



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de
interpretação geológica – Um estudo de caso na Bacia de Volta
Redonda (RJ)**

**Trabalho de Conclusão de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2019



UFRJ

Raphael Camêlo Santana

Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de interpretação geológica – Um estudo de caso na Bacia de Volta Redonda (RJ)

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello
(Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

MSc. Camila Faria de Albuquerque
(PETROBRAS/CENPES)

UFRJ

Rio de Janeiro

2019

Santana, Raphael Camêlo

Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de interpretação geológica – Um estudo de caso na Bacia de Volta Redonda (RJ) / Raphael Camêlo Santana. -- Rio de Janeiro, 2019.

57 p.

Orientador: Claudio Limeira Mello.

Coorientadora: Camila Faria de Albuquerque.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Bacharel em Geologia, 2019.

1. Bacia de Volta Redonda. 2. Modelagem Geológica. 3. Modelo Virtual de Afloramento. I. Limeira Mello, Claudio, orient. II. Faria de Albuquerque, Camila, coorient. III. Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de interpretação geológica – Um estudo de caso na Bacia de Volta Redonda (RJ)

Raphael Camêlo Santana

Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de interpretação geológica – Um estudo de caso na Bacia de Volta Redonda (RJ)

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello
(Depto. Geologia/IGEO/UFRJ)

M.Sc. Camila Faria de Albuquerque
(PETROBRAS/CENPES)

Aprovada em: 16/12/2019

Por:

Orientador: Claudio Limeira Mello (Depto. Geologia/IGEO/UFRJ)

Orientadora: Camila Faria de Albuquerque (PETROBRAS/CENPES)

José Carlos Sícoli Seoane (Depto. Geologia/IGEO/UFRJ)

Aline Theophilo Silva (PETROBRAS/CENPES)

UFRJ
Rio de Janeiro
2019

Dedico a todos aqueles que tornam a
Universidade Pública um direito de todos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha coorientadora Camila Faria de Albuquerque, por suas longas horas de obstinada dedicação em me ajudar e pelos ensinamentos que me foram essenciais para o processo de construção desta monografia. Agradeço também ao meu orientador Claudio Limeira Mello, por sua incomparável dedicação e atenção, sua paciência, além de ser um exemplo muitíssimo positivo, servindo de inspiração como professor, pesquisador e cientista.

Agradeço à equipe de geólogos do “Grupo de Pesquisa do Cenozoico” no departamento de Geologia da UFRJ por todo empenho para com o projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, que forneceu o material necessário e a infraestrutura para a realização deste trabalho. Sou grato à ANP e à PETROBRAS e pelo financiamento da pesquisa necessária à construção deste trabalho, além de ceder o uso dos softwares aqui utilizados. Agradeço à família dos senhores José Luiz Paiva Leijoto e Robson de Paiva Leijoto, por autorizar o acesso ao terreno particular onde o trabalho foi desenvolvido. Agradeço também à dedicação daqueles professores do departamento de Geologia da UFRJ que se preocupam em compartilhar o seu conhecimento geológico a cada nova geração.

Agradeço à minha mãe e à minha irmã, por me apoiarem ao longo de todo o processo de aprendizado acadêmico que culminou em sua consolidação através desta monografia. Agradeço também aos meus amigos e amigas da Universidade e da vida, que tornaram o aprendizado e a própria universidade uma experiência muito rica, além de ficarem ao meu lado em todos os momentos necessários. Sou também especialmente grato a uma pessoa que me apoiou desde o início, estando ao meu lado sempre disposta a ajudar e a me motivar a seguir em frente, transpassando essa etapa que é a graduação em direção a desafios maiores.

Sou grato a todos aqueles que de alguma forma cruzaram o meu caminho ao longo da vida e que foram uma peça-chave para a conquista do meu diploma de Geólogo na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RESUMO

Santana, Raphael Camêlo. **Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de interpretação geológica – Um estudo de caso na Bacia de Volta Redonda (RJ)**. 2019, 57p. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A expansão e a difusão das tecnologias de análise digital de superfície ampliaram as possibilidades de investigação de dados de campo, otimizando a descrição de afloramentos e as atividades de mapeamento. Sem substituir a realização de trabalhos de campo, tais técnicas surgem como opção para contornar eventuais limitações relacionadas, por exemplo, a questões climáticas, distância, recursos financeiros, disponibilidade de tempo, de pessoal e de transporte. Nesse contexto, são aqui apresentados os resultados obtidos com a utilização de um Modelo Virtual de Afloramento (MVA) para a interpretação estratigráfica e estrutural de um afloramento de depósitos paleogênicos na borda sul do Gráben de Casa de Pedra (Bacia de Volta Redonda, RJ). O estudo está inserido em um projeto de pesquisa, um convênio UFRJ/Petrobras/ANP, que trata tais depósitos como análogos a reservatórios areníticos presentes nas bacias marginais do Sudeste do Brasil. O desenvolvimento do trabalho envolveu as seguintes etapas: (i) interpretação estratigráfica e estrutural de um ortofotomosaico obtido com uso de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System* – “Drone”); (ii) interpretação estratigráfica e estrutural tridimensional do MVA; (iii) construção de um modelo geológico tridimensional do afloramento investigado. Durante essas etapas, foram realizadas atividades de campo para o controle das interpretações litológicas e estruturais efetuadas. As interpretações 2D e 3D tiveram como base de comparação uma seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa (na escala 1:50), e outra seção confeccionada em trabalho anterior (na escala 1:100). Os resultados demonstram que a interpretação 2D foi facilitada pela resolução espacial do ortofotomosaico, exibindo, porém, limitações claras quanto à delimitação dos corpos rochosos em virtude da projeção 2D da superfície do afloramento, que é irregular, com variada angulação. O plano estático de observação do afloramento no ortofotomosaico também dificultou a definição da continuidade de falhas ao longo de todo o afloramento. Por outro lado, na interpretação 3D, a delimitação dos corpos rochosos e a interpretação das estruturas tectônicas se mostraram mais claras, apenas com limitação relacionada à perda de resolução em comparação com o ortofotomosaico. Algumas falhas secundárias presentes nas seções de referência, e observadas em campo, principalmente no bloco central do afloramento não puderam ser fotointerpretadas em 2D ou 3D, pois se encontravam envoltas por grande quantidade de cicatrizes no terreno, deixando ambíguas suas possíveis fotointerpretações. O modelo geológico tridimensional criado representa uma aferição simplificada, porém satisfatória, da realidade do afloramento estudado, diante de sua complexidade, sendo necessária a inserção de informações de subsuperfície para o seu maior refinamento.

Palavras-chave: Bacia de Volta Redonda; Modelagem Geológica; Modelo Virtual de Afloramento

ABSTRACT

Santana, Raphael Camêlo. **Application of Digital Outcrop Model as a tool to the geological interpretation – An example in Volta Redonda Basin.** 2019. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The propagation of new digital surface analysis technologies enhanced the investigation and description of outcrops and therefore optimized its interpretation and geological mapping as a whole. The digital techniques emerge as an alternative to eventual limitation to field activities and they are not necessarily applied as substitutes. In this context, this work exposes the results of using a Digital Outcrop Model (DOM) in the stratigraphic and structural geological interpretation of paleogenic deposits of the “Casa de Pedra Graben”, in the Volta Redonda Basin. The study is included in the research project “Characterization of Deformation, Geomechanics and Permeability of Poorly Lithified Sandstones” (UFRJ/Petrobras/ANP cooperation), which considers those deposits as analogues to arenitic reservoirs from Brazilian marginal sedimentary basins. The basic steps of the work development are (i) 2D stratigraphic and structural interpretation of the real outcrop orthophotomosaic, taken by UAV (unmanned aerial vehicle); (ii) 3D stratigraphic and structural interpretation of the DOM; (iii) construction of a tridimensional geological model of the studied outcrop. Both 2D and 3D interpretation were correlated to two geological sections, one developed by previous work (scale 1:100) and another by the research project (scale 1:50). Some fieldworks were conducted along those steps to check the interpretation and correlation made. The results showed that the orthophotomosaic’s excellent spatial resolution benefitted the geological interpretation in 2D, although the single observation plane along with the flat representation of an angular and wrinkled surface, which worked as a barrier to some refined interpretation. The same limitation is applied to the 2D structural interpretation. On the other hand, the definition of the lithological bodies and geological faults were more precise in the 3D interpretation, mainly because of the great topography emulation of the DOM and the contrast between surfaces observed, even though the spatial resolution was decreased by the software optimization. Nevertheless, some secondary geological faults were not able to be observed neither in the 2D nor in the 3D interpretation, mainly in the central sector of the outcrop. They were surrounded by many scars on the terrain, thus their interpretation were not conclusive enough. The geological 3D model built from the outcrop digital interpretation was considered as a greatly simplified representation of the geological framework of the studied outcrop, considering its complexity. Therefore, it is required some additional subsurface information to refine the 3D geological tridimensional.

Keywords: Volta Redonda Basin; Geologic Modeling; Digital Outcrop Model

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Representação das escalas de observação geoespacial, geológica e geofísica, sendo destacada em vermelho a escala referida ao presente trabalho (de 10^{-1} m a 10^0 m). Fonte: modificado de McCaffrey *et al.* (2005)..... 1
- Figura 2** - Localização do afloramento estudado no município de Volta Redonda (RJ). Fonte: editado sobre imagem extraída do Google Earth.4
- Figura 3** - Contexto geológico regional do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Legenda: 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral, na Bacia do Paraná; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozoico-cenozoico; 5) bacias cenozoicas do RCSB (1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Formação Pariquera-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozoico e Cenozoico. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).....5
- Figura 4** - Mapa geológico da região onde está localizada a Bacia de Volta Redonda (elaborado por Negrão, 2014 in Maciel *et al.*, 2017). As unidades do embasamento foram compiladas por Negrão (2014), a partir de Heilbron *et al.* (2004)..... 7
- Figura 5** - Esboços paleotectônicos da evolução do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, segundo Riccomini (1989). 8
- Figura 6** - Mapa geológico da região da Bacia de Volta Redonda, exibindo as principais feições estruturais regionais, assim como os diferentes grábens e áreas de ocorrência menos contínuas de sedimentos (adaptado de Negrão *et al.*, 2015).9
- Figura 7** - Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas da Bacia de Volta Redonda (Negrão *et al.*, 2015 modificado por Maciel *et al.*, 2017). 10
- Figura 8** - (A) Visão geral do afloramento, expondo os dois taludes separados pela berma. (B) Seção geológico-estrutural elaborada por Maciel *et al.* (2017 - escala original 1:100), destacando os contatos litológicos e as estruturas tectônicas reconhecidos por esses autores. 13
- Figura 9** - Seção geológico-estrutural (em escala original 1:50) do talude inferior do afloramento estudado. Fonte: Projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados” (convênio UFRJ/Petrobras/ANP). 15
- Figura 10** - Ortofotomosaico em voo de 100 m de altura expondo o afloramento em sua totalidade (Lima, 2017)..... 16

- Figura 11** - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Exemplo de um foto-horizonte interpretado neste trabalho..... 18
- Figura 12** - Seção geológica do talude inferior do afloramento investigado (escala original 1:50; Fonte: projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, convênio UFRJ/Petrobras/ANP) expondo o foto-horizonte identificado na Figura 11. 19
- Figura 13** - Ortofotomosaico com a interpretação das falhas F1 e F2..... 19
- Figura 14** - (A) Interface do SKUA-GOCAD exibindo a visão frontal do MVA. (B) Interface do SKUA-GOCAD exibindo a visão lateral do MVA a partir do Sul..... 20
- Figura 15** - (A) MVA não fotointerpretado. (B) MVA com fotointerpretação parcial: em rosa, está indicada a falha F1; em azul, a falha F2; e, em laranja, um foto-horizonte associado a contato litológico (base do pelito). 21
- Figura 16** - Imagem mostrando o volume definido para limitar o modelo geológico, com seus eixos I (em vermelho), J (em verde) e K (em azul)..... 22
- Figura 17** - Imagem mostrando um exemplo com as medidas utilizadas e as suas respectivas localizações no traçado interpretado para a falha F1 na seção geológica (de escala original 1:50) utilizada como uma das referências para a construção do modelo tridimensional. 23
- Figura 18** - MVA expondo o traçado da falha F1 no afloramento, com o plano horizontal e os *sticks* que representam as atitudes *dip-dip* utilizadas para definir a falha F1 no modelo..... 24
- Figura 19** - MVA exibindo as projeções dos *strikes* das falhas F1 e F2 ao longo de um plano horizontal. 24
- Figura 20** - MVA exibindo a projeção dos *strikes* das falhas F1 e de F2 em um plano horizontal em cota superior ao da Figura 19..... 25
- Figura 21** - Projeção das falhas F1 e F2 dentro do volume do modelo..... 25
- Figura 22** - (A) Projeção dos planos das falhas F1 e F2 gerados pelo *software* (a partir dos dados inseridos) se interceptando em subsuperfície. (B) Planos das falhas F1 e F2 gerados pelo *software* observados no afloramento. 26
- Figura 23** - Exemplo de coluna estratigráfica para construção de um modelo no SKUA-GOCAD, com destaque para as opções de relação entre os horizontes (destacado em vermelho)..... 27
- Figura 24** - (A) Exemplo de um foto-horizonte interpretado no MVA. (B) Linhas de projeção do foto-horizonte nos planos das falhas F1 e F2..... 28
- Figura 25** - Exemplo de linhas de projeção de um foto-horizonte interpretado nos planos das falhas F1 e F2, e nuvem de pontos unindo as referidas linhas. 29

- Figura 26** - Plano de projeção do foto-horizonte gerado pelo *software* a partir das informações previamente inseridas.29
- Figura 27** - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Ortofotomosaico com a interpretação de falhas (em vermelho) e horizontes estratigráficos (demais cores, de acordo com a legenda)..... 32
- Figura 28** - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Identificação das falhas (em vermelho) fotointerpretadas 33
- Figura 29** - (A) Correlação realizada entre as estruturas identificadas no ortofotomosaico e as registradas na seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa para o talude inferior do afloramento (na escala original 1:50). (B) Correlação realizada entre as estruturas identificadas no ortofotomosaico e as registradas na seção geológica elaborada para o afloramento por Maciel et al. (2017), na escala original 1:100. As linhas tracejadas correspondem a estruturas tectônicas interpretadas no ortofotomosaico sem correlação com a seção.34
- Figura 30** - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Identificação dos horizontes estratigráficos interpretados no ortofotomosaico, com a indicação das falhas F1 e F2 como referência.....35
- Figura 31** - (A) Correlação realizada entre estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos identificados no ortofotomosaico e os registrados na seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa para o talude inferior do afloramento (na escala original 1:50). (B) Correlação realizada entre estruturas tectônica e horizontes estratigráficos identificados no ortofotomosaico e os registrados na seção geológica elaborada para o afloramento por Maciel *et al.* (2017), na escala original 1:100. As linhas tracejadas correspondem a estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretadas no ortofotomosaico sem correlação com a seção.37
- Figura 32** - (A) MVA utilizado, sem interpretações. (B) MVA com a interpretação de falhas (em vermelho) e horizontes estratigráficos (demais cores, de acordo com a legenda).38
- Figura 33** - Observam-se novas falhas na comparação entre (A) falhas interpretadas no ortofotomosaico e (B) falhas interpretadas no MVA..... 39
- Figura 34** - Comparação entre (A) falhas e horizontes estratigráficos interpretados no ortofotomosaico e (B) falhas e horizontes estratigráficos interpretados no MVA.. 40
- Figura 35** - (A) Correlação realizada entre estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretados no MVA e os registrados na seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa para o talude inferior do afloramento (na escala original 1:50). (B) Correlação realizada entre estruturas tectônica e horizontes estratigráficos interpretados no MVA e os registrados na seção geológica elaborada para o afloramento por Maciel *et al.* (2017), na escala original 1:100. As linhas tracejadas correspondem a estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretadas No=O ortofotomosaico sem correlação com a seção.42

- Figura 36** - Projeção 3D dos horizontes estratigráficos 1 a 9, destacando a simplificação do plano de projeção do horizonte 9 em relação ao traçado reconhecido na interpretação do MVA.44
- Figura 37** - Arranjo tridimensional das falhas (enumeradas seguindo a correlação com as seções em escala 1:50 e 1:100). Vista a partir de N sobre o MVA (A) e sem o MVA como plano de fundo (B).45
- Figura 38** - Arranjo tridimensional das falhas (enumeradas seguindo a correlação com as seções em escala 1:50 e 1:100). Vista a partir de SE, sobre o MVA (A) e sem o MVA como plano de fundo (B).46
- Figura 39** - Vista do afloramento a partir de Leste com todas as falhas falhas (enumeradas seguindo a correlação com as seções em escala 1:50 e 1:100) e horizontes estratigráficos projetados, sobre o MVA (A) e sem o MVA como plano de fundo (B), enfatizando a continuidade lateral dos horizontes ao longo do três blocos do afloramento.47
- Figura 40** - (A) Visada de Leste para Oeste do modelo geológico final, com destaque para a conformação estrutural de geral do afloramento, exibindo as falhas interpretadas nos blocos sul e central. (B) Visada de Sul para Norte do modelo geológico final, destacando o bloco central em uma simulação da vista por trás do afloramento.48
- Figura 41** - (A) Visada de Oeste para Leste do modelo geológico final, com destaque para os rejeitos das falhas F1, F2 e 11, além de outras falhas menores. (B) Visada de Nordeste para Sudoeste do modelo geológico final, com destaque para o bloco norte do afloramento, para as falhas F2 e 11, e para a conformação de gráben do bloco central.49
- Figura 42** - Seções do modelo geológico ao longo do eixo J sobre o MVA, destacando o arranjo estratigráfico e estrutural através do volume modelado, partindo-se da visão frontal do afloramento (em A, seção J98) e avançando no sentido Leste, representando um deslocamento para o interior do afloramento (B, seção J68; e C, seção J34).....50
- Figura 43** - Correlação entre a seção J34 do modelo geológico (em A, de orientação N-S e equivalente a uma visão frontal do afloramento) e as seções geológicas nas escalas 1:50 (em B) e 1:100 (em C).....51

Lista de Tabelas

- Tabela 1** - Relações estratigráficas associadas aos horizontes reconhecidos na ortofotomosaico.....36
- Tabela 2** - Relações estratigráficas associadas aos horizontes reconhecidos no MVA, destacando os horizontes que não haviam sido interpretados na ortofotomosaico.....41
- Tabela 3** - Intervalos litológicos representados no modelo geológico e sua correlação com os horizontes estratigráficos que limitam as bases desses intervalos (conforme identificados nas seções geológicas em escala 1:50 e 1:100).52

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. ÁREA DE ESTUDO	4
3.1. Localização.....	4
3.2. Contexto geológico regional	5
3.3. Estratigrafia e evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda	8
3.4. Afloramento estudado.....	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1. Interpretação estratigráfica e estrutural do ortofotomosaico (2D).....	16
4.2. Interpretação estratigráfica e estrutural do MVA (3D).....	20
4.3. Construção do modelo geológico	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1. Interpretação do ortofotomosaico	31
5.2. Interpretação do Modelo Virtual de Afloramento.....	38
5.3. Modelo Geológico Tridimensional	43
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO	

1. INTRODUÇÃO

A análise de afloramentos análogos é uma técnica bastante consolidada como fonte de dados auxiliares para a caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos ou de aquíferos, uma vez que pode ser aplicada para situações em que há escassez de informações, em consequência, por exemplo, da escala de observação dos métodos diretos ou indiretos utilizados (McCaffrey *et al.*, 2005; Howell *et al.*, 2014). Em geral, na escala de reservatórios, os métodos sísmicos ou de correlação de poços têm resolução insuficiente ou são muito esparsos para a compreensão, por exemplo, do fraturamento e das variações geométricas e composicionais de um corpo rochoso (Figura 1).

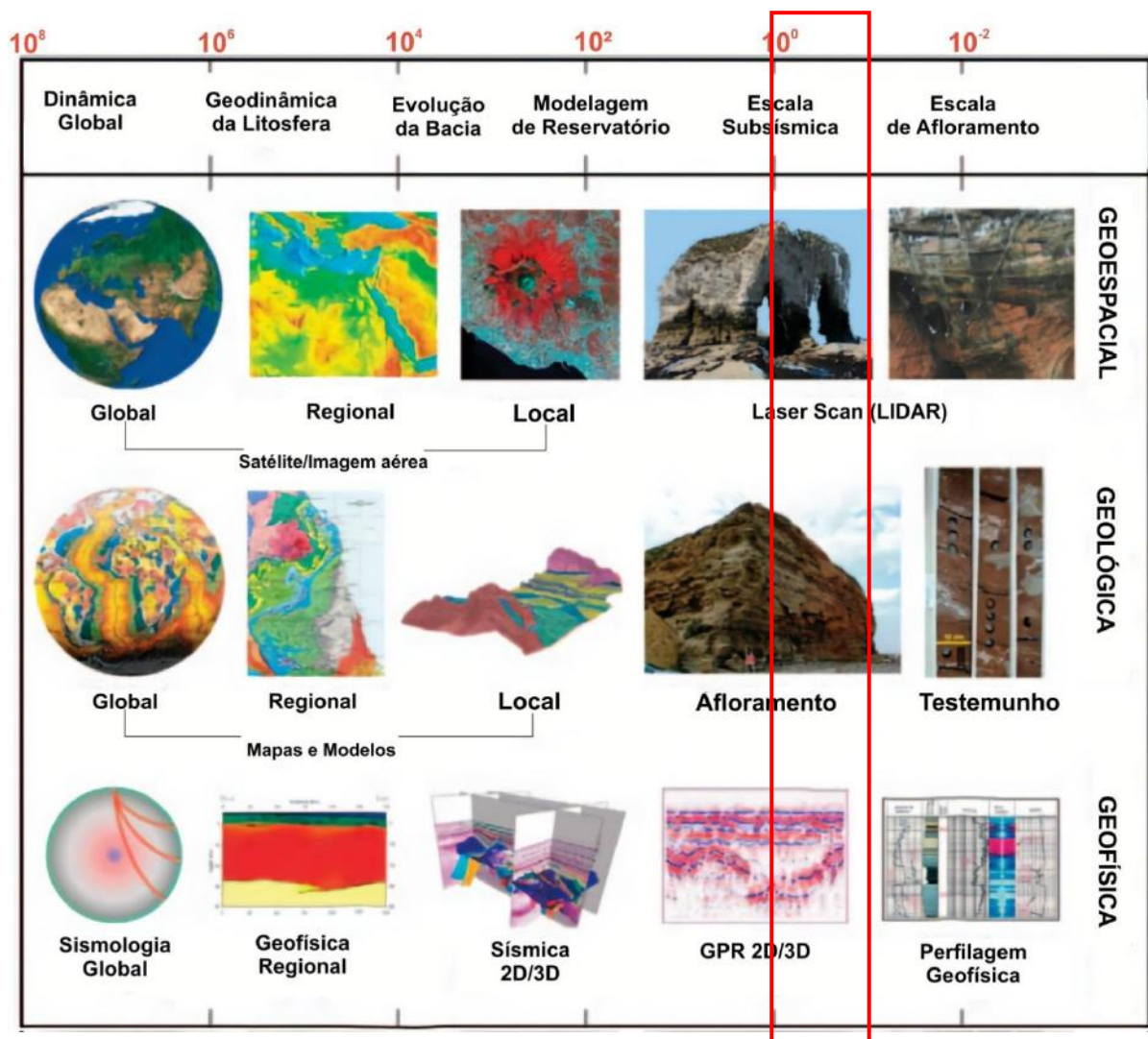


Figura 1 - Representação das escalas de observação geoespacial, geológica e geofísica, sendo destacada em vermelho a escala referida ao presente trabalho (de 10^{-1} m a 10^0 m). Fonte: modificado de McCaffrey *et al.* (2005).

Para que um afloramento seja utilizado como análogo de um reservatório é importante que ele seja acessível, possua excelente exposição (preferencialmente 3D), tenha dimensões suficientemente extensas e seja comparável geologicamente com o objeto de estudo (Pringle *et al.*, 2006; Bertotti *et al.*, 2007). Os análogos podem ser estudados de forma tradicional (como através da ida ao campo) ou, de forma alternativa e/ou complementar, pelo uso de modelos computacionais, como, por exemplo, o “Modelo Virtual de Afloramento (MVA)” ou “Modelo Digital de Afloramento (MDA)”. Ele representa tridimensionalmente a superfície de um afloramento com uma excelente resolução espacial e com precisão de escala e topografia. Esse modelo pode ser utilizado como uma ferramenta auxiliar dentro do mapeamento geológico e, para sua construção, podem ser utilizadas tecnologias de sensor ativo, como, por exemplo, a *Light Detection and Ranging* (LIDAR), ou então técnicas de fotogrametria terrestre ou aérea, com o uso de *Structure From Motion* (SfM), geralmente de sensor passivo. Nessa técnica, duas imagens ou mais de um mesmo objeto são tiradas de posições diferentes e as suas sobreposições geram um efeito de visualização tridimensional. Esse último método tem se consolidado bastante devido aos baixos custos e à agilidade.

O presente trabalho apresenta a utilização de um MVA como objeto para a reunião, em meio digital, das informações geológicas de um afloramento composto por depósitos paleogênicos bastante fraturados e pouco consolidados na Bacia de Volta Redonda (RJ), sendo gerado como produto final um modelo geológico tridimensional do referido afloramento a partir do cruzamento de informações obtidas em campo com aquelas fotointerpretadas digitalmente.

O estudo faz parte de um projeto de pesquisa, intitulado “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados” (convênio UFRJ/Petrobras/ANP), que trata os depósitos investigados como análogos a reservatórios areníticos presentes nas bacias marginais do Sudeste do Brasil, integrando análises estratigráficas, estruturais, geofísicas, petrofísicas e geomecânicas, com a incorporação de técnicas de modelagem computacional e de simulações de fluxo.

2. OBJETIVO

O presente estudo possui como objetivo a criação de um modelo geológico tridimensional de um afloramento de depósitos paleogênicos na Bacia de Volta Redonda (RJ), visando auxiliar no entendimento geológico do mesmo, tendo em vista sua complexidade estrutural.

Buscou-se utilizar a interface entre o uso de dados obtidos em campo e a execução de técnicas digitais de interpretação geológica a partir de um Modelo Virtual de Afloramento (MVA), tomando o afloramento estudado como análogo a reservatórios de arenitos pouco consolidados e fraturados, de modo a explorar o potencial do emprego desse tipo de ferramenta computacional, de forma similar à rotina utilizada no desenvolvimento de campos de petróleo.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

O afloramento estudado está localizado em um terreno particular às margens da Rodovia do Contorno, em frente ao Condomínio Alphaville, no município de Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro (Figura 2). O acesso à região, a partir da cidade do Rio de Janeiro, é realizado pela rodovia Presidente Dutra (BR-116) a uma distância de 125 km.

Geologicamente, a área situa-se nas proximidades da borda sul do depocentro principal da Bacia de Volta Redonda, conhecido como Gráben de Casa de Pedra (ver descrição do contexto geológico regional no item 3.2).

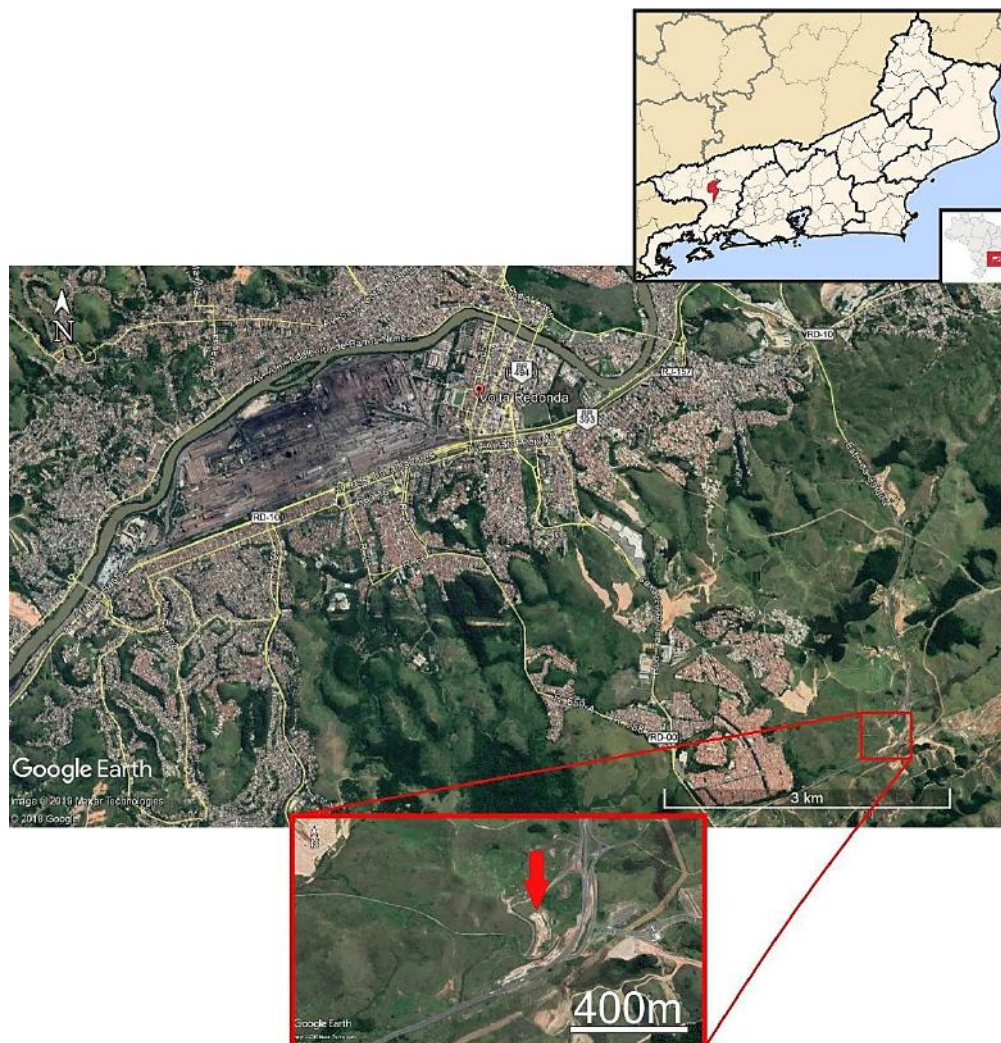


Figura 2 - Localização do afloramento estudado no município de Volta Redonda (RJ). Fonte: editado sobre imagem extraída do Google Earth.

3.2. Contexto geológico regional

A Bacia de Volta Redonda, em conjunto com as bacias de Resende, São Paulo e Taubaté, está localizada no Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB – Riccomini, 1989; Riccomini *et al.*, 2004).

O RCSB (Figura 3), de idade paleogênica, se estende por aproximadamente 900 km em direção paralela à linha de costa atual, desde a cidade de Tijucas do Sul (Paraná), até a porção *offshore* defronte à cidade de Macaé (Rio de Janeiro), sendo subdividido em três segmentos (Riccomini *et al.*, 2004): o **Segmento Ocidental** que engloba a Bacia de Curitiba, as formações Alexandra e Pariquera-Açu, e os grábens de Guaraqueçaba, Cananéia e Sete Barras; o **Segmento Central**, composto pelas bacias de Volta Redonda, São Paulo, Taubaté, Resende, assim como os depósitos das regiões de Bonfim (localizada a sudeste da Bacia de Taubaté) e Cafundó (entre as bacias de Resende e Volta Redonda); e o **Segmento Oriental**, que compreende as bacias do Macacu, Itaboraí e o Gráben de Barra de São João.

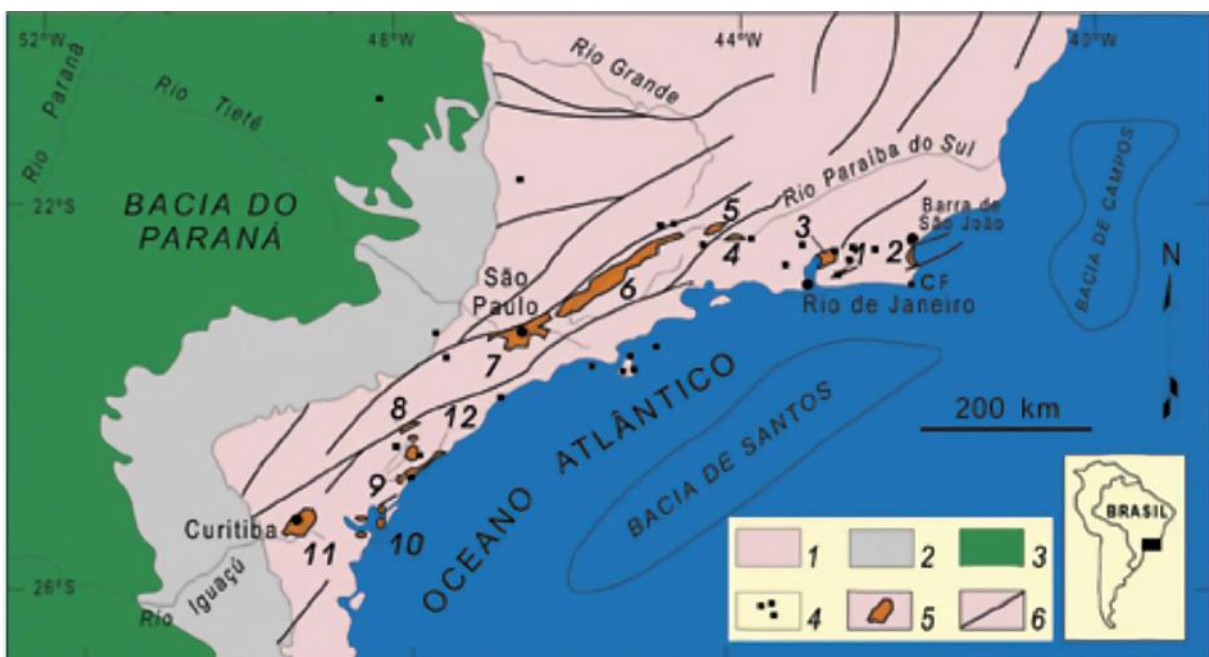


Figura 3 - Contexto geológico regional do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Legenda: 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticas eocretáceas da Formação Serra Geral, na Bacia do Paraná; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozoico-cenozoico; 5) bacias cenozoicas do RCSB (1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Formação Pariquera-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozoico e Cenozoico. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

As bacias do RCSB possuem como embasamento rochas de idade arqueana a neoproterozoica, no domínio da Faixa Ribeira, formadas durante o último ciclo da Orogenia Brasileira, no processo de conclusão da amalgamação da parte ocidental do paleocontinente Gondwana, entre 790 Ma e 520 Ma (Delgado *et al.*, 2003). A geometria e a estruturação NE-SW das bacias do RCSB são heranças diretas da trama litoestrutural gerada na evolução da Faixa Ribeira.

O embasamento da Bacia de Volta Redonda (Figura 4) está inserido nesse contexto geológico regional, sendo formado por complexos ortoderivados paleoproterozoicos, complexos paragnáissicos neoproterozoicos e suítes intrusivas neoproterozoicas/eopaleozoicas, nos domínios dos terrenos Ocidental, Embu e *Klippe* Paraíba do Sul (Heilbron *et al.*, 2004). A origem do RCSB, segundo Riccomini (1989), estaria relacionada à reativação de zonas de cisalhamento pré-cambrianas em um estágio avançado de subsidência térmica da Bacia de Santos. A princípio, Riccomini (1989) identificou quatro eventos tectônicos, um de caráter formador de bacias e outros três deformadores (Figura 5), sendo incluído posteriormente um quinto evento, também de caráter deformador (Salvador & Riccomini, 1995; Riccomini *et al.*, 2004). O primeiro evento tectônico foi denominado de Fase E1, associado a uma **distensão NNW-SSE**, que representa o momento de abertura do próprio RCSB, no Eoceno-Oligoceno, em que estruturas existentes no embasamento, de orientação NE-SW, sofreram reativação como falhas normais. Os três eventos deformadores identificados por Riccomini (1989), que sucedem a etapa distensiva, correspondem primeiramente a uma **fase transcorrente sinistral E-W (TS-EW)**, do Neógeno, com esforços compressivos NE-SW e distensivos NW-SE; uma **fase transcorrente dextral E-W (TD-EW)**, do Neógeno-Quaternário, relacionada a esforços compressivos NW-SE e distensivos NE-SW; e, por último, uma **nova etapa distensiva (E2)**, do Holoceno, relacionada a esforços distensivos de direção E-W a WNW-ESE. Salvador & Riccomini e Riccomini *et al.* (2004) acrescentaram ainda um último evento correspondente à **fase compressiva atual (C)**, relacionada a esforços compressivos E-W a WNW-ESE.

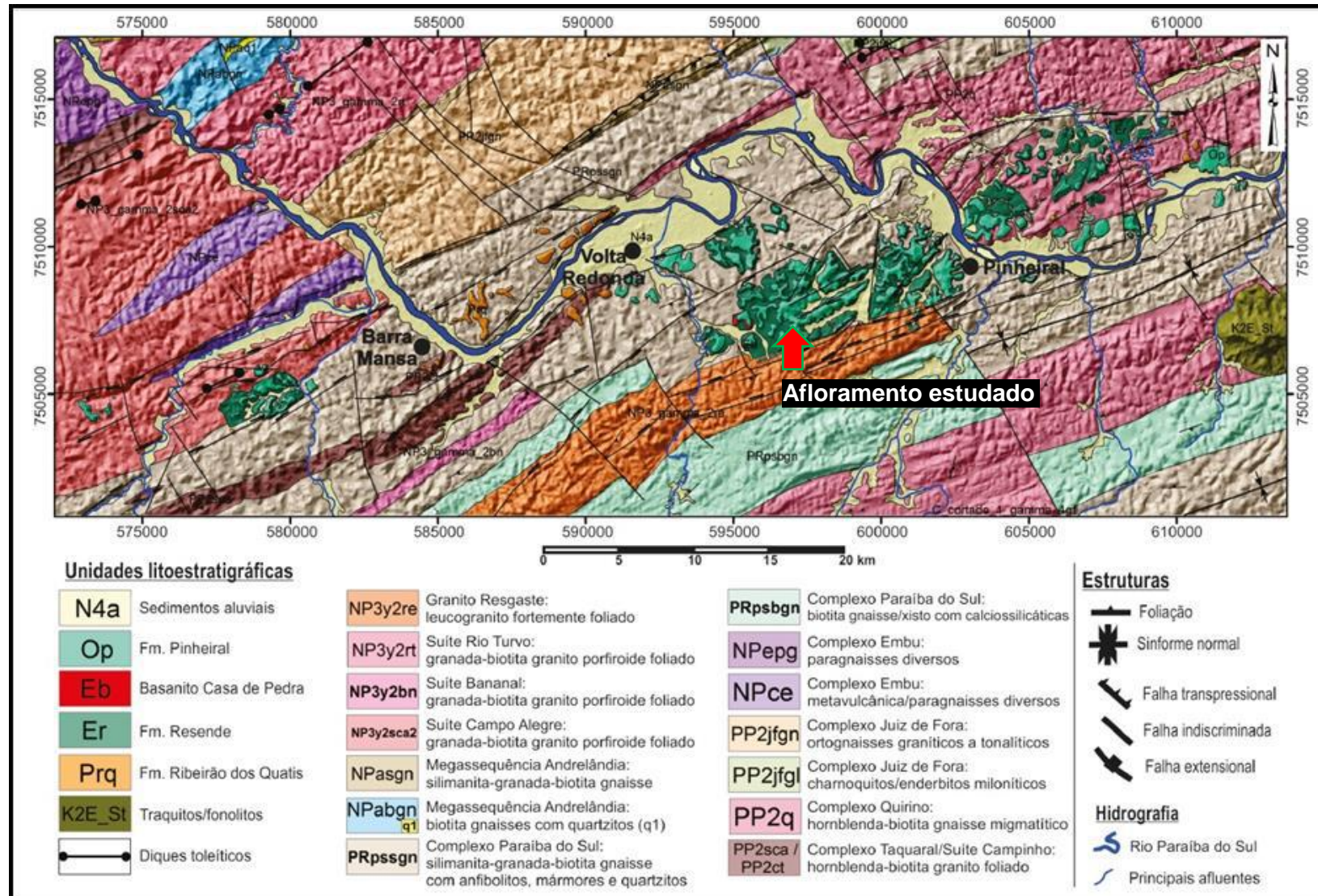


Figura 4 - Mapa geológico da região onde está localizada a Bacia de Volta Redonda (elaborado por Negrão, 2014 in Maciel et al., 2017). As unidades do embasamento foram compiladas por Negrão (2014), a partir de Heilbron et al. (2004).

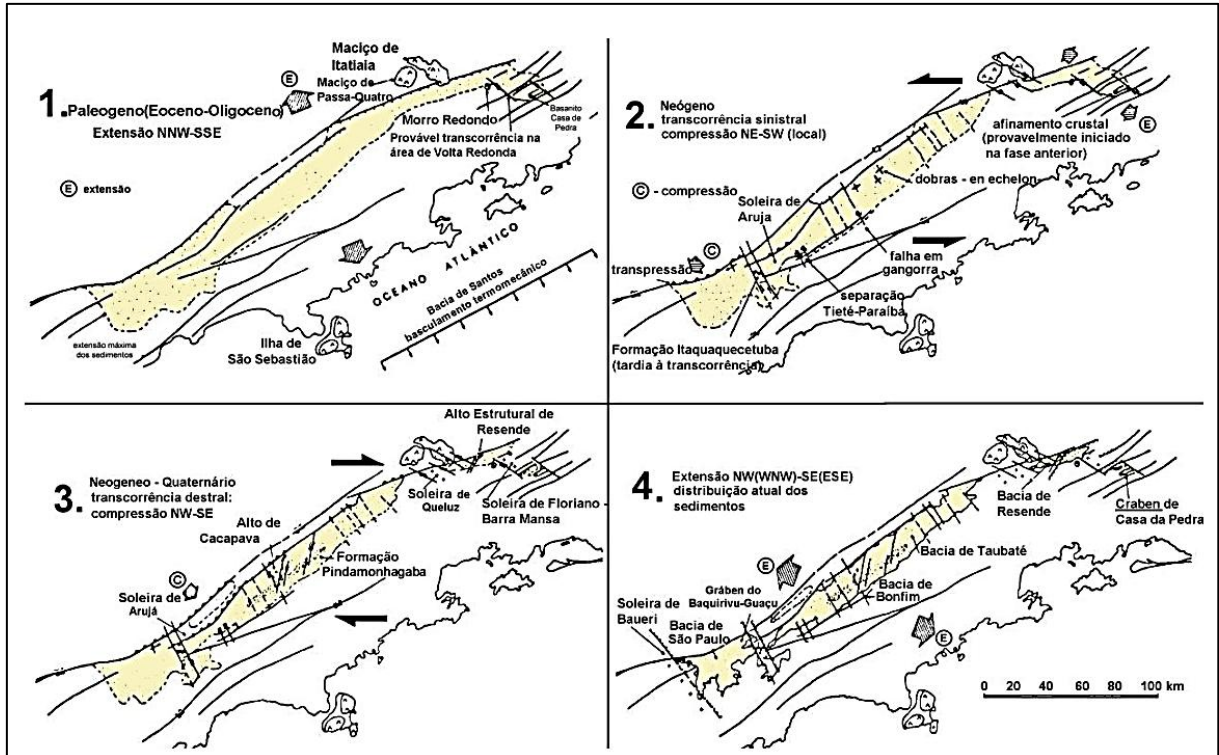


Figura 5 - Esboços paleotectônicos da evolução do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, segundo Riccomini (1989).

Para Riccomini *et al.* (2004), as variações nos campos de esforços responsáveis pelos eventos tectônicos descritos no RCSB foram decorrentes de variações no equilíbrio entre o *ridge-push* e o *slab-pull* na Placa Sul-Americana durante sua movimentação em relação às placas de Nazca e Africana. Dessa forma, a variação das direções de reativação das estruturas e o estilo tectônico variaram conforme a predominância de cada uma das fontes de esforços sobre as descontinuidades que foram herdadas do embasamento, predominando os *trends* orientados NE-SW a E-W.

3.3. Estratigrafia e evolução tectônica da Baía de Volta Redonda

O registro sedimentar da Baía de Volta Redonda está associado a grábens e a ocorrências menos contínuas de sedimentos sobre o embasamento, particularmente nas áreas das cidades de Volta Redonda e Barra Mansa, nas margens do rio Paraíba do Sul (Negrão, 2014; Negrão *et al.*, 2015 - Figura 6).

A região conhecida como Gráben de Casa de Pedra é a maior e mais expressiva ocorrência de registros paleógenos da Baía de Volta Redonda. Esse

gráben consiste em uma depressão de orientação ENE-WSW, controlada por falhas normais que foram reativadas a partir de zonas de cisalhamento pré-cambrianas. Nesse gráben, os sedimentos cenozoicos estão bem preservados e podem ultrapassar os 100 m de espessura, estando presentes também derrames de rochas ultrabásicas alcalinas (ankaramitos) entre outros sedimentos paleogênicos (Riccomini *et al.*, 1983).

Além desse gráben, foram definidos por Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) outros quatro novos grábens (Figura 6), dois paleogênicos (Gráben de Dorândia, localizado a leste do Gráben de Casa de Pedra; e Gráben de Colônia Santo Antônio, a oeste) e dois de idade quaternária (Gráben da Usina, situado na porção central da bacia e região mais urbanizada da cidade de Volta Redonda; e Gráben do Rio do Bananal, situado na porção oeste da bacia e ao norte do Gráben de Colônia Santo Antônio).

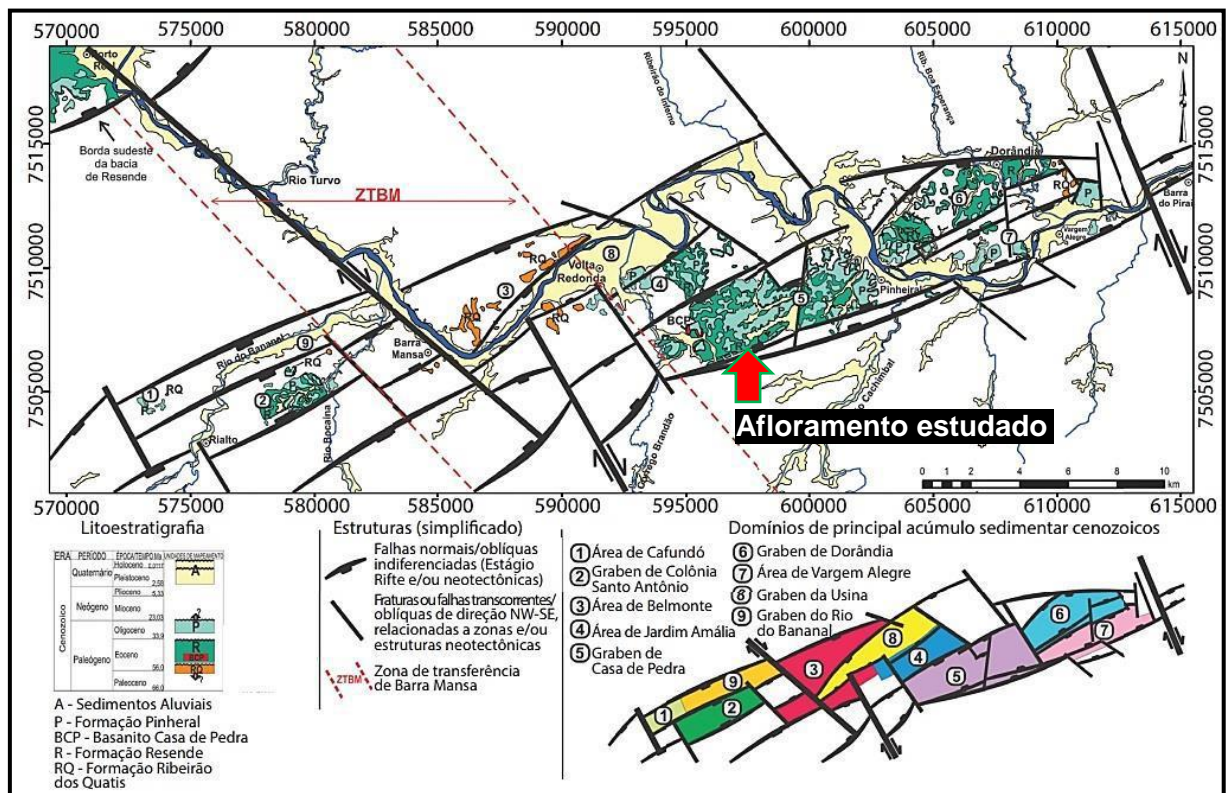


Figura 6 - Mapa geológico da região da Bacia de Volta Redonda, exibindo as principais feições estruturais regionais, assim como os diferentes grábens e áreas de ocorrência menos contínuas de sedimentos (adaptado de Negrão *et al.*, 2015).

O preenchimento sedimentar da Bacia de Volta Redonda é interpretado como de origem essencialmente fluvial, segundo Sanson (2006), Sanson *et al.* (2006), Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015).

No presente trabalho, foi adotada a coluna estratigráfica apresentada por Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) – Figura 7, sendo uma revisão da coluna proposta por Sanson (2006) e Sanson *et al.* (2006).

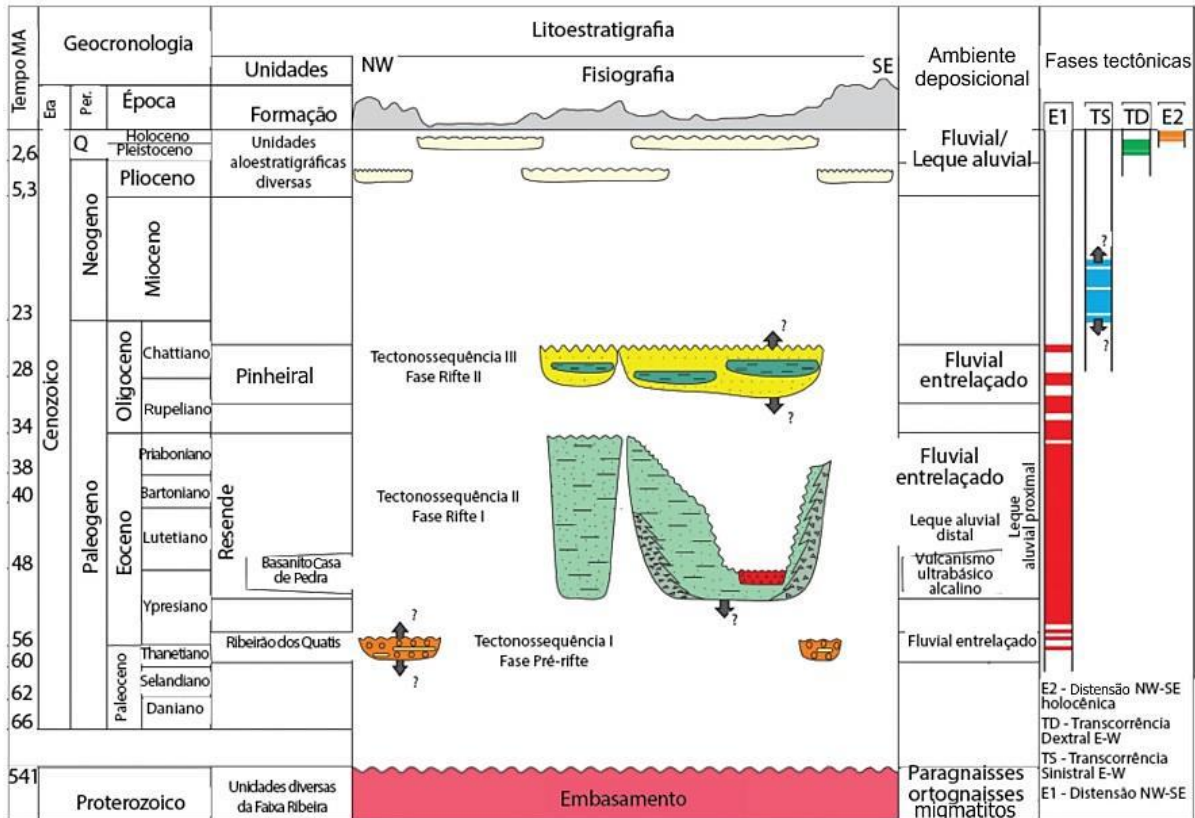


Figura 7 - Coluna litoestratigráfica e fases tectônicas da Bacia de Volta Redonda (Negrão *et al.*, 2015 modificado por Maciel *et al.*, 2017).

As principais unidades litoestratigráficas que ocorrem na Bacia de Volta Redonda são:

- **Formação Ribeirão dos Quatis**, que corresponde aos depósitos mais antigos da bacia, ocorrendo em manchas isoladas em inconformidade com o embasamento gnáissico. Essa unidade se caracteriza por uma sucessão de camadas de ortoconglomerados com intercalações de arenitos feldspáticos, podendo ocorrer lentes pelíticas. O paleoambiente interpretado é de canais fluviais entrelaçados, anterior à fase principal de reativação do sistema de falhas ENE-WSW;
- **Formação Resende**, que representa o registro sedimentar mais expressivo da bacia, sendo caracterizada por arenitos maciços e estratificados, sobre camadas finas de conglomerado, podendo ocorrer camadas de pelitos no topo dessas sucessões, configurando uma alternância de ciclos granodecrescentes. Esse registro é associado a ambiente fluvial entrelaçado, com a contribuição de leques aluviais;

- **Basanito Casa de Pedra**, que corresponde a corpos de rocha ultrabásica alcalina extrusiva, rica em fenocristais de olivina e de augita (ankaramito), apresentando textura porfirítica, com vesículas e amígdalas. Segundo Sanson *et al.* (2006), os derrames ocorreram em ao menos três episódios e estariam associados à fase máxima de distensão crustal do RCSB;
- **Formação Pinheiral**, que corresponde a uma sucessão sedimentar em discordância com a Formação Resende e, em alguns locais, com o Basanito Casa de Pedra. Esta unidade é composta por ciclos granodecrescentes de arenitos e conglomerados, além de camadas pelíticas laminadas ou maciças, sendo interpretada como um registro de canais fluviais entrelaçados, com períodos de inundação registrada pelos pelitos;
- **Sedimentos neogênicos**, que ocorrem em discordância com o registro sedimentar paleogênico da Bacia de Volta Redonda ou sobre o embasamento, sendo caracterizados por depósitos arenosos e argilosos que recobrem colinas de topografia suave;
- **Sedimentos quaternários**, representados por depósitos aluviais e coluviais, preservados em cabeceiras de drenagens e fundos de vales.

A Bacia de Volta Redonda experimentou, segundo Sanson (2006) e Negrão (2014), quatro fases tectônicas (E1, TS, TD e E2) durante a sua evolução, correlacionáveis às fases propostas por Riccomini (1989) e Riccomini *et al.* (2004) para o RCSB.

A **primeira fase (E1)** é caracterizada por uma distensão NW-SE, de idade paleogênica, e foi responsável pelos esforços que resultaram na abertura da bacia e pela principal fase de sedimentação, juntamente com o evento magmático associado ao Basanito Casa de Pedra. As estruturas características são falhas normais de orientação NE-SW, associadas à reativação de zonas de cisalhamento pretéritas.

A primeira fase deformadora, **TS-EW (transcorrência sinistral E-W)**, é caracterizada por estruturas que afetaram somente depósitos paleogênicos, não atingindo coberturas neogênicas nem quaternárias, com idade atribuída ao Neógeno. Foram relacionadas a este evento tectônico falhas normais sinistrais e sinistrais normais com direções NE-SW, ENE-WSW, e mais raramente E-W e WNW-ESE; falhas normais dextrais e dextrais normais com direções variando entre NE-SW e NNW-SSE; e falhas normais NE-SW.

A fase seguinte, **TD-EW (transcorrência dextral E-W)**, com idade pleistocênica, foi registrada apenas em depósitos paleogênicos, neogênicos e pleistocênicos, sendo caracterizada por falhas normais dextrais e dextrais normais de direção WNW-ESE e NW-SE; falhas normais sinistrais e sinistrais normais com direções variando de NW-SE a NNE-SSW; e falhas normais com direção predominante NW-SE, e, mais raramente, WNW-ESE e NNW-SSE.

A última fase de evolução tectônica identificada na Bacia de Volta Redonda por Sanson (2006) e Negrão (2014) é a fase **E2 (distensão NW-SE)**, caracterizada por estruturas que afetaram todo o registro do Cenozoico. As estruturas geradas por este evento são caracterizadas por falhas normais com direções ENE-WSW, NE-SW e NNE-SSW.

A fase de **compressão E-W** de idade holocênica, última fase de evolução tectônica do RCSB descrita por Riccomini *et al.* (2004), não foi identificada por Sanson (2006) ou Negrão (2014) na Bacia de Volta Redonda.

3.4. Afloramento estudado

O afloramento estudado se apresenta como um corte artificial em uma colina, na forma de dois taludes separados por uma berma. Possui orientação aproximadamente N-S e dimensões de 18 metros de altura por 54 metros de largura (Figura 8).

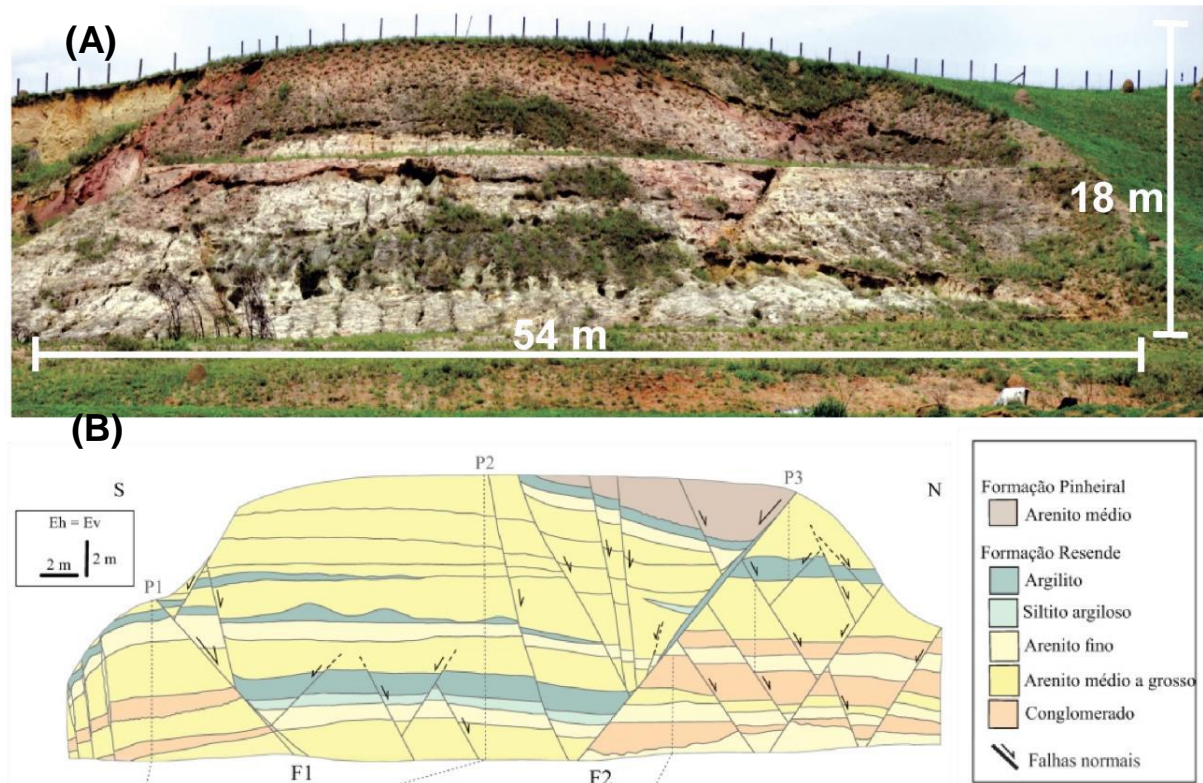


Figura 8 - (A) Visão geral do afloramento, expondo os dois taludes separados pela berma. (B) Seção geológico-estrutural elaborada por Maciel *et al.* (2017 - escala original 1:100), destacando os contatos litológicos e as estruturas tectônicas reconhecidos por esses autores.

O afloramento foi inicialmente descrito por Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017), que elaboraram uma seção geológico-estrutural a partir de levantamentos estratigráficos e estruturais na escala 1:100.

A mais detalhada descrição estrutural e estratigráfica do afloramento foi realizada pela equipe do projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, abordando, no entanto, somente o talude inferior do afloramento, na escala 1:50 (Figura 9).

A principal unidade estratigráfica presente no afloramento é a Formação Resende, sendo representada por intervalos areníticos lenticulares a tabulares intercalados por conglomerados e lamitos. Apenas no topo do afloramento foram caracterizados arenitos e lamitos bastante intemperizados pertencentes à Formação Pinheiral, em discordância com a Formação Resende (Figura 8).

Em relação à análise estrutural, o afloramento registra um conjunto expressivo de falhas normais e bandas de deformação. Conforme Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017), foram reconhecidas duas falhas principais, F1 e F2 (Figura 8), que seccionam o afloramento em três blocos (sul, central e norte), exibindo um padrão de gráben. No bloco sul há o predomínio de camadas de arenitos e conglomerados,

no bloco central predominam arenitos e lamitos; e, no bloco norte, as camadas conglomeráticas sobressaem. As falhas F1 e F2 possuem mesma orientação (ENE-WSW) e mergulhos opostos, com rejeitos de 5 e 7 metros respectivamente. Tais rejeitos foram identificados pelos autores mencionados a partir da caracterização de ciclos sedimentares incompletos, onde há contatos erosivos na base de camadas conglomeráticas e areníticas.

Falhas normais secundárias sintéticas e antitéticas à F1 e à F2 distribuem-se predominantemente no bloco central, observando-se um controle estratigráfico na distribuição dessas estruturas, que tendem a se prolongar somente até um intervalo mais espesso de pelitos próximo à base da seção (figuras 8 e 9).

Maciel *et al.* (2017) também destacaram a presença de feições estruturais com aspecto semelhante a bandas de deformação, com padrão anastomosado e orientação NE-SW, em zonas com espessura de 30 cm a 60 cm. Nessas feições, foi observado um padrão de concentração de oxidação, o que é um indicativo de barramento ou retardo no fluxo de fluidos, o que pode ter favorecido a precipitação do óxido de ferro.

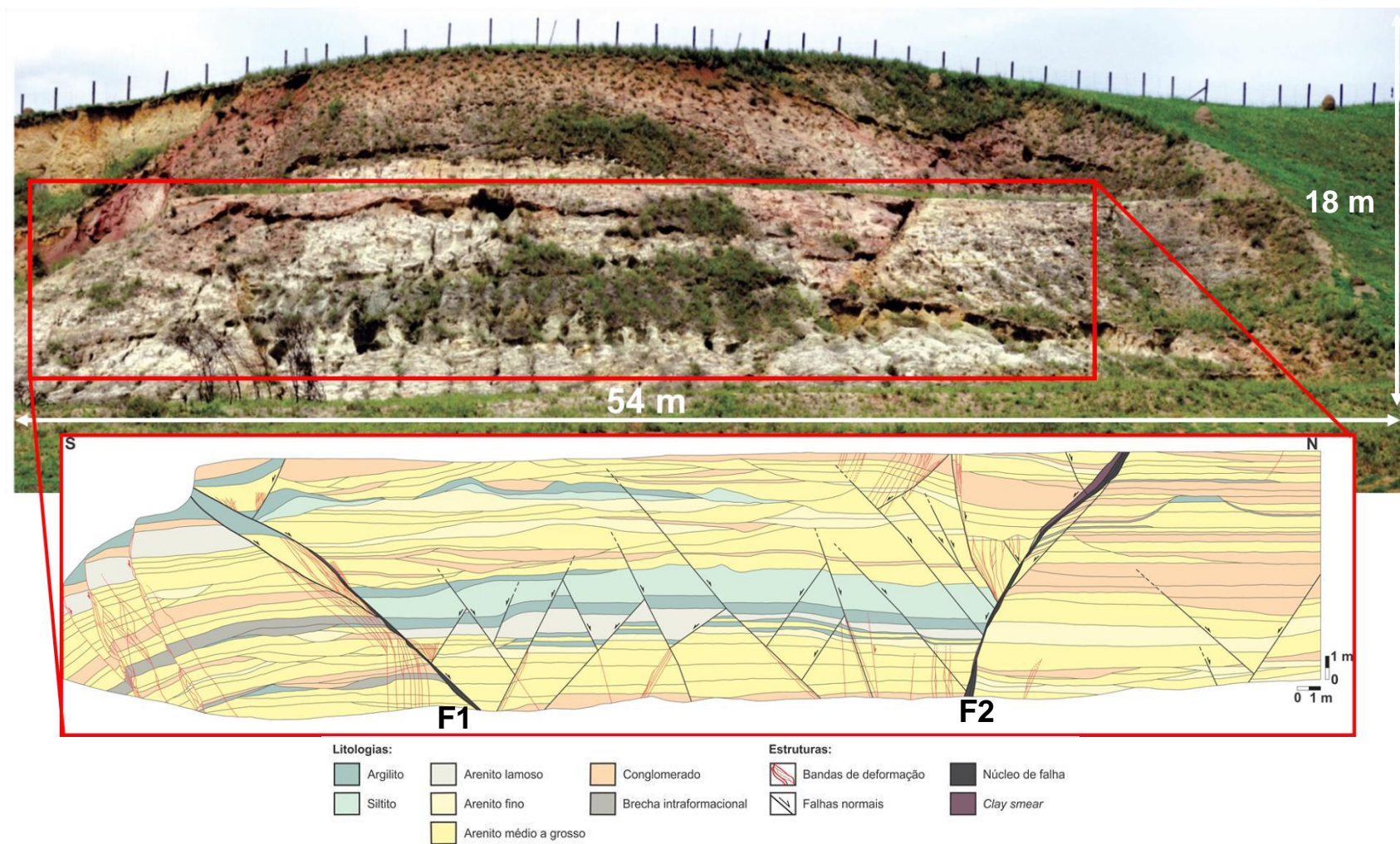


Figura 9 - Seção geológico-estrutural (em escala original 1:50) do talude inferior do afloramento estudado. Fonte: Projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados” (convênio UFRJ/Petrobras/ANP).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Interpretação estratigráfica e estrutural do ortofotomosaico (2D)

O ortofotomosaico utilizado no presente estudo (Figura 10) foi obtido a partir dos trabalhos de Lima (2017), que o adquiriu por meio de RPAS (Drone). Lima (2017) realizou voos de 100m com aeronave autônoma, possuindo sobreposições de 70% (longitudinais e transversais) entre as capturas de imagens, que geraram um tamanho de pixel de 3,95 cm.

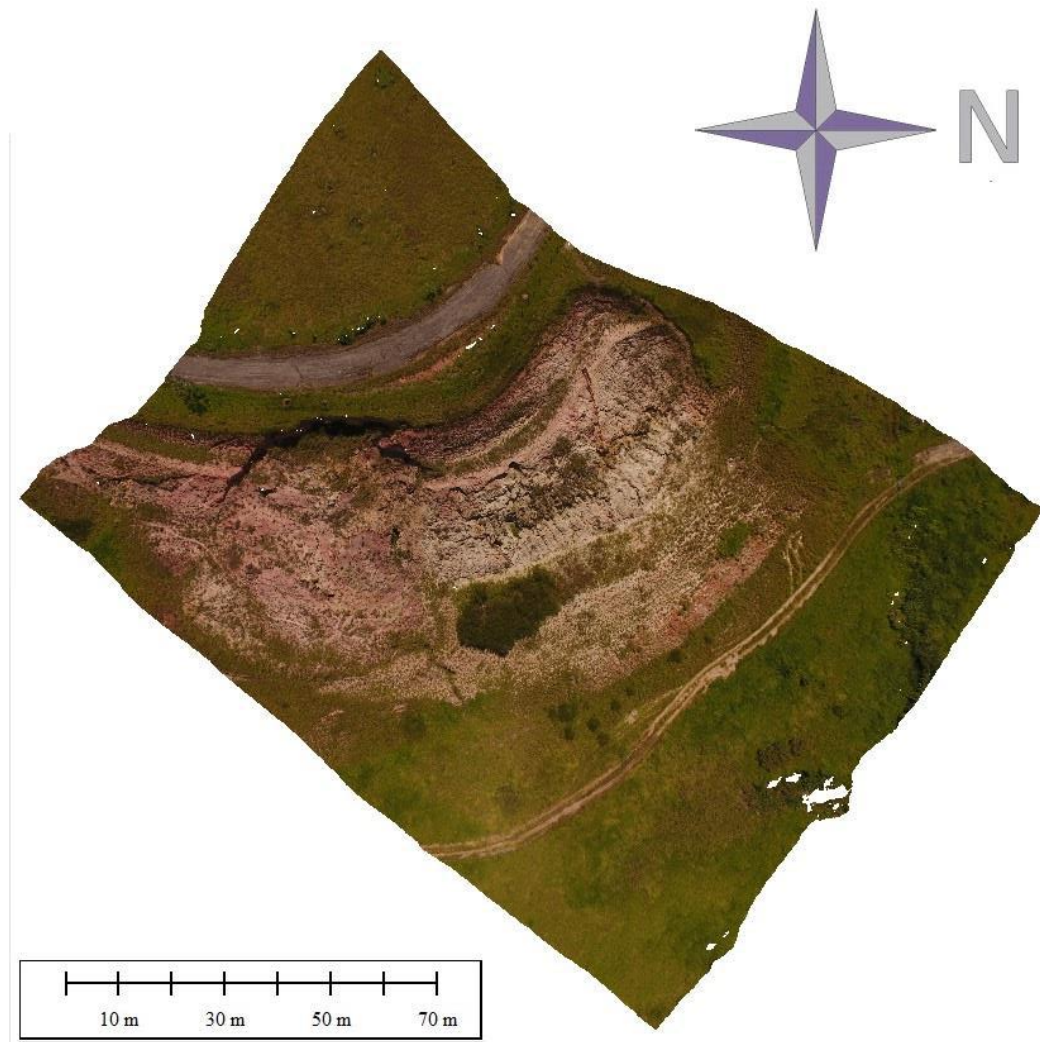


Figura 10 - Ortofotomosaico em voo de 100 m de altura expondo o afloramento em sua totalidade (Lima, 2017).

Inicialmente, o ortofotomosaico foi interpretado estratigraficamente e estruturalmente em duas dimensões no *software* CorelDraw™. Optou-se pela interpretação 2D pelo fato dos arquivos de imagem (*raster*) quando colocados no *software* de visualização tridimensional tenderem a perder resolução espacial. Isso ocorre como uma forma de otimização do *hardware* na reprodução do modelo em 3D pelo *SKUA-GOCAD*, que possui um limite de exibição de 256 cores.. Partindo desse pressuposto, detalhes que poderiam ser observados no ortofotomosaico de alta resolução (4000 x 3000 pixels;) se tornariam difíceis de serem reconhecidos ou não seriam percebidos com a utilização única do modelo virtual 3D.

Tanto para a interpretação estrutural quanto para a estratigráfica foram usadas estratégias já difundidas para a interpretação de fotomosaicos. A referida técnica de fotointepretação está englobada na chamada fotoestratigrafia (Sgavetti, 1991), metodologia utilizada para delimitar e distinguir intervalos e superfícies aflorantes no registro sedimentar, sendo elas expressas, respectivamente, como fotofácies e foto-horizontes (Figura 11). Foto-horizontes são superfícies resultantes do contraste entre os materiais rochosos. Entre os foto-horizontes há uma variedade de geometrias e características fotográficas específicas, como textura, coloração e acamamento, que são a assinatura visual das propriedades geológicas de cada material (fotofácies).

Os conceitos utilizados na fotoestratigrafia são derivados da sismoestratigrafia (Vail *et al.*, 1977), permitindo a observação e a interpretação da continuidade de foto-horizontes e de fotofácies, que podem ser estendidos, por exemplo, desde a escala de afloramento até os limites da bacia sedimentar (Sgavetti, 1991).

Para a interpretação do afloramento investigado, foi utilizada também, como meio de correlação, a seção elaborada para o talude inferior do afloramento (em escala 1:50) e a seção elaborada por Maciel (2016) e Maciel *et al.* (2017), em escala 1:100 (Figura 12). Foram realizadas três visitas ao afloramento, nas quais foram checadas *in situ* as interpretações realizadas.

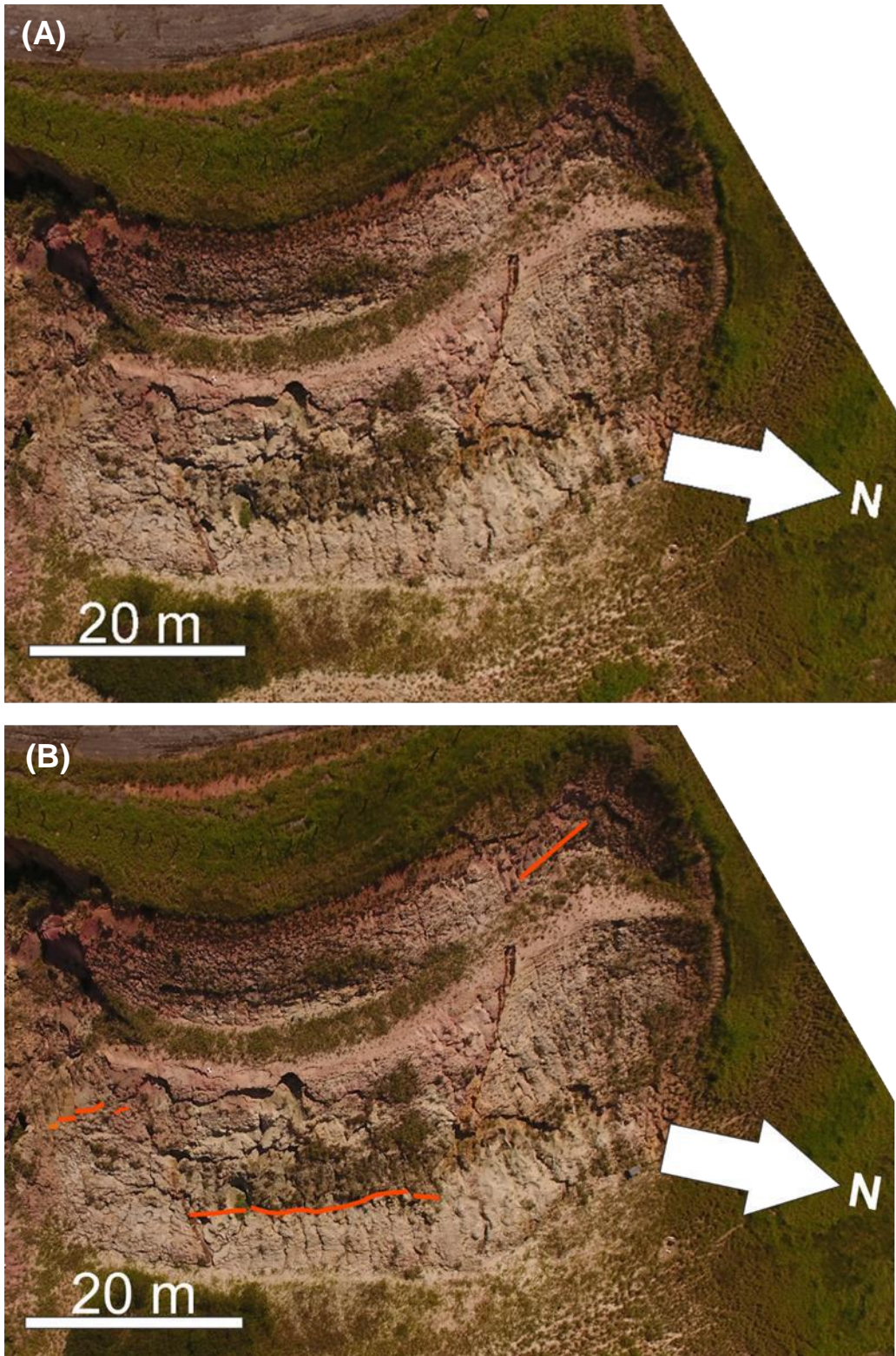


Figura 11 - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Exemplo de um foto-horizonte interpretado neste trabalho.

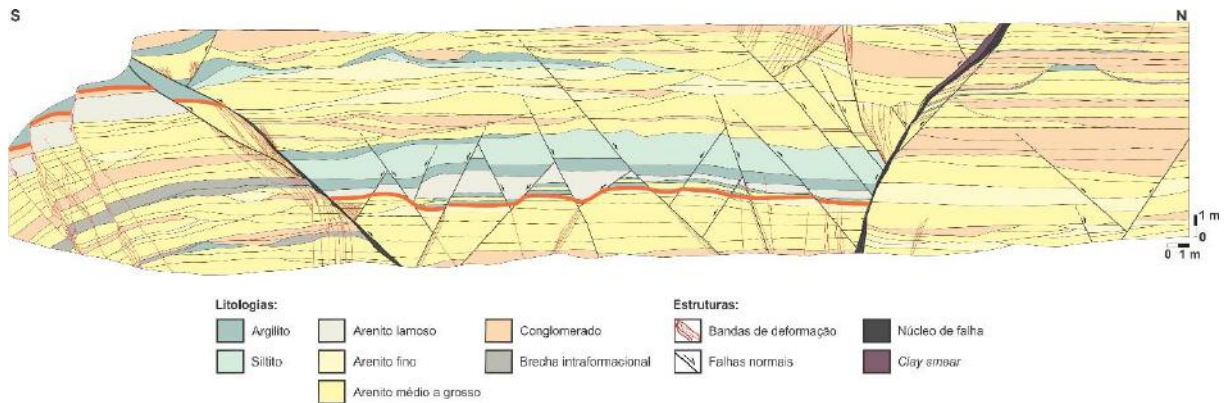


Figura 12 - Seção geológica do talude inferior do afloramento investigado (escala original 1:50; Fonte: projeto “Caracterização da Deformação e de Propriedades Mecânicas e Permoporosas de Arenitos Pouco Consolidados”, convênio UFRJ/Petrobras/ANP) expondo o foto-horizonte identificado na Figura 11.

Em relação à interpretação estrutural, os traços e os rejeitos das falhas principais (F1 e F2) eram bem claros no ortofotomosaico (Figura 13), permitindo a identificação dessas estruturas tectônicas. Entretanto, para as falhas menores, o principal indicativo utilizado para a sua presença eram os traços lineares que se articulavam geometricamente com as falhas maiores, aliados a pequenos deslocamentos ou escalonamentos nos foto-horizontes previamente interpretados.

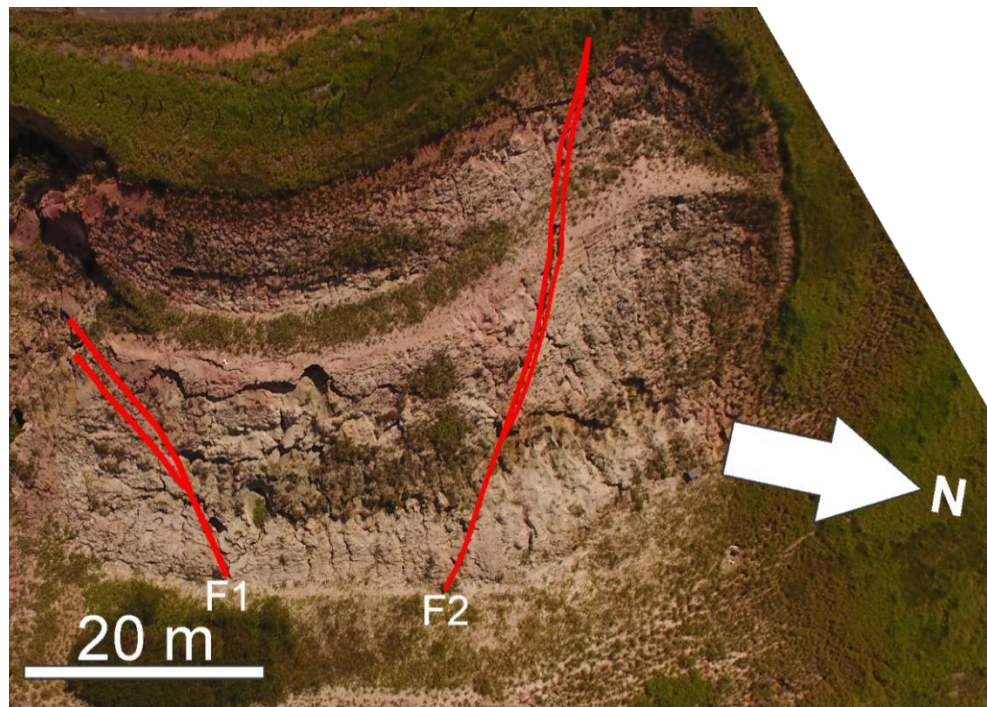


Figura 13 - Ortofotomosaico com a interpretação das falhas F1 e F2.

4.2. Interpretação estratigráfica e estrutural do MVA (3D)

A interpretação geológica do Modelo Virtual de Afloramento (MVA) foi realizada no software *Emerson SKUA-GOCAD™ v.2017* (Figura 14).

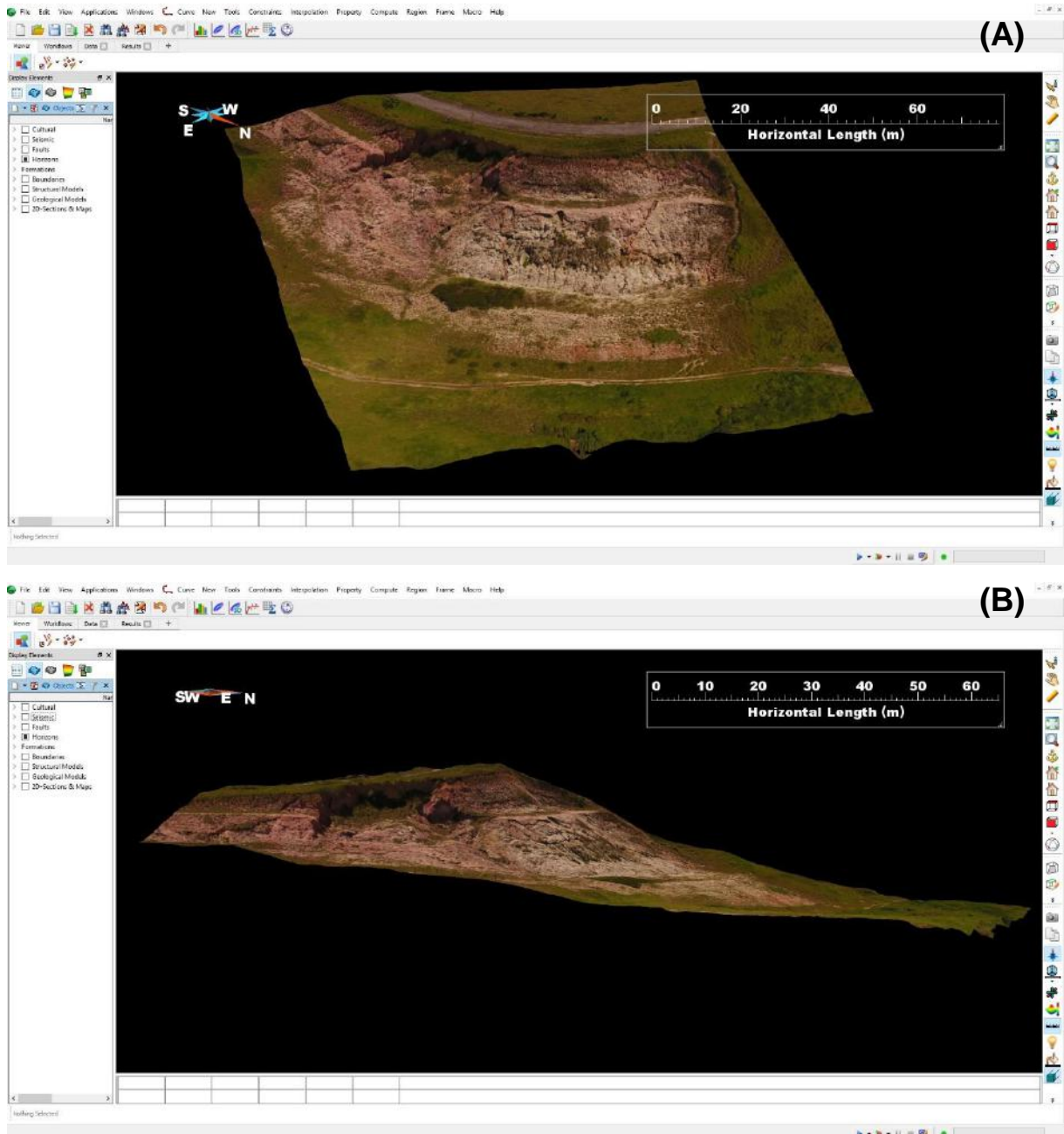


Figura 14 - (A) Interface do SKUA-GOCAD exibindo a visão frontal do MVA. (B) Interface do SKUA-GOCAD exibindo a visão lateral do MVA a partir do Sul.

O MVA foi adquirido a partir dos trabalhos de Lima (2017), que o construiu utilizando uma nuvem de pontos, obtida a partir do uso de RPAS e estação total, e

ortofotomosaicos. No *SKUA-GOCAD* constam as informações de número de pontos igual a 17804 e o número de triângulos utilizados igual a 35052.

Além de buscar o reconhecimento das camadas sedimentares e estruturas tectônicas anteriormente definidas na ortofotomosaico, teve-se como objetivo a extração de novas informações estratigráficas e estruturais com a interpretação do MVA, de modo que fossem para além daquelas já extraídas bidimensionalmente. Assim, buscou-se transpor limitações encontradas em decorrência da superfície plana de visualização, característica da ortofotomosaico.

Para a interpretação do MVA, foram aplicados critérios similares àqueles utilizados na interpretação bidimensional (Figura 15), com destaque para a maior possibilidade de planos de visualização e da possibilidade de estimativa dos rejeitos verticais, por conta da existência de informação em três dimensões em cada ponto do modelo virtual.

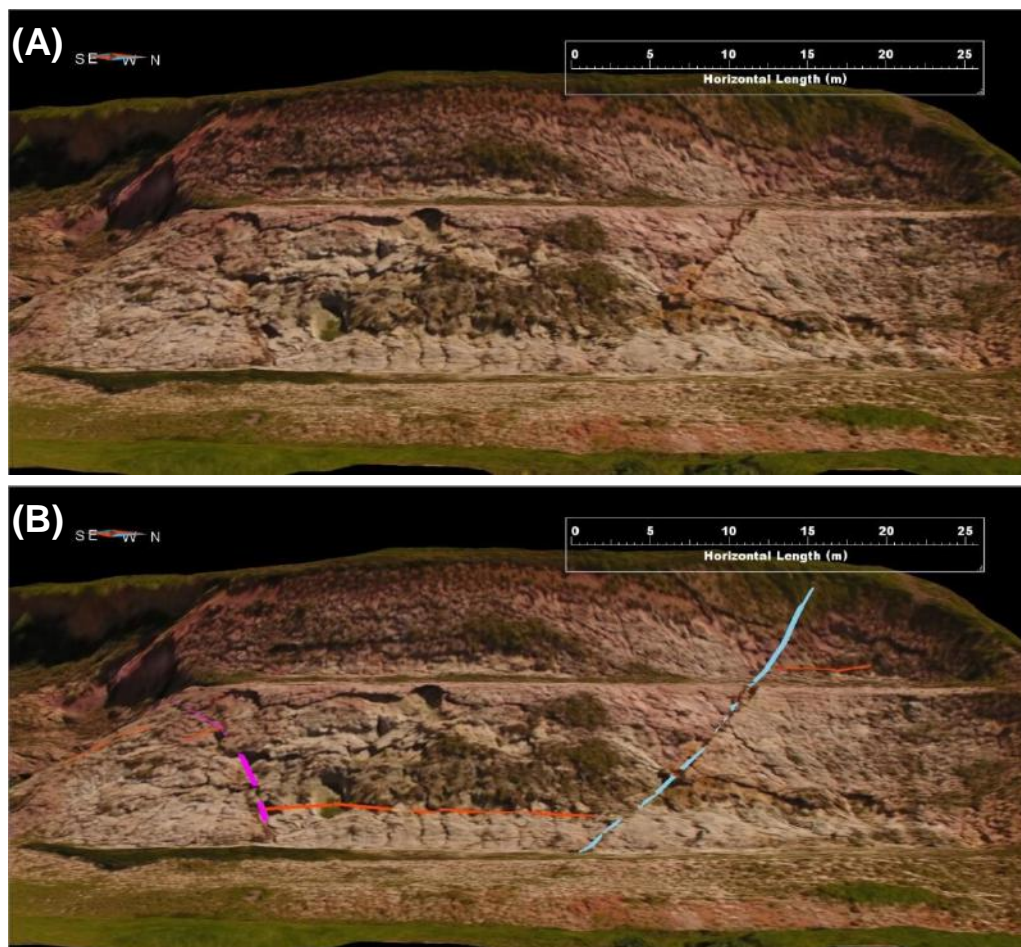


Figura 15 - (A) MVA não fotointerpretado. (B) MVA com fotointerpretação parcial: em rosa, está indicada a falha F1; em azul, a falha F2; e, em laranja, um foto-horizonte associado a contato litológico (base do pelito).

De um modo geral, percebeu-se que a nuvem de pontos foi suficiente para representar a rugosidade natural do afloramento, apesar da diminuição de resolução espacial do arquivo *raster* no *SKUA-GOCAD*, com o aumento do tamanho do pixel de 3,95 cm no ortofotomosaico para 10 cm no MVA, o que já era esperado para esse *software*, por conta da sua limitação na exibição de cores, incorporando assim os pixels de cores não suportadas nos pixels daquelas com suporte.

4.3. Construção do modelo geológico

A construção do modelo geológico a partir da interpretação do MVA foi realizada também no *software EMERSON SKUA-GOCAD™ v.2017*. O modelo é criado com base na projeção e estimativa em três dimensões das falhas e litologias definidas no MVA, baseando-se em conceitos geológicos e geométricos (Jones *et al.*, 2011). Primeiramente, o volume que o modelo geológico ocuparia foi definido na forma de um prisma de base retangular orientado na direção NE-SW, com as dimensões de 40 m de altura, 77 m de largura e 64 m de profundidade (Figura 16). Com a definição do volume o *software* cria automaticamente 10 (dez) planos horizontais e verticais, com espaçamentos regulares e paralelos aos eixos.

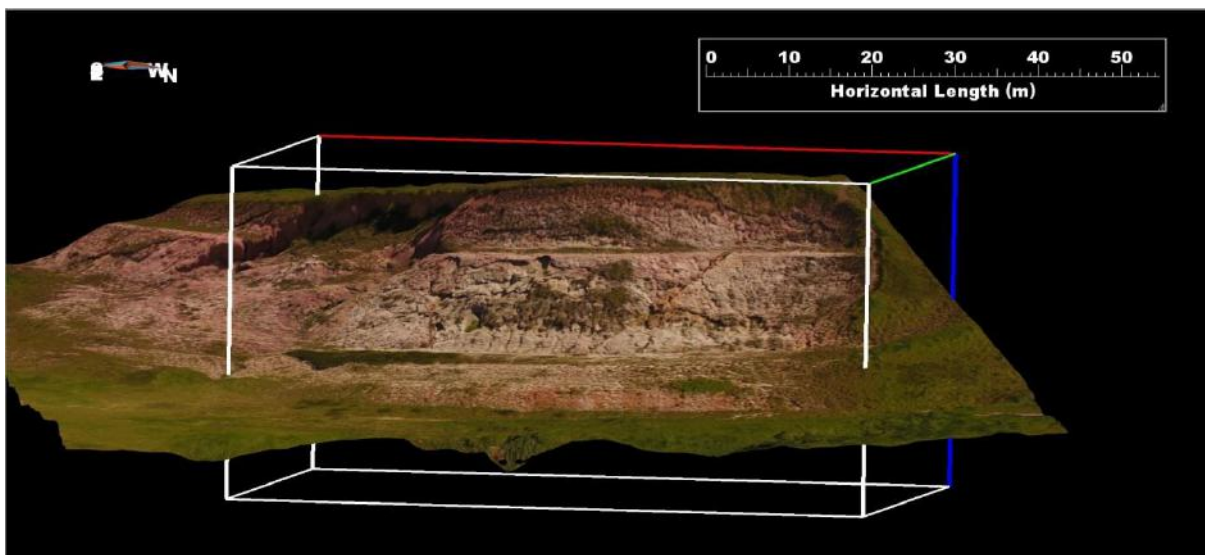


Figura 16 - Imagem mostrando o volume definido para limitar o modelo geológico, com seus eixos I (em vermelho), J (em verde) e K (em azul)

Dentro desse volume, optou-se por começar pela projeção tridimensional das estruturas tectônicas interpretadas no MVA, usando os dados de direção e mergulho

disponíveis (dados obtidos pela equipe do projeto de pesquisa durante a elaboração da seção geológica na escala 1:50 – Figura 17 e Anexo 1).

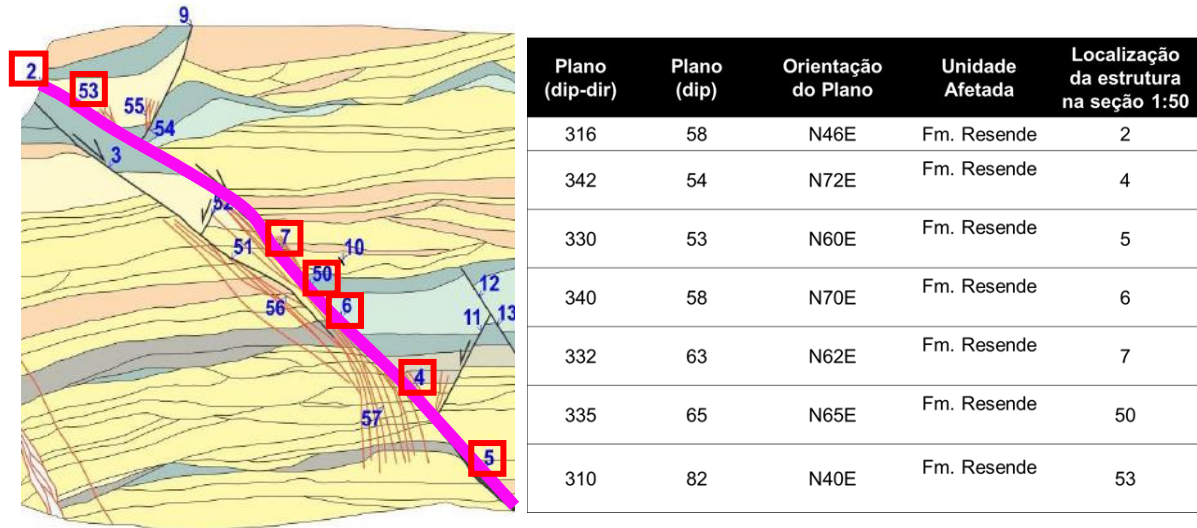


Figura 17 - Imagem mostrando um exemplo com as medidas utilizadas e as suas respectivas localizações no traçado interpretado para a falha F1 na seção geológica (de escala original 1:50) utilizada como uma das referências para a construção do modelo tridimensional.

A inserção dessas informações no MVA foi realizada através de uma extensão macro que, a partir de um ponto de referência inserido manualmente, projeta uma reta com direção e mergulho que seguem os dados de entrada colocados, gerando *sticks* como produto.

Uma vez estabelecidas as informações de direção e mergulho de cada falha com a criação dos *sticks*, o traçado de cada falha foi projetado sobre planos horizontais gerados no interior do volume definido para o modelo. A projeção do *strike* em cada plano utilizado foi feita unindo todas as intersecções dos *sticks* com o plano considerado.

Com a definição do traçado do *strike* da falha nos vários planos horizontais, a etapa seguinte foi a criação dos planos das falhas. De acordo com as informações inseridas para cada falha, o *software* definiu o melhor plano que continha as linhas geradas nas projeções ao longo dos planos horizontais.

Em síntese, as etapas de construção das falhas no modelo foram:

- 1 - geração dos *sticks* para cada falha (Figura 18);
- 2 - criação das linhas de projeção do *strike* de cada falha ao longo dos planos horizontais contidos no volume de criação do modelo (figuras 19 e 20); e

3 - criação dos planos das falhas a partir das linhas de projeção dos *strikes* (figuras 21 e 22).



Figura 18 - MVA expondo o traçado da falha F1 no afloramento, com o plano horizontal e os *sticks* que representam as atitudes *dip-dip* utilizadas para definir a falha F1 no modelo.

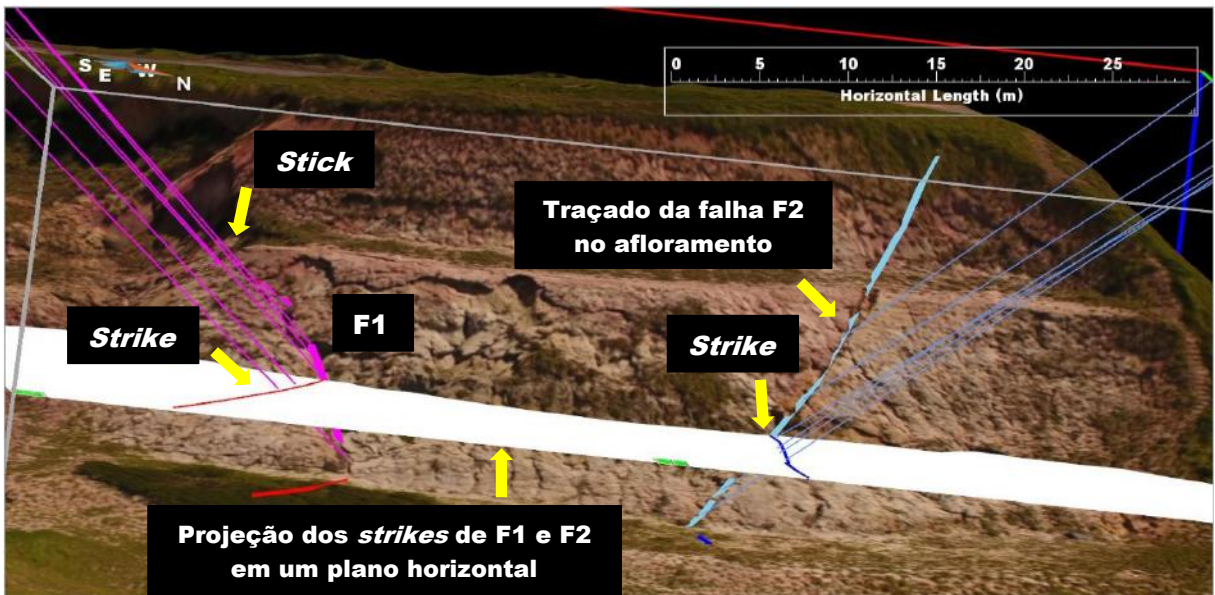


Figura 19 - MVA exibindo as projeções dos *strikes* das falhas F1 e F2 ao longo de um plano horizontal.

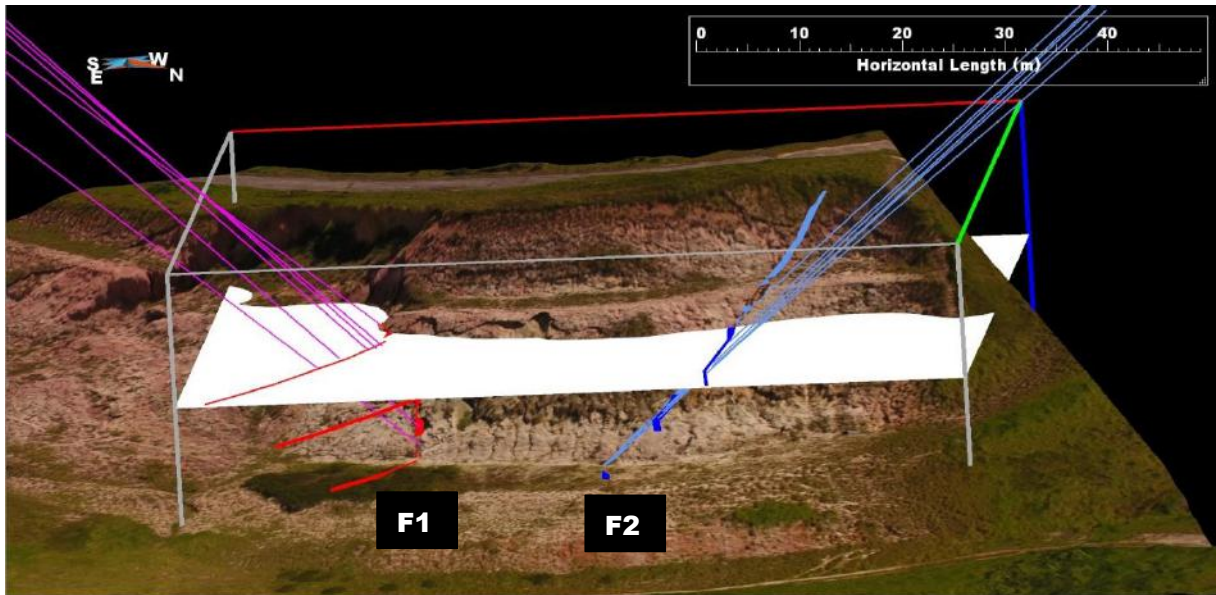


Figura 20 - MVA exibindo a projeção dos *strikes* das falhas F1 e de F2 em um plano horizontal em cota superior ao da Figura 19.

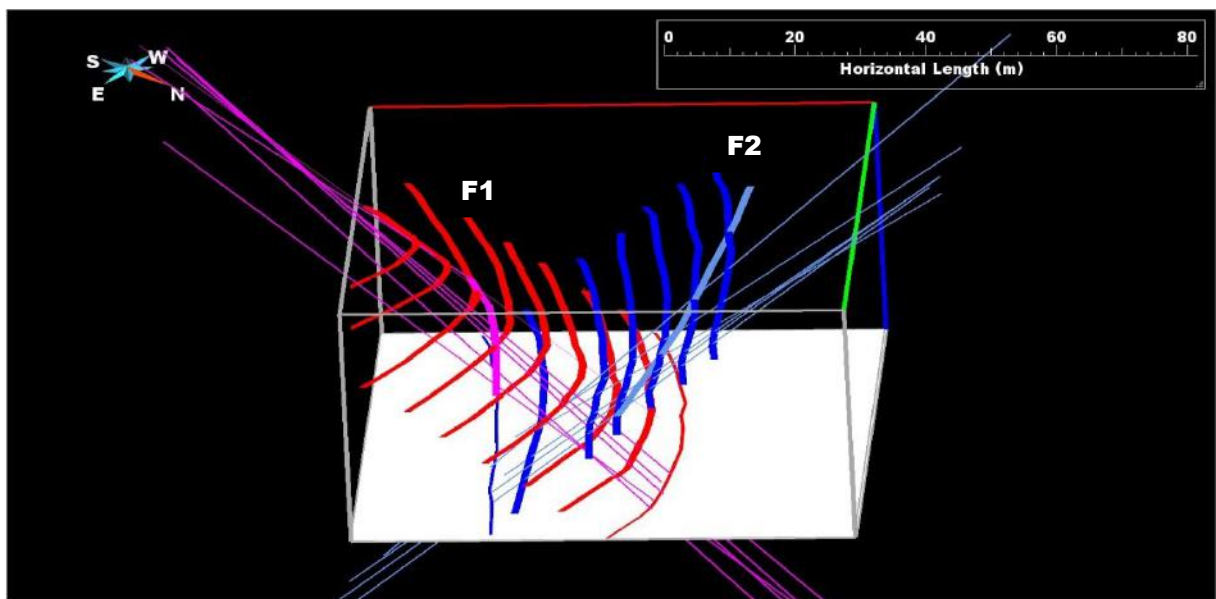


Figura 21 - Projeção das falhas F1 e F2 dentro do volume do modelo.

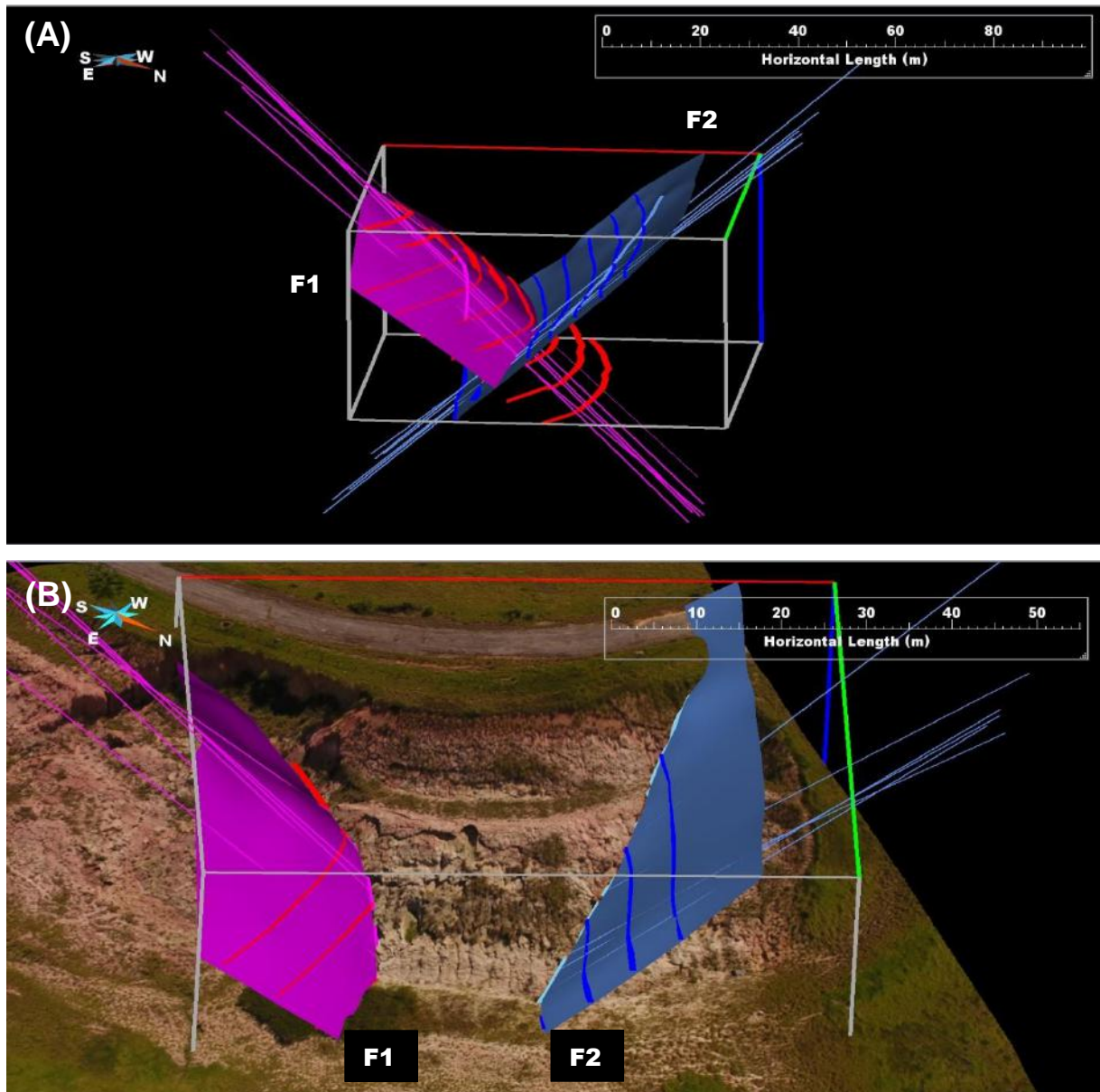


Figura 22 - (A) Projeção dos planos das falhas F1 e F2 gerados pelo *software* (a partir dos dados inseridos) se interceptando em subsuperfície. (B) Planos das falhas F1 e F2 gerados pelo *software* observados no afloramento.

Após terem sido interpretadas as estruturas tectônicas no MVA, foi realizada a projeção tridimensional dos foto-horizontes identificados, partindo-se do pressuposto que as superfícies estratigráficas eram sub-horizontais.

Para a construção dos horizontes no *software* SKUA-GOCAD é necessário definir uma relação entre eles (Figura 23), uma vez que podem ser caracterizados por quatro tipos, a saber: *conformable* (camadas em conformidade tanto do topo quanto da base); *eroded* (camadas em conformidade com a base, mas erodidas no topo); *baselap* (camadas em conformidade com o topo e erodidas na base); e *unconformable* (sem conformidade com o topo e a base). No presente trabalho, a

opção “conformable” foi aplicada a todos os horizontes do modelo geológico, exceto o horizonte mais superior, por representar a base da Formação Pinheiral.



Figura 23 - Exemplo de coluna estratigráfica para construção de um modelo no SKUA-GOCAD, com destaque para as opções de relação entre os horizontes (destacado em vermelho).

Após a definição da trama tridimensional das estruturas tectônicas e criação da ordem estratigráfica, os foto-horizontes foram projetados ao longo dos planos de falha, sempre respeitando os rejeitos identificados (Figura 24).

Em síntese, as etapas de construção dos foto-horizontes no modelo foram:

- 1 - criação do traçado do foto-horizonte nos planos de falha, respeitando os rejeitos (Figura 24);
- 2 - de uma nuvem de pontos, interligando os traçados construídos nos planos de falhas (Figura 25);
- 3 - geração dos planos de projeção dos foto-horizontes pelo *software* a partir da informações previamente construídas (Figura 26).

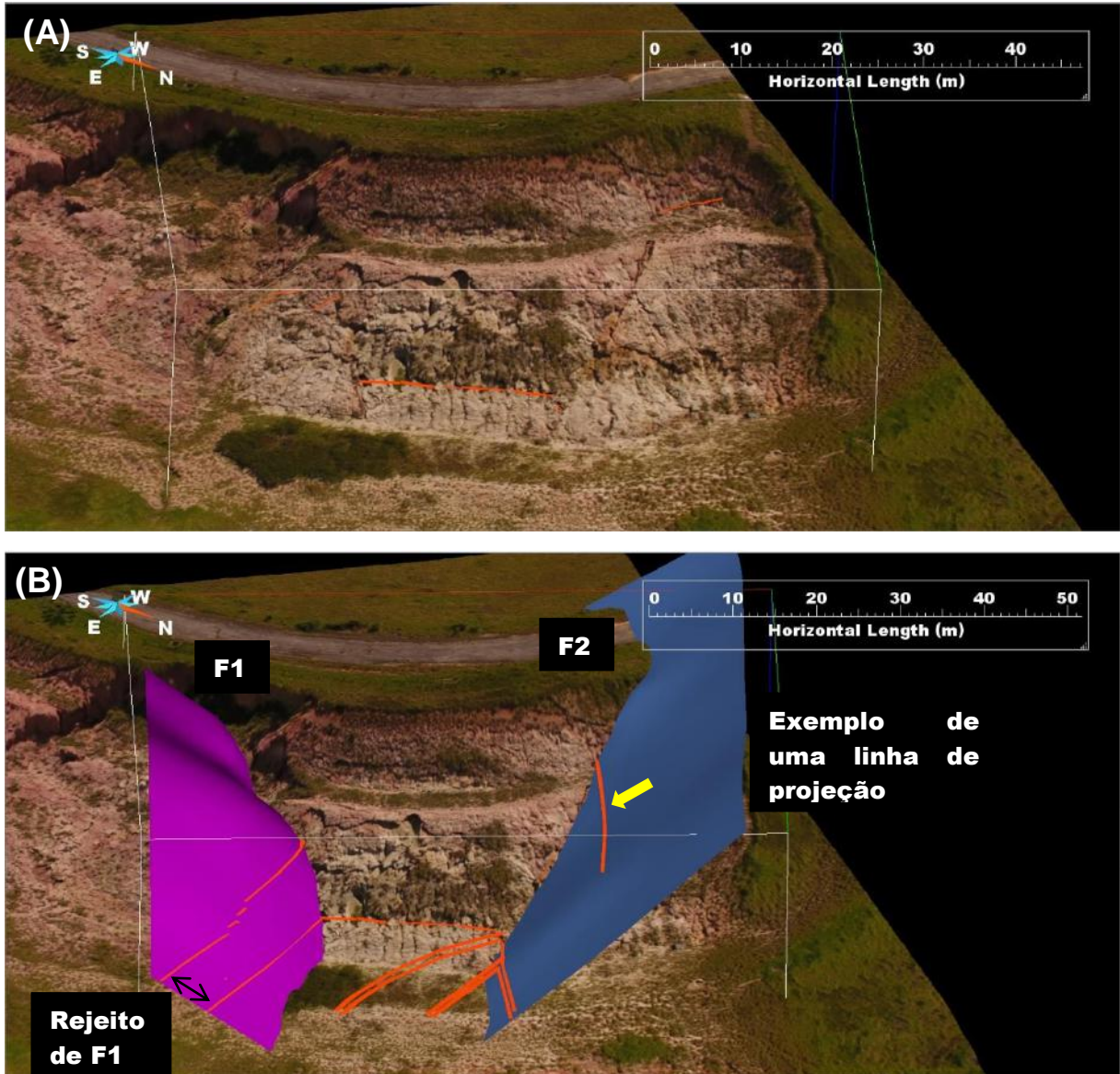


Figura 24 - (A) Exemplo de um foto-horizonte interpretado no MVA. (B) Linhas de projeção do foto-horizonte nos planos das falhas F1 e F2.

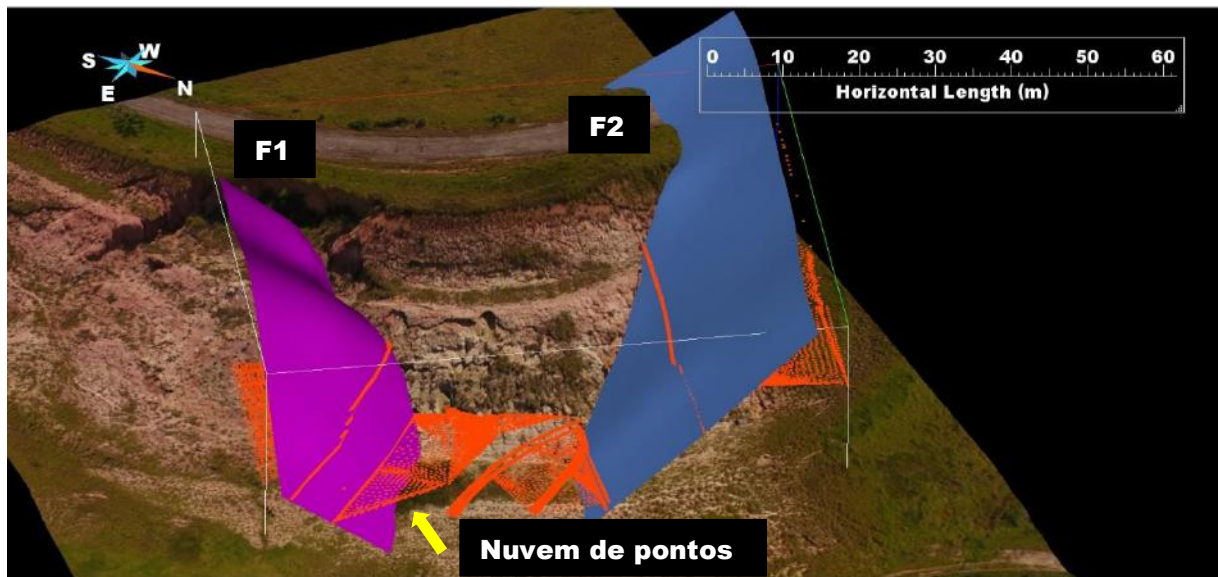


Figura 25 - Exemplo de linhas de projeção de um foto-horizonte interpretado nos planos das falhas F1 e F2, e nuvem de pontos unindo as referidas linhas.

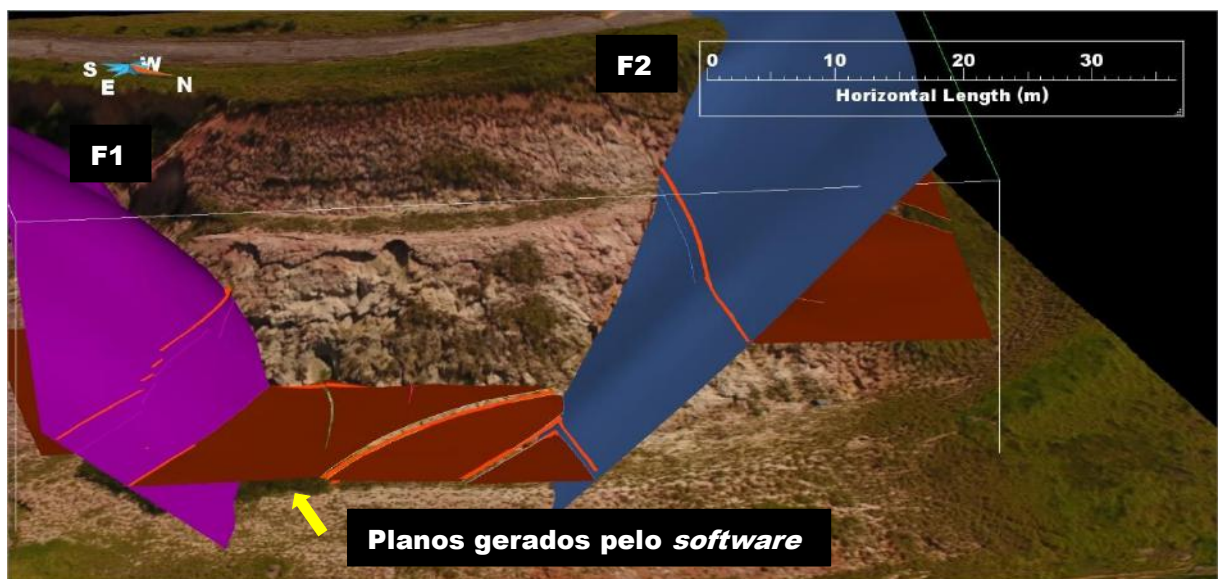


Figura 26 - Plano de projeção do foto-horizonte gerado pelo *software* a partir das informações previamente inseridas.

Para a extensão lateral dos foto-horizontes interpretados que não ocorriam nos três blocos do afloramento, foi realizada uma estimativa baseada na espessura do intervalo que determinado foto-horizonte delimitava em qualquer um dos blocos onde ele foi reconhecido. O intervalo mais basal (limitado no topo pelo foto-horizonte mais inferior) e o intervalo mais superior (limitado na base pelo foto-horizonte mais superior) foram prolongados até os respectivos limites inferior e superior do volume de construção do modelo,

Para a conclusão do modelo foi utilizada um grid com *voxels* de 0,5 m, exceto para o primeiro e o último intervalo, para os quais foi atribuído um tamanho do *voxel* de 10 m, para reduzir a quantidade de *voxels* do modelo. O *grid* gerado possui 140 *voxels* no eixo I e 161 *voxels* no eixo J. Com o ajuste automático do *software*, o eixo K ficou com 50 *voxels* e a *grid* acomodou um total de 1.127.000 *voxels* (140 x 161 x 50).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Interpretação do ortofotomosaico

A partir da interpretação do ortofotomosaico foi identificado um total de 14 horizontes estratigráficos e 15 falhas (Figura 27).

Quanto às falhas, foi possível identificar com clareza aquelas estruturas que apresentam cicatrizes mais evidentes no terreno (as falhas principais - F1 e F2, identificadas na interpretação da ortofotomosaico como as falhas 1 e 2 - Figura 28). As demais estruturas tectônicas foram reconhecidas pela presença de traços lineares menos nítidos associados a deslocamentos de foto-horizontes.

No bloco sul do afloramento, foram fotointerpretadas três falhas que se relacionam a zonas de bandas de deformação (falhas 13, 14 e 15 – Figura 28) de acordo com as interpretações do afloramento por Maciel *et al.* (2017) e pela equipe do projeto de pesquisa (Figura 29), das quais a feição 14 está conjugada à feição 13. As zonas de bandas de deformação foram interpretadas como falhas por estarem associadas a deslocamentos verticais das camadas no topo do afloramento. Ainda nesse bloco, foi fotointerpretada uma falha conjugada que se inicia a partir de F1, na cota intermediária do talude inferior (falha 4).

De todo o arranjo de falhas presente no bloco central (entre as falhas F1 e F2), registradas nas seções geológicas em escala 1:50 e 1:100, foram identificadas no ortofotomosaico duas falhas antitéticas à F1 (uma no talude inferior e outra no superior – falhas 3 e 5, respectivamente) e quatro falhas antitéticas à F2 (duas no talude inferior - falhas 6 e 7, e duas no talude superior - falhas 8 e 9) - figuras 28 e 29.

A falha F2 expõe uma bifurcação (falha 10) que se inicia no talude inferior, pouco antes da berma, é realçada ao longo do plano da berma e se estende pelo talude superior.

No bloco norte, duas falhas foram fotointerpretadas (falhas 11 e 12), sendo a falha 11 considerada principal e a falha 12 antitética a essa. A falha 11 se estende por todo o talude inferior, não tendo sido possível estabelecer a sua continuação no talude superior. A falha 12 se estende apenas até a cota intermediária do talude inferior. Maciel *et al.* (2017) identificaram uma trama mais complexa de falhas no bloco norte (seção geológica na escala 1:100), em contraste com a seção elaborada

pela equipe do projeto (escala 1:50), em que menos falhas foram identificadas e com a qual a fotointerpretação aqui realizada mais se aproximou.

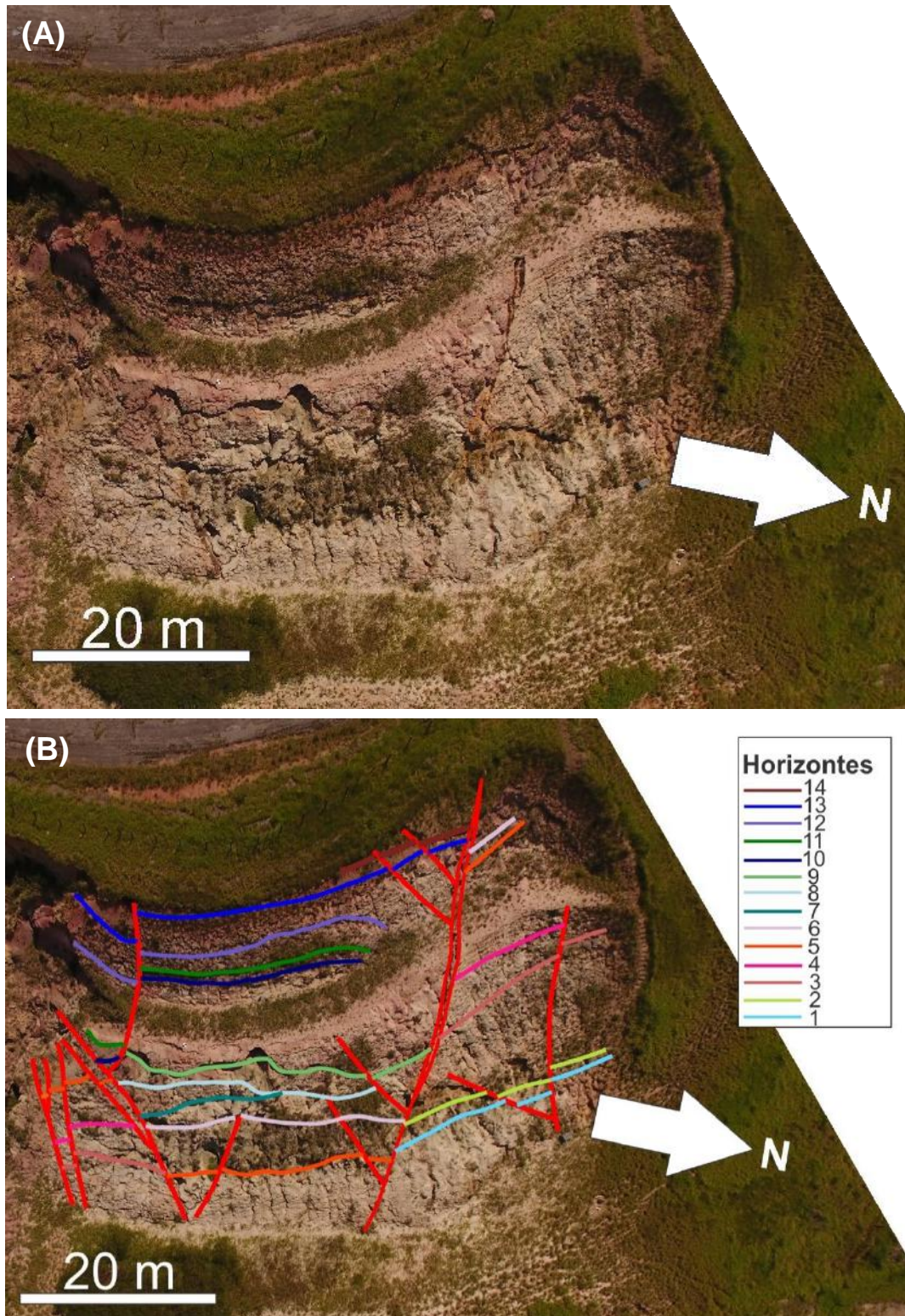


Figura 27 - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Ortofotomosaico com a interpretação de falhas (em vermelho) e horizontes estratigráficos (demais cores, de acordo com a legenda).

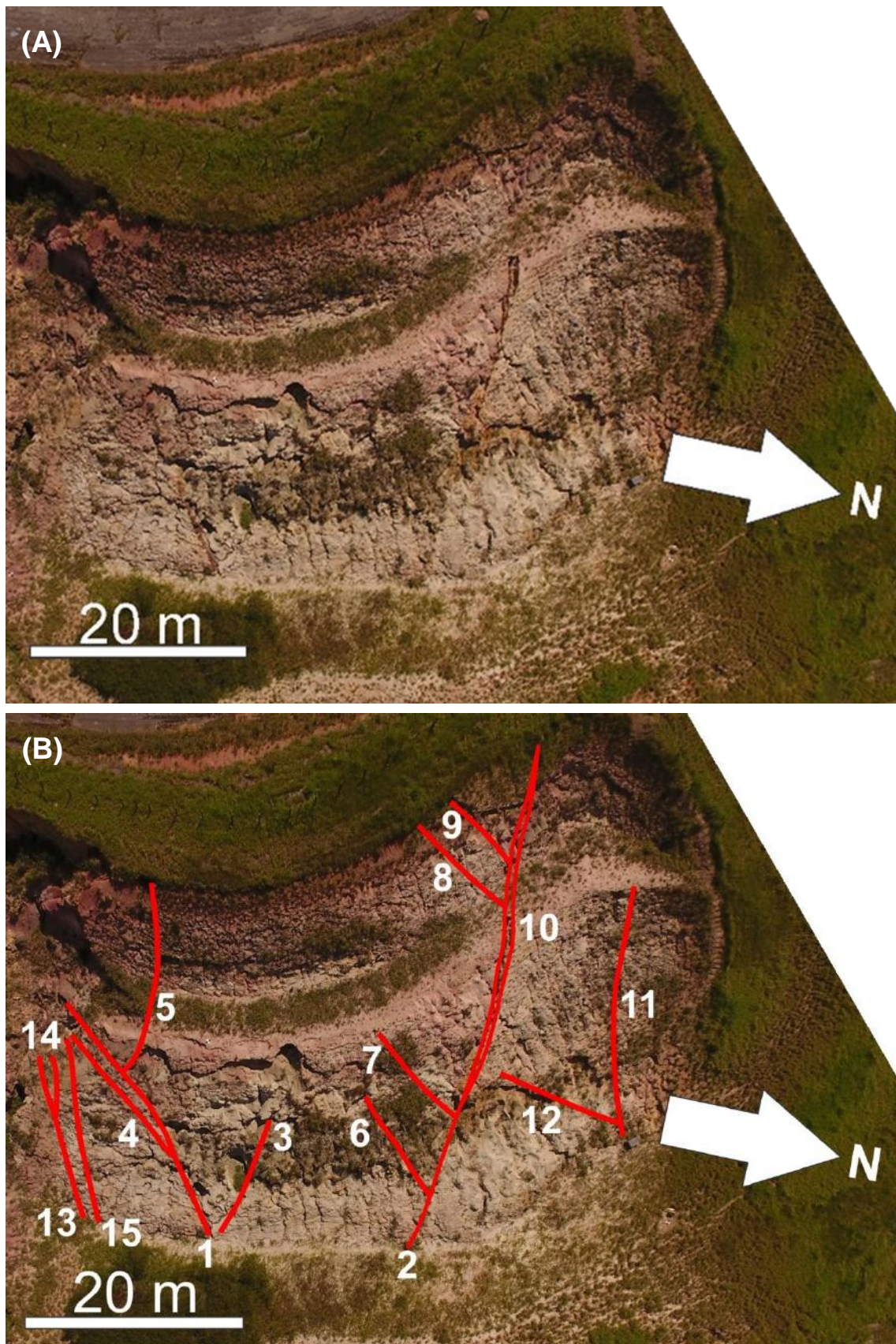


Figura 28 - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Identificação das falhas (em vermelho) fotointerpretadas

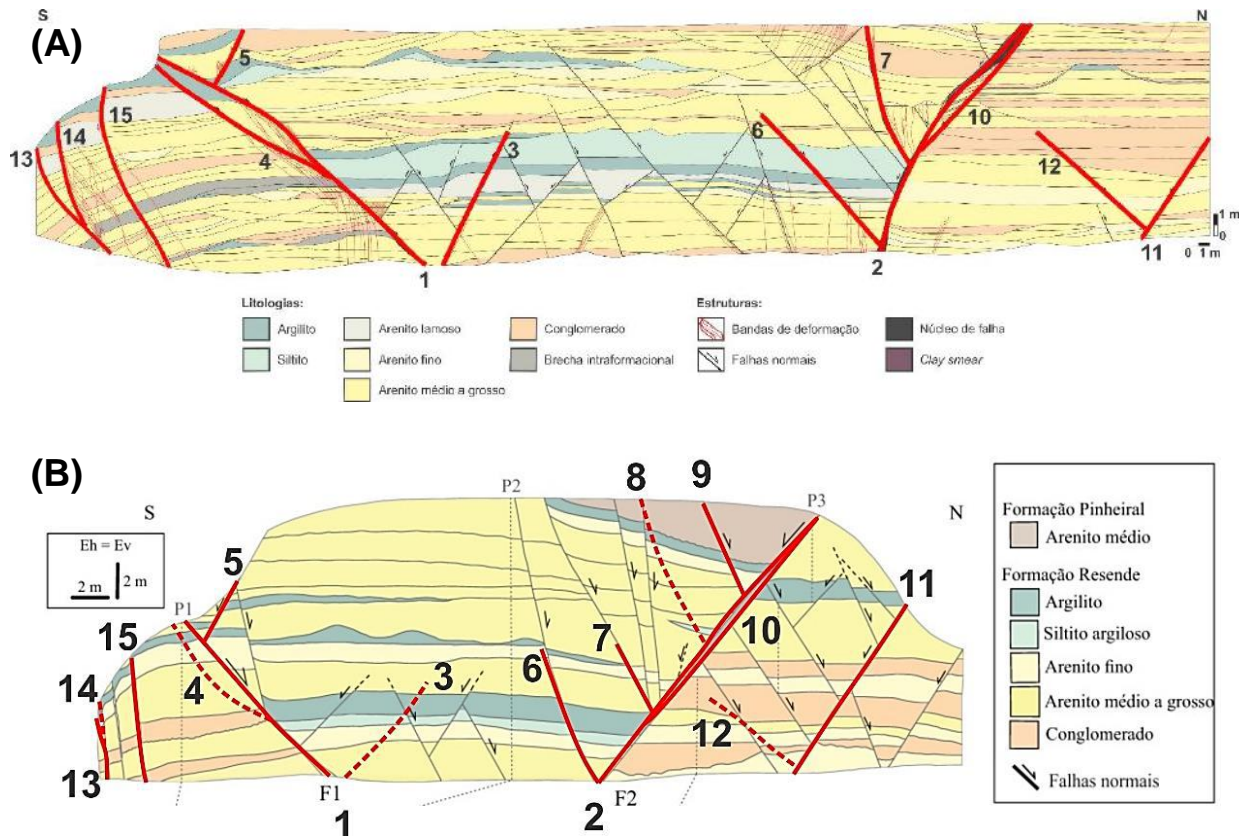


Figura 29 – (A) Correlação realizada entre as estruturas identificadas no ortofotomosaico e as registradas na seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa para o talude inferior do afloramento (na escala original 1:50). (B) Correlação realizada entre as estruturas identificadas no ortofotomosaico e as registradas na seção geológica elaborada para o afloramento por Maciel et al. (2017), na escala original 1:100. As linhas tracejadas correspondem a estruturas tectônicas interpretadas no ortofotomosaico sem correlação com a seção.

Com relação aos 14 horizontes estratigráficos definidos (Figura 30), representam limites entre intervalos litológicos (Tabela 1), marcando frequentemente contatos erosivos em meio à sucessão de arenitos, conglomerados e argilitos típicos da Formação Resende, e ajustando-se às interpretações estratigráficas apresentadas por Maciel *et al.* (2017) e pela equipe do projeto de pesquisa (Figura 31).

A distribuição dos horizontes estratigráficos nos três blocos do afloramento é condicionada principalmente pelos rejeitos verticais das falhas principais F1 e F2, de modo que os horizontes mais basais estão presentes apenas nos blocos norte (horizontes 1, 2, 3 e 4) e sul (horizontes 3 e 4) – blocos soerguidos, enquanto os horizontes superiores (horizontes 7 a 14) estão presentes apenas no bloco central (bloco abatido).

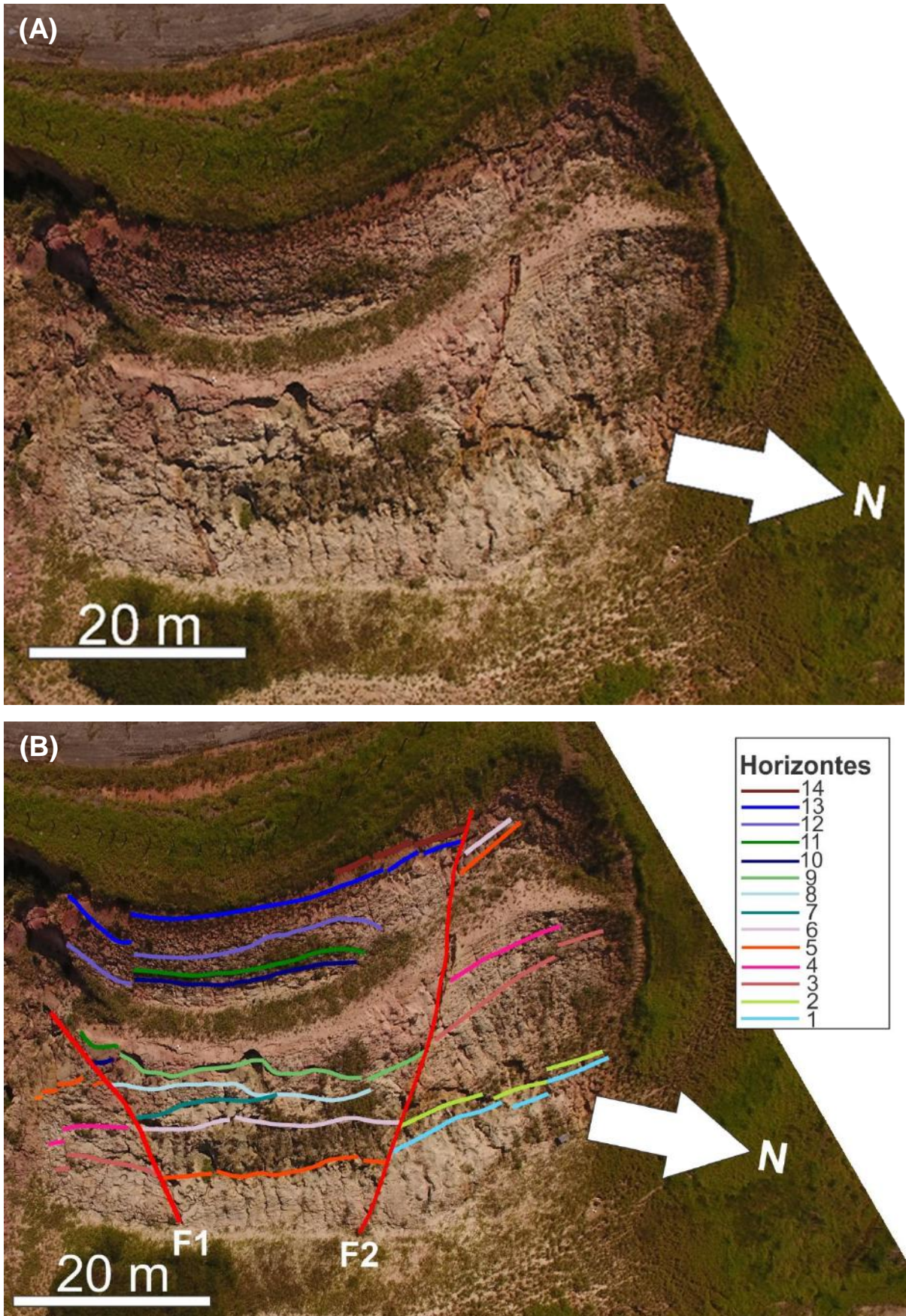


Figura 30 - (A) Ortofotomosaico utilizado, sem interpretações. (B) Identificação dos horizontes estratigráficos interpretados no ortofotomosaico, com a indicação das falhas F1 e F2 como referência.

Tabela 1 - Relações estratigráficas associadas aos horizontes reconhecidos no ortofotomosaico.

Horizonte	Descrição	Natureza do contato
14	Arenito (Formação Pinheiral) sobre argilito (Formação Resende)	Erosivo (discordante)
13	Argilito sobre arenito	Não erosivo
12	Conglomerado sobre arenito	Erosivo
11	Conglomerado/arenito sobre argilito	Erosivo
10	Arenito sobre argilito	Erosivo
9	Arenito/conglomerado sobre argilito	Erosivo
8	Siltito/argilito sobre arenito	Não erosivo
7	Arenito grosso sobre arenito fino	Erosivo
6	Arenito sobre argilito	Erosivo
5	Argilito sobre arenito/conglomerado	Não erosivo
4	Arenito sobre conglomerado	Não erosivo
3	Brecha intraformacional sobre arenito	Erosivo
2	Conglomerado sobre arenito	Erosivo
1	Arenito grosso sobre arenito fino	Erosivo

O horizonte estratigráfico 5 é o primeiro correlacionável nos três blocos do afloramento (sul, central e norte), sendo utilizado como guia para a estimativa dos rejeitos aparentes das falhas identificadas, principalmente das falhas F1 e F2.

O horizonte estratigráfico 6 também é identificado nos blocos central e norte, e sua ausência no bloco sul se deve à erosão da parte superior do afloramento nesse bloco.

O intervalo litológico limitado pelos horizontes 5 e 6 corresponde ao principal pacote de sedimentos finos exposto no afloramento. A variação de espessura desse intervalo entre os blocos sul, central e norte, observada na interpretação do ortofotomosaico, se deve em grande parte à diferença de declividade do corte entre a posição de ocorrência desse intervalo nos blocos central (superfície inclinada) e norte (superfície quase vertical). Em relação ao bloco sul, o intervalo não está completo, pela ausência do horizonte 6 nesse bloco.

Os horizontes estratigráficos mais destacados são as superfícies 2, 5, 6, 8, 9, 13 e 14 (Figura 30), correspondendo a contatos erosivos (horizontes 2, 6, 9 e 14) ou superfícies de base de intervalos lamosos (horizontes 5, 8 e 13), que se destacam pela mudança no aspecto textural (fotofácies) - Tabela 1.

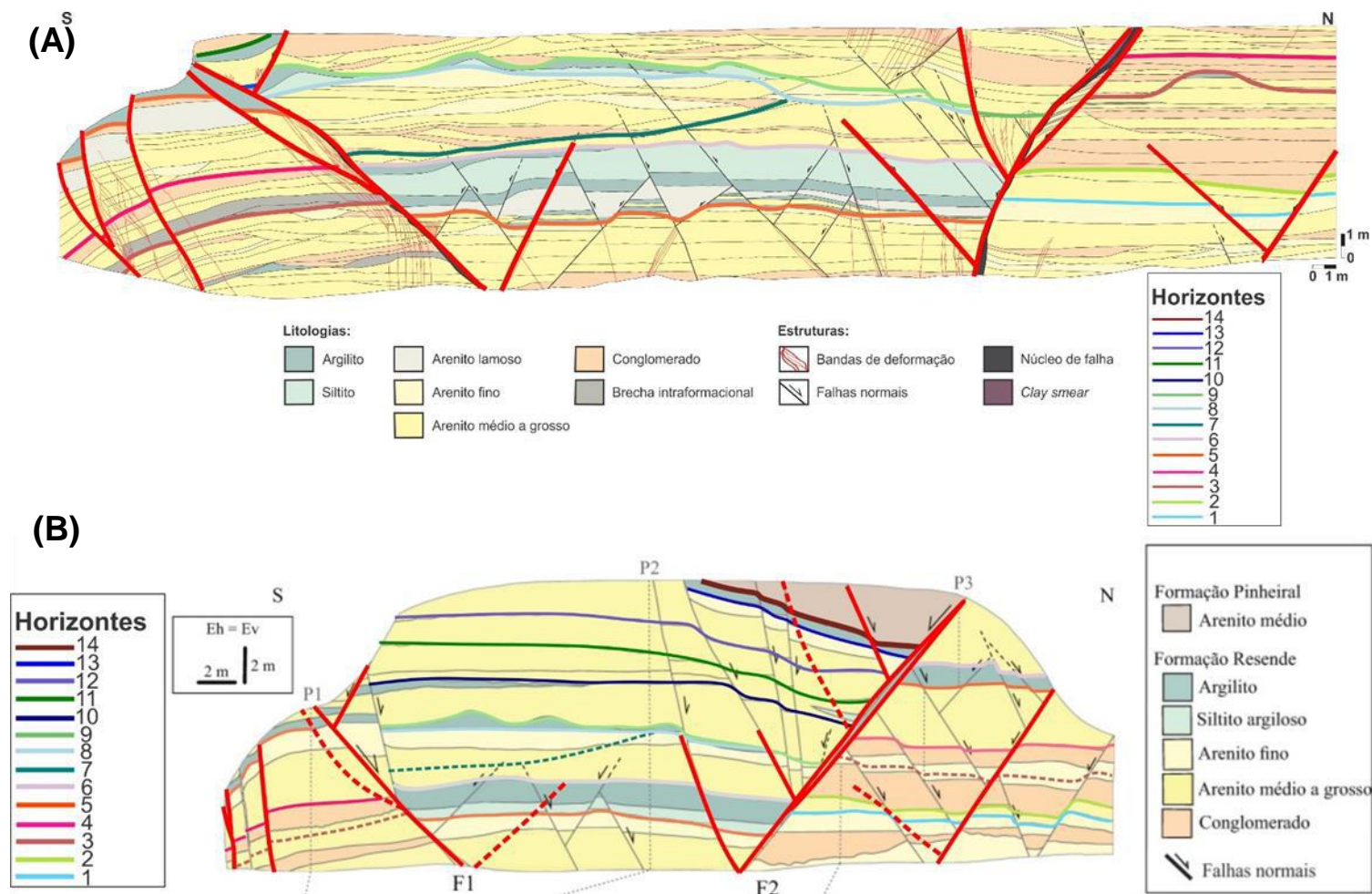


Figura 31 – (A) Correlação realizada entre estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos identificados no ortofotomosaico e os registrados na seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa para o talude inferior do afloramento (na escala original 1:50). (B) Correlação realizada entre estruturas tectônica e horizontes estratigráficos identificados no ortofotomosaico e os registrados na seção geológica elaborada para o afloramento por Maciel *et al.* (2017), na escala original 1:100. As linhas tracejadas correspondem a estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretadas no ortofotomosaico sem correlação com a seção.

5.2. Interpretação do Modelo Virtual de Afloramento

Na interpretação do MVA foram definidos 16 horizontes estratigráficos e 17 falhas (Figura 32). Em comparação com interpretação do ortofotomosaico, houve um aumento no número de horizontes estratigráficos (de 14 para 16) e falhas (de 15 para 17) identificados.

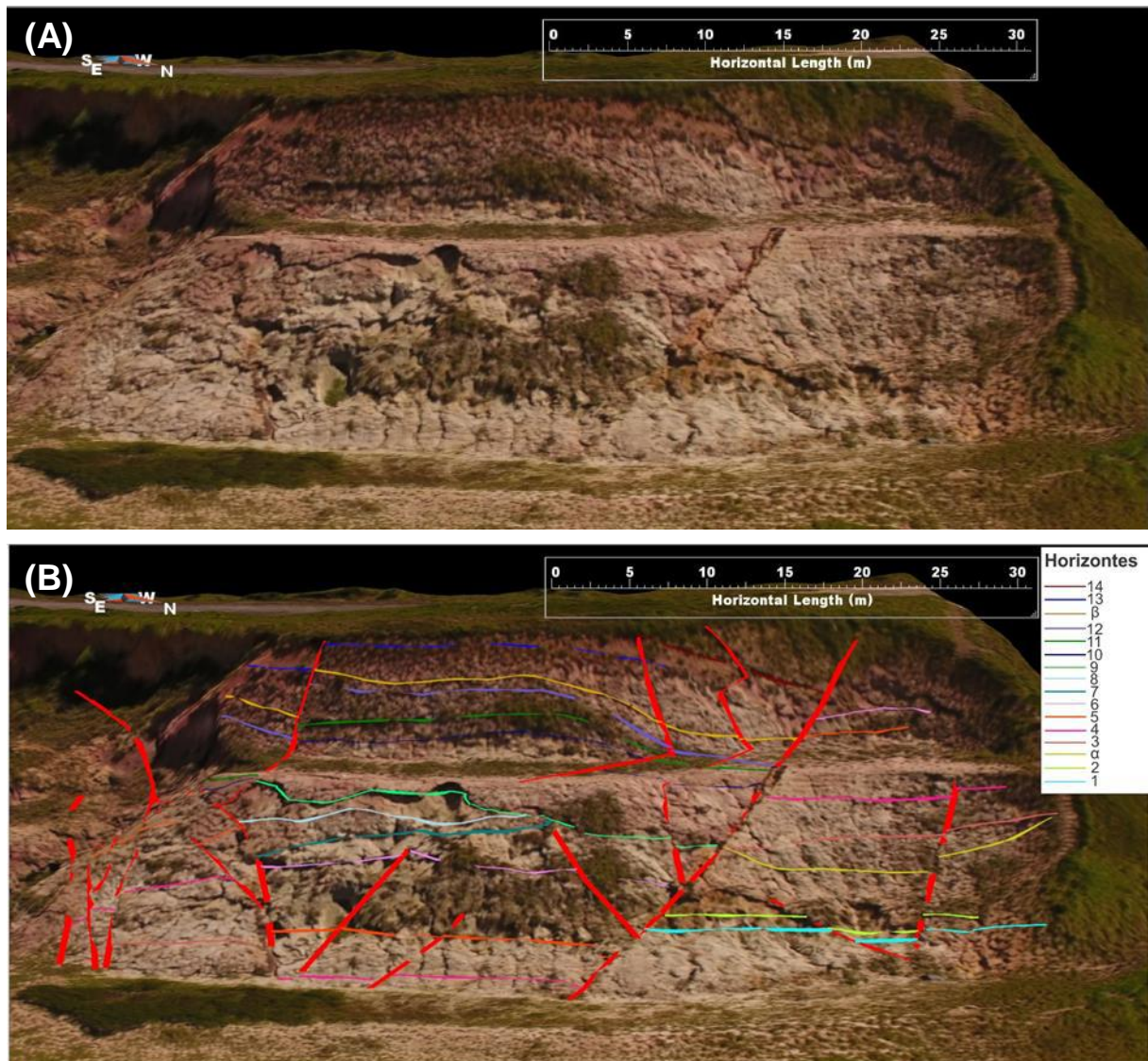


Figura 32 - (A) MVA utilizado, sem interpretações. (B) MVA com a interpretação de falhas (em vermelho) e horizontes estratigráficos (demais cores, de acordo com a legenda).

No caso das falhas, algumas das estruturas presentes no talude inferior e no superior do afloramento foram classificadas como distintas na interpretação do ortofotomosaico (bidimensional), mas puderam ser identificadas como estruturas

únicas pela visualização tridimensional (Figura 33). Esse é caso tanto das falhas 8 e 18 quanto das falhas 7 e 9.

Foram interpretadas no MVA três novas falhas: uma na extremidade sul do afloramento (falha 16), na região das zonas de bandas de deformação descritas por Maciel *et al.* (2017) e pela equipe do projeto de pesquisa (Figura 35); e outras duas no gráben central do afloramento (falhas 17 e 18). A falha 6 não foi interpretada no MVA.

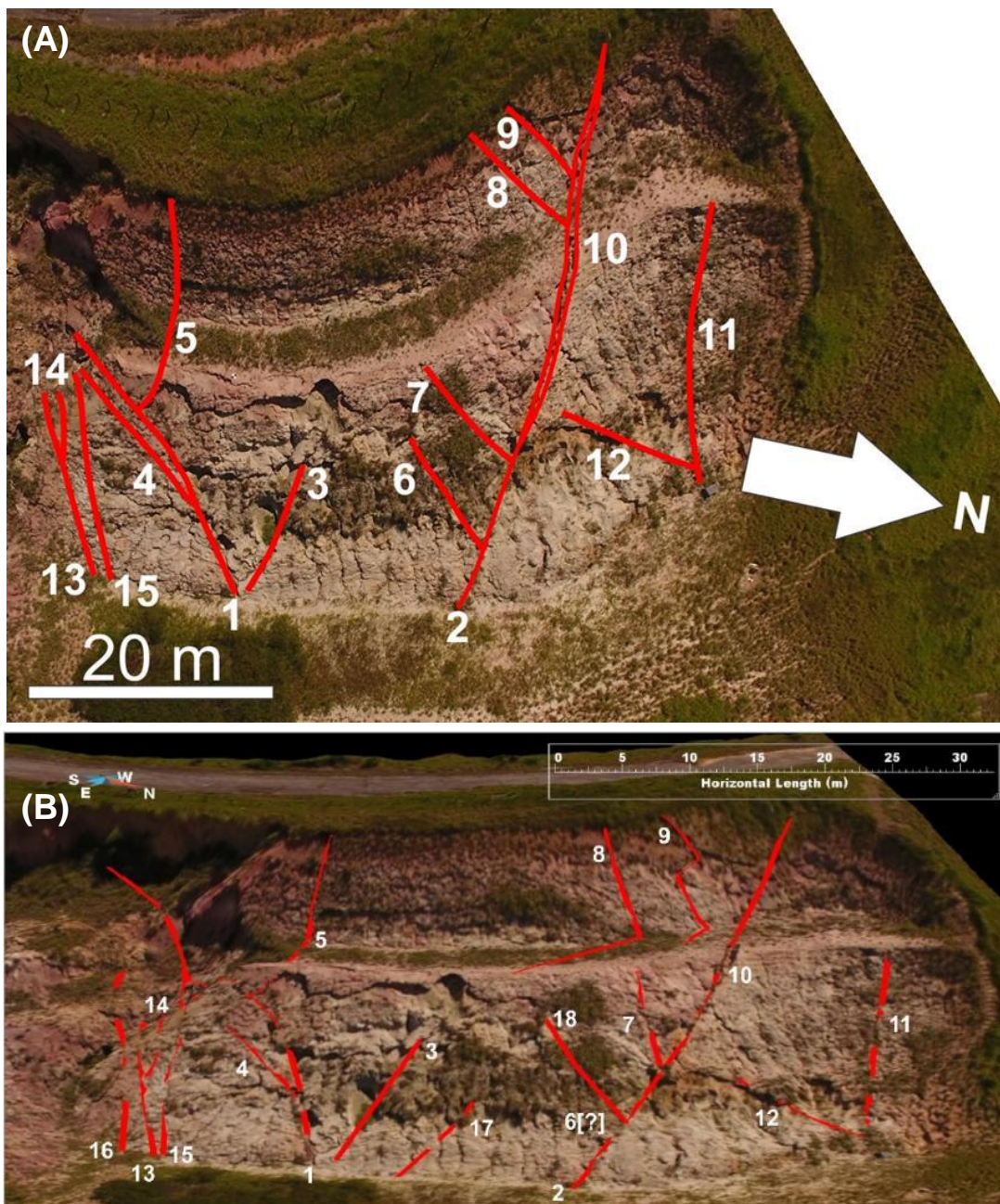


Figura 33 – Observam-se novas falhas na comparação entre (A) falhas interpretadas no ortofotomosaico e (B) falhas interpretadas no MVA.

Em relação aos horizontes estratigráficos, dois foram incluídos (horizontes α e β) e outros foram alterados (horizontes 7 e 8) - Figuras 34 e 35; Tabela 2.

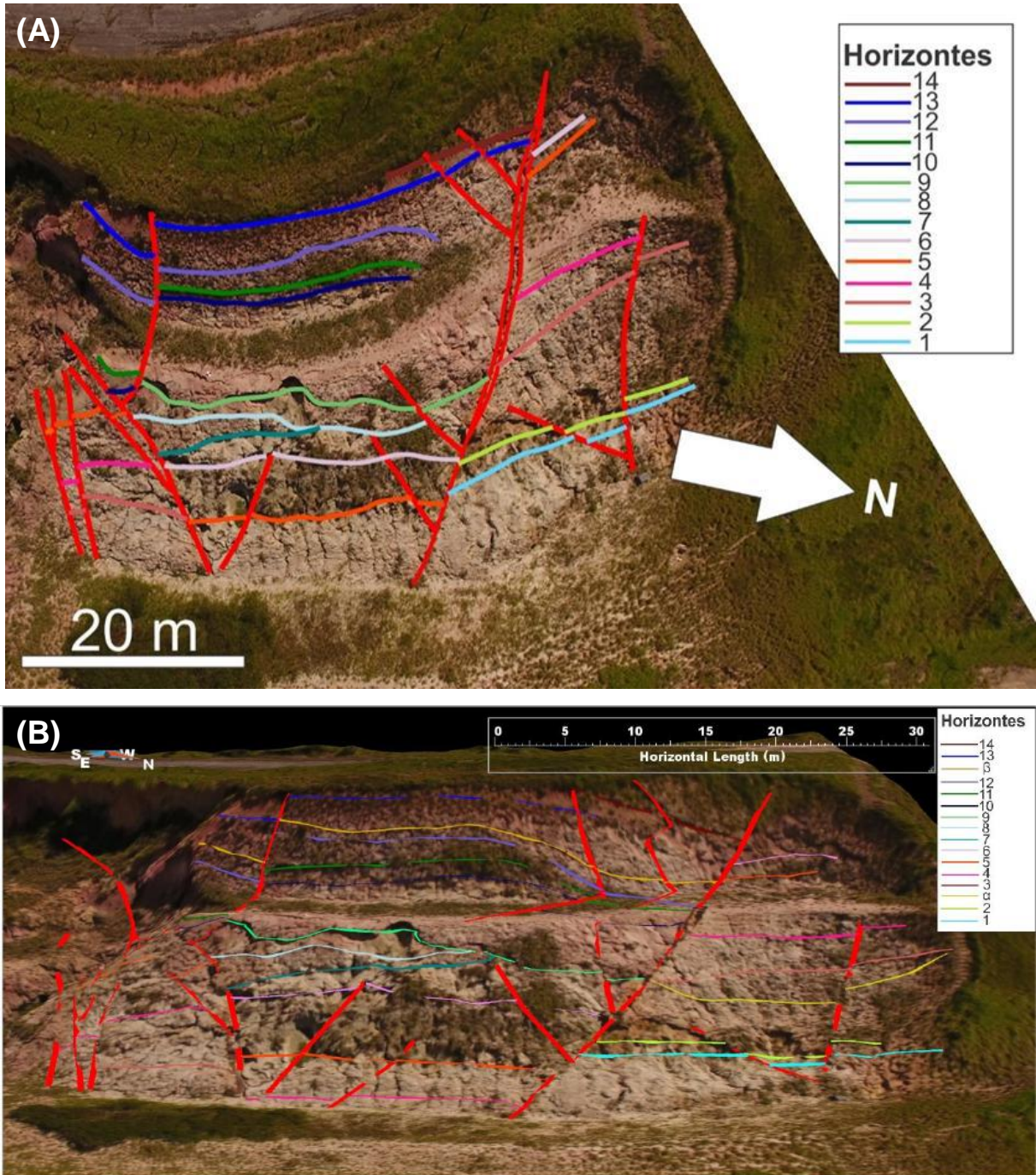


Figura 34 – Comparação entre (A) falhas e horizontes estratigráficos interpretados no ortofotomosaico e (B) falhas e horizontes estratigráficos interpretados no MVA.

Tabela 2 - Relações estratigráficas associadas aos horizontes reconhecidos no MVA, destacando os horizontes que não haviam sido interpretados no ortofotomosaico.

Horizonte	Descrição	Natureza do contato
14	Arenito (Formação Pinheiral) sobre argilito (Formação Resende)	Erosivo (discordante)
13	Argilito sobre arenito	Não erosivo
β	Arenito sobre arenito	Erosivo
12	Conglomerado sobre arenito	Erosivo
11	Conglomerado/arenito sobre argilito	Erosivo
10	Arenito sobre argilito	Erosivo
9	Arenito/conglomerado sobre argilito	Erosivo
8	Siltito/argilito sobre arenito	Não erosivo
7	Arenito grosso sobre arenito fino	Erosivo
6	Arenito sobre argilito	Erosivo
5	Argilito sobre arenito/conglomerado	Não erosivo
4	Arenito sobre conglomerado	Não erosivo
3	Brecha intraformacional sobre arenito	Erosivo
α	Conglomerado/arenito sobre arenito/conglomerado	Erosivo
2	Conglomerado sobre arenito	Erosivo
1	Arenito grosso sobre arenito fino	Erosivo

Percebeu-se, de um modo geral, que houve um realce nos contrastes no MVA por conta de sua representação das diversas irregularidades naturais características da superfície do afloramento, geradas por erosões diferenciadas nos pacotes litológicos. Logo, apesar da diminuição da resolução espacial no MVA, foram encontradas mais estruturas em relação ao ortofotomosaico.

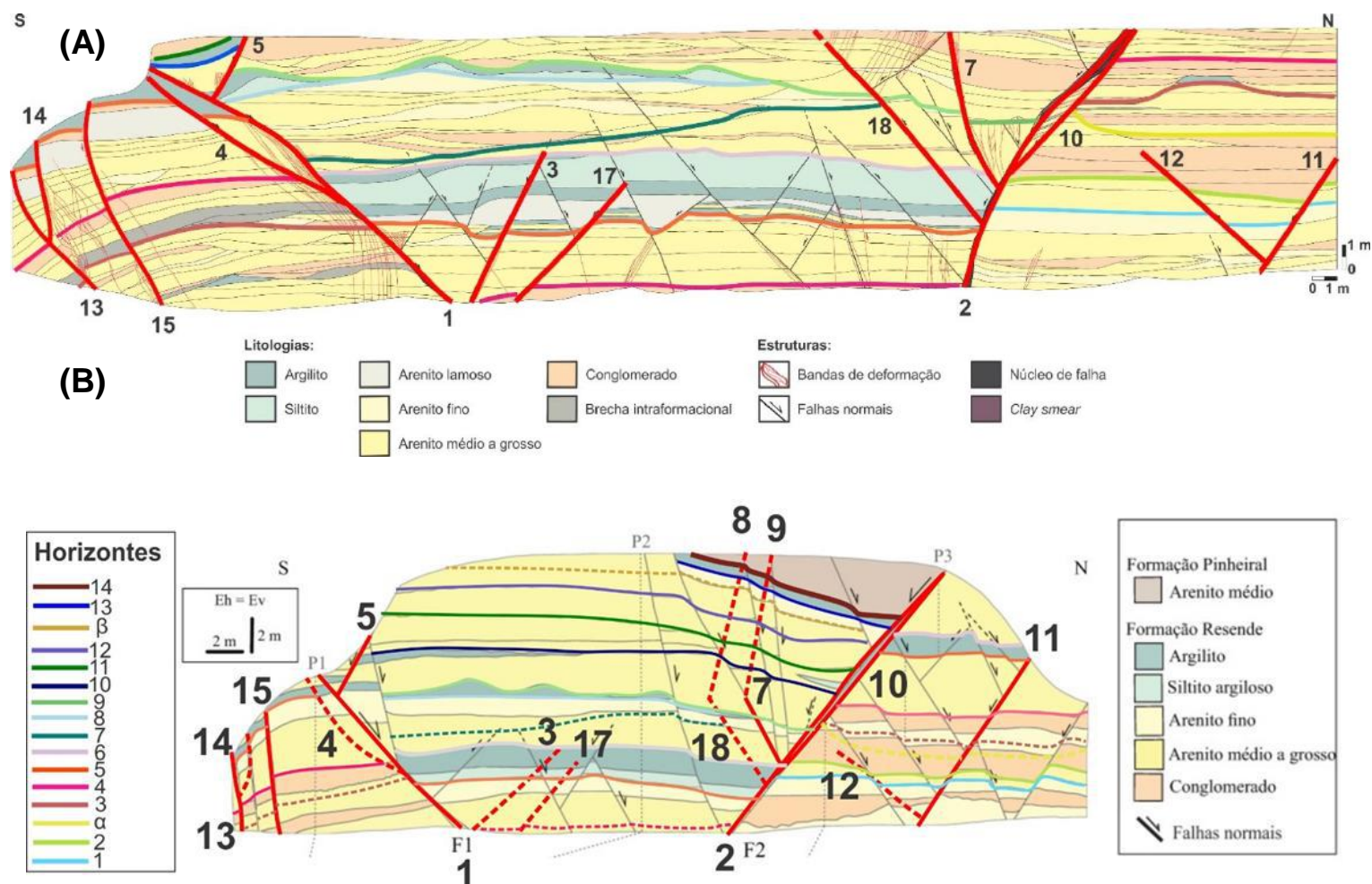


Figura 35 - (A) Correlação realizada entre estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretados no MVA e os registrados na seção geológica elaborada pela equipe do projeto de pesquisa para o talude inferior do afloramento (na escala original 1:50). (B) Correlação realizada entre estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretados no MVA e os registrados na seção geológica elaborada para o afloramento por Maciel *et al.* (2017), na escala original 1:100. As linhas tracejadas correspondem a estruturas tectônicas e horizontes estratigráficos interpretadas no=O ortofotomosaico sem correlação com a seção.

5.3. Modelo Geológico Tridimensional

O modelo geológico tridimensional final foi gerado com as falhas interpretadas no Modelo Virtual de Afloramento (MVA), exceto a falha 10. Optou-se por não incluí-la devido ao pequeno espaçamento em relação à falha 2, a qual ela está subordinada, o que resultaria em células distorcidas no modelo final. Foram desconsiderados também os horizontes α , 7 e 8, em virtude de serem de abrangência espacial limitada, estando restritos apenas a um determinado bloco, com geometria não retilínea e truncados por outros horizontes. O caráter limitado da distribuição desses horizontes não foi respeitado nas tentativas iniciais de modelagem geológica, uma vez que a coluna estratigráfica construída para este modelo considerou apenas superfícies em conformidade entre si, gerando camadas do tipo “*layer cake*”, com exceção da camada 14 (base da Formação Pinheiral). Outros modelos foram construídos, considerando algumas superfícies erosivas, não apresentaram resultados satisfatórios, devido à falta de informação em subsuperfície.

As projeções tridimensionais dos horizontes estratigráficos atenderam bem ao traçado geral interpretado no MVA. Porém, em alguns casos, como o do horizonte 9, o *software* retificou a geometria do plano projetado, em função de ter sido gerada uma nuvem de pontos simplificada na etapa de construção do horizonte no modelo, ou seja, a projeção desse horizonte não foi tão sinuosa quanto o traçado interpretado no MVA (Figura 36).

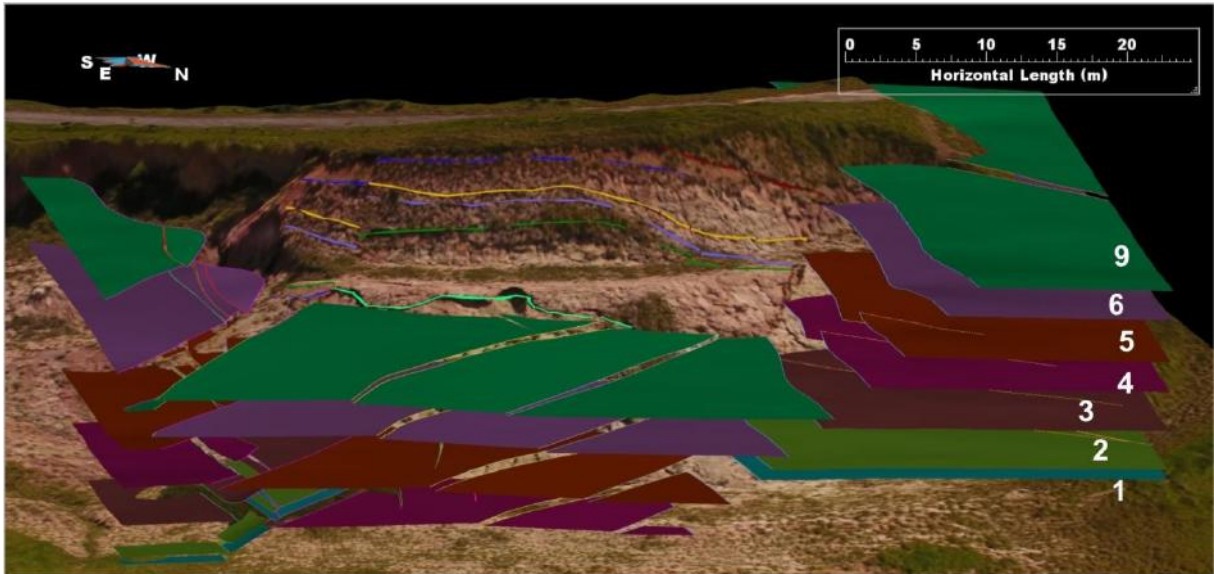


Figura 36 - Projeção 3D dos horizontes estratigráficos 1 a 9, destacando a simplificação do plano de projeção do horizonte 9 em relação ao traçado reconhecido na interpretação do MVA.

Com relação às falhas, como foi reunida uma quantidade significativa de informações sobre suas atitudes e rejeitos, as projeções tridimensionais foram geometricamente coerentes, incluindo possíveis relações de interceptação em superfície e subsuperfície (figuras 37 e 38). Entretanto, a projeção tridimensional da falha 12 foi considerada pouco satisfatória. Mesmo sendo mantida a relação de interceptação com a falha 11, a orientação da falha 12 não se mostrou coerente em comparação às outras falhas projetadas. Isso se justifica por se dispor de apenas uma medida geométrica, insuficiente para a construção de um plano. Para a projeção do plano da falha 12, a única medição de atitude que estava disponível foi pareada à média das medidas de atitude da falha mais próxima com direção de *strike* e caimento similares no afloramento, como, por exemplo, a falha 7.

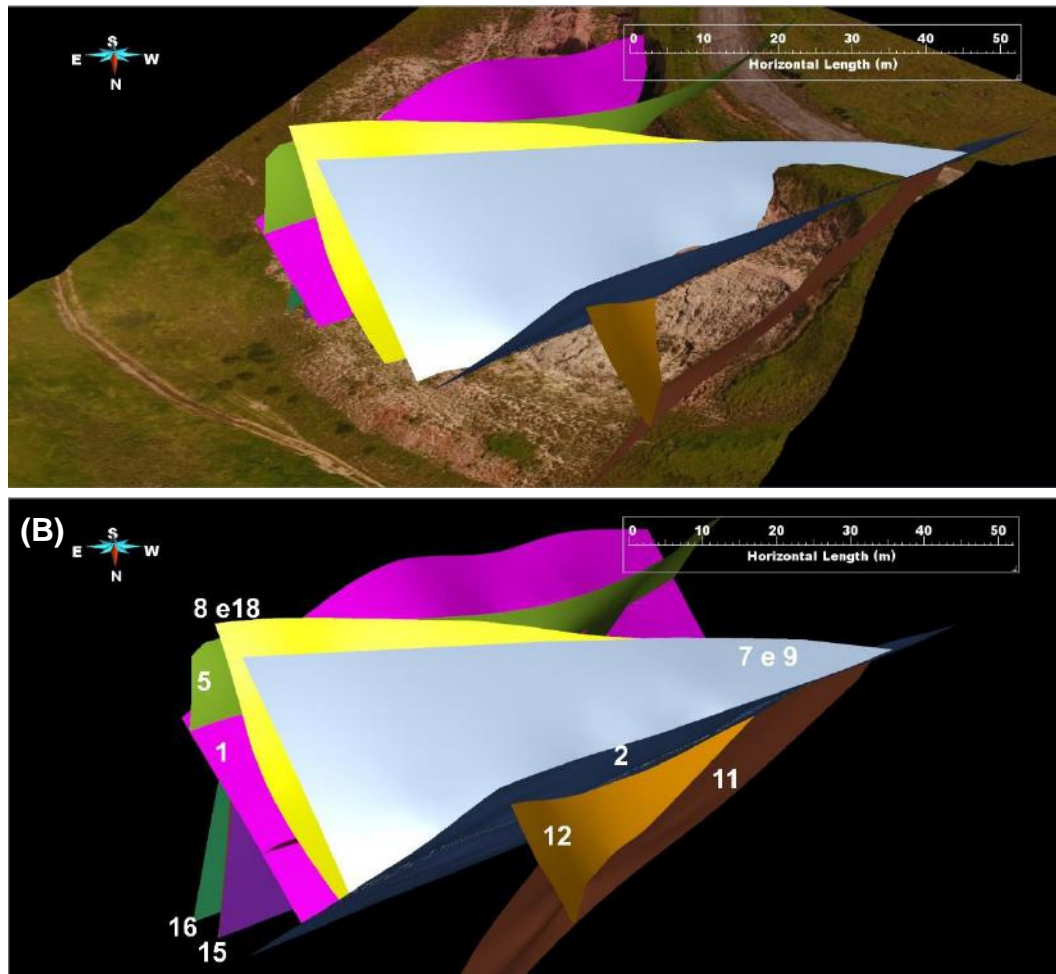


Figura 37 - Arranjo tridimensional das falhas (enumeradas seguindo a correlação com as seções em escala 1:50 e 1:100). Vista a partir de N sobre o MVA (A) e sem o MVA como plano de fundo (B).

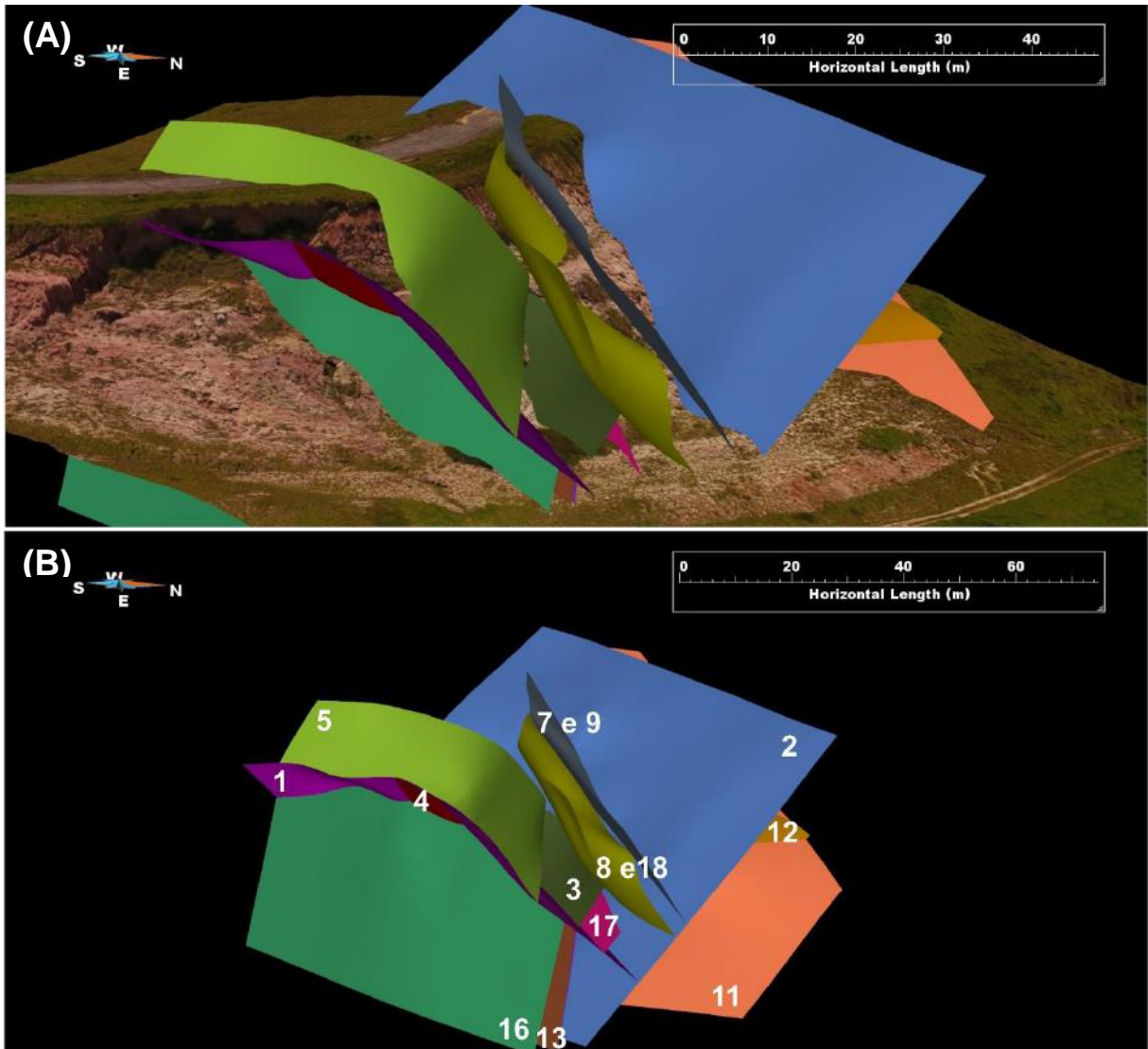


Figura 38 - Arranjo tridimensional das falhas (enumeradas seguindo a correlação com as seções em escala 1:50 e 1:100). Vista a partir de SE, sobre o MVA (A) e sem o MVA como plano de fundo (B).

Na Figura 39 é possível observar todos os horizontes estratigráficos e falhas projetados tridimensionalmente (em superfície e subsuperfície), ilustrando a compartimentação dessas estruturas na trama de grábens, típica do afloramento.

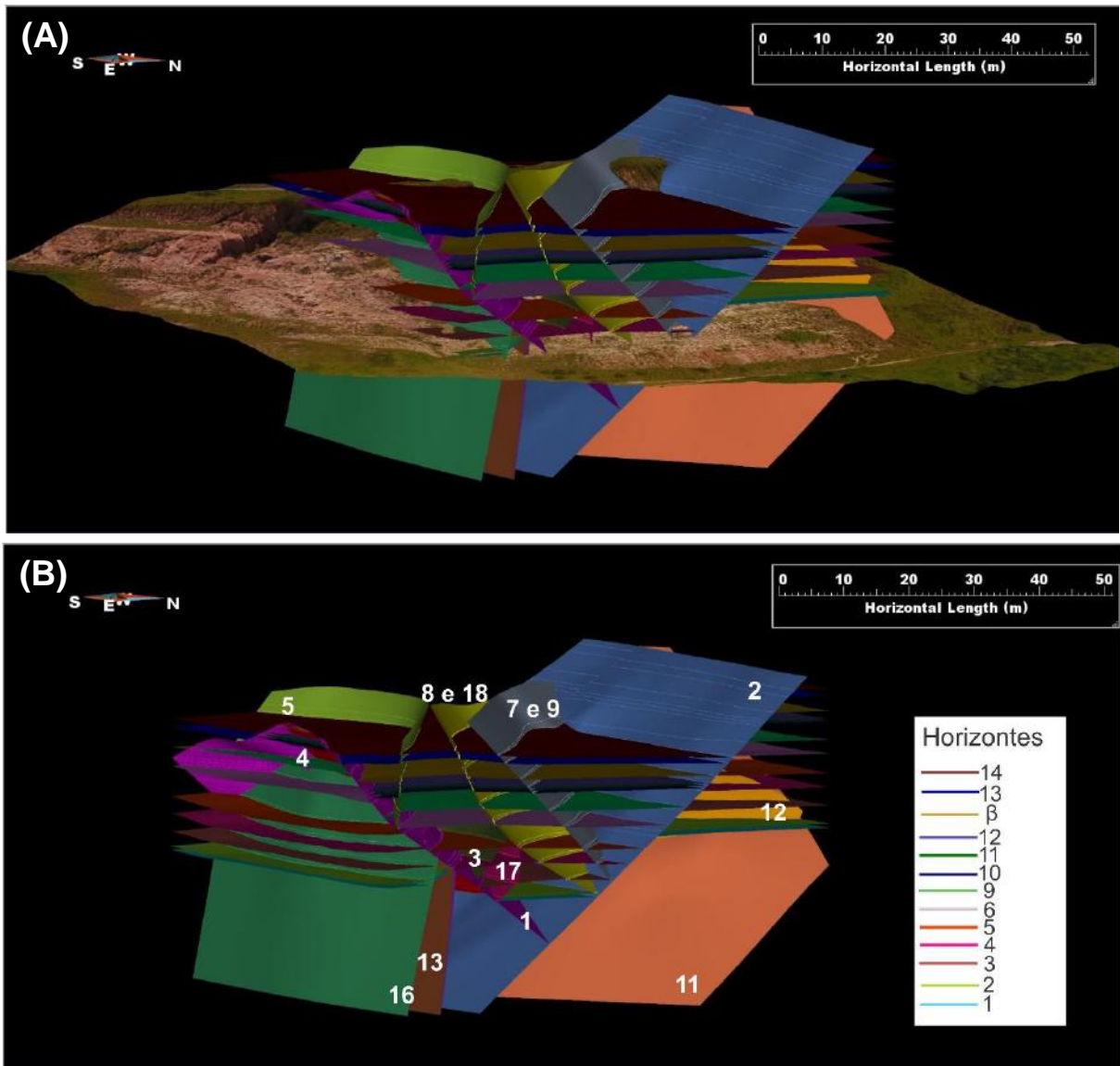


Figura 39 - Vista do afloramento a partir de Leste com todas as falhas falhas (enumeradas seguindo a correlação com as seções em escala 1:50 e 1:100) e horizontes estratigráficos projetados, sobre o MVA (A) e sem o MVA como plano de fundo (B), enfatizando a continuidade lateral dos horizontes ao longo do três blocos do afloramento.

O modelo geológico final representa de forma satisfatória a realidade do afloramento estudado, diante de sua complexidade. Pôde-se inferir o comportamento das falhas em subsuperfície, tornando possível a compreensão do modo como todas as falhas sintéticas e antitéticas convergem para a falha 2 (F2), considerada a de maior rejeito vertical (falha principal).

Nas figuras 40 e 41 são apresentadas várias visadas do modelo construído neste trabalho.

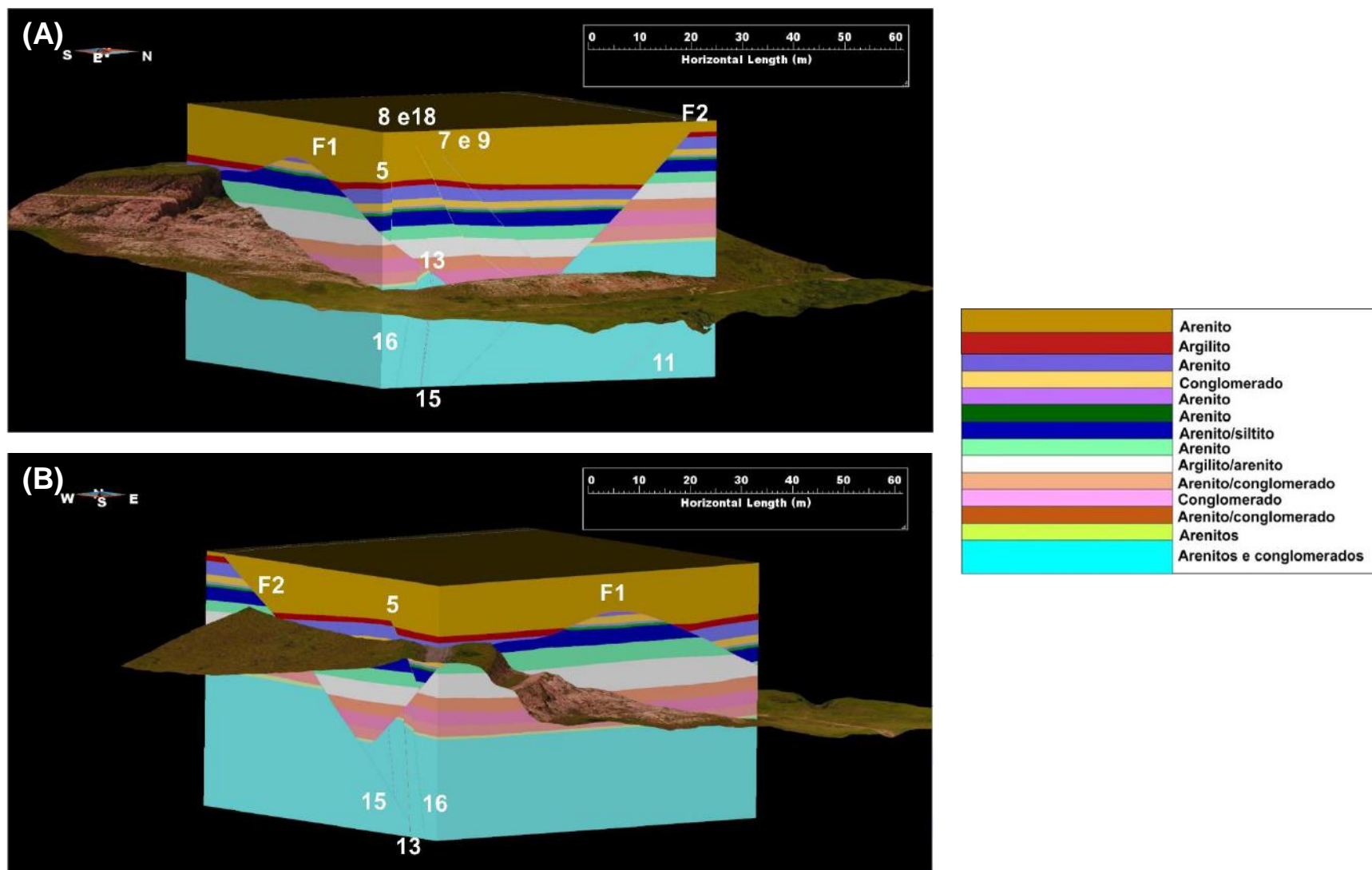


Figura 40 – (A) Visada de Leste para Oeste do modelo geológico final, com destaque para a conformação estrutural de geral do afloramento, exibindo as falhas interpretadas nos blocos sul e central. (B) Visada de Sul para Norte do modelo geológico final, destacando o bloco central em uma simulação da vista por trás do afloramento.

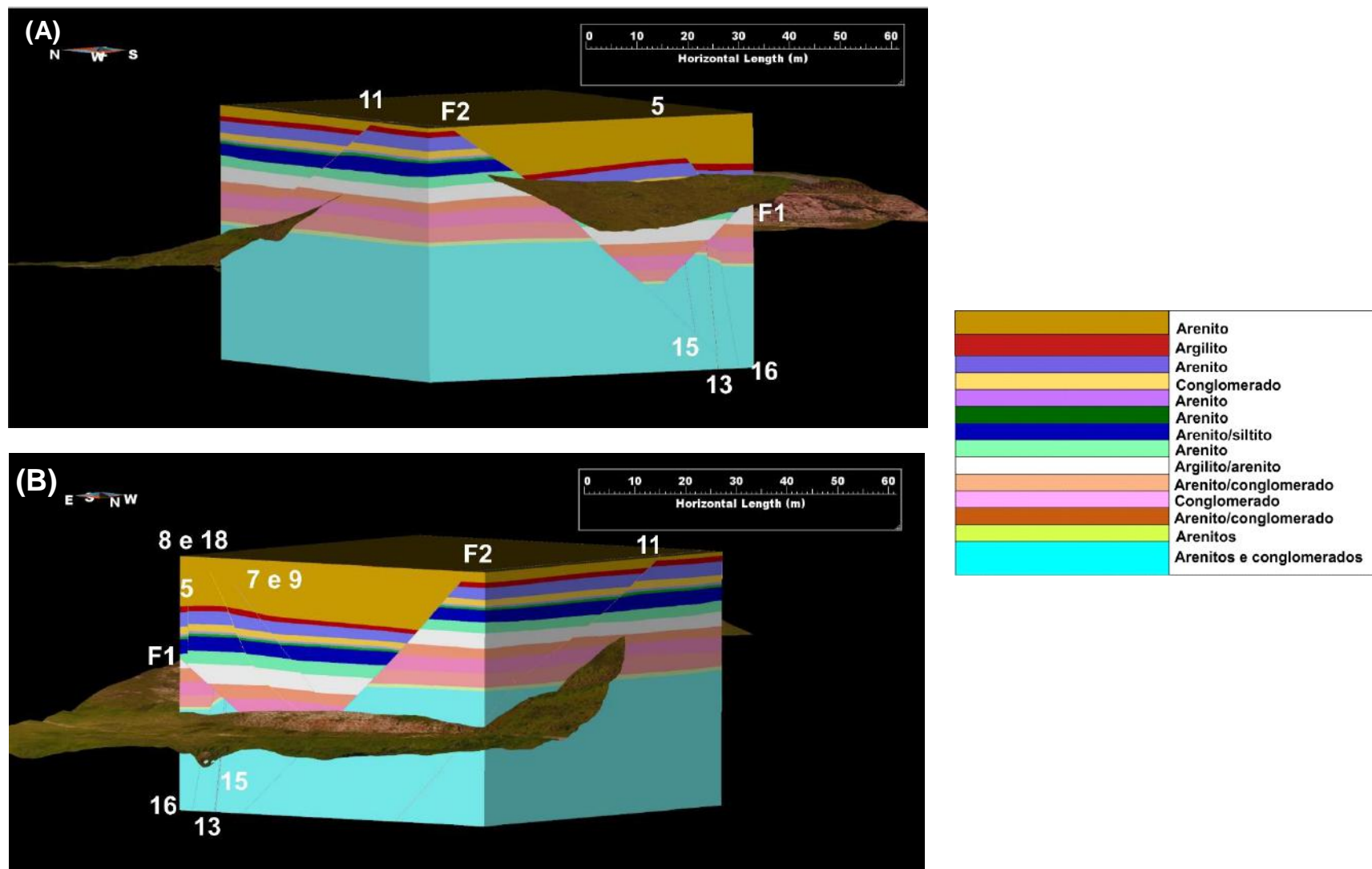


Figura 41 – (A) Visada de Oeste para Leste do modelo geológico final, com destaque para os rejeitos das falhas F1, F2 e 11, além de outras falhas menores. (B) Visada de Nordeste para Sudoeste do modelo geológico final, com destaque para o bloco norte do afloramento, para as falhas F2 e 11, e para a conformação de gráben do bloco central.

A seguir, sobre o MVA, são apresentadas três seções de orientação S-N geradas a partir do modelo, expondo a variação do arranjo estratigráfico e estrutural no sentido de Leste para Oeste (Figura 42).

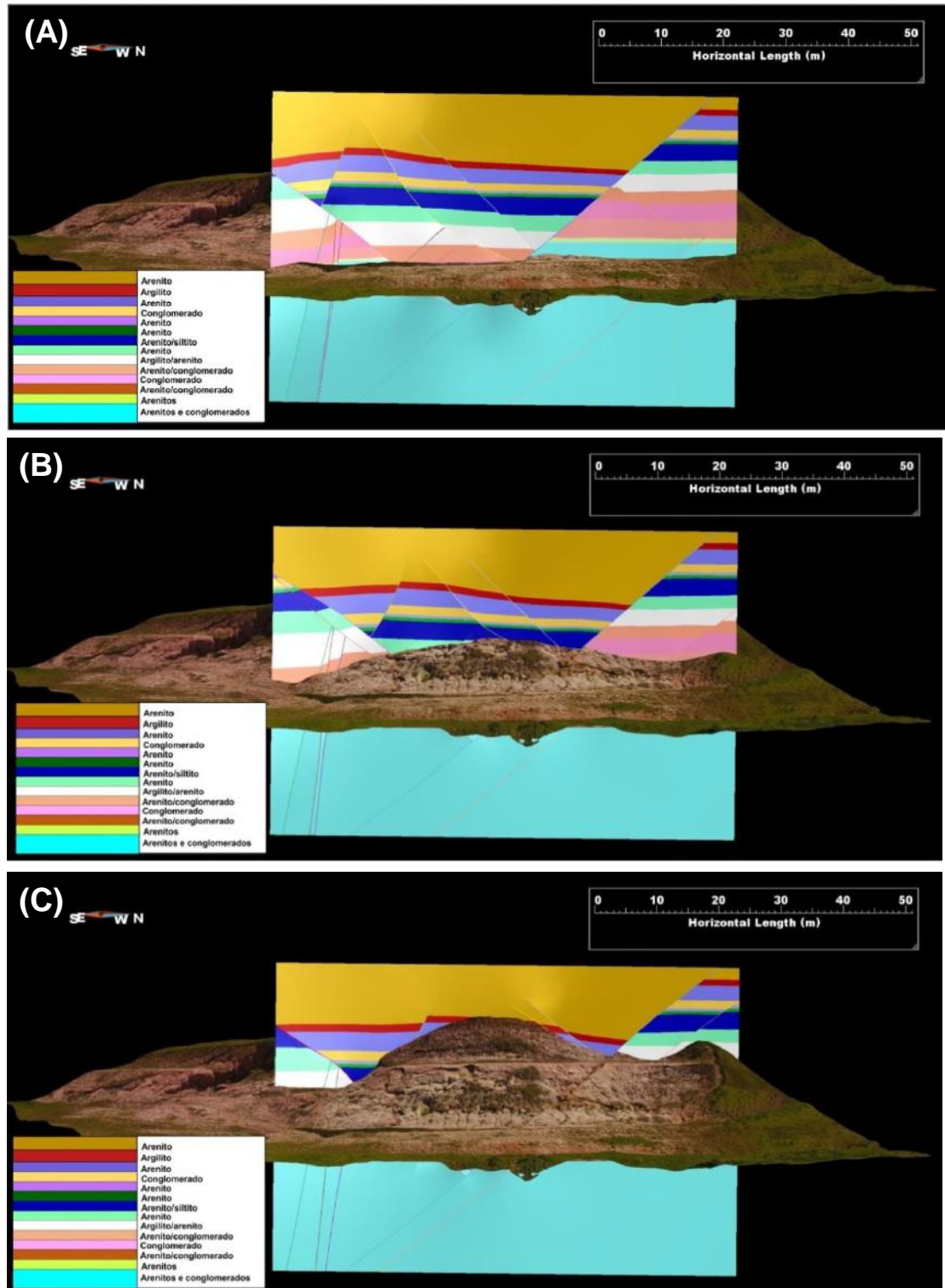


Figura 42 - Seções do modelo geológico ao longo do eixo J sobre o MVA, destacando o arranjo estratigráfico e estrutural através do volume modelado, partindo-se da visão frontal do afloramento (em A, seção J98) e avançando no sentido Leste, representando um deslocamento para o interior do afloramento (B, seção J68; e C, seção J34).

A Figura 43 e a Tabela 3 mostram as correlações entre as estruturas tectônicas e intervalos litológicos representados no modelo geológico final e as seções geológicas nas escalas 1:50 e 1:100.

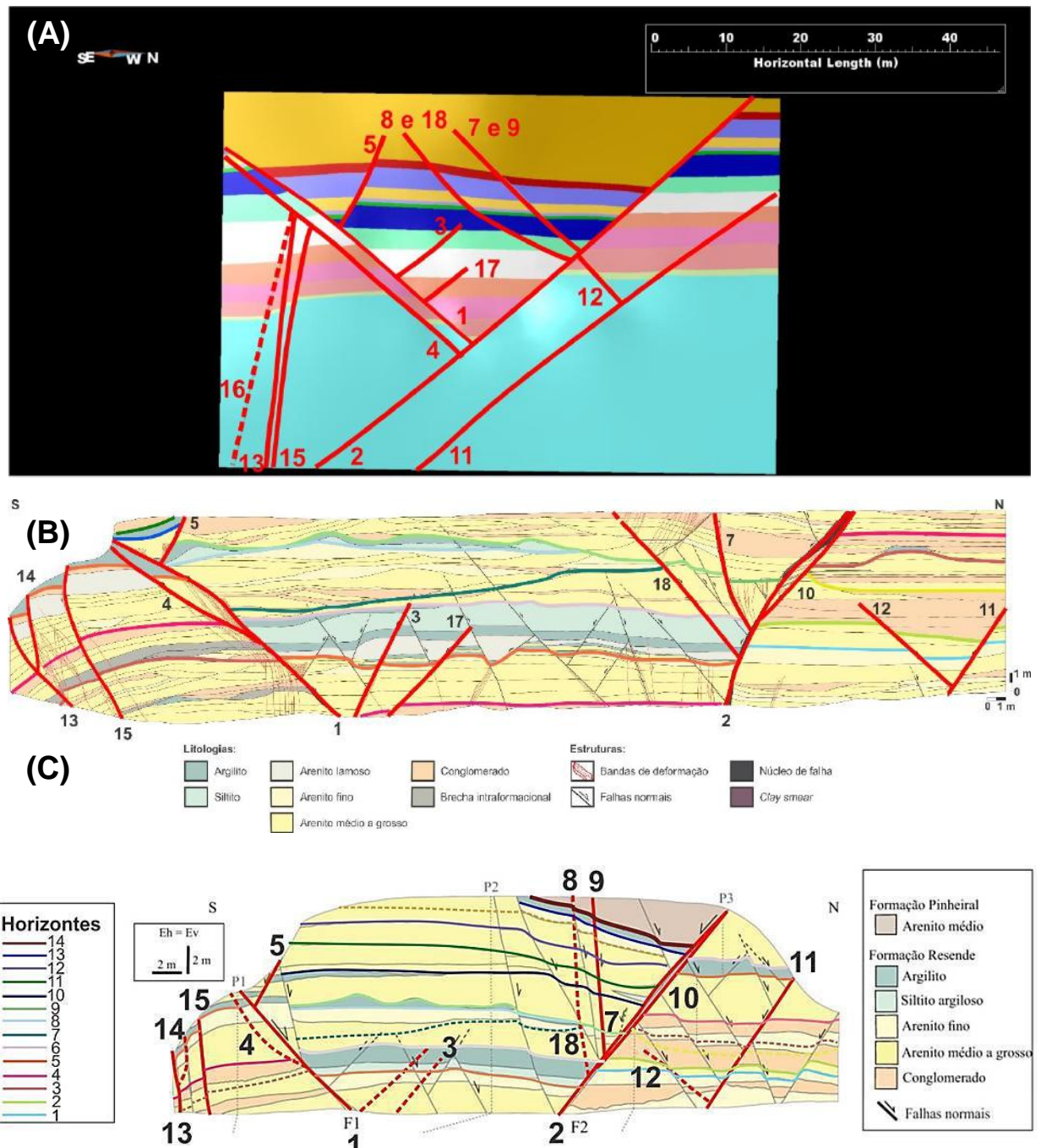


Tabela 3 - Intervalos litológicos representados no modelo geológico e sua correlação com os horizontes estratigráficos que limitam as bases desses intervalos (conforme identificados nas seções geológicas em escala 1:50 e 1:100).

Cor no modelo geológico	Descrição (litologias presentes)	Horizonte estratigráfico marcador da base
	Arenito (extrapolado)	14
	Argilito	13
	Arenito	β
	Conglomerado	12
	Arenito	11
	Arenito	10
	Arenito/siltito	9
	Arenito	6
	Argilito/arenito	5
	Arenito/conglomerado	4
	Conglomerado	3
	Arenito/conglomerado	2
	Arenito	1
	Grande pacote de arenito/ conglomerado (extrapolado)	(limite inferior do modelo)

Apesar de ficar clara a simplificação do modelo frente à seção 1:100 e principalmente à seção 1:50, observou-se que estão destacados os atributos geológicos importantes do afloramento, como, por exemplo, a feição característica de gráben e a disposição dos horizontes estratigráficos perante as falhas no espaço tridimensional.

6. CONCLUSÕES

Durante a interpretação do ortofotomosaico, a resolução espacial foi um grande facilitador, pois se pôde aumentar a escala de observação (*zoom*) sem haver distorção da imagem, otimizando a visualização de contrastes entre materiais, bem como aberturas e cicatrizes. Um obstáculo enfrentado na interpretação bidimensional, principalmente em relação à interpretação estrutural, foi a projeção da superfície irregular do afloramento em um plano 2D. Como exemplo, houve prejuízo para definição da continuidade do traçado de um plano de falha ao longo do afloramento, uma vez que muitas falhas tendiam a atravessar três planos com inclinações diferenciadas, começando pelo talude inferior, prolongando-se pela berma em direção ao talude superior. Essa divisão básica do afloramento, aliada à interface estática do *software* de visualização, gerou uma interpretação com falhas fragmentadas, ou seja, traçados interpretados como diferenciados no talude inferior e no talude superior do afloramento, na verdade se tratavam da projeção de uma única falha em superfícies com angulações diferentes.

O MVA propiciou uma ótima simulação digital do afloramento e permitiu uma interpretação mais detalhada, porém a diminuição da resolução realizada pelo *software*, com consequente pixelização, trouxe alguma dificuldade para a interpretação geológica, por limitar o aumento da escala de observação. Uma possível solução para essa situação é uso de *hardware* mais potente associado a *softwares* específicos para esse tipo de interpretação. No estudo aqui realizado, tal limitação foi contornada por conta da tridimensionalidade embutida ao MVA, aliada às ferramentas exploradas no aplicativo. A tridimensionalidade realçou a rugosidade da superfície do afloramento, deixando mais claros os contrastes entre os materiais, aberturas e cicatrizes no terreno, ao passo que a presença de ferramentas de estimativa de distâncias no *software* auxiliou na correlação com as seções geológicas disponíveis em escala 1:50 e 1:100, possibilitando a estimativa dos rejeitos verticais e espessuras de camadas, ao se utilizar de qualquer ponto nas superfícies como referência. A liberdade de movimentação dos planos de visualização no MVA, juntamente à inserção no *software* das medidas de atitudes retiradas em campo, também permitiu resolver a questão da continuidade do traçado dos planos das falhas nos diferentes taludes do afloramento.

De maneira positiva, o Modelo Virtual de Afloramento possui potencial para a extração de informações que podem ser adquiridas no afloramento real, principalmente considerando as estruturas tectônicas, pois neste trabalho foi observada uma boa correlação com as seções geológicas realizadas em escala 1:50 e 1:100. Das 28 falhas presentes na seção detalhada (em escala 1:50), foi possível identificar, juntamente com uma falha fora dos limites das seção, 13 delas no MVA, o que é aqui considerado um número expressivo.

O modelo geológico construído pode ser visto como uma representação simplificada, porém satisfatória, da realidade do afloramento estudado, sendo um meio expositivo de compreendê-lo e podendo ser usado como forma de entendimento do comportamento das camadas e estruturas tectônicas diante da irregularidade da superfície e de sua geometria curva.

A partir do modelo, observou-se que o MVA foi suficiente para se extrair e correlacionar informação geológica em relação à superfície do afloramento estudado. Uma parte desses dados da superfície pôde ser extrapolada para subsuperfície em condições ideais como, por exemplo, a presença de continuidade lateral e de espessuras constantes. Porém, deve-se levar em consideração a inclusão de mais dados de subsuperfície no modelo geológico 3D para que seja feito o seu refinamento, principalmente em relação ao intervalo litológico mais basal, cuja espessura foi exagerada diante da falta dessas informações.

Para trabalhos futuros, sugere-se a inclusão de dados obtidos através de furos de sondagem (descrição de testemunhos e perfilagens geofísicas) para apoiar a inserção de propriedade de rocha no modelo, tais como litologia, porosidade, permeabilidade, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTOTTI, G.; HARDEBOL, N.; KOPPEN, J. K. T.; LUTHI, S. M. 2007. Toward a quantitative definition of mechanical units: new techniques and results from an outcropping deep-water turbidite succession (Tanqua-Karoo Basin, South Africa). **AAPG Bulletin**, 91(8): 1085–1098.

DELGADO, I. M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L. C. 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (eds.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas e SIG**. Brasília: CPRM, 4 CD-ROM, p. 227 - 334.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A. 2004. A Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (eds.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Editora Beca, p. 203-234.

HOWELL, J. A.; MARTINIUS, A. W.; GOOD, T. R. 2014. **The application of outcrop analogues in geological modelling**: A review, present status and future outlook, in Martinius, A. W.; Howell, J. A.; Good, T. R. (Eds.), *Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface*: The Geological Society 387, 1–25.

Jones, R. R.; Pringle, J. K., McCaffrey K. J.W.; Imber, J.; Wightman, R. H.; Guo, J.; Long, J.J. 2011. **Extending Digital Outcrop Geology into the Subsurface**. In: Martinsen, O. J.; Pulham, A. J.; Haughton, P. D. W.; Sullivan, M. D. (eds.). *Outcrops Revitalized: Tools, Techniques and Applications*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, v.10, p. 31-50.

LIMA, L. F. A. 2017. **Confecção de uma ortofotoplanta planialtimétrica cadastral pelo método da aerofotogrametria digital utilizando imagens obtidas por VANT e comparação dos resultados com no método de topografia tradicional**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro. 151 p.

MCCAFFREY, K. J. W.; JONES, R. R.; HOLDSWORTH, R. E.; WILSON, R. W.; CLEGG, P.; IMBER, J.; HOLLIMAN, N.; TRINKS, I. 2005. Unlocking the spatial dimension: digital technologies and the future of geoscience fieldwork. Londres: Geological Society of London, **Journal**, v.162, p. 927–938.

MACIEL, I. B. 2016. **Caracterização da Deformação Rúptil em Afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda (Estado do Rio de Janeiro)**. Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 80p.

MACIEL, I. B.; MELLO, C. L.; SILVA, A. T. 2017. Caracterização da deformação rúptil em afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro. **Geol. USP, Sér. cient.**, 17(3): 113-124.

MARQUES, C. C. S.; MELLO, C. L.; RAMOS, R. R. C. 2006. **Análise Multiescalar de Atributos Sedimentares em Depósitos Fluviais Paleogênicos da Bacia de Volta Redonda, RJ.** Anuário do Instituto de Geociências (Rio de Janeiro), v. 29, p. 168-198.

NEGRÃO, A. P. 2014. **Evolução Tectonossedimentar e Deformação Rúptil Cenozóica da Região da Bacia Sedimentar de Volta Redonda (Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil, RJ).** Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 249p.

NEGRÃO, A. P.; RAMOS, R. R. C.; MELLO, C. L.; SANSON, M. S. R. 2015. Mapa Geológico do Cenozoico da Região da Bacia de Volta Redonda (RJ, Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil): Identificação de Novos Grábens e Ocorrências Descontínuas, e Caracterização de Estágios Tectonossedimentares. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45: 273 - 291.

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**, v. 24, no. 3, p. 33-42.

RICCOMINI, C.; MELO, M. S.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; MIOTO, J. A.; HASUI, Y. Sobre a Ocorrência de um Derrame de Ankaramito na Bacia de Volta Redonda (RJ) e Sua Importância na Datação das Bacias Tafrogênicas Continentais do Sudeste Brasileiro. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 4, 1983. **Boletim de Resumos, Sociedade Brasileira de Geologia**, n. 1: 23 – 24, 1983.

RICCOMINI, C. 1989. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil.** Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 256p.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. 2004. **Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil.** In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; DAL RÉ CARNEIRO, C.; BRITO NEVES, B. B. (eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Editora Beca, p. 383 - 405.

SALVADOR, E. D. & RICCOMINI, C. 1995. Neotectônica do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). **Revista Brasileira Geociências**, São Paulo, 25 (3): 151 - 164.

SANSON, M. S. R. 2006. **Sistemas Depositionais Aluviais e Tectônica Cenozóica na Região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil.** Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 169p.

SANSON, M. S. R.; RAMOS, R. R. C.; MELLO C. L. 2006. **Bacias Sedimentares Brasileiras** - Bacia de Volta Redonda. Phoenix. 88: 1 - 6.

SCHMITT, R. S.; TROUW, R. A. J.; VAN SCHMUS, W. R.; PIMENTEL, M. M. 2004. Late Amalgamation in the Central Part of West Gondwana: New Geochronological Data and the Characterization of a Cambrian Orogeny in the Ribeira Belt – SE Brazil. *Precambrian Research*, 133: 29 – 61

SGAVETTI, M. Photostratigraphy of ancient turbidite systems. 1991. In: WEIMER, P.; LINK, M.H. **Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems** (Eds.). Springer: Nova Iorque, p. 107-126,

VAIL. P.R.; MITCHUM, R.M. & THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C.E. (Ed.) *Seismic stratigraphy – application to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir* 26: 63-81, 1977.

ANEXO

1. Imagem da tabela com as medidas de atitude *dip-dip* utilizadas na modelagem das estruturas tectônicas fotointerpretadas.

N.	Ponto	Coordenadas UTM (X,E)	Coordenadas UTM (Y,S)	Fuso	DATUM	Autor (ano)	Plano (Dip-dir)	Plano (dip)	Estria (Azimute)	Estria (Plunge)	Orientação do plano	Tipo de estrutura	Unidade afetada	Localização da estrutura na seção 1:50
83	Seção Sul - F1	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	316	58			N46E	falha	Fm. Resende	2
85	Seção Sul - F1	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	320	58			N60E	falha	Fm. Resende	3
86	Seção Sul - F1	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	342	54			N72E	falha	Fm. Resende	4
87	Seção Sul - F1	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	330	53			N60E	falha	Fm. Resende	5
88	Seção Sul - F1'	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	340	58			N70E	falha	Fm. Resende	6
89	Seção Sul - F1'	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	332	63			N62E	falha	Fm. Resende	7
91	Seção Sul - Graben	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	154	44			N54E	falha	Fm. Resende	9
101	Seção Sul - Graben	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	168	57			N78E	falha	Fm. Resende	17
104	Seção Sul - Graben	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	152	56			N62E	falha	Fm. Resende	19
103	Seção Sul - Graben	597428	7507066	23	WGS-84	Projeto (2017)	130	60			N40E	falha	Fm. Resende	20
133	Seção Norte - Graben	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2017)	313	75			N53E	falha	Fm. Resende	32
152	Seção Norte - Graben	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2017)	327	78	327	78	N57E	falha	Fm. Resende	34
157	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2017)	150	60			N60E	falha	Fm. Resende	35
166	Seção Sul - Graben	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2017)	330	80	330	80	N60E	falha	Fm. Resende	48
171	Seção Sul - F1	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	335	65	335	65	N65E	falha	Fm. Resende	50
172	Seção Sul - F1'	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	320	55			N50E	falha	Fm. Resende	51
175	Seção Sul - F1	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	310	82			N40E	falha	Fm. Resende	53
176	Seção Sul - Graben	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	136	45			N46E	falha	Fm. Resende	54
178	Seção Sul - F1'	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	328	48			N58E	banda de deformação	Fm. Resende	56
184	Seção Norte - Graben	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	328	68			N58E	fratura	Fm. Resende	61
186	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	153	60	153	60	N63E	falha	Fm. Resende	62
187	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	153	58	153	58	N63E	falha	Fm. Resende	63
188	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	160	60	160	60	N70E	falha	Fm. Resende	64
189	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	165	52			N75E	falha	Fm. Resende	65
190	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	164	58			N74E	falha	Fm. Resende	66
191	Seção Norte - F2	597428	7507066	23	WGS-91	Projeto (2018)	134	55			N44E	falha	Fm. Resende	67