretação do afloramento são apenas alguns dos elementos a serem considerados previamente à etapa de imageamento. O imageamento de uma única cena de um afloramento representa um grande volume de dados, normalmente da ordem de vários milhões de pontos, contendo dados de coordenadas geodésicas, da cor da superfície em padrão RGB, obtida com o uso do sistema fotográfico acoplado ao equipamento, e dos dados de intensidade de retorno do pulso *laser*.

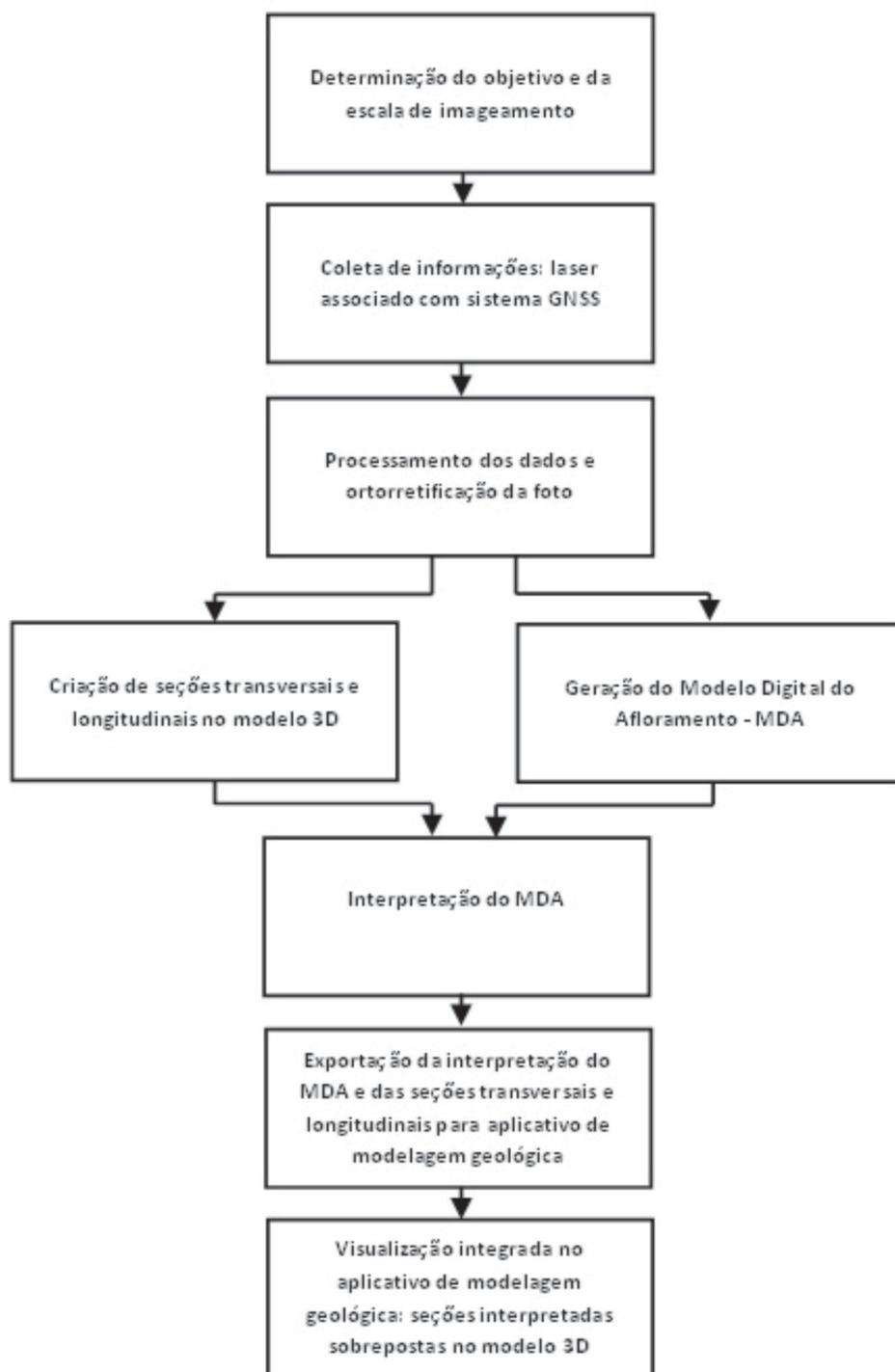
Para melhor entender o método proposto nesse trabalho, criou-se um fluxograma de atividades (Figura 3).

### AQUISIÇÃO

O imageamento é um modo relativamente simples de se obter dados de um afloramento com alta resolução, especialmente se comparado com a fotogrametria terrestre, que necessita de tempo elevado de planejamento e processamento e cuja qualidade final está relacionada à geometria da imagem e aos níveis de contraste (Baltasavias et al., 2001). No que diz respeito a estudos de afloramentos é importante considerar a densidade de pontos a serem capturados. Assim, se faz necessário avaliar inicialmente a capacidade de *hardware*, tanto para o armazenamento de dados quanto para o processamento da nuvem de pontos.

Outro parâmetro a ser considerado no processo de imageamento é a capacidade da rocha a ser imageada em refletir a luz incidente, denominada de albedo. Os fabricantes informam em seus catálogos um alcance máximo do *laser* do equipamento, porém não informam que esse alcance só é possível com objetos com um albedo mínimo de 80% (Riegl, 2009). Wehr & Lohr (1999) relataram que superfícies com rochas expostas geralmente têm um albedo de até 75%, sendo que as condições atmosféricas (*e.g.* alto percentual de umidade e de aerossóis) podem dispersar a luz do *laser*, reduzindo o alcance máximo do mesmo.

Em afloramentos, em geral, uma única estação de aquisição não é suficiente para um imageamento adequado, principalmente pela existência de obstáculos e sombras na área a ser imageada. Portanto, se faz necessário definir um conjunto de estações para garantir um imageamento representativo do objeto de estudo. Outro elemento relevante é a posição do equipamento



**FIGURA 3.** Fluxograma mostrando as diferentes etapas entre o planejamento do imageamento, aquisição, processamento, geração e interpretação do MDA e exportação dos dados.

em relação ao afloramento. Se o instrumento está instalado em um ponto muito mais baixo que o afloramento, como ocorre em geral, então a linha de visão para todas as áreas da face fica prejudicada, em razão do posicionamento oblíquo entre o equipamento e o objeto a ser imageado. Portanto, é preferencial que o equipamento fique posicionado perpendicularmente à cena, como forma de minimizar efeitos de sombra e de não-

aquisição de dados em razão das irregularidades da superfície. Na impossibilidade de posicionar o equipamento adequadamente em relação ao afloramento, Labourdette & Jones (2007) salientam que a aquisição de dados a partir de técnicas fotogramétricas ou com *scanner a laser* terrestre aerotransportados pode ser mais eficiente, ou mesmo podem ser usados para complementar o imageamento terrestre.

### Estruturação da Rede de Apoio Geodésico

O processo de imageamento integrado ao sistema GNSS (Figura 4A) foi realizado a partir da definição de um ponto de referência próximo ao afloramento (Figura 4B). Nesse ponto foi implantado um Marco Geodésico, que foi rastreado durante 4 horas com um equipamento de dupla frequência ( $L_1$ ,  $L_2$ ), modelo Leica 900. Para o transporte de coordenadas foram utilizados

como pontos de controle as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) das cidades de Santa Maria (SMAR) e Porto Alegre (POAL). Esse ponto foi ajustado com o *software* Leica GeoOffice e serviu de apoio para a obtenção das coordenadas geodésicas de sete estações utilizadas no imageamento da Pedra Pintada (Figura 5).

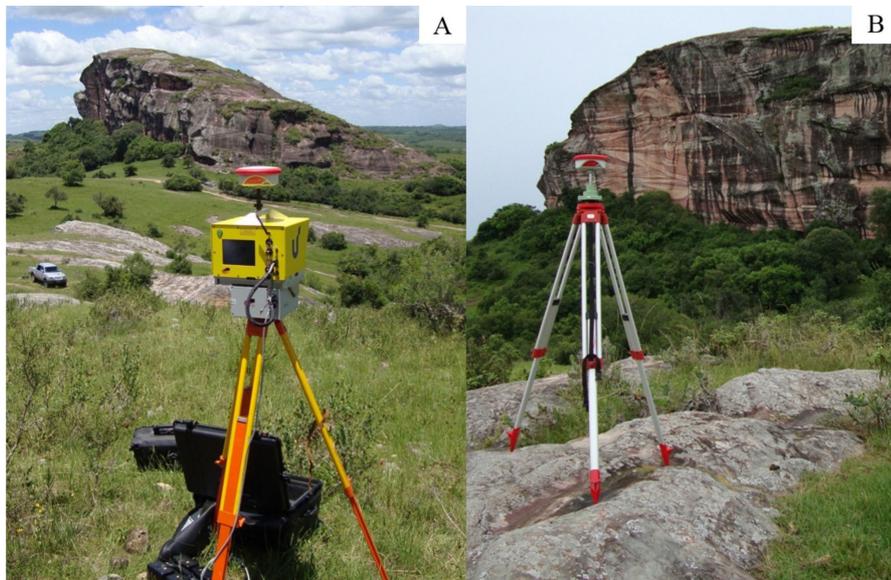


FIGURA 4. Equipamentos utilizados na etapa de imageamento. (A) *Scanner a laser* terrestre Optech; (B) Receptor GNSS.

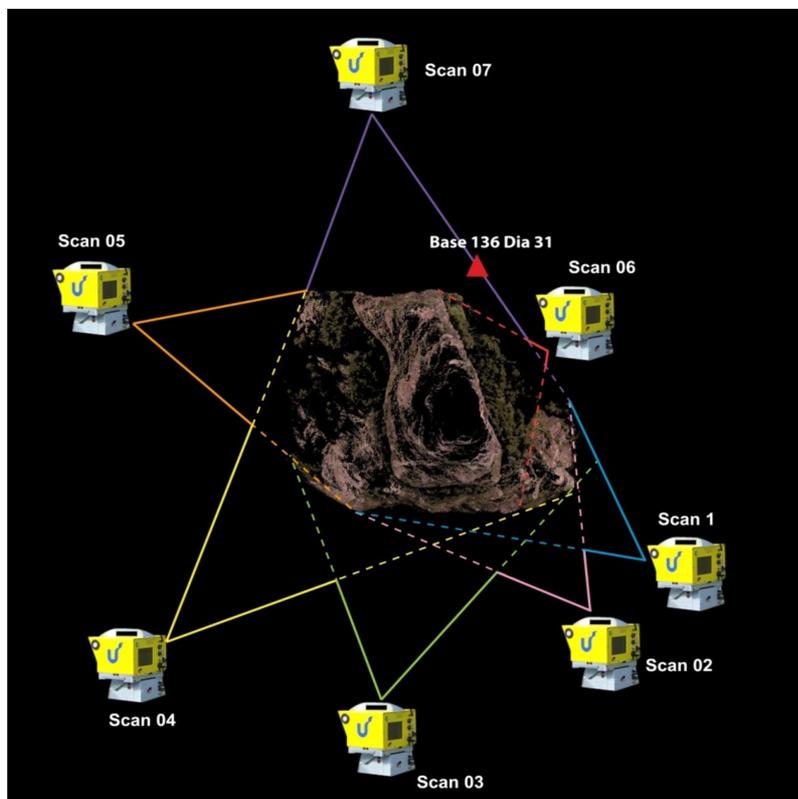
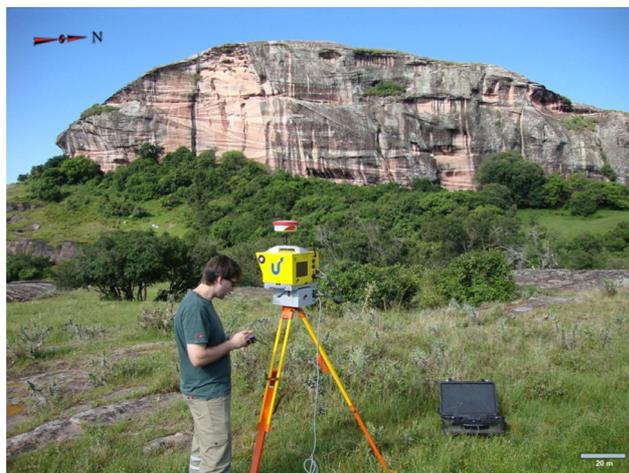


FIGURA 5. Estações de imageamento com o *scanner a laser* terrestre rastreadas com o sistema GNSS.

As coordenadas UTM de todas as estações de imageamento foram obtidas com um nível de exatidão menor que 10 mm. A preocupação com o nível de exatidão na obtenção das coordenadas geodésicas é de suma importância no processo de imageamento uma vez que o modelo 3D gerado permitirá interpretações geológicas que poderão ser integradas com outros sensores remotos e todos os dados integrados servirão para a geração de modelos geológicos tridimensionais.

### Imageamento com Scanner a Laser Terrestre

Durante o trabalho de campo para o imageamento da Pedra Pintada o scanner a laser terrestre Optech, modelo ILRIS-3D (*Intelligent Laser Ranging and Imaging System*) (Figura 6) foi instalado nos 7 pontos da rede geodésica. O imageamento em cada ponto teve a duração de aproximadamente 40 minutos. Com o transporte do scanner de um ponto a outro, seu posicionamento e configuração, levava-se aproximadamente 3 horas para cada imageamento tendo sido necessários 3 dias de trabalho. Adotou-se como parâmetro para o imageamento do afloramento uma resolução de 4 cm, o que gerou uma nuvem com 17.000.000 de pontos. As distâncias das estações de imageamento ao afloramento variaram de 170 a 320 m.



**FIGURA 6.** Scanner a laser terrestre integrado com sistema GNSS (estação SCAN 6) imageando uma das faces do afloramento.

### PROCESSAMENTO

As nuvens de pontos processadas, embora representem o relevo do afloramento com precisão, não são suficientes no processo de interpretação geológica. É importante o uso de uma câmera fotográfica de alta resolução integrada ao scanner a laser terrestre, que possibilita adicionar a cor do pixel ao ponto coletado. A imagem também pode ser usada como uma fonte adicional de medida. Mas, para tal, é necessário

calibrar a câmera, bem como utilizar os parâmetros de distorção da lente (Wolf & Dewitt, 2000). A vantagem em se trabalhar com a câmera calibrada é que a nuvem de pontos pode ser associada a uma imagem ortorretificada, desde que todas as informações estejam no mesmo sistema de referência de coordenadas.

Para a integração de dados geológicos no mesmo sistema de referência é fundamental uma rede de apoio geodésico. Para isso, se faz uso do sistema GNSS para garantir que a qualidade do georreferenciamento esteja intrinsecamente correlacionada com a exatidão da rede. A junção de diferentes cenas imageadas é um típico caso. Durante a aquisição, geralmente se faz uso de alvos, que não necessariamente têm que ser colocados no afloramento, mas, sim, em qualquer lugar desde que eles sejam visíveis de vários locais. Na prática, muitas vezes, ao invés de alvos, são utilizadas feições comuns nas cenas imageadas para a junção das mesmas (Buckley et al., 2008). Tal método proporciona um ganho de tempo nas atividades de campo especialmente quando os afloramentos são inacessíveis, mas dependem de um correto procedimento de obtenção de coordenadas das estações de imageamento.

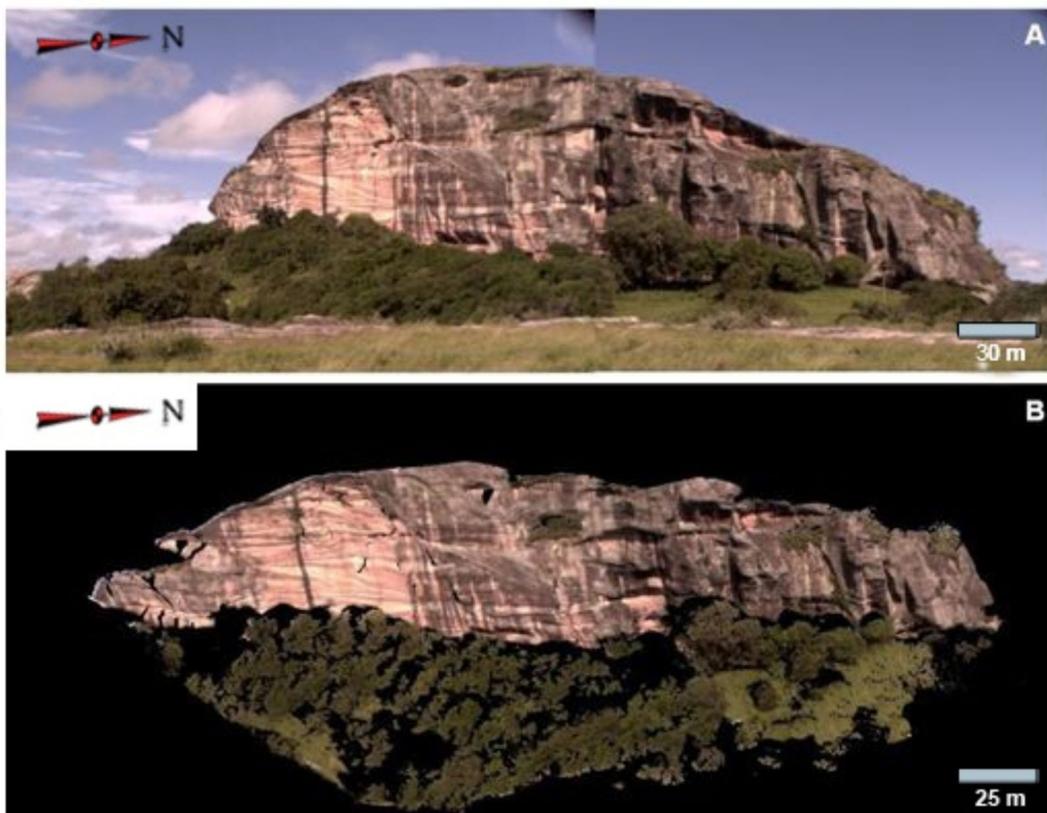
O processamento da nuvem de pontos foi realizado em 3 etapas, utilizando-se os recursos dos aplicativos *PolyWorks*, *Parser* e *Point Cloud*, conforme descrito a seguir:

1. Limpeza – foram eliminados pontos referentes à vegetação e/ou obstruções que pudessem interferir na visualização e interpretação do afloramento, bem como no tamanho do arquivo a ser processado;
2. Alinhamento e Georreferenciamento – foram executados os alinhamentos das cenas imageadas de todas as 7 nuvens de pontos obtidas a partir de cada estação para a junção em um único arquivo. De forma concomitante, realizou-se o georreferenciamento da nuvem de pontos, utilizando-se os dados obtidos no campo com o sistema GNSS;
3. Triangulação – foi executada a triangulação dos pontos para renderizar a superfície do afloramento, gerar o modelo digital tridimensional do afloramento e adicionar as informações de cores a esse modelo.

Após essas etapas, o MDA pode ser visualizado (Figura 7) e, posteriormente, interpretado.

### INTERPRETAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE AFLORAMENTO

As etapas de interpretação dos MDAs e a integração dos resultados com os aplicativos de modelagem geológica são o grande desafio na utilização da técnica LIDAR para estudos de afloramentos. Dentre os principais desafios a serem solucionados estão o processamento de grande volume de dados e o desenvolvimento de ferramentas de interpretação geológica



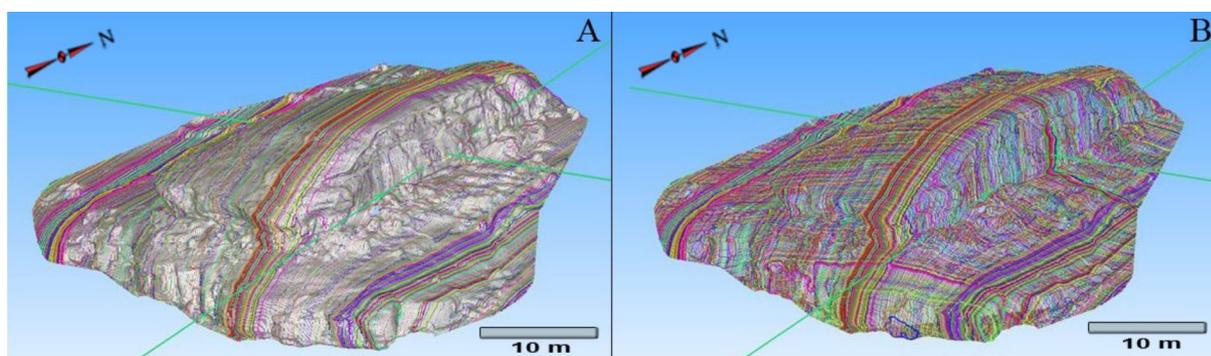
**FIGURA 7.** Comparação entre uma fotomontagem (A) e o Modelo Digital do Afloramento Pedra Pintada (B).  
Notar a distorção no topo do afloramento, na junção das fotografias.

incorporadas ao(s) aplicativo(s) onde os MDAs são visualizados e interpretados.

O MDA da Pedra Pintada foi interpretado utilizando-se um aplicativo de plataforma CAD denominado *Point Cloud Pro*, desenvolvido exclusivamente para manipular nuvens com grande quantidade de pontos. Com o *Point Cloud Pro* foi possível segmentar o afloramento e demarcar feições geológicas identificadas de forma hierárquica (Figura 8). Nesse processo, utilizou-se a técnica de montagem para sobrepor uma imagem digital de alta resolução ao MDA com precisão melhor que 0,20 m. Os resultados obtidos

na interpretação do MDA foram exportados em um formato compatível com o aplicativo de modelagem geológica GOCAD.

A exportação do modelo para o GOCAD foi executada por meio dos aplicativos 3D *Reshaper* e *AutoCAD* e de um conversor de arquivo vetorizado em pontos. Devido ao volume de dados em formato de nuvem de pontos, foi necessário exportar para o GOCAD somente o MDA e posteriormente os vetores da interpretação obtidos pelo *Point Cloud Pro*. O GOCAD não possibilitou manipular a nuvem de pontos e nem a junção da foto com a nuvem.



**FIGURA 8.** MDA segmentado em seções transversais (A) e longitudinais (B) feitas no 3D *Reshaper*, ambas espaçadas de 1 m para posterior conversão das interseções das seções em pontos e importação no GOCAD.

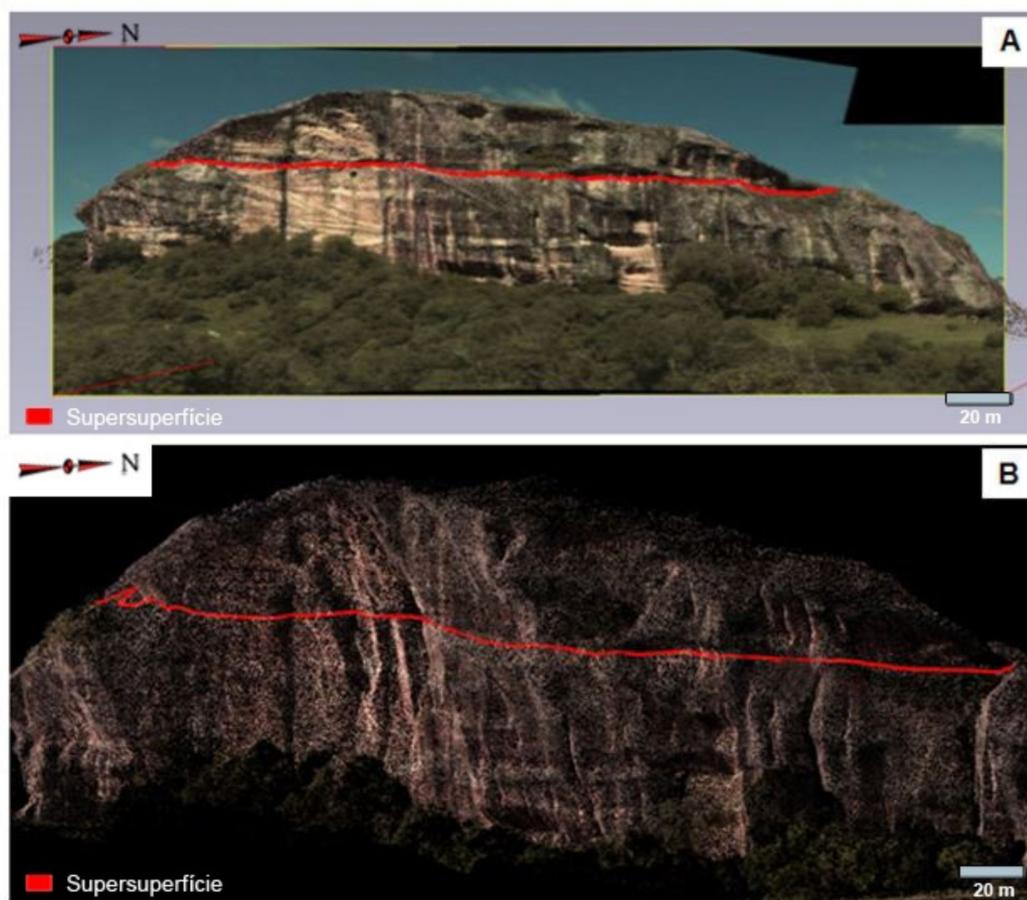
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O equipamento mostrou-se eficiente com distâncias superiores a 60 m e inferiores a 1000 m. Constatou-se um deslocamento da nuvem de pontos em relação à imagem obtida com o escaner a *laser* terrestre em distâncias inferiores a 60 m. Tal fato deve-se a um problema de paralaxe em função da resolução relativamente baixa da câmera fotográfica acoplada ao escaner. O nível de exatidão do MDA da Pedra Pintada foi inferior a 0,20 m, decorrente de erros inerentes à rede geodésica bem como à resolução da nuvem de pontos, que no caso da Pedra Pintada foi de um ponto coletado a cada 4 cm. Por ser um modelo tridimensional gerado a partir de uma nuvem de pontos georreferenciada de alta densidade é possível estabelecer medidas precisas, como a altura, extensão, espessura de estratos sedimentares, orientação de planos etc.

A possibilidade de movimentar (isto é, inclinar, rotacionar etc.) o modelo tridimensional permite que a interpretação seja coerente e precisa, pois de forma rápida pode-se conferir a continuidade de superfícies que estão sendo interpretadas em diferentes faces de

um mesmo afloramento ou de afloramentos diferentes em uma mesma região. Essa é uma vantagem que o trabalho de campo convencional não possibilita em razão da limitação do campo visual que o ser humano possui em relação à distância do objeto de estudo ou às distâncias entre diferentes pontos da região de estudo.

O processo de ortorretificação foi incorporado na fase de interpretação do MDA por agregar qualidade visual, uma vez que o traço interpretativo é realizado com base em uma fotografia digital de alta resolução sobreposta à nuvem de pontos (Figura 9). O emprego dessa técnica facilita o processo interpretativo uma vez que todo o traçado (Figura 9A) está vinculado ao MDA, mas é realizado com base nos detalhes da fotografia digital. É importante salientar que, nesse caso, a foto serve apenas para orientar o traçado sobre o MDA, pois os segmentos são conectados nos pontos tridimensionais que estão atrás da imagem. O traçado conectado à nuvem de pontos pode ser melhor percebido com a desabilitação da função da visualização da imagem ortorretificada (Figura 9B).



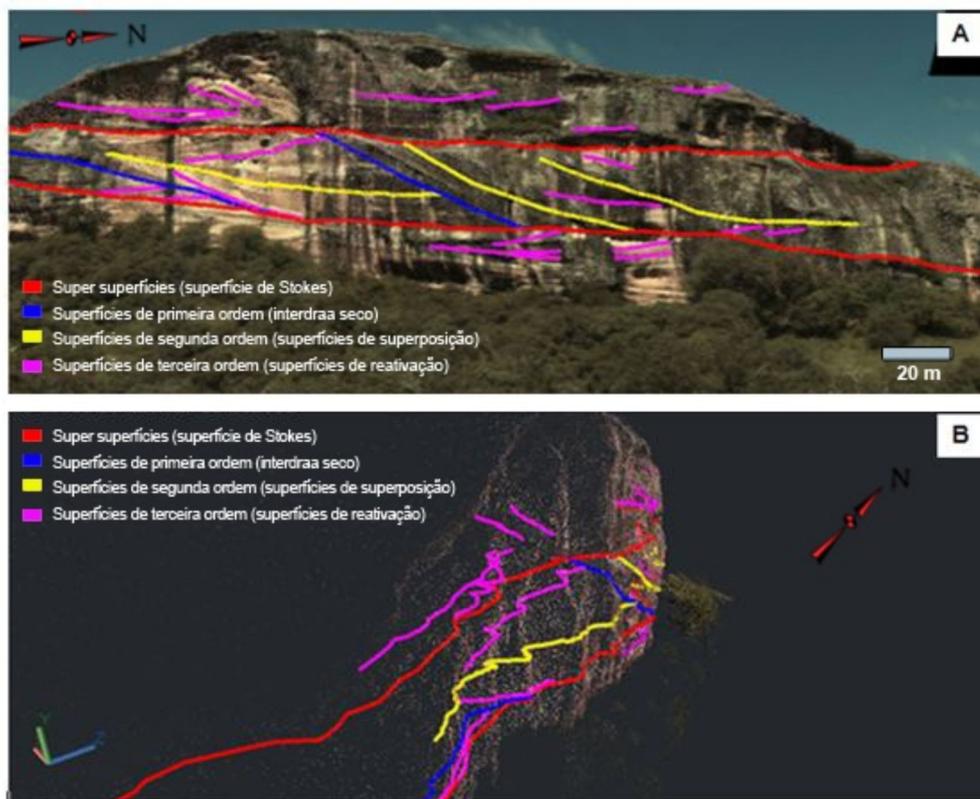
**FIGURA 9.** Interpretação do MDA. A) Interpretação em imagem ortorretificada sobreposta à nuvem de pontos. B) Superfície estratigráfica interpretada sem a imagem ortorretificada sobreposta à nuvem de pontos.

A interpretação geológica foi realizada em um aplicativo desenvolvido com o propósito de manipulação e tratamento de nuvens de pontos, sendo por isso limitado em termos de ferramentas de interpretação geológica. Trata-se de um aplicativo desenvolvido em plataforma CAD com ferramentas de desenho limitadas a traçados de linhas, polilinhas, polígonos etc. A Figura 10A ilustra a interpretação geológica do MDA da Pedra Pintada executada com as ferramentas do aplicativo *Point Cloud Pro*. Na Figura 10B, o MDA interpretado está rotacionado como forma de mostrar que os traços de interpretação são tridimensionais e georreferenciados, permitindo assim que sejam exportados em formato adequado aos dos aplicativos de modelagem geológica, a exemplo do GOCAD.

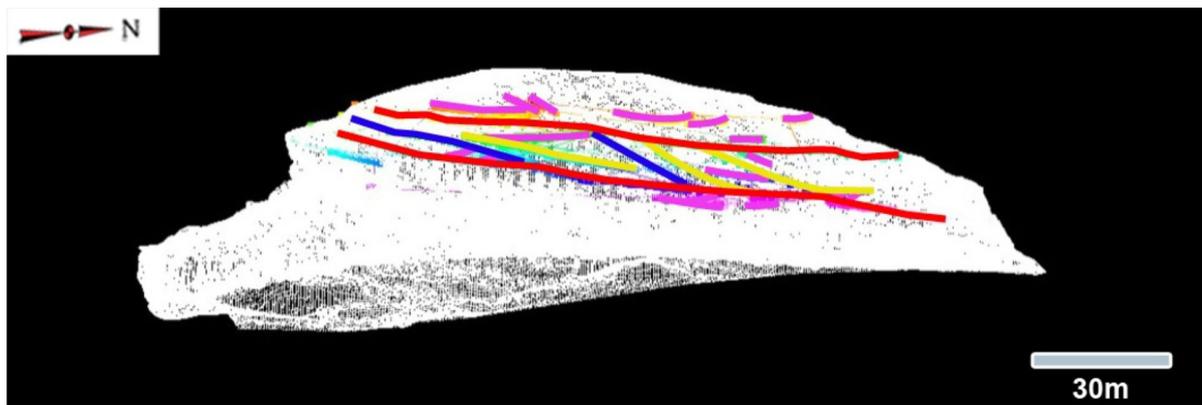
A Figura 11 mostra a nuvem de pontos renderizada pelo método da triangulação sobreposta pelos traços de interpretação geológica realizados no aplicativo *Point Cloud Pro*, resultado do processo de exportação dos dados interpretados no MDA e importados no aplicativo GOCAD. Cabe salientar que o modelo visualizado no GOCAD está representado com todos os pontos coletados em campo com o *scanner a laser* terrestre. O MDA gerado foi convertido em um arquivo passível de importação no aplicativo de modelagem geológica GOCAD, que serviu de base para a sobre-

posição das interpretações geológicas realizadas no aplicativo *Point Cloud Pro*. Nesse processo de exportação e importação entre diferentes aplicativos, não foi possível a importação dos dados de cores associados ao MDA no aplicativo GOCAD, motivo pelo qual as interpretações geológicas são visualizadas sobre a superfície renderizada a partir da nuvem de pontos (Figura 11).

Tanto o aplicativo *Point Cloud Pro* quanto o GOCAD são sistemas desenvolvidos em unidade de processamento central (CPU), o que compromete o desempenho do *hardware* quando um grande volume de dados necessita de processamento simultâneo. Experiências realizadas com nuvens de pontos de tamanhos variados mostraram que o aumento da capacidade de processamento em *hardware* (ex: processadores multi-núcleo, memória RAM) não é diretamente proporcional ao aumento de eficiência necessário. Bellina (2009) desenvolveu um aplicativo de visualização baseado na renderização por pontos e em níveis de detalhamento (LOD) que permitiu manipular com rapidez um MDA com 130 milhões de pontos em um computador portátil convencional. Posteriormente, Gomes (2010) comparou diferentes configurações de *hardware* no processamento de uma nuvem com 21 milhões de pontos advindos de *scanner*



**FIGURA 10.** Interpretação de superfícies estratigráficas e estratificações cruzadas no MDA.  
 A) Interpretação de superfícies utilizando imagem ortoretificada sobreposta à nuvem de pontos.  
 B) Nuvem de pontos rotacionada com as interpretações realizadas em A.



**FIGURA 11.** Nuvem de pontos com interpretações geológicas vista no aplicativo GOCAD.

a *laser* terrestre. Os resultados mostraram que o aumento de desempenho necessário às operações com MDAs foi obtido com unidades de processamento gráfico (GPU).

Mesmo com o desempenho comprometido ao manipular o modelo 3D durante o processo de interpretação geológica no sistema *Point Cloud Pro* foi possível demarcar superfícies estratigráficas de forma hierarquizada. A literatura geocientífica relata casos de autores que apenas conseguiram viabilizar a impor-

tação de MDAs obtidos a partir do sistema LIDAR em aplicativos de modelagem geológica após filtrarem a nuvem de pontos, com a consequente redução do número de pontos da nuvem (Buckley et al., 2008; Teixeira, 2008). Embora seja um recurso válido, tal procedimento subutiliza a potencialidade do equipamento e pode levar a um MDA com qualidade visual inferior à necessária para a interpretação geológica. Ao contrário, neste trabalho foram utilizados todos os pontos do imageamento.

## CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi estabelecer procedimentos e métodos para a geração de MDAs a partir da utilização da técnica LIDAR. Todos esses procedimentos foram integrados com dados do sistema GNSS, como forma de garantir que o MDA estivesse associado a um referencial geodésico.

A grande vantagem de se utilizar o sistema LIDAR para a geração de MDAs é a possibilidade de se ter um modelo virtual 3D com qualidade de visualização suficiente para a análise e interpretação geológica. Além disso, permite interpretar áreas inacessíveis do afloramento com a mesma qualidade visual das áreas onde o geólogo pode acessar durante um trabalho de campo.

O trabalho evidenciou que a técnica LIDAR pode ser uma ferramenta de extrema importância para a manutenção de registros de afloramentos, pois muitos desses sofrem degradações antrópicas e intempéricas

ao longo do tempo, o que afeta a qualidade de novas aquisições de dados. Com o imageamento, é possível criar um banco de MDAs e, assim, garantir o acesso a dados de afloramentos que porventura não estejam mais em condições de estudo. A técnica envolvendo a sobreposição de uma imagem ortorretificada sobre uma nuvem de pontos mostrou-se eficiente para melhor visualizar informações não-identificáveis no MDA.

Por fim foi constatou-se que a modelagem digital de afloramentos utilizando a técnica LIDAR depende de uma junção de conhecimentos de áreas distintas, como Geologia, Cartografia e Informática, integrados para desenvolver métodos de coleta e processamento de dados, desenvolver técnicas de visualização 3D e ferramentas de interpretação geológica. Além disso, deve-se aperfeiçoar os procedimentos de exportação de MDAs interpretados, de forma a integrá-los com diferentes aplicativos de modelagem geológica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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. Aos técnicos do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital (LASERCA/UNISINOS) pelo suporte nas

atividades de campo e pelas discussões. Os trabalhos de campo foram parcialmente financiados pela Ferrari Solutions e pela 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), concedido a Francisco M. W. Tognoli. À CAPES, pela concessão de bolsa de doutorado do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares a Reginaldo Macedônio da Silva. Leonardo Campos Inocêncio agradece à UNISINOS pela concessão da bolsa institucional Milton Valente. Paulo Sergio Gomes Paim agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa. Ao editor e revisores, cujos comentários e sugestões incrementaram o presente artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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**, v. 4, n. 3, p. 576-58, 2008.
2. ARNOT, M.J.; LEWIS, J.M.; GOOD, T.R. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale outcrop data. **Journal of Sedimentary Research**, v. 67, p. 984-987, 1997.
3. BALTSAVIAS, E.P.; FAVEY, E.; BAUDER, A.; BÖSCH, H.; PATERAKI, M. Digital surface modelling by airborne *laser* scanning and digital photogrammetry for glacial monitoring. **Photogrammetric Record**, n. 17, p. 243-273, 2001.
4. BARCHIK, E.; MOSER, I.; SANTOS, D.S. DOS; MARTINS, B.D. 2007. Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS – 3D no Ramo da Mineração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007, p. 3631-363.
5. 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.
6. 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.
7. BELLIAN, J.A.; JENNETTE, D.C.; KERANS, C.; GIBEAUT, J.; ANDREWS, J.; YSSLDYK, B.; LARUE, D. **3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology**. Disponível em <http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>. Acessado em: 21mar2011.
8. BELLIAN, J.A.; KERANS, C.; JENNETTE, D.C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. **Journal of Sedimentary Research**, n. 75, p. 166-176, 2005.
9. BELLINA, G.M. **Modelagem Digital de Afloramentos a partir da renderização por pontos**. São Leopoldo, 2009. 25 p. Trabalho (de Conclusão de Curso) – Ciência da Computação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
10. 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**, v. 165, n. 3, p. 625-638, 2008.
11. CENTENO, J.A.S.; WUTKE, J.D.; MITSHITA, E.A.; VÖGTLE, T. Two Methods to Estimate the Spot Size of Terrestrial Laser Scanners. **Journal of Surveying Engineering**, v. 136, p. 126-131, 2010.
12. 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, p. 139-161, 2010.
13. 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, p. 469-490, 2007.
14. 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.
15. 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.
16. FREIRE, R.C. **Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR**. Natal, 2006. 54 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
17. GOMES, R.K. **Visualização de Nuvem de Pontos no Processo de Imageamento de afloramentos com Escaner a Laser Terrestre utilizando GPU**. São Leopoldo, 2010. 87 p. Trabalho (de Conclusão de Curso) – Ciência da Computação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
18. JACOBI, L.; MACEDONIO, R. DA S.; MARKOSKI, P.R.; VERONEZ, M.R.; TOGNOLI, F.M.W.; PAIM, P.S.G.; FACCINI, U.F.; LAVINA, E.L.C. Modelo Digital de Afloramento visando a análise e interpretação geológica: um estudo de caso baseado em dados de *Laser Scanner* 3D Terrestre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45, 2010. **Anais...** PAP916.pdf.
19. 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.
20. 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.
21. JONES, R.R.; MCCAFFREY, K.J.W.; IMBER, J.; WIGHTMAN, R.; SMITH, S.A.F.; HOLDSWORTH, R.E.; CLEGG, P.; PAOLA, N. DE; 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.
22. 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.

23. LABOURDETTE, R. & JONES, R.R. Characterization of fluvial architectural elements using a three-dimensional outcrop data set: Escanilla braided system, South-Central Pyrenees, Spain. **Geosphere**, v. 3, n. 6, p. 422-434, 2007.
24. 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.
25. 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.
26. MCCAFFREY, K.J.W.; HODGETTS, D.; HOWELL, J.; HUNT, D.; IMBER, J.; JONES, R.R.; TOMASSO, M.; THURMOND, J.; VISEUR, S. Virtual fieldtrips for petroleum geoscientists. **Geological Society**, Petroleum Geology Conference Series, v. 7, p. 19-26, 2010.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. PAIM, P.S.G. & SCHERER, C.M.S. Arquitetura estratigráfica de sucessões flúvio-eólicas: o exemplo do Alogrupo Guaritas na região da Pedra Pintada, Rio Grande do Sul, Brasil. In: PAIM, P.S.G.; FACCINI, U.F.; NETTO, R.G. (Eds.), **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudo de casos**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, p. 38-58, 2003.
31. PAIM, P.S.G. & SCHERER, C.M.S. High resolution stratigraphy and depositional model of wind-and-water-laid deposits in the Ordovician Guaritas rift (southernmost Brazil). **Sedimentary Geology**, v. 202, p. 776-795, 2007.
32. PAIM, P.S.G.; FACCINI, U.F.; NETTO, R.G. **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudo de casos**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 239 p., 2003.
33. 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.; SCHOBENHAUS, 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.
34. 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, U.S.A. **Journal of Sedimentary Research**, v. 77, n. 11, p. 939-964, 2007.
35. 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.
36. 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.
37. TEIXEIRA, W.L.E. **Aquisição e construção de modelos estáticos análogos a reservatórios petrolíferos com tecnologia LIDAR e GEORADAR**. Natal, 2008. 99 p. Dissertação (de Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
38. THURMOND, J.B.; DRZEWIECKI, P.A.; XU, X. Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML). **Computers and Geosciences**, v. 31, 913-919, 2005.
39. 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.
40. WAWRZYNIENEC, 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.
41. WEHR, A. & LOHR, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 54, p. 68-82, 1999.
42. 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.
43. WOLF, P.R. & DEWITT, B.A. **Elements of Photogrammetry (with Applications in GIS)**. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 624 p., 2000.
44. WUTKE, J.D. & CENTENO, J.S. Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestre. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, p. 151-164, 2007.
45. 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** 19, p. 197-202, 2000.
46. 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 Reflectless Laser Rangefinders. **GPS Solutions**, v. 5, p. 15-23, 2001.
47. 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.

*Manuscrito Recebido em: 21 de março de 2011  
Revisado e Aceito em: 14 de fevereiro de 2012*