



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA

LEONARDO HENRIQUE GOMES DA SILVA

ANÁLISE DE PALEOCORRENTES COM A UTILIZAÇÃO DE AFLORAMENTOS  
VIRTUAIS

PALEOCURRENT ANALYSIS USING VIRTUAL OUTCROPS

LIMEIRA  
2020

LEONARDO HENRIQUE GOMES DA SILVA

ANÁLISE DE PALEOCORRENTES COM A UTILIZAÇÃO DE AFLORAMENTOS  
VIRTUAIS

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Tecnologia da Universidade Estadual de  
Campinas como parte dos requisitos exigidos  
para a obtenção do título de Mestre em  
Tecnologia na Área de Ambiente.

Supervisor/Orientador: Bernardo Tavares Freitas

Co-supervisor/Coorientador: Ronalton Evandro Machado

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO DEFENDIDA PELO ALUNO  
LEONARDO HENRIQUE GOMES DA SILVA,  
E ORIENTADA PELO PROF. DR. BERNARDO  
TAVARES FREITAS

LIMEIRA

2020

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

---

Si38a Silva, Leonardo Henrique Gomes da, 1993-  
Análise de paleocorrentes com a utilização de afloramentos virtuais /  
Leonardo Henrique Gomes da Silva. – Limeira, SP: [s.n.], 2020.

Orientador: Bernardo Tavares Freitas.

Coorientador: Ronalton Evandro Machado.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Tecnologia.

1. Drone. 2. Fotogrametria. 3. Modelagem. 4. Afloramento (Geologia).  
5. Rochas sedimentares. I. Freitas, Bernardo Tavares, 1984-. II. Machado,  
Ronalton Evandro, 1966-. III. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

---

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Paleocurrent analysis using virtual outcrops

**Palavras-chave em inglês:**

Drone aircraft

Photogrammetry

Modeling

Outcrops (Geology)

Rocks, Sedimentary

**Área de concentração:** Ambiente

**Titulação:** Mestre em Tecnologia

**Banca examinadora:**

Bernardo Tavares Freitas

Carlos Henrique Grohman de Carvalho

Vitor Eduardo Molina Junior

**Data de defesa:** 28-02-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Tecnologia

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-3742-9102>

Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0496886155825223>

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Mestre em Tecnologia na área de concentração de Ambiente, a que submeteu o aluno Leonardo Henrique Gomes da Silva em 28 de fevereiro de 2020 na Faculdade de Tecnologia- FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

**Prof. Drº Bernardo Tavares Freitas**

Presidente da Comissão Julgadora

**Prof. Drº Carlos Henrique Grohman de Carvalho**

USP- Universidade de São Paulo

**Prof. Dr. º Vitor Eduardo Molina Junior**

UNICAMP- Universidade Estadual de Campinas

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós Graduação da FT.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi apoiado financeiramente pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, por meio do projeto de auxílio a pesquisa número 2016/19736-5. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Gostaria de agradecer a Pró Reitoria de Pesquisa da UNICAMP pela bolsa auxílio de mestrado FAEPEX que contribuiu para a total dedicação a esta pesquisa.

## RESUMO

Embora o uso afloramentos virtuais ou modelos digitais de afloramento em geociências venha se tornando cada vez mais comum, praticamente nenhuma atenção tem sido dada a obtenção de paleocorrentes. Paleocorrentes são dados abundantes no registro sedimentar e apresentam implicações determinantes para análise de bacias, reconstruções tectônicas e paleogeográficas, assim como em previsões relacionadas a fluxo sedimentar. Paleocorrentes também são parâmetros quantificáveis em sucessões sedimentares, de modo que podem ser utilizadas na modelagem quantitativa de arquitetura deposicional e em reconstruções da dinâmica de transporte sedimentar. Contudo, obstáculos comuns na obtenção de grandes conjuntos de dados de paleocorrente são a dificuldade de acesso a faces íngremes e altas de afloramentos e limitações de tempo e recursos financeiros disponíveis para campanhas de campo. Para superar essas questões, desenvolveu-se um fluxo de trabalho, o mais simples possível, para aquisição com uso de drones, processamento fotogramétrico e análise de afloramentos virtuais com o objetivo de obter dados de paleocorrentes a partir de estratificações cruzadas de difícil acesso. Os resultados mostram que as orientações de estratificações cruzadas medidas em afloramentos virtuais construídos dessa forma equivalem a resultados obtidos por medições convencionais em campo utilizado bússolas analógicas ou eletrônicas. O método relativamente simples apresentado aqui pode, portanto, complementar significativamente mapeamentos de paleocorrentes ao longo de grandes áreas e diferentes intervalos estratigráficos.

## ABSTRACT

Although virtual outcrops or digital outcrop models use in geologic studies became increasingly common, virtually no attention have been given to paleocurrent acquisition. Paleocurrent data is abundant in the sedimentary record and present compelling implications in basin analysis, plate reconstructions and paleogeographic reconstructions, as well as in predictions on sediment flow systems. Paleocurrent is also a quantifiable parameter from sedimentary successions, that can be used in quantitative modelling of depositional architecture and reconstructions of sediment transport dynamics. However, a common obstacle in obtaining large paleocurrent datasets is the reduced access to steep and high outcrop faces, as well as financial and time limitations on field work duration. To overcome these issues, we appraise the simpler possible workflow for drone-based acquisition, photogrammetric processing and analysis of virtual outcrops aiming at the attainment of otherwise inaccessible paleocurrent data from cross-strata. Our results show that orientations of cross-beds measured on virtual outcrops obtained from a simple workflow are comparable to field measurements using analogic and electronic devices. The straightforward method presented here can thus significantly complement paleocurrent mapping across wide areas within different stratigraphic intervals.

## SUMÁRIO

I.	INTRODUÇÃO	9
II.	MÉTODOS	10
	II.1 Escaneamento e Processamento de Afloramentos 3D	11
	II.2 Obtenção de Dados à Partir dos Afloramentos Virtuais	15
	II.3 Divulgação dos Resultados	16
III.	ÁREAS DE ESTUDO	17
IV.	RESULTADOS	19
	IV.1 Estudo de Caso 1	20
	IV.2 Estudo de Caso 2	26
	IV.3 Estudo de Caso 3	29
V.	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	33
	Referências Bibliográficas	37

## I. INTRODUÇÃO

A análise de paleocorrentes é uma ferramenta de suma importância para a investigação da história da terra, além de apresentar um ótimo potencial para prospecção mineral, exploração e desenvolvimento de campo de petróleo e de águas subterrâneas (Dueholm & Olsen, 1993; Pringle et. al., 2006). Desde o começo do século XX, a análise de paleocorrentes tem sido utilizada para a interpretação do comportamento de bacias (Pettijohn & Potter, 1963), para a reconstrução de fontes e rotas de dispersão de sedimentos (Allen, 2008, Martinsen et al., 2010), e para a análise da arquitetura estratigráfica de depósitos sedimentares (Miall, 1988; Long, 2011; Almeida et al., 2016).

Apesar do desenvolvimento nas técnicas relacionadas à análise de afloramentos virtuais, pouca atenção foi dada para o estudo de paleocorrentes. Os principais enfoques da construção de afloramentos tridimensionais texturizados tem sido estudos na área da engenharia geotécnica (e.g. Deb et al., 2008; Sturzenegger & Stead, 2009 a; Sturzenegger & Stead, 2009 b; Sturzenegger et al., 2011; Assali et al., 2014), geologia estrutural – primordialmente focada na análise de fraturas -- (e.g. Javernick et al., 2014; Tavani et al., 2014; Vasuki et al., 2013, Vasuki et al., 2014 e Vasuki et al., 2017), e no estudo de reservatórios análogos – com ênfase na quantificação da razão arenito/lamito - (e.g. Dueholm & Olsen 1993; Pringle et al., 2001; Thurmond et al. 2005; Schmitz et al., 2014; Buckley et al., 2010; Rittersbacher et al., 2014; Mullins et al., 2016). O único estudo voltado ao uso de afloramentos virtuais para a obtenção de paleocorrentes se deu em Marte (Edgar et al., 2017).

Uma possível causa para a falta de estudos sobre paleocorrentes que envolvam afloramentos virtuais, pode ser devido a limitação na resolução necessária para a identificação de estruturas com significado paleohidráulico nos modelos 3D. Quanto maior a resolução dos afloramentos virtuais, maior a capacidade computacional requerida para o processamento e maior o tamanho dos arquivos resultantes, o que poderia dificultar sua manipulação em computadores convencionais.

Outro fator possivelmente relacionado a falta de avanços na área é a complexidade potencialmente intimidadora do fluxo de trabalho desde a aquisição até a obtenção dos afloramentos virtuais. No total são apresentados 7 diferentes

afloramentos virtuais neste trabalho. São 5 pertencentes ao Grupo Serra Grande, (PC 01, PC 02, PC 03, LP 01 e LP 02) e 2 referentes ao preenchimento fluvial cretácico da Bacia do Tucano (MR36 e TUC 41, respectivamente representantes das formações Marizal e São Sebastião).

Para abordar essas questões, é proposto e analisado um fluxo de trabalho o mais simples, direto e de baixo custo possível para a obtenção dados de paleocorrentes a partir de afloramentos virtuais. Nesse trabalho utilizou-se Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP, neste caso referidas pelo nome popular, Drones) de entrada para escanear depósitos fluviais repletos de estratificações cruzadas no Nordeste do Brasil. As fotografias obtidas foram processadas em softwares comerciais populares com vistas a obtenção de modelos digitais 3D fotogramétricos. Os afloramentos virtuais resultantes foram exportados para um software de visualização 3D voltado a análise geológica, em que orientações de estratificações cruzadas foram medidas. Diferentes cenários de aquisição de dados, envolvendo o uso de pontos de controle em solo e diferentes parâmetros de qualidade da resolução, foram comparados a aquisição direta em campo a partir da medição com bússola de estruturas sedimentares expostas nos afloramentos reais.

## II. MÉTODOS

Para avaliar a utilização de afloramentos virtuais na análise de paleocorrentes, foram comparadas orientações de estratificações cruzadas coletadas em campo (referidas como *field*) e orientações obtidas a partir dos afloramentos virtuais (referidos nas figuras como *virtual data*). Em campo foram realizadas coletas de dados através da utilização de bússolas analógicas (e.g. *Brunton Geo Pocket Transit Compass*), e eletrônicas (e.g. *smartphone/tablet*) (para uma explicação detalhada das diferenças e comparações entres esses tipos de bússolas, consultar Almendinger et al,2017), localmente com a utilização de técnicas de trabalho em altura (item 4).

As análises deste trabalho se deram a partir de três estudos de caso. No Estudo de Caso 1 são comparadas medidas de paleocorrentes realizadas nos exatos

mesmos planos tanto em campo quanto no modelo 3D. No Estudo de Caso 2 são comparadas medidas obtidas a partir dos mesmos *cosets* (conjuntos de séries de estratificações cruzadas) No Estudo de Caso 3 são comparadas populações de dados medidos aleatoriamente numa região do afloramento abrangendo diversos *cosets*. Os dados referentes às orientações de estratificações cruzadas são abaixo apresentados em estereogramas e tabelas para consideração dos valores de mergulho e direção de mergulho (*dip*, *dipdir*), assim como em diagramas circulares de frequência que trazem apenas valores de direção de mergulho mas são as representações gráficas mais comumente utilizadas em estudos de paleocorrentes (e.g. Miall, 1974; Potter & Pettijhon, 1974). Também é apresentado um diagrama em caixa das distâncias angulares. As distâncias angulares são o módulo da diferença entre dois ângulos, no estudo de caso 1, os diagramas de caixa são utilizados para demonstrar quantitativamente a diferença entre os ângulos de mergulho e sentido do mergulho para cada orientação coletada. Nos estudos de caso 2 e 3 as distâncias angulares são obtidas através do confronto dos vetores médios.

## II.1 Escaneamento e processamento de afloramentos 3D

A construção de afloramento virtuais tem se tornado acessível em custo e técnicas devido ao desenvolvimento dos algoritmos *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS) (e.g. Carrivick et al., 2013, Carrivick et al., 2016; Pavlis & Mason, 2017). A facilidade de utilização de softwares baseados em *SfM-MVS* permite produzir modelos tridimensionais texturizados com alta precisão e acurácia em poucos passos (e.g. Cawood 2017). O Agisoft Metashape (Nova versão do conhecido Agisoft PhotoScan) é um dos diversos softwares capazes produzir um afloramento virtual (e.g. Tavani et al., 2014; Viana et al., 2016; Barbasiewicz et al., 2018) por meio dos algoritmos supracitados. O Metashape é um software intuitivo, produz bons resultados e possui uma licença acadêmica de baixo custo. Para discussões sobre as vantagens e desvantagens de softwares, sensores imageadores terrestres e aerotransportados, diferença de resoluções e outras questões, sugere-se a leitura de Smith et al., (2016), Micheletti et al. (2015), Barbasiewicz et al. (2018), Cawood (2016), Flaming e Pavlis (2018), e Schwind e Starek (2017). Esses últimos analisam e apresentam as diferenças do PhotoScan com seu concorrente de mercado mais próximo e também muito utilizado, o Pix4D (Pix4D SA, 2019). Detalhes acerca dos algoritmos e seus

papeis na construção do afloramento virtual podem ser encontrados nos trabalhos de James & Robson (2012), Brown & Lowe (2005), Viana et al (2018)

No Metashape e em softwares similares a interferência humana pode ser bastante reduzida e ocorrer apenas nas etapas (I) adição das imagens, (II) geração da nuvem de pontos esparsa (*Sparse Cloud*), (III) inserção de pontos de controle, (IV) geração da nuvem de pontos densa (*Dense Cloud*), (V) limpeza de pontos errôneos e ou irrelevantes, (VI) geração da malha tridimensional, (VII) texturização da malha tridimensional. Alguns passos podem ser realizados antes e depois dos citados, como por exemplo entre os passos (I) e (II) pode-se aplicar máscaras para uma redução de tempo de processamento e maior enfoque na região desejada. Também é possível gerar ortomosaicos e modelos digitais de elevação (MDE/DEM – *Digital Elevation Model*), porém, para este trabalho essas etapas foram desconsideradas (e.g. Agisoft, 2019).

Todos os afloramentos virtuais apresentados neste trabalho foram construídos a partir dos passos citados anteriormente. Foram utilizados conjuntos de imagens (Tabela 1) contendo de algumas centenas a pouco mais de 1300 fotografias obtidas com o auxílio de drones. O processamento dessas imagens sem a aplicação de máscaras resultou em enormes nuvens de pontos densas, o que dificulta sua utilização. Dessa maneira foram realizados recortes e reduções nos afloramentos virtuais para focar apenas nas áreas de maior interesse. O reprocessamento de áreas reduzidas resultou em arquivos mais leves e com maior resolução (item IV).

As rotinas *SfM-MVS* são totalmente dependentes da maneira como são realizadas as tomadas. É necessário que as fotografias sejam de obtidas de posições diferentes e com um bom recobrimento lateral e longitudinal (Fleming e Pavlis 2018, Cawood et al 2017). As tomadas de imagens podem ser de movimento contínuo, variado ou estático, como exemplificado no manual do usuário do Metashape (Agisoft, 2019). Também podem ser de diversos tipos de sensores diferentes, como fotográficos, multiespectrais, hiperespectrais, termais, dentre outros (Westoby, 2012 e Carrivick et al., 2016). Embora o algoritmo consiga lidar com quaisquer tipos de imagens, é sugerido que sejam atendidos alguns critérios mínimos para a obtenção de bons resultados. Devem ser evitadas lentes fish eye (olho de peixe), câmeras com menos de 5 MP de resolução e posições de tomada que não recubram a totalidade do alvo possível (e.g. Metashape, 2019).

Nesta pesquisa foram utilizados três diferentes drones e câmeras. Foi utilizado um drone plataforma fechada DJI Phantom 4 Pro que possui uma câmera CMOS 20 MP para a digitalização dos afloramentos virtuais correspondentes ao Grupo Serra Grande, apresentados nos estudos de caso 1 e 3. Para o estudo de caso 2, foi utilizado um hexacóptero plataforma aberta, modelo X800, produzido pela XFly Brasil, carregando uma Sony A600 24.1 MP. Para o estudo de caso 3, também foi realizada a digitalização de um afloramento pertencente a Formação São Sebastião utilizando uma Câmera fotográfica *Canon Powershot S100*, 12 MP, a bordo de um drone multirrotor quadricóptero de plataforma aberta (Figueiredo, 2013) (Tabela 1).

Todos os equipamentos utilizados são equipamentos de entrada no seguimento profissional de mapeamento e imageamento com a utilização de drones. Suas autonomias de voo variaram entre 15 e 25 minutos, e foram utilizados os sensores GNSS dos drones para georreferenciamento das imagens capturadas. Foi prezada sempre pela maior proximidade possível do afloramento escaneado, respeitando distâncias mínimas de obstáculos que poderiam apresentar riscos à integridade dos equipamentos. Os voos foram planejados de maneira a maximizar a eficiência da luz solar, já que todos os sensores eram passivos.

Foram utilizados preferencialmente dois softwares para a preparação, controle e manuseio dos voos, o *Mission Planner* (para as plataformas abertas) e o *Drone Deploy* (para a plataforma fechada). Ambos fazem parte de um conjunto de programas especializados em planejamento e controle de voo. Servem tanto para o planejamento e execução de voos automáticos quanto para o acompanhamento de voos controlados manualmente, funcionando como uma estação de controle para análise em tempo real dos sensores dos drones em voo. A vantagem do planejamento de voo automático é a praticidade e a menor interferência do operador.

Contudo, a maioria dos aplicativos (incluindo os softwares utilizados nesse trabalho) não apresenta opções simples para a criação de planos automáticos de voo no eixo vertical, apenas no eixo horizontal. Os afloramentos estudados se apresentam como superfícies íngremes, com orientações próximas da vertical. Desse modo, fotografias obtidas a partir de voos horizontais podem não representar o alvo fielmente e resultar em distorções nos modelos 3D (Fleming & Plavis, 2018). Existem duas principais soluções para esse caso. Primeiro é sugerida a operação manual do drone com a câmera voltada para frente ou ligeiramente oblíqua para baixo.

Alternativamente, é possível programar levantamentos na vertical por meio de numerosos comandos específicos (e.g. Grohmann,2018), consumindo muito tempo e com boas chances de falhas. Recentemente a SPH *Engineering* lançou o *software* UgCS para planejamento e controle de voos não tripulados com a opção de planos de voos verticais.

A principal desvantagens da operação manual é a falta de controle da posição e quantidade de fotografias. Realizar o processamento com muitas fotografias tem um lado positivo e outro negativo (e.g. Micheletti et al., 2015). Muitas imagens permitem a criação de nuvens densas mais detalhadas e com medidas mais próximas ao real. Porém, aumenta consideravelmente o tempo de processamento do software e o tamanho final do arquivo processado. No momento da coleta é preferível o exagero a falta de fotografias necessárias ao processamento. Contudo, é sugerido uma seleção apurada no momento da importação para o software.

Uma das preocupações quando se trata de levantamento de dados com drones, é a necessidade de Pontos de Controle em Solo (*Ground Control Points – GCPs*) para correção da posição relativa dos dados. Os sensores a bordo dos modelos de drone de entrada apresentam precisão limitada, com erros variando de poucos a dezenas de metros. Essa informação (*geotag*) é salva como metadado de cada arquivo de fotografia. Diversas áreas de aplicação de produtos obtidos com drones requerem uma informação posicional precisa, de maneira que as informações referentes às *geotags* são comumente consideradas insuficientes.

Logo, é frequentemente sugerida a coleta e inserção de pontos de controle no momento do processamento das imagens com posições obtidas com receptores GPS de precisão com erros na escala de milímetros a centímetros (e.g. Smith et al., 2015; James & Robson, 2017, Tavani, 2014). Neste trabalho procuramos testar os resultados obtidos em afloramentos virtuais processados apenas com as informações das *geotags*, em relação a afloramentos virtuais processados com a correção de posição a partir de pontos de controle em solo.

Para todos os afloramentos do Grupo Serra Grande, foram utilizados o conjunto Topcon Sokia GSX2 – um par de coletores RTK (*Real time Kinematic*), capazes de operar GPS, GLONASS e SBAS (Topcon, 2012); Para a Formação Marizal foram utilizados dois equipamentos –um par GNSS Promark 2 da Ashtec, em

modo *Stop-And-Go*, capaz de operar na banda L1, GPS, GLONASS e outras constelações (Ashtec, 2014) e um par RTK, modelo REACH RS+, produzidos pela EMLID (EMLID, 2018). Para a Formação São Sebastião foi utilizado um conjunto GNSS Topcon base/receptor SOKIA GSX2, com capacidade de rastrear sinais GPS, GLONASS E SBAS (TOPCON, 2012).

## II.2 Obtenção de dados a partir dos afloramentos virtuais

A maior parte dos softwares que operam SfM-MVS oferecerem visualização dos resultados e algumas ferramentas, como a “régua” para medições e calculadoras de volume sobre as nuvens e modelos criados. Dessa maneira, é necessário a utilização de softwares auxiliares para trabalhos específicos como a medição de orientações de superfícies. Alguns softwares já foram utilizados e/ou possuem ferramentas específicas para extração de orientações de fraturas, como, por exemplo, o CloudCompare que possui uma ferramenta denominada “Compass”, que utiliza uma nuvem densa para obtenção de orientação de fraturas (GPL software; Dewez et al., 2016; Thiele et al., 2017). Outros softwares que podem apresentar recursos que permitem a obtenção de orientação de estruturas geológicas são o MeshLab (Cignoni et al., 2008; Viana et al., 2016), o OpenPlot (Tavani et al., 2011; Tavani et al., 2013; Corradetti, 2016) e o LIME (Virtual Outcrop Group, Bhatti, 2017; Bisschop, 2017; Buckley et al., 2019).

Nesse trabalho foi utilizado o LIME devido a facilidade de obtenção das medidas pretendidas. O LIME é um software que tem desenvolvimento e manutenção pela *Virtual Outcrop Geology Group* (VOG, 2018). O programa possui duas ferramentas disponíveis para o cálculo das atitudes, e neste trabalho foi utilizado a ferramenta de geração e extração de planos. Essa ferramenta extrapola o plano de interesse a partir da marcação de três pontos, de modo a fornecer os valores de mergulho (*dip*) e sentido do mergulho (*dip direction*). A geração de planos do LIME também permite a reunião de todos os planos criados em um só grupo, fornecendo as informações tabuladas em arquivo .txt.

Embora o LIME forneça as informações das atitudes medidas no modelo, o software não fornece ferramentas para a criação de estereogramas com os dados. Para isso, foi escolhido o programa open source, OpenStereo. O OpenStereo foi desenvolvido por Grohmann e Campanha (2010), com a intenção de fornecer uma estrutura simples

de entrada e manuseio de orientações de planos. O software gera a visualização em estereogramas, histogramas e diagramas de frequência circular (rosetas).

### II.3 Divulgações dos resultados

Após a construção dos afloramentos virtuais, é importante a disponibilização desse resultado. Dentre as opções, a plataforma de armazenamento e visualização mais popular é o SketchFab (Sketchfab INC, 2018- <https://sketchfab.com>). O Sketchfab é uma plataforma *online* que permite o *upload* de modelos 3D, com ou sem textura em seu *website*. Possui licença gratuita com algumas limitações e licenças pagas com benefícios. Dentre as diversas categorias de *upload* para os usuários escolherem, foi utilizada a categoria free que dá o direito a um número ilimitado de *uploads*, porém com tamanho máximo de 50 MB somados entre modelo e textura. Essa categoria também não permite ao usuário comercializar o seu modelo ou restringir a visualização. Ao realizar o *upload* existem diversas ferramentas para edição de textura e melhoria das qualidades do modelo. O *website* não oferece nenhum tipo de ferramenta de coleta de informações no modelo, mas, oferta uma alternativa *online* que pode ser acessada por quaisquer tipos de aparelho que possuam uma conexão com a internet.

Com a proposta semelhante ao concorrente Sketchfab, o P3D.in (Global Scanning Denmark, 2018- <https://p3d.in/>), fornece a mesma possibilidade de *upload* de um modelo 3D em sua base de dados para exposição *online*. Também possui planos de assinatura, mas fornece um *upload* maior do que o Sketchfab no plano gratuito (200 MB). A principal diferença entre os dois *websites* são os recursos para edição de textura e exibição do modelo. Porém, ambos possuem a possibilidade de manutenção das propriedades originais do modelo inserido.

Soma-se a essas opções a iniciativa eRock (Cawood e Bond, 2018). O eRock é formado por uma parceria da Universidade de Aberdeen com a plataforma *online* Sketchfab para permitir *uploads* ilimitados de afloramentos virtuais com o objetivo de construir uma ampla base de dados voltadas para ensino e treinamento profissional. Dessa maneira quando gerado um modelo tridimensional de uma exposição rochosa, o modelo deve ser encaminhado para os pesquisadores responsáveis a partir de um *upload* na nuvem, onde será realizado uma checagem e

será disponibilizado no *website* no grupo (<https://www.e-rock.co.uk/>), a partir da estrutura do Sketchfab.

### III. ÁREAS DE ESTUDO

Todos os estudos de caso apresentados neste trabalho foram realizados a partir de arenitos de origem fluvial bem expostos no Nordeste do Brasil (Figura 1). As sucessões estudadas referem-se a três unidades dominadas por arenitos médios a grossos, localmente conglomeráticos e repletos de estratificações cruzadas organizadas em séries de espessura centimétrica a decimétrica que formam *cosets* de espessuras métricas. Os *cosets* por sua vez tendem a formar sucessões com até 15 m de espessura limitadas por amplas superfícies erosivas.

Cinco dos afloramentos abordados neste trabalho ([PC01](#), [02](#) e [03](#) e [LL01](#) e [02](#)) (Estudos de caso 1 e 3) pertencem ao grupo Serra Grande, Siluriano da Bacia do Parnaíba (Vaz et al., 2007; Daly et al., 2018) que ocorre em diversos estados brasileiros, dentre eles o Piauí e o Ceará. Três dos afloramentos estudados (PC01, PC02 e PC03 Figura 2.A, 2.B e 2.C) estão à margem da rodovia BR-222, dentro do estado do Piauí e próximos a divisa com o Ceará. Os afloramentos do Grupo Serra Grande são lateralmente contínuos por dezenas a algumas centenas de metros, apresentando espessuras da ordem de dezenas de metros. Os depósitos são parte da seção superior da Formação Ipu de origem glácio-fluvial e do intervalo transgressivo da Formação Tianguá, mais jovem (Caputo et al., 1984; Vaz et al., 2007).

Dois outros afloramentos estudados, [MR36](#) (Estudo de caso 2, Figura 7) e [TUC41](#) (Estudo de caso 3, Figura 9.A), referem-se respectivamente às formações Marizal (Freitas et al., 2017) e São Sebastião (Figueiredo et al., 2016), Cretáceo da Bacia do Tucano (Costa et al., 2007a e b). A Formação Marizal, aptiana, cobre aproximadamente 80% da Bacia do Tucano e apresenta espessura máxima de aproximadamente 300 m (Viana et al., 1971). A unidade ocorre acima de uma discordância erosiva regional que trunca a Formação São Sebastião e pode ser subdividida em duas sequências fluviais, os membros Banzaê, basal, e Cícero Dantas, superior (Freitas et al., 2017). O afloramento MR36, constituído por paredes verticais com mais de 30 m e contínuas lateralmente por centenas de metros, refere-se ao topo

do Membro Banzaê exposto no contexto da seção tipo dessa unidade, próximo à sede do município homônimo (Almeida et al., 2016; Freitas et al., 2017).

O afloramento estudado da Formação São Sebastião, de idade berriasiana a barremiana, referido como TUC41, é um morro tabular a margem da rodovia BR 235 que liga as cidades de Canudos e Jeremoabo no Estado da Bahia. A exposição, dominada por arenito avermelhado, é contínua lateralmente por centenas de metros e apresenta altura de dezenas de metros. Nessa parte da Bacia do Tucano, a Formação São Sebastião ocorre com espessura reduzida a várias centenas de metros sobre um alto estrutural – a Zona de Transferência do Vaza-Barris (Magnavita & Cupertino, 1988; Milani & Davison, 1988). Nos depocentros da bacia a unidade atinge milhares de metros de espessura sobrepondo depósitos deltaicos do Grupo Ilhas (Costa et al., 2007a e b).

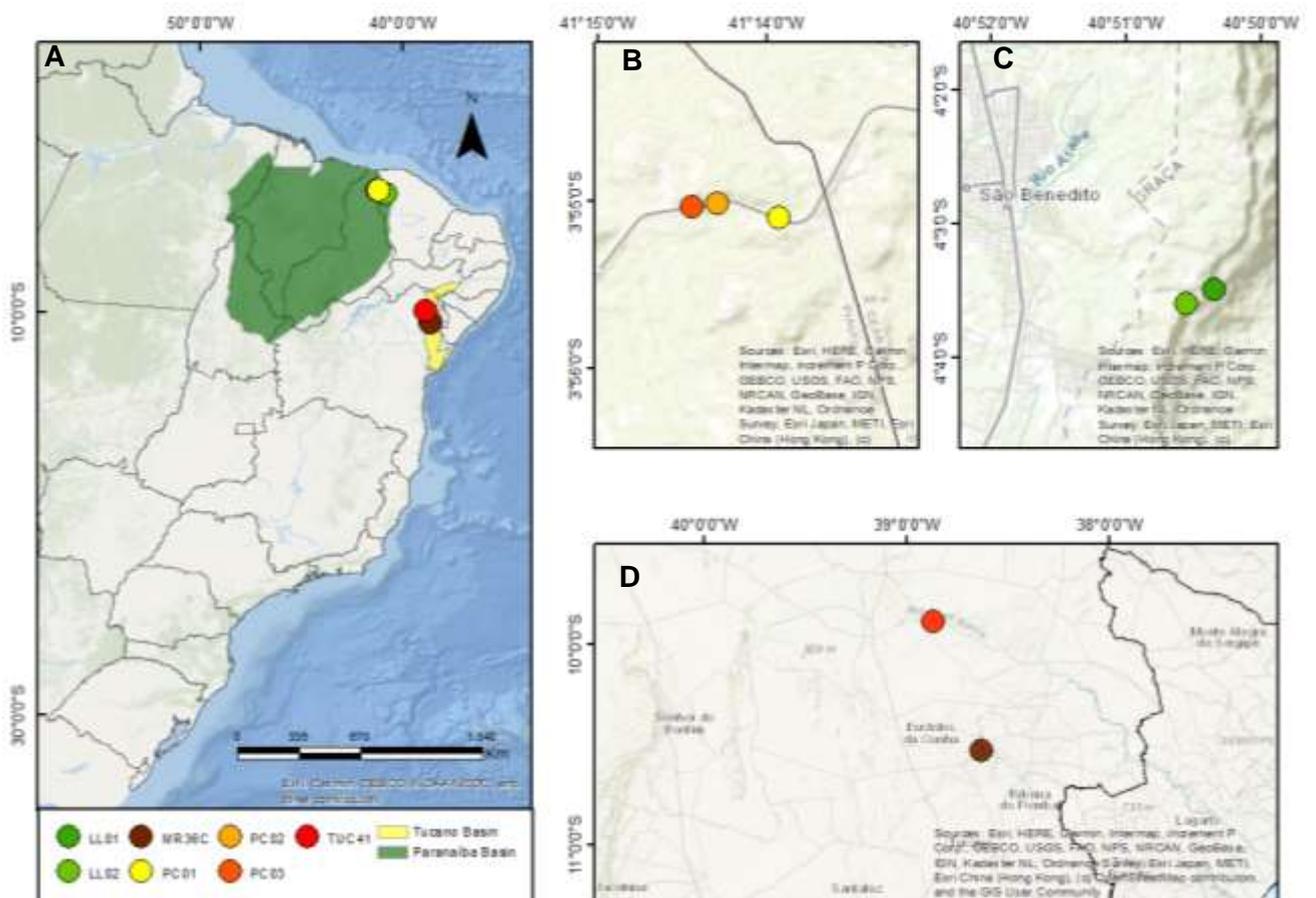


Figura 1. Localização dos afloramentos estudados. A – Contexto regional das bacias do Parnaíba e Recôncavo-Tucano-Jatobá e áreas estudadas. B e C – Contextos locais dos afloramentos estudados no nordeste da Bacia do Parnaíba, próximo à divisa entre os estados do Piauí e do Ceará. D – Afloramentos estudados na Bacia do Tucano.

#### IV. RESULTADOS

Para estabelecer uma rotina o mais simples e com o menor custo possível para a utilização de afloramentos virtuais para a obtenção de paleocorrentes foram realizados três estudos de caso. Para cada estudo de estudo de caso foram realizados diversos cenários de processamentos, tendo como principais diferenças a resolução da nuvem de pontos densa (principal responsável pela qualidade final da malha tridimensional e pelo tempo de processamento) e a utilização ou não de pontos de controle em solo (GCP) (Tabela 1). Tabela 1. Principais parâmetros de processamento para os diferentes estudos de caso

Case Study	1					2	3	
<b>Outcrop</b>	PC01	PC02	PC03	LL01 <sup>2</sup>	LL02 <sup>2</sup>	MR36C	TUC41	
<b># photos</b>	1327	671	390	1193	712	423	399	
<b>Average Dist. (m)</b>	8.14	9.01	8.99	11.4	3.91	63.8	32.6	
<b>Pixel Size (µm)</b>	2.61 x 2.61			2.53 x 2.53		4 x 4	1.86 x 1.86	
<b>f (mm)</b>	8.8					16	5.2	
<b>Camera Resolution</b>	4864 x 4864			5478 x 3078		6000 x 4000	4000 x 3000	
<b>GSD* (mm/pix)</b>	1.97-2.93	2.23-2.25	2.12-2.14	2.75-2.93	1-1.01	11.2-13.8	8.08-8.22	
<b>Reprojection error (pix)</b>	0,539	0,707	0,47	0,41	0,564	0,672	0,682	
<b>Total Processing Time HQ Geotag</b>	MQ	14h30	2h10	50m	4h20	2h15	14h	1h
	HQ	44h	6h30	2h	15h	3h30	36h20	5h
	UHQ	>540h	---	---	---	---	---	24h
<b>Total Processing Time HQ GCP</b>	MQ	14h10	2h10	52m	4h20	1h10	17h30	1h25
	HQ	48h10	6h35	2h10	15h10	1h30	37h	5h20
	UHQ	---	---	---	---	---	---	---
<b>Final File Size<sup>1</sup> (Mb)</b>	MQ	67	122	69	80	173	25	170
	HQ	100	152	98	102	589	43	875
	UHQ	11.182	---	---	---	---	---	2280
<b>Markers</b>	6	2	3	5	7	5	3	
<b>Collector used</b>	Topcon Sokia GSX2					Promark 2/ REACH RS +	Topcon Hiper SR	

<sup>1</sup> apenas da malha texturizada

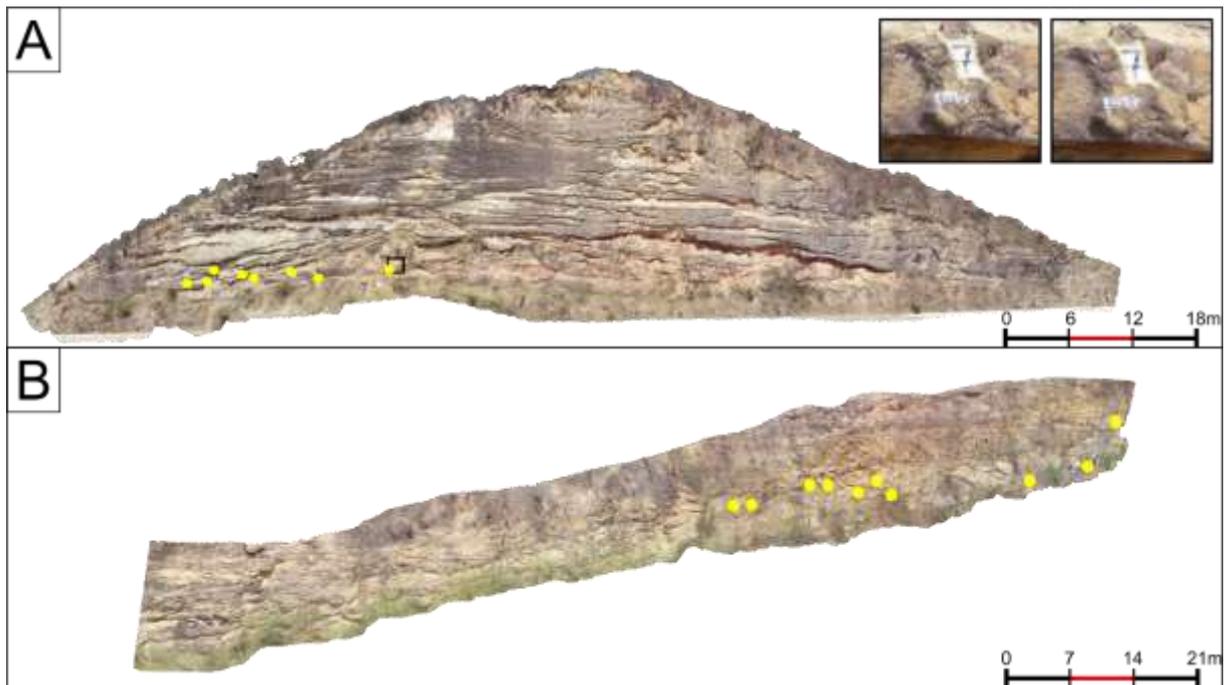
<sup>2</sup> utilizados no estudo de caso 1 e 3

\* resolução de reprojeção do solo

##### IV.1 Estudo de caso 1

As mesmas estratificações cruzadas foram medidas em campo e a partir de modelos digitais 3D de 5 afloramentos do Grupo Serra Grande (Figura 2 e Tabela 3). Os resultados obtidos em 4 diferentes cenários, qualidade alta (HQ) e média (MQ) e uso ou não de pontos de controle em solo (respectivamente GCP e Geotag) (Tabela 3), foram comparados aos dados obtidos em campo.

A dispersão dos valores de sentido de mergulho apresentou forte correlação linear, muito próxima de uma reta em que  $x = y$  (plotada em laranja na Figura 3) em todos os cenários de processamento dos afloramentos virtuais, com coeficientes de determinação variando de 0,9572 a 0,9747 (Figura 3). Essa estreita variação não permite distinguir com clareza um melhor cenário no que diz respeito a equivalência com os dados obtidos em campo.



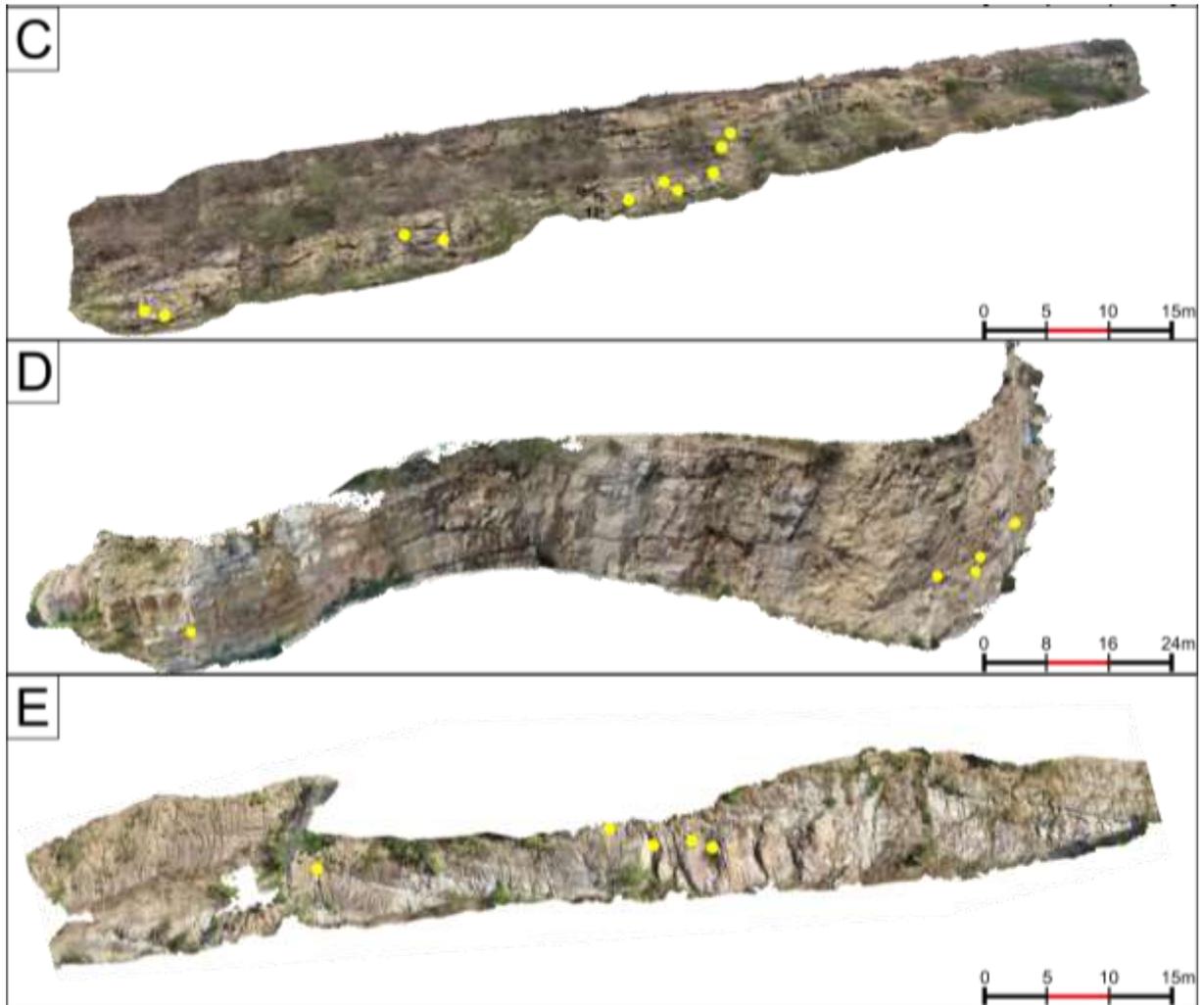


Figura 2. Distribuição das medidas analisadas no estudo de caso 1 (pontos amarelos). Algumas medidas diferentes podem estar representadas por apenas um ponto devido a sua proximidade. A – Afloramento PC01, n = 9, visada para SW, <https://skfb.ly/6KVWO>. Quadro preto mostra zoom em área do modelo digital 3D (imagem da esquerda no canto superior direito de A) comparada com resultado de reprocessamento dessa área específica (imagem da direita). B – Afloramento PC02, n = 10, visada para SE, <https://skfb.ly/6PYVY>. C – Afloramento PC03, n = 10, visada para SE, <https://skfb.ly/6PYXq>. D – Afloramento LL01, n = 5, visada para SE, <https://skfb.ly/6OD8z>. E – Afloramento LL02, n = 6, visada para NW, <https://skfb.ly/6PYVF>.

Tabela 2 – Orientações medidas em campo e nos modelos digitais 3D

	Field		HQ Geotag		HQ GCP		MQ Geotag		MQ GCP	
	DipDir	Dip	DipDir	Dip	DipDir	Dip	DipDir	Dip	DipDir	Dip
PC01	25	10	338	9	21	19	16	26	17	16
	87	22	89	18	90	22	103	16	85	23
	125	24	96	21	87	26	105	21	80	29

	67	17	56	19	49	24	53	16	52	26
	351	21	349	24	369	22	342	19	364	29
	41	20	29	18	47	27	15	32	25	35
	94	9	64	7	72	15	21	31	85	25
	50	23	335	29	349	29	315	23	345	30
	278	27	299	21	315	16	327	29	340	26
PC 02	291	23	245	21	340	36	218	21	307	32
	298	18	227	21	344	25	225	24	301	4
	301	24	210	21	316	30	255	29	334	18
	317	33	221	28	307	32	234	28	313	31
	262	26	221	37	295	36	238	28	293	38
	255	25	245	39	293	32	232	16	268	7
	244	21	221	38	284	25	267	29	260	16
	296	22	232	24	292	31	299	27	291	31
	230	18	217	38	302	20	212	33	301	19
	251	2	187	25	334	27	199	15	282	10
PC 03	20	18	15	23	43	14	16	21	23	20
	287	22	288	31	321	34	273	26	317	32
	38	23	18	24	30	26	22	23	33	21
	34	26	14	32	45	21	22	10	25	29
	314	21	297	21	273	14	283	18	307	18
	346	12	333	10	356	12	312	31	357	4
	314	16	303	13	294	14	347	16	313	13
	257	21	278	27	236	23	262	25	231	24
	289	15	309	27	299	18	271	19	271	15
	279	16	269	18	250	13	260	17	266	15
LL 01	7	14	366	19	328	15	18	22	335	15
	349	19	346	21	356	21	336	21	355	22
	212	20	236	26	248	31	242	23	233	24
	331	2	284	17	286	21	326	6	321	3
	352	19	353	15	340	23	348	30	356	19
LL 02	256	18	271	23	285	35	280	21	236	15
	264	21	253	16	272	23	278	20	268	22
	230	15	265	18	255	22	252	16	234	21
	261	23	264	27	216	10	264	27	257	25
	352	18	323	27	331	25	334	27	330	25
	50	19	48	30	50	26	49	29	47	26

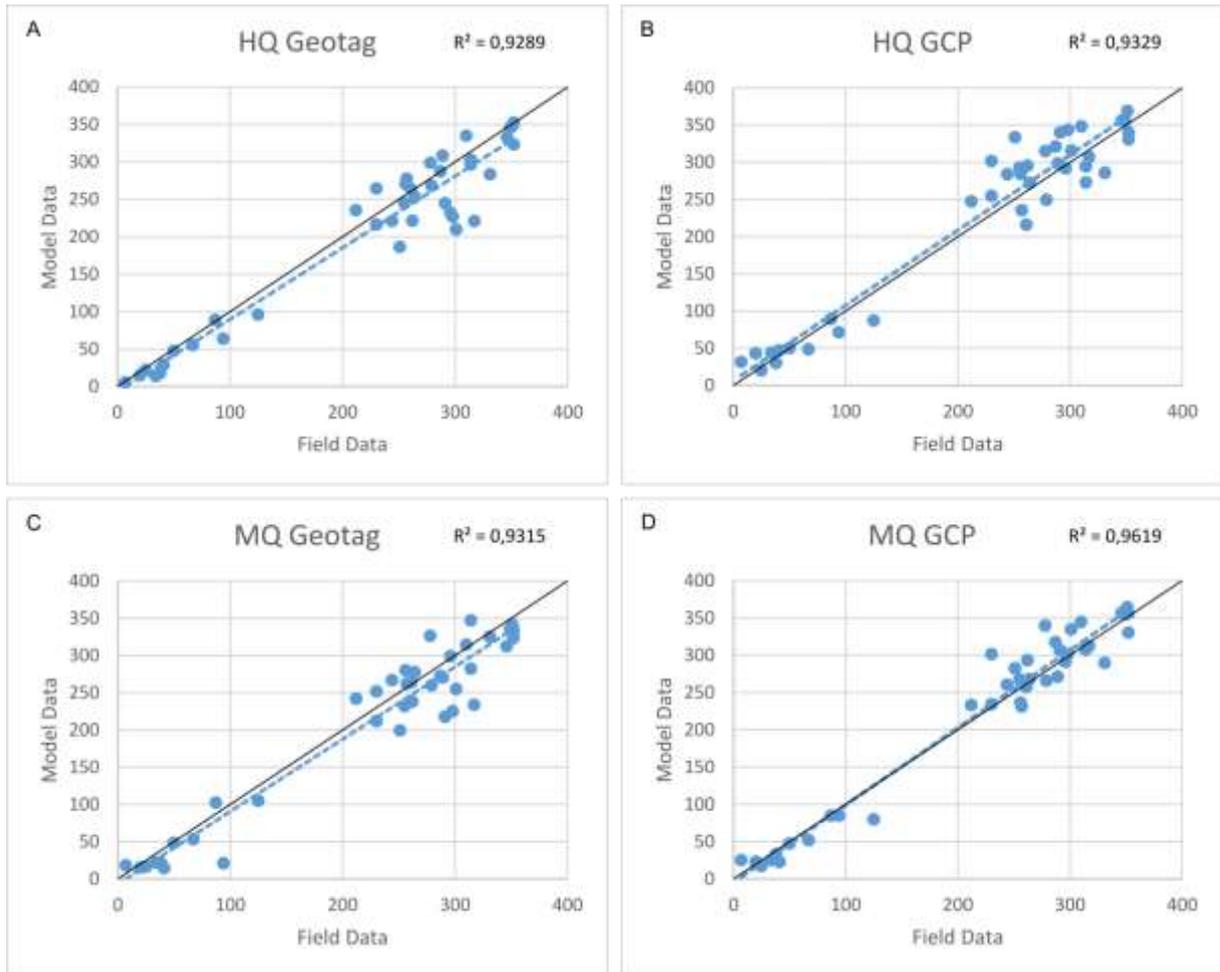


Figura 3 – Gráficos de Dispersão dos valores de sentido de mergulho obtidos em campo comparados com valores obtidos a partir de afloramentos virtuais processados de diferentes maneiras. A – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em alta qualidade (HQ) e com coordenadas apenas de geotags (sem pontos de controle em solo). B – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em alta qualidade com pontos de controle em solo (GCP). C – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em média qualidade (MQ) e com coordenadas apenas de geotags (sem GCP). D – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em média qualidade (MQ) com GCP.

Já os valores de mergulho de estratificações cruzadas, obtidos a partir dos modelos digitais 3D, apresentaram maiores dispersões que os sentidos de mergulho. Os valores de correlação linear obtidos para quatro cenários analisados ficaram abaixo de 0,3621, com correlações tão baixas quanto 0,0729. As distâncias da reta  $x = y$  também aumentaram significativamente (Figura 4). As menores dispersões foram

obtidas nos cenários processados em alta qualidade sem pontos de controle (Figura 4A) e em qualidade média com pontos de controle (Figura 4 D).

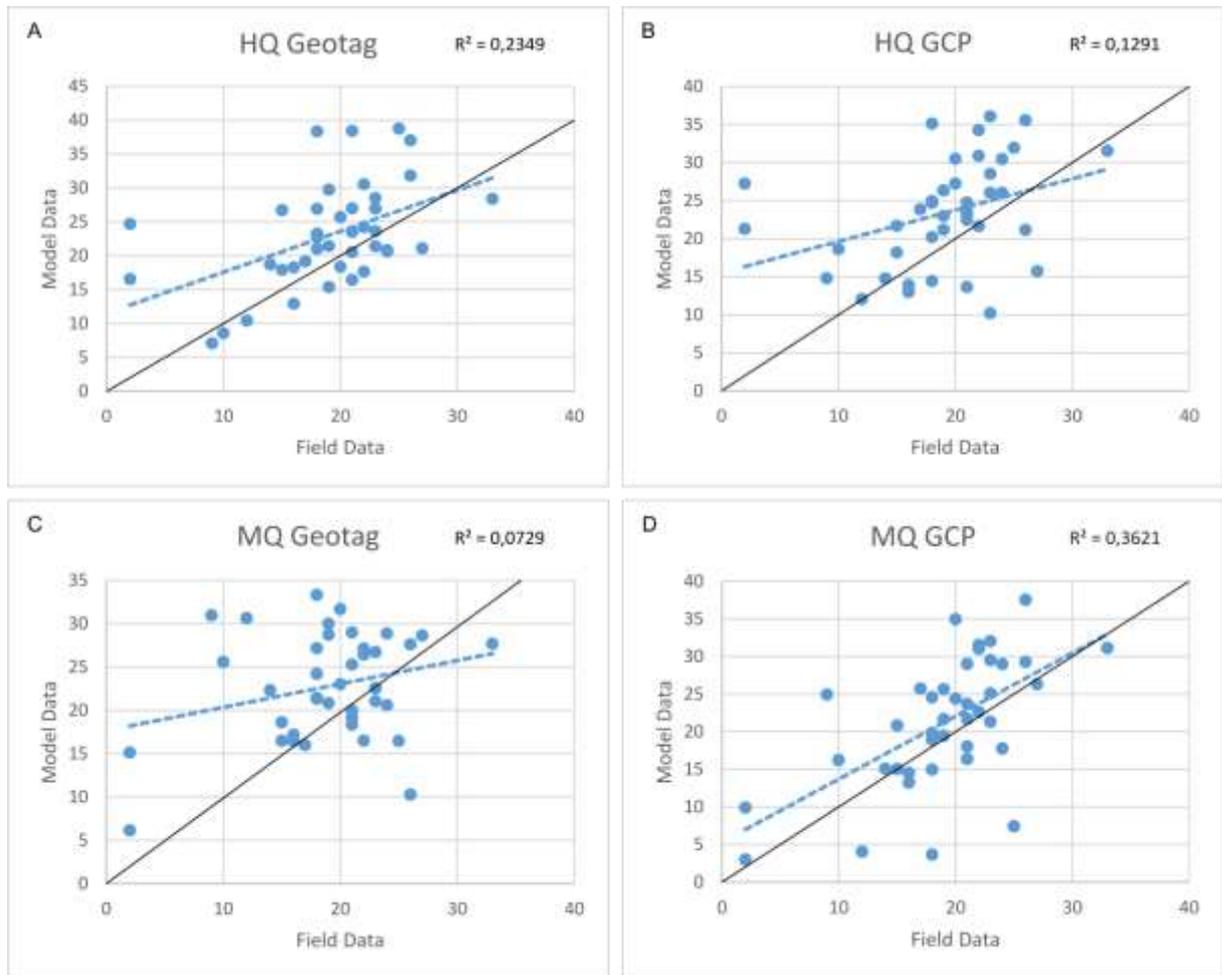


Figura 4 – Gráficos de Dispersão dos valores do ângulo de mergulho obtidos em campo comparados com valores obtidos a partir de afloramentos virtuais processados de diferentes maneiras. A – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em alta qualidade (HQ) e com coordenadas apenas de geotags (sem pontos de controle em solo). B – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em alta qualidade com pontos de controle em solo (GCP). C – Dados de campo comparados com afloramento virtual processado em média qualidade

Contudo, as distâncias angulares tanto do sentido de mergulho (Figura 5) quanto do ângulo de mergulho (Figura 6) foram relativamente pequenas. Para os sentidos de mergulho, houve 2 cenários (HQ geotag e MQ GCP) em que a mediana das distâncias angulares ficou próxima de  $10^\circ$  (Figura 5), valor obtido por Almendinger et al. (2017) ao comparar medidas obtidas a partir de imagens de satélite e bússolas analógica e eletrônica. Para os valores de ângulos de mergulho, as distâncias

angulares ficaram abaixo de  $5^\circ$  em 3 cenários (HQ geotag, MQ geotag e MQ GCP) (Figura 6).

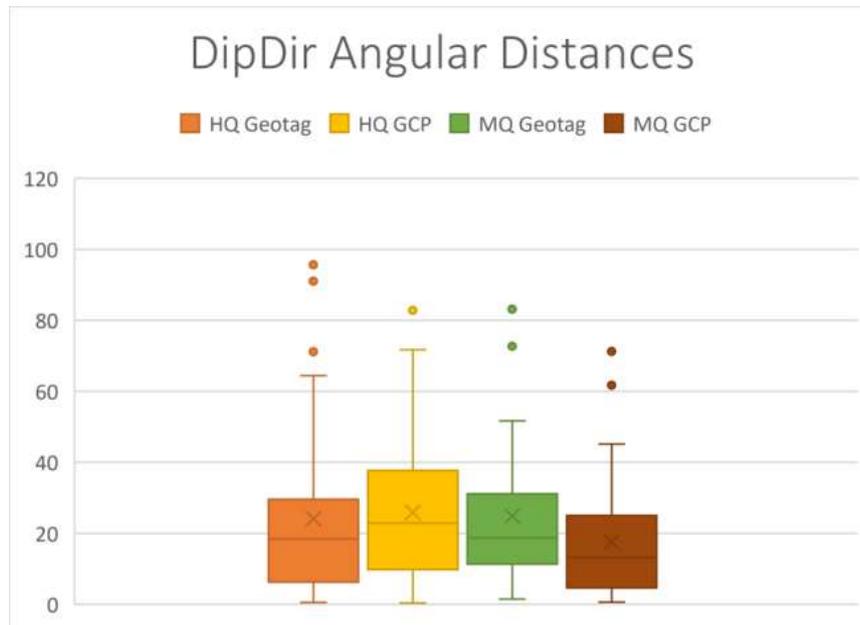


Figura 5. Boxplot das distâncias angulares dos sentidos de mergulho obtidos em 4 cenários de processamento distintos comparados a dados obtidos diretamente com o uso de bússola, em campo.

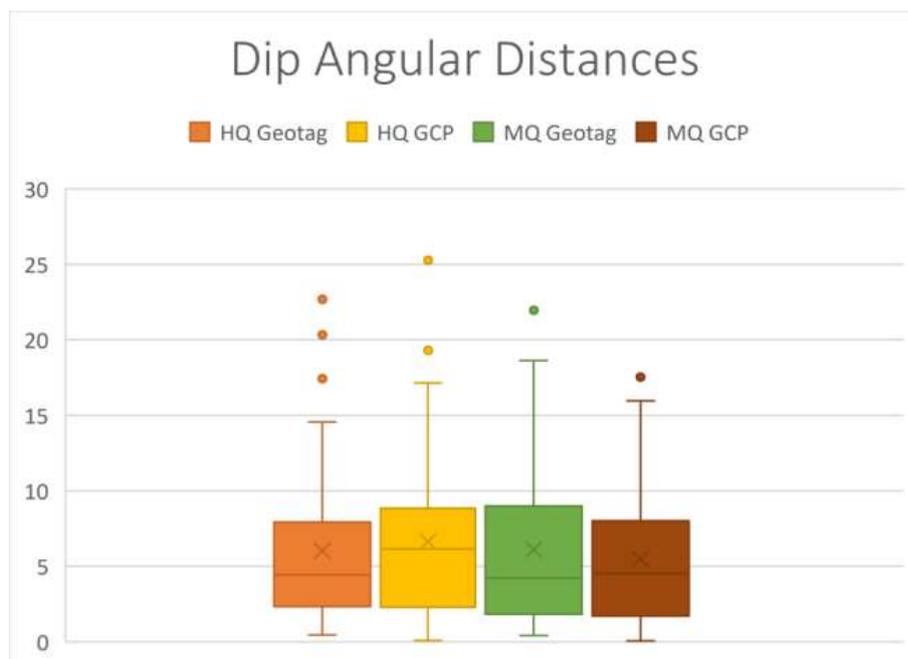


Figura 6. Boxplot das distâncias angulares dos dados de ângulo de mergulho obtidos em 4 cenários de processamento distintos comparados a dados obtidos diretamente com o uso de bússola, em campo.

## IV.2 ESTUDO DE CASO 2

Nesse estudo de caso, foi analisada uma face vertical de aproximadamente 25 m de altura que compõe uma exposição da Formação Marizal localmente com mais de 40 m de altura. Nessa face foram obtidos, com auxílio de cordas e técnicas de trabalho em altura, diversos dados sedimentológicos (Figura 7) ao longo de aproximadamente 3 dias de levantamentos.

A partir desses dados foram identificados conjuntos de depósitos interpretados como pertencentes a 3 cinturões de canais (*channel belts*) (Almeida et al., 2016). Cada um desses constituído por *cosets* de séries (*sets*) de estratificações cruzadas e limitados no topo e na base por superfícies erosivas de grande escala (linhas tracejadas vermelhas na figura 7). Os depósitos de cinturão de canais referidos como *channel belt 2* foram individualizados em duas sucessões de barras compostas (*compound bars*) distintas (Almeida et al., 2016).

Para a construção do modelo digital 3D (Figura 7) dessa exposição foram utilizadas fotografias obtidas a partir de 3 voos de aproximadamente 20 minutos cada. A obtenção da posição de 5 pontos de controle em solo foi realizada com 2 equipamentos diferentes (Tabela 1) e levou aproximadamente 7 horas devido à dificuldade de acesso ao topo da exposição. Desse modo, os processamentos foram realizados considerando-se 2 parâmetros de resolução – qualidades alta e média – e 3 fontes de dados de posição – geotag, GCP com DGPS (Ashtec) e GCP com RTK (Emlid), totalizando 6 cenários a serem analisados (Figura 8).

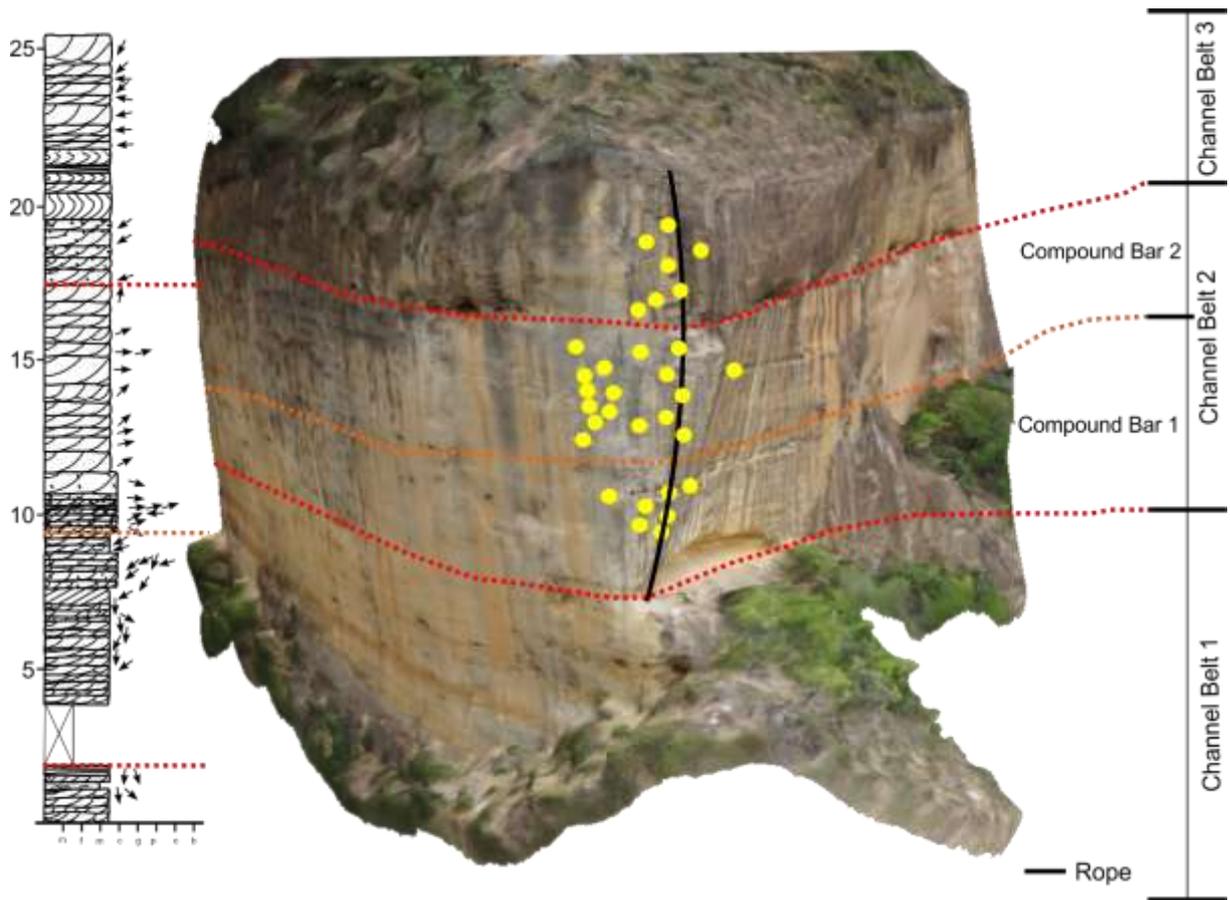


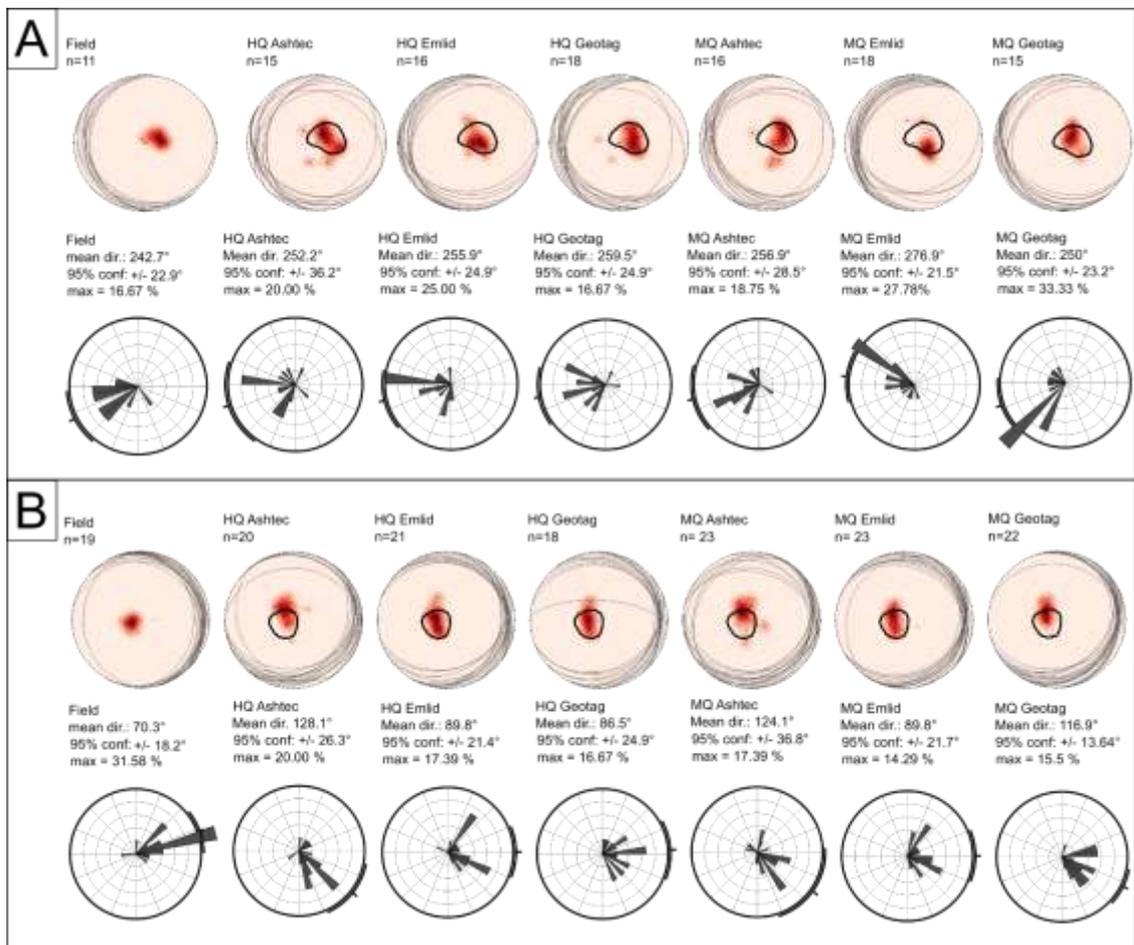
Figura 7. Afloramento virtual MR36. A exposição é dominada por arenitos com estratificações cruzadas com espessuras (em metros), orientações, granulação e principais subdivisões sistematizadas na seção colunar a esquerda, conforme dados obtidos em campo. A direita é designada as subdivisões interpretadas (modificado de Almeida et al., 2016). Os círculos amarelos marcam as posições de obtenção de dados nos modelos digitais a serem comparados com dados obtidos em campo e representados como setas (norte para cima) na seção colunar <https://skfb.ly/6KVXU>.

A comparação dos resultados obtidos em diferentes cenários de processamento foi realizada considerando-se dados oriundos dos mesmos conjuntos de séries (*cosets*) de estratificações cruzadas que, por sua vez constituem hierarquias maiores de depósitos, como barras compostas e cinturões de canais (Figura 7).

Os resultados mostram concentrações semelhantes dos valores obtidos para orientações de estratificações cruzadas nos mesmos *cosets* na maioria dos cenários analisados (Figura 7A a C). Ao contrário do que se poderia esperar, as

maiores dispersões em relação às medidas de campo ocorreram nos cenários de afloramentos virtuais processados com pontos de controle em solo (Figura 7A a C).

Quando analisada a semelhança dos gráficos de frequência circular, verifica-se que a maior parte dos cenários gerou distribuições semelhantes. As rosetas mais discrepantes foram produzidas novamente nos cenários processados com pontos de controle em solo (Figura 7 A a C). Essa constatação pode ser melhor visualizada considerando-se as distâncias angulares entre os vetores médios obtidos (Tabela 4). A maior parte dos resultados fica próximo ou abaixo de  $30^\circ$ , valor sugerido por Selley (1982) como erro aceitável na análise de paleocorrentes.



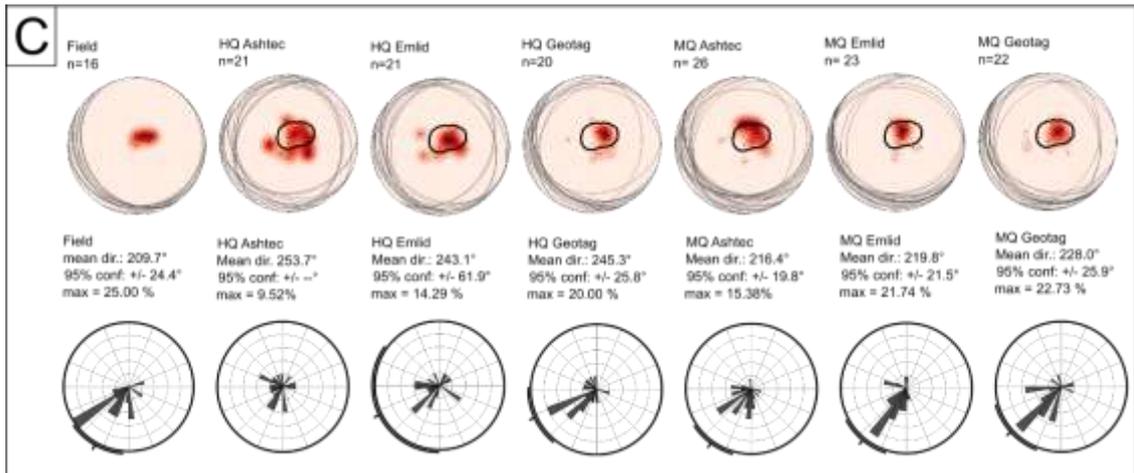


Figura 8. Medidas de paleocorrentes do afloramento MR36 em esterogramas (projeção de polos e planos) e em rosetas. Note que o contorno das maiores concentrações de dados de campo está plotado nos diferentes cenários de afloramentos virtuais para comparação. A – Resultados obtidos para cosets do cinturão de canais 3. B – Resultados obtidos para cosets da barra composta 2 do cinturão de canais 2. C – Resultados obtidos para cosets da barra composta 1 do cinturão de canais 2.

Tabela 3 - Distâncias angulares entre vetores médios obtidos no estudo de caso 2. Os valores mais discrepantes em cada conjunto de dados estão destacados em negrito.

<i>Distâncias angulares entre vetores médios</i>						
<i>Cosets</i>	HQ Ashtec	HQ Emlid	HQ Geotag	MQ Ashtec	MQ Emlid	MQ Geotag
<i>Channel Belt</i>	9,5	13,2	16,8	14,2	<b>34,2</b>	7,3
<i>Compound Bar 2</i>	<b>57,8</b>	19,5	16,2	<b>53,8</b>	19,5	<b>46,6</b>
<i>Compound Bar 1</i>	<b>44</b>	33,4	35,6	6,7	10,1	18,3
	111,3	66,1	68,6	74,7	63,8	72,2

### IV.3 ESTUDO DE CASO 3

Para esse estudo de caso foram utilizados dados coletados em pontos diferentes de uma mesma região de três afloramentos estudados. Um desses afloramentos é o TUC41 (Figura 9.A), pertencente a Formação São Sebastião e constituído por *cosets* de séries de estratificações cruzadas compondo sucessões separadas por superfícies erosivas de grande escala Figueiredo (2013).

Os outros dois afloramentos, LL01 (Figura 9.B) e LL02 (Figura 9.C), já apresentados (Item IV.1) e constituídos de fácies e associações semelha, também

foram submetidos ao mesmo procedimento, com diversas medidas de orientação obtidas *in loco* comparadas com número equivalente de medidas obtidas em pontos diferentes mas nas mesma região dos afloramentos virtuais processados em diversos cenários.

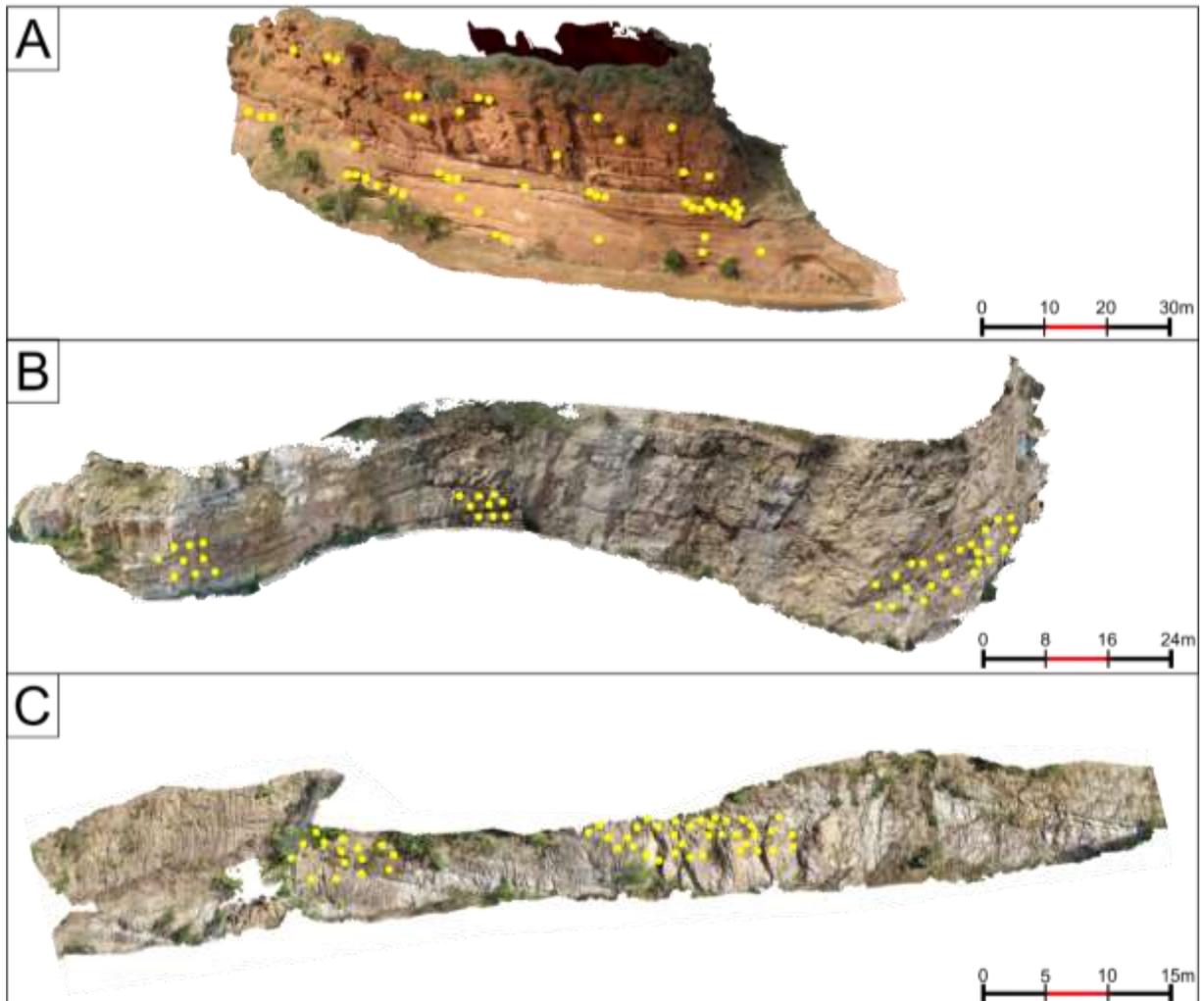
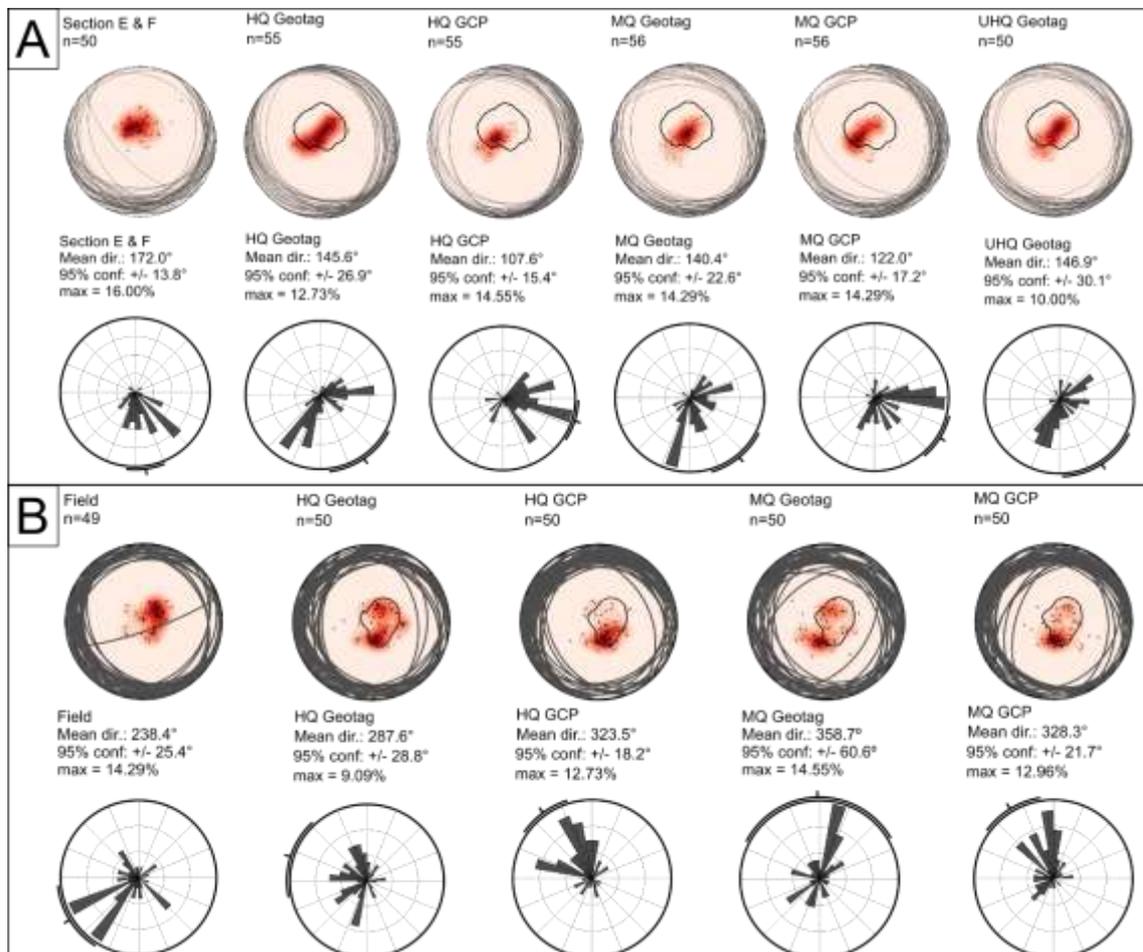


Figura 9. Distribuição das medidas analisadas no estudo de caso 3 (pontos amarelos). Algumas medidas diferentes podem estar representadas por apenas um ponto devido a sua proximidade. A – Afloramento TUC41,  $n = 50$ , visada para NW, <https://skfb.ly/6KVWE>. B – Afloramento LL01,  $n = 50$ , visada para SE, <https://skfb.ly/6OD8z>. C – Afloramento LL02,  $n = 50$ , visada para NW, <https://skfb.ly/6PYVF>.

A comparação dos dados obtidos em campo e a partir dos afloramentos virtuais estudados no caso 3 mostra dispersões de valores de sentido de mergulho e ângulo de mergulho de estratificações cruzadas bastante semelhantes (Figura 10 A a C). No entanto, nota-se um esperado aumento da dispersão dos dados virtuais em

relação aos dados de campo quando comparados ao estudo de caso anterior (item IV.2) (Figura 8).

As rosetas dos valores obtidos para o TUC41 e o LL01 (Figura 10 A e B, respectivamente) também ilustram essa tendência no aumento da dispersão por se tratar de dados dispersos em uma maior área dos afloramentos em comparação aos estudos de caso anteriores (itens IV.1 e IV.2). Já as rosetas obtidas para o afloramento LL02 apresentaram maior semelhança de seus parâmetros estatísticos básicos (Figura 10C).



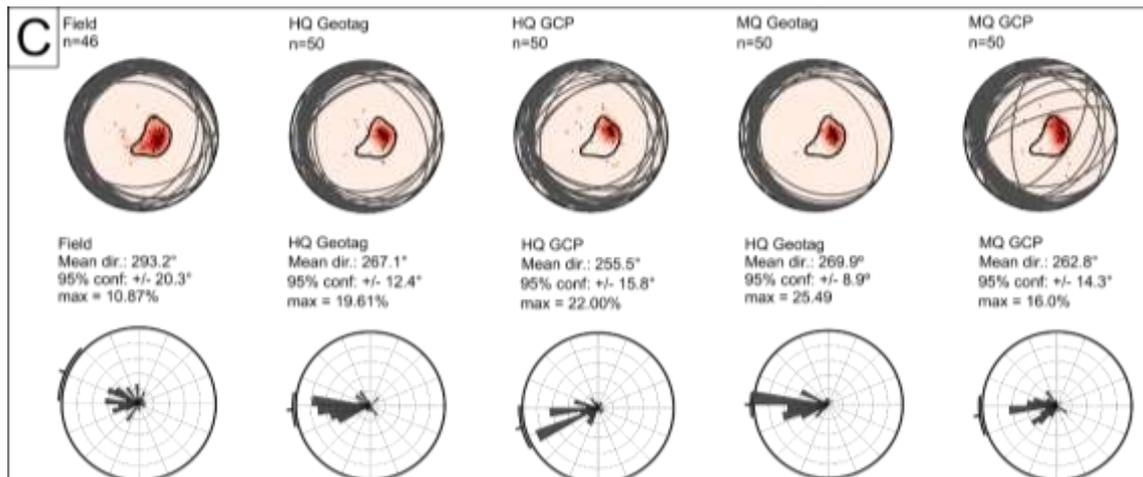


Figura 10. Medidas de paleocorrentes do estudo de caso 3 em estereogramas (projeção de polos e planos) e em rosetas. Note que o contorno das maiores concentrações de dados de campo está plotado nos diferentes cenários de afloramentos virtuais para comparação. A – TUC41 com dados de campo de duas seções colunares (E e F) levantadas por Figueiredo (2013). B – LL01. C – LL02.

As distâncias angulares entre os vetores médios resultantes dos dados de campo e dos dados medidos nos afloramentos virtuais apresentou valores próximos e abaixo de  $30^\circ$  para dois dos afloramentos estudados (TUC41 e LL02) (Tabela 4).

Distâncias angulares bem maiores foram obtidas para o afloramento LL01 (Tabela 4), provavelmente em função de maior diferença entre as distribuições das posições das medidas nos afloramentos virtuais e real. Nesse caso, a menor diferença entre vetores médios, de quase  $50^\circ$ , resultou dos dados oriundos do afloramento virtual processado em qualidade alta (HQ) e sem pontos de controle (Tabela 4).

Novamente houve piores resultados nos cenários processados com pontos de controle (Tabela 4).

Tabela 4 - Distâncias angulares entre vetores médios obtidos no estudo de caso 3. Os valores mais discrepantes em cada conjunto de dados estão destacados em negrito

<i>Distâncias angulares entre vetores médios</i>					
<i>Afloramento</i>	HQ Geotag	HQ GCP	MQ Geotag	MQ GCP	UHQ
<i>TUC41</i>	26,4	<b>64,4</b>	31,6	<b>50</b>	25,1
<i>LL 01</i>	49,2	<b>85,1</b>	<b>120,3</b>	<b>89,9</b>	
<i>LL 02</i>	26,1	<b>37,7</b>	23,3	30,4	
	101,7	187,2	175,2	170,3	25,1

## V. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os três estudos de caso apresentados foram concebidos com o intuito de avaliar a utilização de afloramentos virtuais na análise de paleocorrentes através de medidas de orientações de estratificações cruzadas. Para tanto, foram consideradas as equivalências dos dados referentes (i) exatamente às mesmas medidas; (ii) aos mesmos conjuntos de estratificações cruzadas (*cosets*) restritos às proximidades de uma linha vertical e; (iii) a uma área maior de um dado afloramento em que a posição de obtenção dos dados é bastante variável, simulando os limites da reprodutibilidade de estudos de paleocorrentes realizados por diferentes pesquisadores ou grupos de pesquisa em um mesmo afloramento (item IV).

Diferentemente de estruturas geológicas deformacionais rúpteis, como fraturas que frequentemente ocorrem como planos dissecados, as estratificações cruzadas são superfícies penetrativas ao afloramento comumente visualizadas por meio das linhas de intersecção com a superfície do afloramento. Dessa forma, a medição desse tipo de estrutura requer uma abordagem específica e que tem sido negligenciada no desenvolvimento de aplicações de afloramentos virtuais às geociências.

Assim, buscou-se avaliar fluxos de trabalho para o escaneamento de afloramentos, o processamento de modelos digitais 3D e a extração de dados de orientações de superfícies com as particularidades descritas acima (item II), avaliando também a equivalência dos dados obtidos a partir dos afloramentos virtuais com dados obtidos em campo (item IV).

Diferentes cenários de processamento, caracterizados pelo uso ou não de pontos de controle em solo e por parâmetros de qualidade, foram testados no contexto dos estudos de caso. Cada estudo de caso contou também com diferentes tipos de drones e câmeras, assim como diferentes sensores GPS utilizados para a aferição da posição dos pontos de controle (Tabela 1).

Os conjuntos drone-câmera utilizados podem ser todos considerados conjuntos de entrada para levantamentos profissionais, com preços variando aproximadamente entre R\$10.000,00 (U\$2000,00) e R\$30.000,00 (U\$6000,00) em valores e relações cambiais de 2019. As resoluções das câmeras utilizadas variaram de 12 a 24 MP. As distâncias médias dos alvos fotografados variaram de aproximadamente 4 a pouco mais de 60 m, com mediana por volta de 10 m. As

resoluções resultantes foram predominantemente de escala milimétrica, com apenas a maior distância de aquisição resultando em resolução pouco maior que 10 mm (Tabela 1).

Optou-se pela operação manual dos drones em todos os casos, assim como na obtenção de muito mais fotografias do que o necessário, o que gerou a necessidade de seleção de imagens para processamentos menos pesados. Nos levantamentos, ênfase também foi dada a alvos caracterizados por faces com orientações próximas a perpendicular, de modo a facilitar a reconstrução de planos em ambiente virtual (item II).

Para o planejamento e operação dos voos e processamento das fotografias obtidas e construção dos afloramentos virtuais foram utilizados softwares livres ou com licenças acadêmicas de baixo custo. A facilidade de operação e obtenção de dados também influenciou a escolha dos softwares utilizados de modo a compor um fluxo de trabalho simples e de fácil reprodução (item II).

Nesse sentido, o processamento e construção dos afloramentos virtuais seguiu estritamente o fluxo estabelecido pelo software Metashape. Apenas um passo adicional foi estabelecido para aprimorar a resolução de áreas de interesse em modelos constituídos por muitas centenas ou mais fotografias (itens II e IV).

Foram analisados diferentes parâmetros de qualidade para a construção dos modelos digitais 3D utilizados. O parâmetro de menor qualidade analisado (qualidade média, MQ, Tabela 1) resultou em tempos de processamento entre aproximadamente 1h e 14h. O parâmetro de alta qualidade (HQ) resultou em tempos de processamento 2 a 3 vezes maior que o processamento em qualidade média, enquanto o processamento em qualidade ultra alta (UHQ) resultou em tempos de processamento 24 a 40 vezes maior que a qualidade média (Tabela 1).

Quanto aos resultados, nos três estudos de caso desenvolvidos a maior parte deles está dentro de padrões estatísticos previamente estabelecidos para análise de paleocorrentes. Desses padrões destacam-se o erro de  $\pm 10^\circ$  para o sentido de mergulho – obtido por Almendiger et al. (2017) ao comparar medidas realizadas a partir de imagens de satélite de altíssima resolução e medidas das mesmas estruturas com bússolas analógica e sensores presentes em smartphones – e de  $\pm 30^\circ$  para vetores médios de sentidos de mergulho – conforme sugerido por Selley (1982) ao recomendar um número mínimo de 25 medidas de paleocorrentes por estação de medidas (item IV).

Os afloramentos virtuais construídos com pontos de controle em solo apresentaram os resultados com menor equivalência na comparação com resultados de campo (item IV). Foram utilizados 2 a 7 (mediana = 4) pontos de controle nos cenários processados com esse tipo de parâmetro.

A menor equivalência dos dados oriundos de modelos com GCP poderia ser atribuída ao baixo número de pontos de controle em cada processamento. Contudo, os bons resultados obtidos apenas com as geotags das fotografias e sem pontos de controle sugere que os modelos digitais 3D processados por meio dos algoritmos SfM-MVS apresentam coerência interna adequada a obtenção de medidas de orientação de superfícies, conforme limites aceitos para análise de paleocorrentes.

Dessa maneira, a inserção de pontos de controle em solo parece afetar a coerência interna dos produtos do processamento SfM-MVS, como analisado em detalhe por James & Robson (2012) e Chelsey et al. (2017). Para aplicações que necessitam de posicionamento absoluto com erros subcentimétricos, a solução desse problema passa pelo uso de uma quantidade maior de pontos de controle em solo por área, assim como pela interferência no processo computacional de recálculo das coordenadas dos pontos da nuvem processada (e.g. James & Robson, 2012).

Os resultados aqui obtidos indicam que medidas independentes de coordenadas acuradas e precisas, e dependentes exclusivamente da coerência interna do modelo digital 3D, como espessuras, áreas, volumes e orientações de superfícies, podem ser obtidas sem pontos de controle em solo. Essa conclusão, implica em enorme economia de tempo e dinheiro em levantamentos voltados a análise de paleocorrentes com a utilização de afloramentos virtuais.

Pontos de controle em solo também são frequentemente utilizados como forma de aferir acurácia e precisão de modelos digitais 3D. Ao empregar afloramentos virtuais à análise de paleocorrentes, é possível utilizar seções com medidas de paleocorrentes realizadas em campo como controle para avaliar a equivalência de dados oriundos de modelos digitais 3D com dados de campo.

**Em suma**, o estudo aqui desenvolvido permitiu estabelecer um fluxo de trabalho simples, de fácil reprodução e menor custo possível para a construção de afloramentos virtuais com o auxílio de drones e com vistas a análise de paleocorrentes. A rotina consiste:

- (i) na utilização de drones de entrada no segmento profissional, com câmeras de 12 a 24 MP, autonomia de voo ao redor de 20 min. e 3 a 6 baterias sobressalentes;
- (ii) voos operados manualmente, descrevendo trajetos verticais paralelos a distâncias de até 10 m das superfícies de interesse quando utilizando câmeras de menor resolução, podendo variar até 70 m de distância com câmeras de maior resolução;
- (iii) disparos a cada 2 a 4 segundos para velocidades de subida e descida do drone entre 1 e 2 m/s, privilegiando o excesso em detrimento da falta de imagens;
- (iv) ênfase em alvos caracterizados por faces próximo de perpendiculares;
- (v) processamento do modelo digital 3D (afloramento virtual) a partir de fotografias pré-selecionadas (preferência para conjuntos de poucas centenas), com geotags, no software Metashape, em alta qualidade e sem pontos de controle (devido a economia de tempo em campo, já que o uso de GCPs e de qualidade média no processamento também apresenta alto potencial de gerar resultados satisfatórios);
- (vi) importação do modelo digital 3D texturizado para o software LIME e medição de orientações de estratificações cruzadas por meio da reconstrução de planos com pontos;
- (vii) avaliação da equivalência dos dados por meio de paleocorrentes de controle medidas em campo (mínimo de poucas dezenas de dados para comparação);
- (viii) adicionalmente, a qualidade/viabilidade de uso do afloramento virtual no contexto da análise de paleocorrentes também pode ser avaliada comparando um ortomosaico ou modelo digital de elevação produzido no Metashape com imagens de satélite em ambientes GIS.

## Referências bibliográficas

- AGISOFT (2019). Agisoft Metashape user manual: professional edition, Version 1.5.1. St. Petersburg (Russia): Agisoft LLC.
- ALLEN, P. A. (2008). From landscapes into geological history. *Nature*, 451(7176), 274-276.
- ALLMENDINGER, R. W., SIRON, C. R., & SCOTT, C. P. (2017). Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices. *Journal of Structural Geology*, 102, 98-112.
- ALMEIDA, R. P., FREITAS, B. T., TURRA, B. B., FIGUEIREDO, F. T., MARCONATO, A., & JANIKIAN, L. (2016). Reconstructing fluvial bar surfaces from compound cross-strata and the interpretation of bar accretion direction in large river deposits. *Sedimentology*, 63(3), 609-628.
- ASSALI, P., GRUSSENMEYER, P., VILLEMIN, T., POLLET, N., & VIGUIER, F. (2014). Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102-114.
- BARBASIEWICZ, A., WIDERSKI, T., & DALIGA, K. (2018). The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 26, p. 00012). EDP Sciences.
- BISSCHOP, T. Virtual Outcrop Analysis using LIME. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Tu Delft. 23 de Outubro de 2017.
- BHATTY, S. The uses of Virtual Outcrops in Reservoir Modelling of Fluvial Systems. A Case Study Review. University of Aberdeen. 02 de Agosto de 2017
- BROWN, M. LOWE, D. G. Unsupervised 3D Object Recognition and Reconstruction in Unordered Datasets. In: *3DIM*. 2005. p. 56-63.
- BUCKLEY, S. J., ENGE, H. D., CARLSSON, C., & HOWELL, J. A. (2010). Terrestrial laser scanning for use in virtual outcrop geology. *The Photogrammetric Record*, 25(131), 225-239.
- BUCKLEY, S. J., RINGDAL, K., NAUMANN, N., DOLVA, B., KURZ, T. H., HOWELL, J. A., & DEWEZ, T. J. (2019). LIME: Software for 3-D visualization, interpretation, and communication of virtual geoscience models. *Geosphere*, 15(1), 222-235.

- CAPUTO, M. V., & LIMA, E. C. (1984). Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande–Bacia do Parnaíba. In Anais 33° Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro (Vol. 8, pp. 740-753).
- CARRIVICK, J. L., SMITH, M. W., QUINCEY, D. J., & CARVER, S. J. (2013). Developments in budget remote sensing for the geosciences. *Geology Today*, 29(4), 138-143.
- CARRIVICK, J. L., SMITH, M. W., & QUINCEY, D. J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.
- Dueholm, K. S., & Olsen, T. (1993). Reservoir analog studies using multimodel photogrammetry: a new tool for the petroleum industry. *AAPG Bulletin*, 77(12), 2023-2031.
- CAWOOD, A. J., BOND, C. E., HOWELL, J. A., BUTLER, R. W., & TOTAKE, Y. (2017). LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. *Journal of Structural Geology*, 98, 67-82.
- CAWOOD, A. J., & BOND, C. E. (2018). eRock: an *online*, open-access repository of virtual outcrops and geological samples in 3D. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 20, p. 18248).
- CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F., & RANZUGLIA, G. (2008). Meshlab: an open-source mesh processing tool. In Eurographics Italian chapter conference (Vol. 2008, pp. 129-136).
- CHESLEY, J. T., LEIER, A. L., WHITE, S., & TORRES, R. (2017). Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sedimentary Geology*, 354, 1-8.
- COSTA, I.P., BUENO, G.V., MILHOMEM, P.S., SILVA, H.S.R.L., KOSIN, M.D., 2007a. Subbacias de Tucano Norte e Bacia de Jatobá. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15, 445-453.
- COSTA, I.P., MILHOMEM, P.S., BUENO, G.V., SILVA, H.S.R.L., KOSIN, M.D., 2007b. Subbacias de Tucano Sul e Central. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15, 433- 443.
- DALY, M. C., FUCK, R. A., JULIÀ, J., MACDONALD, D. I., & WATTS, A. B. (2018). Cratonic basin formation: a case study of the Parnaíba Basin of Brazil. Geological Society, London, Special Publications, 472(1), 1-15.

- DEB D., HARIHARAN S., RAO U., RYU C.H. 2008. Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images. *Computers and Geosciences*, 34(2):115-126. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.03.007>
- DEWEZ, T., GIRARDEAU-MONTAUT, D., ALLANIC, C., & ROHMER, J. (2016, July). Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds.
- DUEHOLM, K. S., & OLSEN, T. (1993). Reservoir analog studies using multimodel photogrammetry: A new tool for the petroleum industry. *AAPG bulletin*, 77(12), 2023-2031.
- EDGAR, L. A., GUPTA, S., RUBIN, D. M., LEWIS, K. W., KOCUREK, G. A., ANDERSON, R. B., ... & HARDGROVE, C. (2018). Shaler: in situ analysis of a fluvial sedimentary deposit on Mars. *Sedimentology*, 65(1), 96-122.
- EMLID (2019). EMLID REACH RS+.. Disponível em: <<https://emlid.com/br/reachrs/>>. Acesso em: 20 de novembro. de 2019.
- FIGUEIREDO, F. T. (2013). Proveniência e arquitetura de depósitos fluviais das Sub-Bacias Tucano Central e Norte, Cretáceo (BA) (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- FIGUEIREDO, F. T., ALMEIDA, R. P., FREITAS, B. T., MARCONATO, A., CARRERA, S. C., & TURRA, B. B. (2016). Tectonic activation, source area stratigraphy and provenance changes in a rift basin: the Early Cretaceous Tucano Basin (NE-Brazil). *Basin Research*, 28(4), 433-445.
- FLEMING, Z., & PAVLIS, T. (2018). An orientation based correction method for SfM-MVS point clouds—Implications for field geology. *Journal of Structural Geology*, 113, 76-89.
- FREITAS, B. T., ALMEIDA, R. P., CARRERA, S. C., FIGUEIREDO, F. T., TURRA, B. B., VAREJAO, F. G., & ASSINE, M. L. (2017). Aptian sedimentation in the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift System and its tectonic and paleogeographic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 80, 460-481.
- GROHMANN, C. H., & CAMPANHA, G. A. (2010). OpenStereo: open source, cross-platform software for structural geology analysis. In *AGU Fall Meeting abstracts*.
- GROHMANN, C. H., VIANA, C. D., BUSARELLO, M. T., & GARCIA, G. P. (2018). Structural analysis of clastic dikes based on Structure from Motion/Multi-View Stereo (No. e27060v1). *PeerJ Preprints*.

- JAMES, M. R.; ROBSON, Stuart. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 117, n. F3, 2012.
- JAVERNICK, L., BRASINGTON, J., & CARUSO, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166-182.
- LONG, D. G. F. (2011). Architecture and depositional style of fluvial systems before land plants: a comparison of Precambrian, early Paleozoic and modern river deposits. *From river to rock record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation*, 97, 37-61.
- MARTINSEN, O. J., SØMME, T. O., THURMOND, J. B., HELLAND-HANSEN, W., & Lunt, I. (2010). Source-to-sink systems on passive margins: theory and practice with an example from the Norwegian continental margin. In *Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series (Vol. 7, No. 1, pp. 913-920)*. Geological Society of London.
- MIALL, A. D. (1974). Paleocurrent analysis of alluvial sediments; a discussion of directional variance and vector magnitude. *Journal of Sedimentary Research*, 44(4), 1174-1185.
- MIALL, A. D. (1988). Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies. *AAPG bulletin*, 72(6), 682-697.
- MULLINS, O. C., PRIMIO, R. D., ZUO, J. Y., UCHYTIL, S., MISHRA, V. K., DUMONT, H., ... & BETANCOURT, S. S. (2016). Reservoir Fluid Geodynamics; the Link between Petroleum Systems and Production Concerns Relating to Fluids and Tar Distributions in Reservoirs. In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- MICHELETTI, N., CHANDLER, J. H., & LANE, S. N. (2015). Structure from motion (SFM) photogrammetry.
- PAVLIS, T. L., & MASON, K. A. (2017). The new world of 3D geologic mapping. *GSA Today*, 27(9), 4-10.
- PIX4D SA. *Pix4Dmapper 3.2 User Manual*, 2018
- POTTER, P. E., & PETTIJOHN, F. J. (1963). *Paleocurrents and basin analysis*: Academic Press Inc. New York, 296.
- POTTER, P. E., & PETTIJOHN, F. J. (1963). *Paleocurrents and basin analysis*: Academic Press Inc. New York, 296.

- PRINGLE, J. K., CLARK, J. D., WESTERMAN, A. R., STANBROOK, D. A., GARDINER, A. R., & MORGAN, B. E. F. (2001). Virtual outcrops: 3-D reservoir analogues. *Animations in Geology. Journal of the Virtual Explorer*, 3, 00-01.
- PRINGLE, J. K., HOWELL, J. A., HODGETTS, D., WESTERMAN, A. R., & Hodgson, D. M. (2006). Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art. *First break*, 24(3), 33-42.
- RITTERSBACHER, A., HOWELL, J. A., & BUCKLEY, S. J. (2014). Analysis of fluvial architecture in the Blackhawk Formation, Wasatch Plateau, Utah, USA, using large 3D photorealistic models. *Journal of Sedimentary Research*, 84(2), 72-87.
- SCHWIND, M., & STAREK, M. (2017). How to produce high-quality 3D point clouds Structure-from-Motion Photogrammetry. *GIM INTERNATIONAL-THE WORLDWIDE MAGAZINE FOR GEOMATICS*, 31(10), 36-39.
- SELLEY, R. C. (1982). *Introduction to sedimentology*. Academic Press.
- SMITH, M. W., CARRIVICK, J. L., & QUINCEY, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 247-275.
- STURZENEGGER, M., & STEAD, D. (2009a). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3-4), 163-182.
- STURZENEGGER, M., & STEAD, D. (2009b). Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 267-287.
- STURZENEGGER, M., STEAD, D., & ELMO, D. (2011). Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology*, 119(3-4), 96-111.
- TAVANI, S., ARBUÉS, P., SNIDERO, M., CARRERA GARCÍA DE CORTÁZAR, N., & MUÑOZ, J. A. (2011). Open Plot Project: an open-source toolkit for 3-D structural data analysis. *Solid Earth*, 2011, vol. 2, p. 53-63.
- TAVANI, S., GRANADO, P., CORRADETTI, A., GIRUNDO, M., IANNACE, A., ARBUÉS, P., ... & MAZZOLI, S. (2014). Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via

- OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers & Geosciences*, 63, 44-53.
- THIELE, S. T., GROSE, L., SAMSU, A., MICKLETHWAITE, S., VOLGGGER, S. A., & CRUDEN, A. R. (2017). Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data. *Solid Earth*, 8(6), 1241.
- THURMOND, J. B., DRZEWIECKI, P. A., & XU, X. (2005). Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML). *Computers & Geosciences*, 31(7), 913-919.
- TOPCON. (2012). HiPer SR Operator's Manual. Topcon Positioning Systems, Inc.
- TOPCON. (2012). GSX2 SR Operator's Manual. Topcon Positioning Systems, Inc.
- VASUKI, Y., HOLDEN, E. J., KOVESI, P., & MICKLETHWAITE, S. (2013). A geological structure mapping tool using photogrammetric data. *ASEG Extended Abstracts*, 2013(1), 1-4.
- VASUKI, Y., HOLDEN, E. J., KOVESI, P., & MICKLETHWAITE, S. (2014). Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22-32.
- VASUKI, Y., HOLDEN, E. J., KOVESI, P., & MICKLETHWAITE, S. (2017). An interactive image segmentation method for lithological boundary detection: A rapid mapping tool for geologists. *Computers & Geosciences*, 100, 27-40.
- VAZ, P. T., REZENDE, N. G. A. M., WANDERLEY FILHO, J. R., & TRAVASSOS, W. S. (2007). Bacia do parnaíba. *Boletim de Geociencias da PETROBRAS*, 15(2), 253-263.
- VIANA, C. D., ENDLEIN, A., DA CRUZ CAMPANHA, G. A., & GROHMANN, C. H. (2016). Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models. *Computers & geosciences*, 90, 112-122.
- VIANA, C. D., GROHMANN, C. H., BUSARELLO, M. D. S. T., & GARCIA, G. P. B. (2018). Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion-Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 48(4), 839-852.
- VIANA, C. F., GAMA JR, E. G., SIMÕES, I. D. A., MOURA, J. A., FONSECA, J. D. R., & ALVES, R. J. (1971). Revisão estratigráfica da bacia Recôncavo/Tucano. *Boletim técnico da Petrobrás*, 14(3-4), 157-192.

WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., & REYNOLDS, J. M. (2012). 'Structure-from-Motionphotogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.