

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

ARTHUR VILELA ORTIZ

**Turbiditos em Modelos Virtuais de Afloramentos: Aplicações em Trapas
Estratigráficas e/ou estruturais**

CURITIBA
2024

ARTHUR VILELA ORTIZ

**Turbiditos em Modelos Virtuais de Afloramentos: Aplicações em Trapas
Estratigráficas e/ou estruturais**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Paraná como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Orientadora: Prof^a Dr^a Carolina
Danielski Aquino

Co-orientadora: Prof^a Dr^a Victoria
Valdez Buso

CURITIBA

2024

Dedico esse trabalho de conclusão de curso a todos e todas que não puderam ter a mesma oportunidade. Espero conseguir retornar todo o investimento como forma de contribuir para que cada vez mais pessoas consigam mudar suas vidas por meio da educação pública, emancipadora e de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a essa estimada instituição, UFPR, por me fornecer as ferramentas necessárias para que fosse possível um menino da Vila Osternack estar concluindo uma graduação como a de Geologia. Instituição essa que apesar dos planos de sucateamento possui, discentes, docentes, técnicos e servidores que seguem firmes na luta por um ensino emancipador, público e de qualidade para todas, todes e todos. A esses os meus mais sinceros agradecimentos.

Nessa toada gostaria de agradecer a todos os docentes que me transmitiram seus conhecimentos, sejam geológicos ou de vida, ao longo desses anos. Em especial, minha orientadora Prof^a Dr^a Carolina Danielski Aquino que vem me orientando da melhor maneira possível desde o programa de iniciação científica, o qual ingressei com objetivo de me tornar um cientista da terra e estou logrando êxito com este documento. A minha coorientadora, Prof^a Dr^a Victoria Valdez Buso, pela assistência ao longo desse processo de escrita.

Não poderia esquecer jamais dos companheiros e companheiras de curso que estavam ao meu lado nesses 7 anos de caminhada. Sinto que ao menos um pouco de cada um eu carrego dentro do coração. Dentre todos e todas quero trazer considerações especiais sobre alguns: Celeste Bertassoni, a menina que conheci no primeiro dia de aula lá no CEGEP e que desse dia até hoje somos melhores amigos, muito obrigado por tudo, principalmente pelos seus resumos; Cristian Rodrigues, irmão que a geologia me deu, muito obrigado por todos os momentos e, principalmente, sentimentos compartilhados; Daniel Carminatti, desde o dia da matrícula sabia que nossa amizade vingaria e aqui estamos, muito obrigado por todas as conversas nos bons e nos maus momentos, e é claro, por todas as caminhadas até o Piratas pós Happy Hour; a Nathalia Krause, amiga e camarada, juntos nos desenvolvemos politicamente e crescemos enquanto pessoa.

Ao Centro Acadêmico dos Estudantes de Geologia do Paraná, à Executiva Nacional de Estudantes de Geologia e todas as pessoas que construíram essas entidades comigo. Iniciar na luta através do movimento estudantil me transformou como pessoa, e agora compreendo que o único caminho possível para uma nova sociedade é a luta!

Aos amigos e amigas dos 4 cantos do Brasil que a geologia me deu, seja através dos ENEGEIS, congressos e simpósios, e viagens de galera, meu muitíssimo obrigado por, mesmo longe, estarem sempre comigo.

Quero agradecer também aos meus amigos de fora do mundo geológico, Angelo Peixoto, Álvaro Rivas, Eduarda Marculan, Felipe Reis, Gabriel Vitor, Graziela Marculan, Iago Korello, Lucas Finkler, Marina Persegani, Milena Cramar e Tayane Tanello, por sempre perguntarem sobre geologia quando estamos em uma cachoeira ou fazendo uma trilha, por ouvirem com atenção a explicação mesmo parecendo grego para vocês e por se surpreenderem quando nem tudo é granito.

E por fim, o mais importante, minha família! Muito obrigado, Dona Osila, minha amada mãe, por sempre me apoiar nessa jornada, você foi o pilar que me sustentou ao longo desta difícil caminhada. Muito obrigado, Seu Marco, meu querido pai, por estar sempre disposto a me ajudar no que fosse preciso. Muito obrigado, Rebeca, minha maninha, por todos os momentos de descontração proporcionados. Muito obrigado, Dona Maria e Dona Maria, minhas avós, por todo conhecimento e ancestralidade passada. Muito obrigado, Juliana, minha companheira, a qual amo mil milhões, por descomplicar esse cubo mágico.

Não existe conquista individual, essa não seria a exceção à regra, pois sem todos e todas aqui citados ela não ocorreria.

RESUMO

O estudo da geologia requer uma grande riqueza de detalhes, pois é a partir deles que decisões importantes são tomadas, em especial na indústria de energia, onde se estudam rochas análogas que se apresentam em superfície com as de subsuperfícies dos possíveis alvos de interesse (p.e. reservatórios de hidrocarbonetos, de armazenamento de CO₂, aquíferos, entre outros). O certo é que existe uma grande necessidade de precisar ao máximo o conhecimento, para que os investimentos tenham o retorno esperado. Porém, o caminho para que se alcance este grau de detalhe de análogos em afloramentos muitas vezes é dificultado pela questão do acesso até o objeto de estudo. Existem exposições que possuem dezenas de metros de altura e são praticamente inviáveis para um estudo que traga clareza sobre suas condições geológicas. Outro impeditivo para alcançar o saber de uma área de interesse é a questão do deslocamento, que implica no financeiro de um projeto, exemplificando, se o afloramento que será estudado se encontra em uma região a qual só será realizada uma ida a campo, ou então, que não poderá ser visitada. Com isso, afloramentos virtuais utilizando a técnica do *Structure-from-Motion (SfM)* somada a de interpretação geológica a partir de *softwares*, como o *LIME*, pode vir a se mostrar como uma grande solução. A construção de modelos virtuais 3D de afloramentos (MVA) traz consigo a vantagem de uma melhor identificação das características do objeto de estudo devido ao seu amplo detalhamento, a qual pode representar estruturas estratigráficas centimétricas, muitas vezes milimétricas, com fidedignidade, possibilitando que se retorne ao local do afloramento sem que seja necessário o deslocamento. Esses métodos foram aplicados para dois afloramentos de depósitos turbidíticos. O afloramento Alto Forçação está localizado no município de Doutor Pedrinho, na porção norte do estado de Santa Catarina. Seu contexto geológico se insere na bacia do Paraná, compreendendo depósitos Permocarboníferos do grupo Itararé, mais especificamente a Fm. Rio do Sul e compreende a base da sequência 3 de acordo com estudos prévios. A outra área estudada está localizada em território francês, na região sudeste conhecida como *Provence-Alpes-Côte-D'azur*. O afloramento em questão se encontra cerca de 75 km a norte de Annot, próximo do *Trois-Échêvés*, e está inserido no contexto geológico da bacia de *Annot* formando uma unidade generalizada de turbiditos do Paleógeno depositados na bacia alpina do tipo *foreland*. Após gerados os modelos virtuais de afloramento foi possível reconhecer algumas terminações estratais ou *pinch-outs* das camadas, que ajudam na compreensão das trapas estratigráficas no contexto de hidrocarbonetos. A distinção das litologias foi de fácil interpretação, além de conseguirmos identificar outras estruturas como o diapirismo do folhelho ocasionado pela rápida sobreposição de material arenoso no sistema. Podemos chegar à conclusão que o uso de Modelos Virtuais de Afloramento auxiliam os estudos na área da indústria de energia, seja para exploração de hidrocarbonetos ou para armazenamento de CO₂ devido à grande gama de informações que são possíveis de serem coletadas.

Palavras-chave: Modelos Virtuais de Afloramento; Reservatório de Hidrocarbonetos; Trapas Estratigráficas.

ABSTRACT

The study of geology requires a lot of detail, as important decisions hinge on these details, particularly in the energy industry. Here, outcrops analogues found on the surface are studied in relation to subsurface formations of potential interests such as hydrocarbon reservoirs, CO₂ storage, aquifers, among others. Precise knowledge is crucial to ensure expected returns on investments. However, achieving detailed analog studies at outcrops is often hindered by accessibility issues. Some exposures can be tens of meters high, making it practically unfeasible to study their geological conditions in clarity. Another obstacle is the logistical challenge and costs involved in reaching study sites. For instance, if an outcrop is in a remote location requiring a single visit or no access at all, it complicates detailed geological assessment. Virtual outcrop models using Structure-from-Motion (SfM) combined with geological interpretation software like LIME present a promising solution. Building 3D Virtual Outcrop Models (VOM) allows for detailed identification of geological features, capturing centimeter- to millimeter-scale stratigraphic structures accurately. This approach enables revisiting outcrop details without the need for physical travel. These methods were applied to two turbidite deposit outcrops. One, located in Doutor Pedrinho, northern Santa Catarina, Brazil, is within the Paraná Basin, specifically within Permocarboniferous deposits of the Itararé Group, more precisely the Rio do Sul Formation, corresponding to Sequence 3 as per previous studies. The other study area is in southeastern France, in the Provence-Alpes-Côte-D'azur region, approximately 75 km north of Annot near Trois-Échêvés. This outcrop belongs to the geological context of the Annot basin, forming a generalized unit of Paleogene turbidites deposited in the Alpine foreland basin. Through virtual outcrop modeling, it was possible to identify stratigraphic terminations and pinchouts, aiding in the understanding of stratigraphic traps in hydrocarbon contexts. Lithology distinctions were easily interpreted, along with identifying structures such as shale diapirism caused by rapid overburden of sandy material. In conclusion, Virtual Outcrop Models are instrumental in energy industry studies, facilitating exploration of hydrocarbons and CO₂ storage by providing a wealth of detailed information that would otherwise be challenging to gather.

Keywords: Virtual Outcrop Models; Hydrocarbon Reservoirs; Stratigraphic Traps.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização do afloramento Alto Forcação. O município de Doutor Pedrinho está destacado em vermelho, enquanto o objeto de estudo está demarcado por um ponto amarelo. Fonte: Autor, 2024.....	8
Figura 2: Mapa de localização referente a região de estudo na França. Destacado em vermelho a Comuna de Annot, enquanto o afloramento estudado está demarcado com um ponto amarelo. Fonte: Autor, 2024.....	9
Figura 3: Estrutura de uma corrente de turbidez de acordo com Pickering et al., (1986).....	10
Figura 4: Seção esquemática de um sistema de canais-levees, onde os canais apresentam o processo de migração lateral e de aggradação. Autor, 2024.	11
Figura 6: [A] <i>Simple Onlap</i> , leitos paralelos, sem alteração significativa na espessura do leito. [B] <i>Draping Onlap</i> , as camadas viram para cima para correrem paralelamente à superfície sobreposta. [C] <i>Onlap</i> com espessamento de leito, camadas engrossando à medida que se aproximam do <i>onlap</i> . (Modificado de Gardiner, 2006).	13
Figura 7: [A] Trapa estrutural em dobra anticlinal. [B] Trapa estrutural associada a falha. [C] Trapa estratigráfica relacionada à discordância. Fonte: Autor 2024.....	14
Figura 8: Diagrama mostrando diferentes tipos de pinch-outs que podem gerar trapas estratigráficas em sistema turbidítico marinho profundo (modificado de Amy, 2019).	15
Figura 9: Diagrama simplificado da relação profundidade versus densidade do CO ₂ . Fonte: Ringrose P., 2020.....	17
Figura 10: Modelo do drone utilizado para captura das imagens.	19
Figura 11: Modelo virtual de afloramento dos turbiditos de Doutor Pedrinho (SC) - Alto Forcação.	22
Figura 12: Modelo virtual de afloramento dos turbiditos na bacia de Annot (França).	22
Figura 13: Diapirismo do folhelho. Scale Bar possui 3 metros.	23
Figura 14: [A] Onlap identificado no MVA. Scale Bar possui 2 metros. [B] Imagem a partir de fotografia em campo interpretada da mesma feição retirada do trabalho Os Primeiros Turbiditos do Brasil (Vesely et al, 2021).....	24

Figura 15: Intercalação de corpos areníticos e corpos pelíticos com presença de estruturas de carga. Setas indicando a estrutura e a deformação do folhelho que decorre dela. Scale Bar possui 3 metros.....	25
Figura 16: [A] Estruturas de carga resultantes da deformação dos sedimentos moles identificada no MVA. [B] Deformação de sedimentos moles em grande escala. (Modificado de Fallgatter, 2024).....	25
Figura 17: Espessamento ascendente dos corpos turbidíticos e variação interna de espessura de uma mesma camada. Scale bar possui 5 metros.	26
Figura 18: Coluna estratigráfica elaborada no MVA onde é possível separar a sequência 2, folhelho Lontras, da sequência 3, corpos areníticos definido previamente no trabalho de Aquino et.al., 2016. No modelo interpretado, é possível notar na base o acunhamento das camadas de arenitos em direção ao diapiro do folhelho, e o padrão de engrossamento para o topo da sucessão.	27
Figura 19: Afloramento virtual indicando possibilidade de reservatório devido a sequência estratigráfica: arenitos em contexto de trapa mista (estratigráfica e estrutural) seguido por camadas de rochas potencialmente de baixa permeabilidade (folhelhos e ritmitos delgados) que pode se configurar como uma rocha selante. Scale bar possui 20 metros.....	28
Figura 20: Falha normal, em amarelo, identificada no MVA. Scale bar possui 10 metros.	29
Figura 21: Camadas de arenito sofrendo um acunhamento progressivo, da porção axial do canal 275cm afinando até atingir 100cm na região próxima à margem. Scale Bar possui 5 metros.	30
Figura 22: Geometrias das camadas de turbiditos conhecidas como pinch-outs - acunhamento. Scale bar possui 20 metros.	30
Figura 23: [A] Acunhamento deposicional das camadas de arenitos sem falha associada (modificado de Amy, 2019). A cor amarela representa a litologia enquanto a verde os hidrocarbonetos. [B] Acunhamento das camadas turbidíticas no afloramento Alto Forcação de Dr. Pedrinho/SC.	33
Figura 24: [A] Modelo virtual do afloramento de Annot, França, onde é possível observar a erosão dos depósitos sotopostos. [B] MVA interpretado evidenciando as geometrias de pinch-out geradas pelo preenchimento das correntes de turbidez. ...	35

Figura 25: Acunhamento das camadas de arenito. [A] Espessura da porção axial do canal 275cm afinando até atingir 100cm na região próxima à margem. [B] Espessura da porção axial do canal 340cm afinando até atingir 145cm na região próxima à margem. A scale bar possui 5 metros para ambas as imagens.	35
Figura 26: [A] Trapa com falha normal associada (modificado de Amy, 2019). A cor amarela representa a litologia enquanto a verde os hidrocarbonetos. [B] Falha normal deslocando os arenitos de Annot.	36

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1: Passo a passo da utilização do software Agisoft Metashape Pro.....	20
Fluxograma 2: Passo a passo da utilização do VRGeoscience.	21

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 e 2: [A] Afloramento Alto forçação, Santa Catarina, Brasil, pertencente ao grupo Itararé, Formação Rio do Sul. [B] Afloramento de Tete d'I Estrope, Provence-Alpes-Côte-D'azur, França, pertencente à bacia Gre`s d'Annot.	7
--	---

LISTA DE ABREVIATURAS

P.e: Por exemplo

Dr. Doutor

MVAs: Modelos Virtuais de Afloramentos

Fig: Figura

BR: Rodovia Federal Brasileira

SC: Santa Catarina

GSD: *Ground Sample Distance*

CM: Centímetros

M: Metros

KM: Quilômetros

SfM: *Structure from Motion*

MVS: *Multi-View Stereo*

VRGS: *Virtual Reality Geological Studio*

OBJ: *Wavefront OBJ.*

PLY: *Polygon File Format*

SLPK: *Scene Layer Package*

DEM: *Digital Elevation Model*

ASPRS las: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Laser

GeoTIFF: *Geographic Tagged Image File Format*

2D: *Bidimensional*

3D: *Tridimensional*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1. CONTEXTO E PROBLEMA.....	6
1.2. OBJETIVOS.....	7
1.2.1 Objetivo Geral.....	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 Localização e geologia das áreas.....	7
2. REVISÃO TEÓRICA.....	9
2.1 Turbiditos	9
2.2 Canais-Levees	10
2.3 Lobos	11
2.5 Trapas Estratigráficas e Estruturais	13
2.3 Reservatório de Hidrocarbonetos.....	15
2.4 Reservatórios de CO ₂	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4. RESULTADOS	21
4.1 Modelos Virtuais de Afloramento	21
4.2 Interpretação geológica do modelo virtual de afloramento dos turbiditos de Doutor Pedrinho (SC) - Alto Forcação	23
4.3 Interpretação geológica do modelo virtual de afloramento dos turbiditos de Annot (França).....	27
5. DISCUSSÃO	30
5.1 Importância dos MVA.....	30
5.2 Diferença de escala	32
5.3 Implicância para reservatórios	33
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	36
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E PROBLEMA

O estudo da geologia requer uma grande riqueza de detalhes, pois é a partir deles que decisões importantes são tomadas, em especial na indústria de energia, onde se estudam rochas análogas que se apresentam em superfície com as de subsuperfícies dos possíveis alvos de interesse (p.e. reservatórios de hidrocarbonetos, de armazenamento de CO₂, aquíferos, entre outros). O certo é que existe uma grande necessidade de precisar ao máximo o conhecimento, para que os investimentos tenham o retorno esperado.

Porém, o caminho para que se alcance este grau de detalhe de análogos em afloramentos muitas vezes é dificultado pela questão do acesso até o objeto de estudo. Existem exposições que possuem dezenas de metros de altura e são praticamente inviáveis para um estudo que traga clareza sobre suas condições geológicas (Freitas et al., 2021). Outro impeditivo para alcançar o saber de uma área de interesse é a questão do deslocamento, que implica no aspecto financeiro de um projeto, exemplificando, se o afloramento que será estudado se encontra em uma região a qual só será realizada uma ida a campo, ou então, que não poderá ser visitada.

Na realização desse projeto, ambas as adversidades foram enfrentadas, uma vez que os afloramentos possuem dimensões métricas, em especial sua exposição vertical, de difícil acesso, e restrições logísticas quanto às idas ao campo.

Todavia, com a implementação das tecnologias, como o auxílio de drones para a aquisição de fotografias georreferenciadas, somado a utilização de *softwares* de construção de Modelos Virtuais de Afloramentos (Buckley et al., 2019; Nesbit, 2019; Westoby, 2012) e programas de interpretação geológica, tais dificuldades podem ser amenizadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

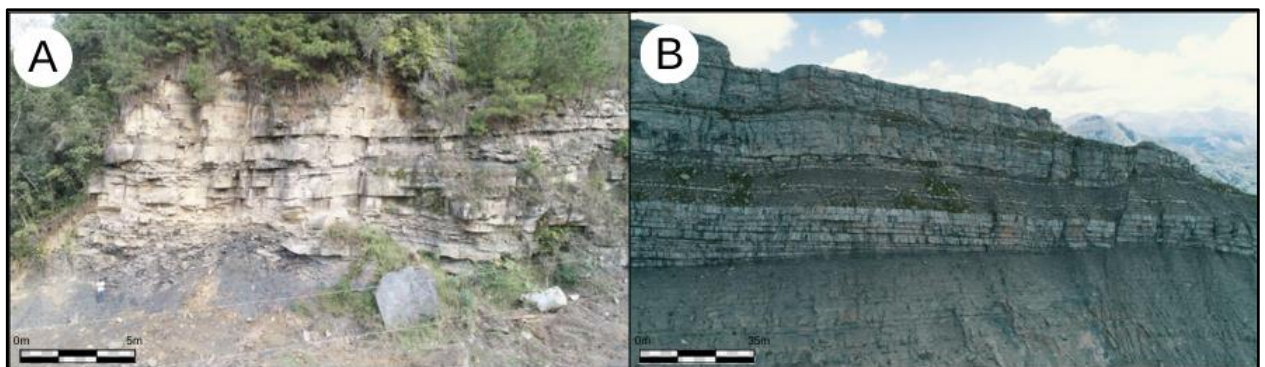
- Identificar, a partir de Modelos Virtuais de Afloramentos (MVAs) de sistemas turbidíticos, possíveis arranjos de trapas, sejam eles estratigráficos, estruturais ou a combinação dos dois, em diferentes escalas de observação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Gerar modelos virtuais de afloramento a partir de fotografias obtidas por drones de regiões que possuem um contexto geológico de geração de trapas estratigráficas e/ou estruturais.
- Analisar, em escala detalhada, os depósitos turbidíticos tanto em afloramento como de MVA da região de Doutor Pedrinho - SC.
- Analisar, em escala mais ampla, os depósitos semelhantes de um afloramento de grande extensão na região sul dos Alpes Marítimos, comuna localizada no sudeste da França, a partir de MVAs.
- Identificar e caracterizar as terminações estratais presentes nos modelos virtuais de afloramento.
- Identificar e caracterizar, com base nas informações obtidas pelos MVAs, os sistemas de trapas existentes nas diferentes escalas de observação e sua implicância para caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos e CO₂.

1.3 Localização e geologia das áreas

Os dois objetos alvo do estudo na presente pesquisa estão situados em diferentes localidades.



Fotografia 1 e 2: [A] Afloramento Alto forcação, Santa Catarina, Brasil, pertencente ao grupo Itararé, Formação Rio do Sul. [B] Afloramento de *Tete d'I Estrope*, *Provence-Alpes-Côte-D'azur*, França, pertencente à bacia *Trois-Échêvé*.

O afloramento Alto Forção está localizado no município de Doutor Pedrinho, na porção norte do estado de Santa Catarina. A região estudada se localiza a cerca de 185km de Curitiba - a capital paranaense está destacada em azul na Figura 1 - via BR 116. Graças à rede de rodovias e estradas o acesso ao afloramento é facilitado.

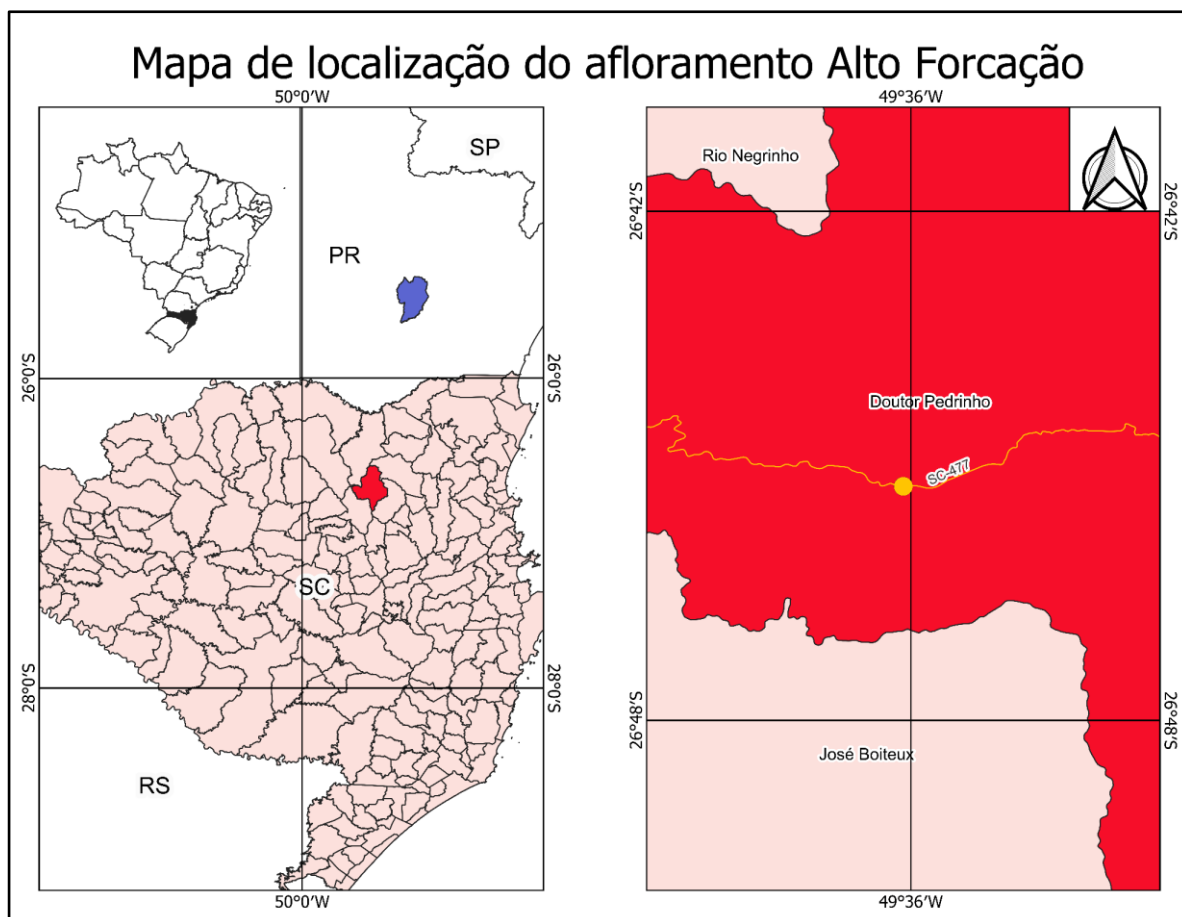


Figura 1: Mapa de localização do afloramento Alto Forção. O município de Doutor Pedrinho está destacado em vermelho, enquanto o objeto de estudo está demarcado por um ponto amarelo. Fonte: Autor, 2024.

Seu contexto geológico se insere na bacia do Paraná, abrangendo depósitos Permocarboníferos do Grupo Itararé, mais especificamente a Formação Rio do Sul (Schneider et al., 1974), e compreende a base da sequência 3 de Aquino et al. (2016).

A outra área estudada está localizada em território francês, na região sudeste conhecida como *Provence-Alpes-Côte-D'azur*. A Provença, que é conhecida em português como Riviera Francesa, faz fronteira com a Itália e é banhada pelo Mar Mediterrâneo. Annot, a cidade destacada em vermelho na Figura 2, é a região que dá o nome da bacia sedimentar estudada, ela se localiza no interior da Provença, estando a cerca de 90 km de Nice, cidade destacada em azul na Figura 2. O afloramento em

questão se encontra cerca de 75 km a norte de Annot, próximo do *Massif Trois-Échêvé*, um dos altos dos alpes franceses.

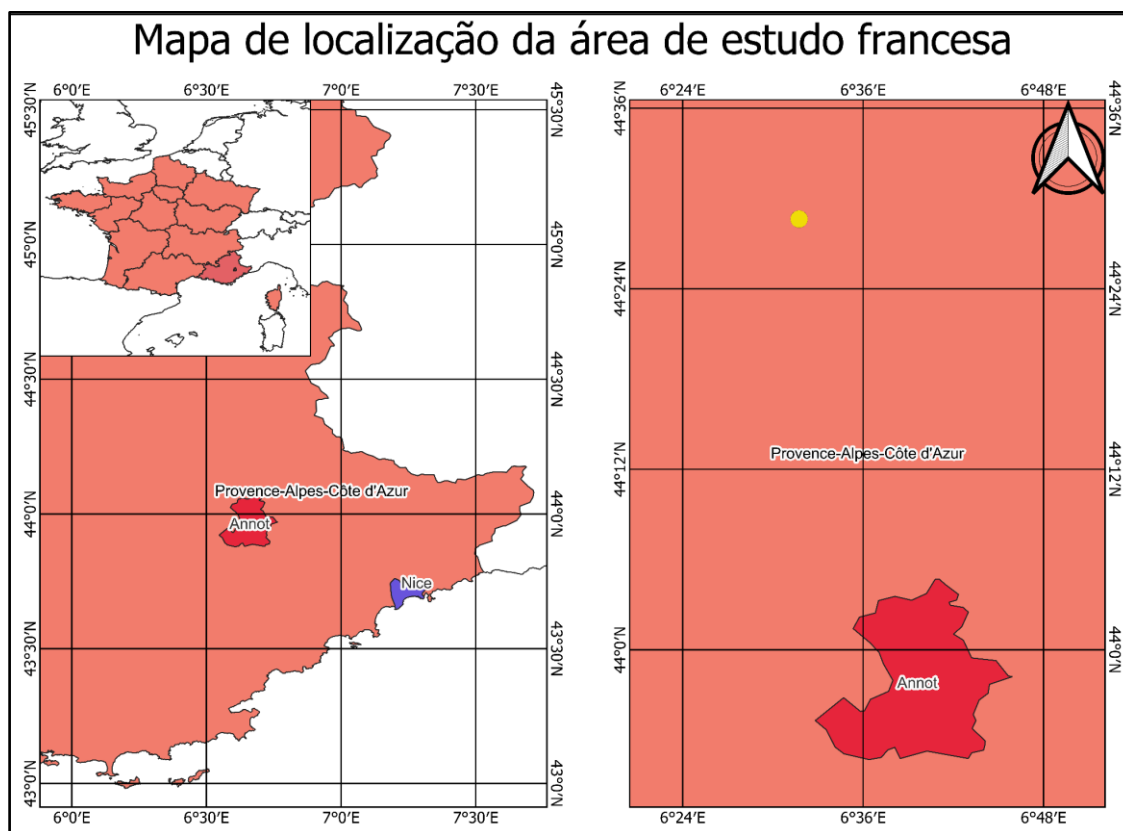


Figura 2: Mapa de localização referente a região de estudo na França. Destacado em vermelho a Comuna de *Annot*, enquanto o afloramento estudado está demarcado com um ponto amarelo. Fonte: Autor, 2024.

O afloramento de Annot está inserido, juntamente com seus depósitos correlatos, a exemplo do Arenito *Champ-saur*, no contexto geológico da bacia *Gre's d'Annot* formando uma unidade generalizada de turbiditos do Eoceno-Oligoceno depositados na bacia alpina do tipo *foreland* (Elliott et al., 1985).

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 Turbiditos

Para caracterizar um fluxo gravitacional de sedimentos Middleton e Hampton (1973) utilizaram a combinação da natureza reológica dos sedimentos juntamente com o mecanismo de suporte de grãos, os quais eles classificaram em 4 tipos: o fluxo de detritos, o fluxo de grãos, os fluxos fluidizados, e as correntes de turbidez.

Correntes de turbidez são caracterizadas como fluxos bipartidos (Mutti, 1992) que são frequentemente associados a eventos catastróficos de curta a longa duração, como ondas de tempestade, terremotos, colapso de sedimentos em taludes íngremes (Mulder e Alexander, 2001) e cheias fluviais.

As correntes de turbidez possuem três subdivisões de acordo com Pickering et al., (1986). A primeira é a cabeça, que corresponde a porção frontal onde a turbulência é mais intensa. Nessa parte a espessura juntamente com a velocidade são maiores. Posteriormente temos o corpo, que se refere a porção central e a cauda, região em que o fluxo sofre rápido adelgaçamento (Fig.3).

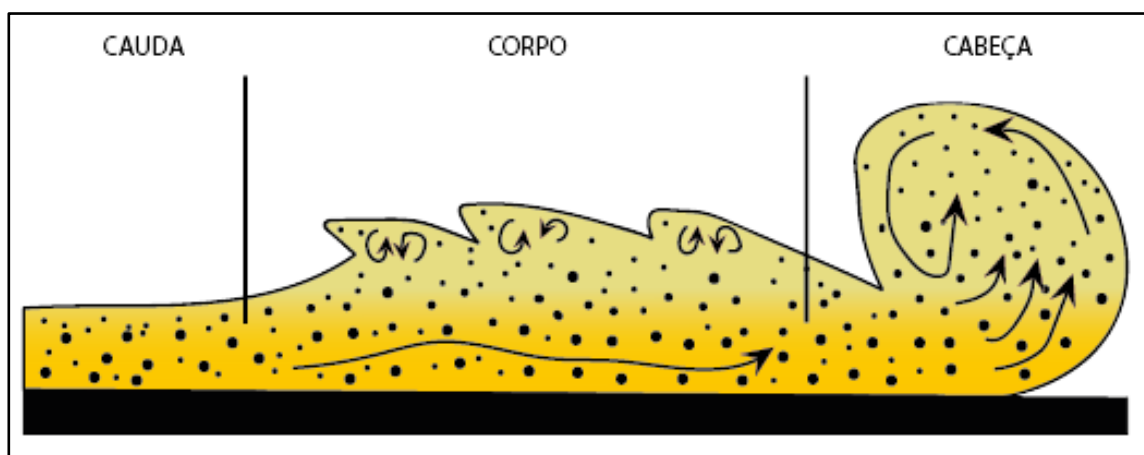


Figura 3: Estrutura de uma corrente de turbidez de acordo com Pickering et al., (1986).

A partir da dimensão dos grãos trazidos pelas correntes de turbidez pode-se distingui-la entre de baixa e de alta densidade (Lowe, 1982). Quando os sedimentos variam sua granulometria de argila até areia média podendo ter todos em suspensão como grãos individuais dentro do fluxo turbulento, a corrente será de baixa densidade, enquanto a de alta densidade será composta por todos os tamanhos de sedimento. Após a corrente deixar o canal distributário ela irá depositar o material de maneira a formar lobos (Prelat, 2009).

2.2 Canais-Levees

Quando o canal, por onde passa a corrente de turbidez, está confinado entre duas ombreiras ou dois diques marginais (*levees*) podemos caracterizá-lo como um sistema de canal-*levee*. Essa morfologia formada contribui para o empilhamento vertical dos sedimentos, devido ao impedimento da mobilidade lateral provocada por

essas barreiras. Todavia, quando uma dessas ombreiras se rompem, os canais voltam a formar padrões de empilhamento laterais de maior extensão (Wynn et al., 2007).

Os canais-*levees* são extensos, podendo atingir centenas de quilômetros, e podem ocorrer em taludes com ângulo relativamente baixo. Quando associados lateralmente com outros canais com essas características formam os sistemas de canais-*levees*, que por sua vez vão se sobrepondo para formar os complexos de canais-*levees* (Fig. 4).

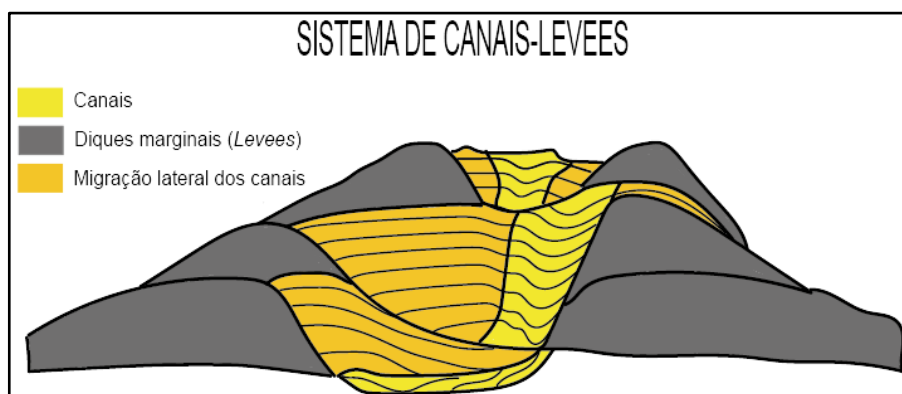


Figura 4: Seção esquemática de um sistema de canais-*levees*, onde os canais apresentam o processo de migração lateral e de aggradação. Autor, 2024.

Para o estudo de reservatórios, esse padrão de empilhamento se mostra fundamental, já que colabora com a conectividade vertical entre os depósitos. Essa interconexão entre os poros pode ser impedida lateralmente, devido às barreiras criadas pelos *levees*, que são constituídos principalmente por material pelágico.

2.3 Lobos

Os lobos são sistemas distributivos que marcam o componente mais distal da deposição de sedimentos em ambiente marinho profundo (Prelat, 2009). Eles são subdivididos em *lobe apex*, que indica a transição do canal alimentador para o lobo, o *lobe centroid*, onde se localiza o centro de massa, e as zonas de acunhamento - *lobe axis*, *lobe off-axis*, *lobe fring* e *lobe distal fringe* - que determinam a largura do lobo (Fig. 5).

O empilhamento de duas ou mais *beds* - eventos deposicionais únicos - recebe o nome de *lobe element*, que por sua vez, é separado verticalmente de outro *lobe element* por material pelágico (*interlobe*) e sua sobreposição irá resultar no lobo (Fig. 5), de acordo com Prelat, (2009).

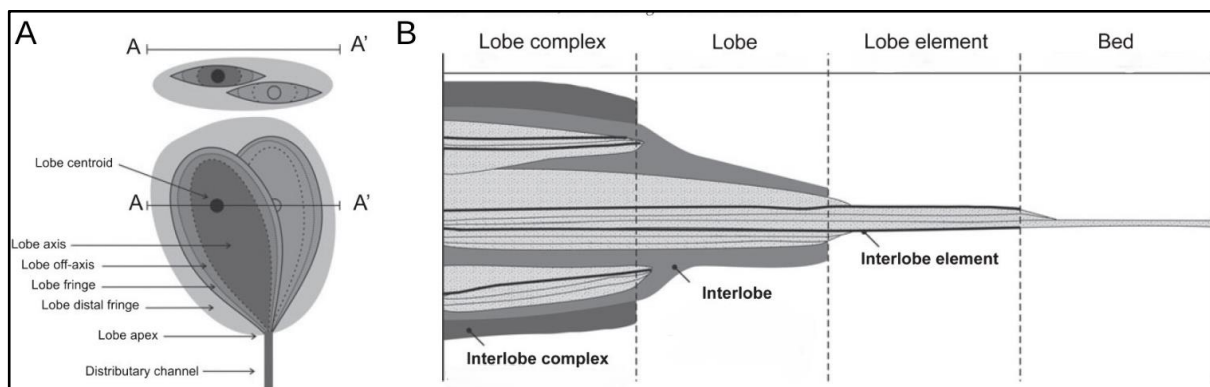


Figura 5: [A] Vista esquemática em planta e corte transversal de dois lobos indicando a nomenclatura usada para descrever diferentes componentes e ambientes de sistemas de lóbulos. [B] Esquema hierárquico dos elementos que compõem um lobo. (Modificado Prelat et al., 2009).

2.4 Classificação de *pinch-outs* e *onlaps*

As terminações estratais das camadas turbidíticas são de grande interesse do ponto de vista de reservatórios de hidrocarbonetos, portanto suas classificações devem seguir a geometria dos estratos em contato com uma superfície existente (Fig. 6). Os principais tipos de *pinch-outs*, de acordo com Gardiner, 2006, são o *Simple Onlap*, que ocorre quando o corpo arenoso é contido bruscamente contra uma superfície pré-existente. O *Draping onlap*, que acontece quando leitos de arenito individuais se estendem alguma distância até a superfície *onlap*. E o *onlap* com espessamento de leito, que é caracterizado por espessamento de leitos individuais próximo à superfície *onlap*.

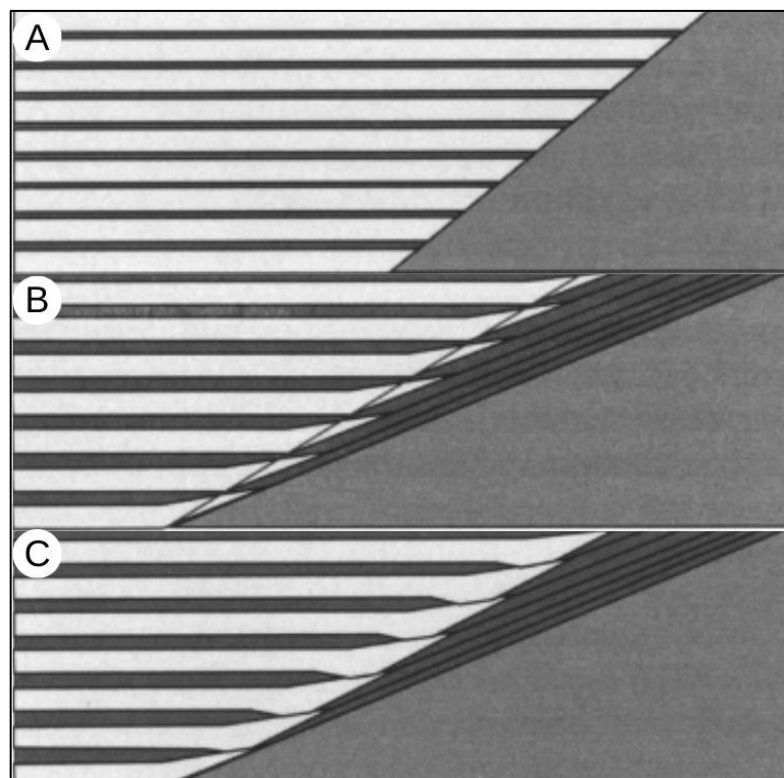


Figura 6: [A] *Simple Onlap*, leitos paralelos, sem alteração significativa na espessura do leito. [B] *Draping Onlap*, as camadas viram para cima para correrem paralelamente à superfície sobreposta. [C] *Onlap* com espessamento de leito, camadas engrossando à medida que se aproximam do *onlap*. (Modificado de Gardiner, 2006).

2.5 Trapas Estratigráficas e Estruturais

A acumulação do petróleo acontece devido a um arranjo espacial das rochas reservatórios com as rochas selantes, gerando dessa maneira as trapas ou armadilhas (Fig. 7). Essas estruturas são responsáveis por concentrar os fluidos que estão em processo de migração em uma região e impedir o escape dos mesmos, formando a acumulação (Milani et al., 2001). A depender das características litológicas e geométricas, as trapas podem ser classificadas como estruturais, estratigráficas, hidrodinâmicas ou mistas (Magoon et al., 1994).

As trapas estruturais são formadas por movimentações tectônicas que geram dobras, diapiros e falhas. O conjunto de dobramentos (homoclinais e anticlinais) somados com falhas normais ou reversas estão entre as trapas mais comuns do tipo estrutural (Allen & Allen, 2005).

As trapas estratigráficas resultam de variações litológicas entre rochas de maior porosidade/permeabilidade - arenitos e carbonatos, por exemplo - com rochas que

possuem uma porcentagem menor dessas características, p.e. folhelhos. Elas podem ser formadas durante a deposição ou após, através de truncamentos e terminações de estratos (*onlaps* e *pinch-out*) e barreiras diagenéticas, por exemplo.

Para o setor energético as armadilhas estratigráficas são de grande importância, devido à sua ampla presença nas bacias ao redor do mundo (Counts, 2021). A exploração dentro desse contexto geológico por vezes se mostra arriscada, já que os estudos de sísmica, por mais avançados que sejam, não conseguem identificar algumas falhas na vedação das armadilhas por falta de elementos robustos de fechamento e contenção.

As trapas hidrodinâmicas formam-se em áreas onde o fluxo descendente de água retém o petróleo sem nenhum tipo de fechamento estrutural ou barreira estratigráfica. As trapas mistas são o resultado da combinação de duas de quaisquer situações acima.

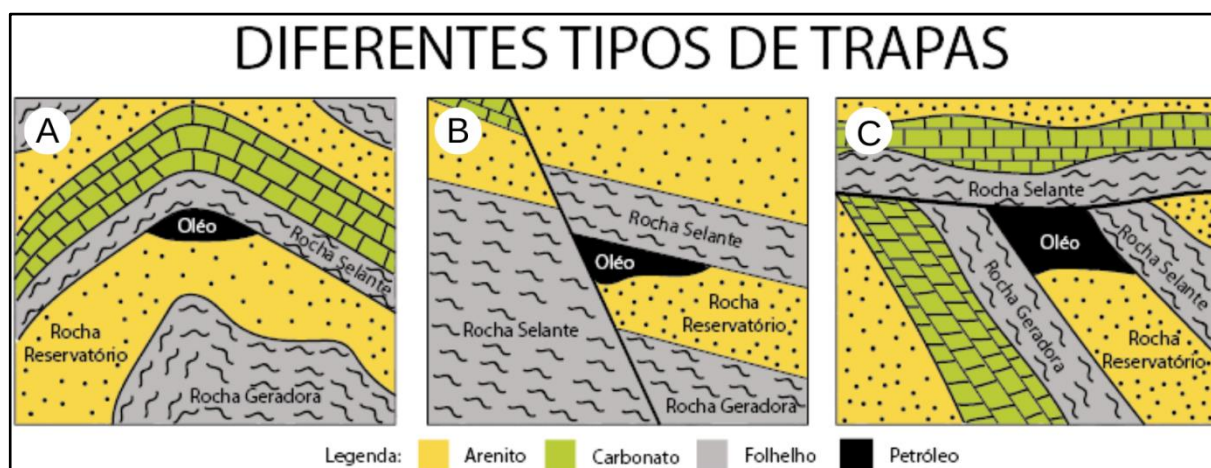


Figura 7: [A] Trapa estrutural em dobra anticlinal. [B] Trapa estrutural associada a falha. [C] Trapa estratigráfica relacionada à discordância. Fonte: Autor 2024.

Os sistemas turbidíticos apresentam características de extrema importância para o estudo e exploração de hidrocarbonetos, sendo que uma das mais relevantes é a presença de terminações e adelgaçamento dos estratos conhecidos como *pinch-outs* (Amy, 2019). Pelo menos 20 campos de 11 bacias em todo mundo possuem reservas acumuladas em uma ampla variedade de estilos de trapeamentos, incluindo trapas estratigráficas do tipo *pinch-out*, estruturais e combinadas (estratigráficas-estruturais) (Flinch et al., 2009; Bruhn et al., 2017, Amy, 2019). Segundo a análise de Amy (2019), realizada em vários reservatórios de petróleo em depósitos turbidíticos

de águas profundas e ultra-profundas, existem oito principais tipos dessas estruturas de aprisionamento, que se dividem em trapas estratigráficas (*pinch-out* deposicional, *pinch-out* erosional e *pinch-out* sobre talude controlado por falha) e estruturais/mistas (*pinch-out* falhado, *pinch-out* em falha de crescimento, falha normal, falha reversa e *pinch-out* erosional associado a anticlinal). A Figura 8 ilustra os diferentes tipos de *pinch-outs* que podem formar trapas estratigráficas em sistemas turbidíticos marinhos profundos.

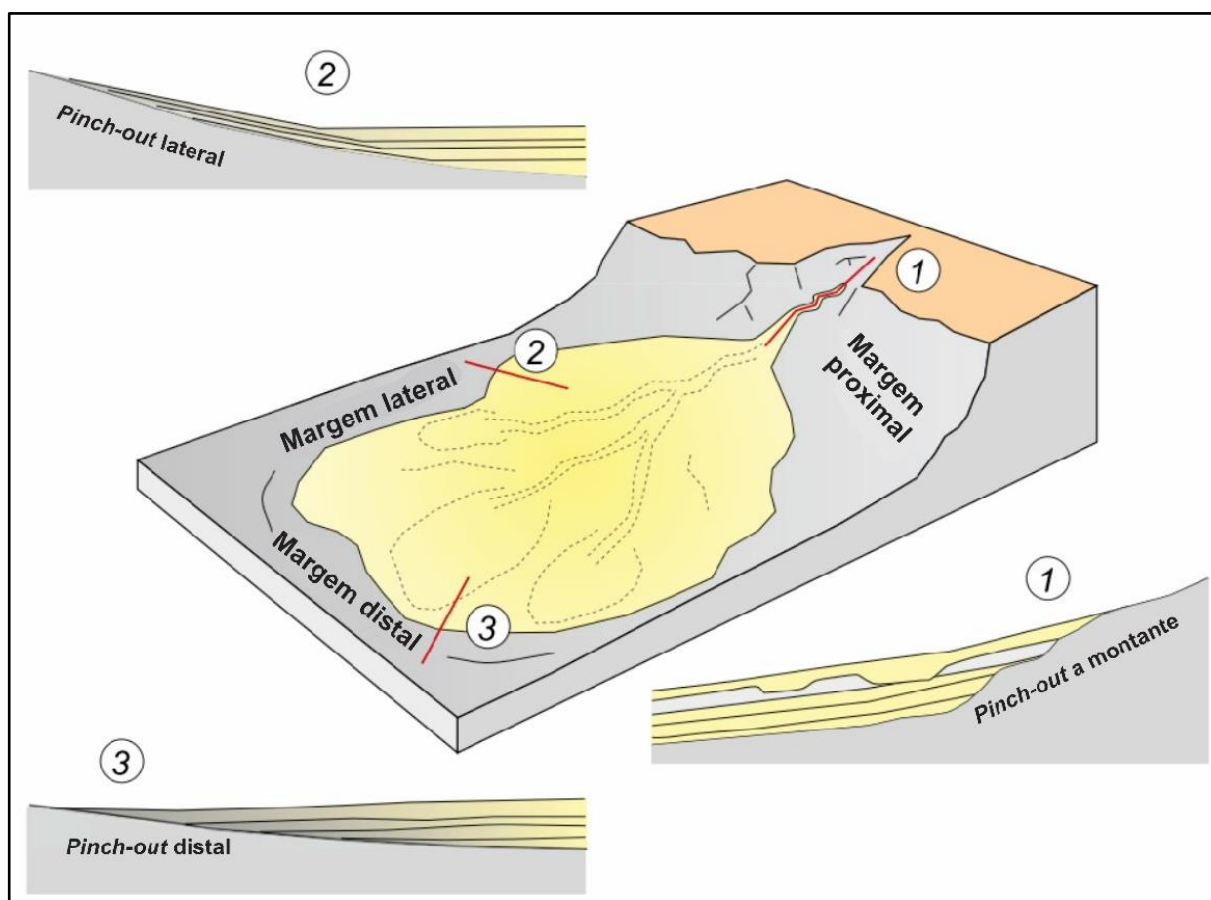


Figura 8: Diagrama mostrando diferentes tipos de *pinch-outs* que podem gerar trapas estratigráficas em sistema turbidítico marinho profundo (modificado de Amy, 2019).

2.3 Reservatório de Hidrocarbonetos

Os reservatórios constituem uma parte do sistema petrolífero, o qual envolve elementos e processos que devem interagir entre si de forma simultânea para que seja possível a acumulação de óleo e/ou gás. Os elementos constituintes são as rochas geradoras, reservatórios, selantes e as trapas (ou armadilhas).

Quando gerado, o petróleo e/ou gás pode migrar até alcançar as rochas reservatórios - arenitos, e carbonatos, por exemplo - que possuem porosidade e

permeabilidade suficientes para armazenar e conceder movimentação aos hidrocarbonetos (Rosa, 2006).

Há dois tipos de porosidade, a porosidade primária e a secundária. A porosidade primária é formada pelo próprio arranjo dos grãos durante a deposição de sedimentos, e dessa forma tende a diminuir com o soterramento. Já a porosidade secundária é originada principalmente com a dissolução dos minerais, sendo posterior à deposição durante as etapas de diagênese (Milani et al., 2000).

A permeabilidade é a competência que uma rocha possui em transmitir fluidos que é controlada principalmente pela quantidade, geometria e grau de conectividade dos poros. Um bom reservatório apresenta boas condições de porosidade e permeabilidade. Já rochas com baixa permeabilidade – folhelhos e evaporitos, por exemplo – podem atuar como rochas selantes, que devido às suas condições petrofísicas, impossibilitam a migração contínua dos hidrocarbonetos. Para um eficaz sistema de reservatório, além dessas características supracitadas, é necessário um sistema de trapas eficiente que aprisionam o fluido em alguma porção específica do reservatório. Esse sistema de trapas será discutido mais adiante.

2.4 Reservatórios de CO₂

Visando a remediação das mudanças climáticas iniciou-se pesquisas para estocar geologicamente o gás CO₂, um dos maiores contribuintes ao aquecimento global. Uma das maneiras mais estudadas para atingir esse objetivo é a utilização dos reservatórios de hidrocarbonetos depletados, devido a suas características geológicas de armazenamento já conhecidas, possibilitando a estocagem a longo prazo.

É fundamental que o local de retenção do CO₂ seja relativamente profundo - maior que 800 metros - para garantir que dessa forma o composto alcance a fase supercrítica e se apresente de forma densa (Fig. 9). Atingindo essa condição o gás irá se comportar de maneira semelhante ao estado líquido, permitindo que uma maior quantidade seja injetada. Dessa maneira a eficácia do armazenamento se torna maior (Ringrose P., 2020).

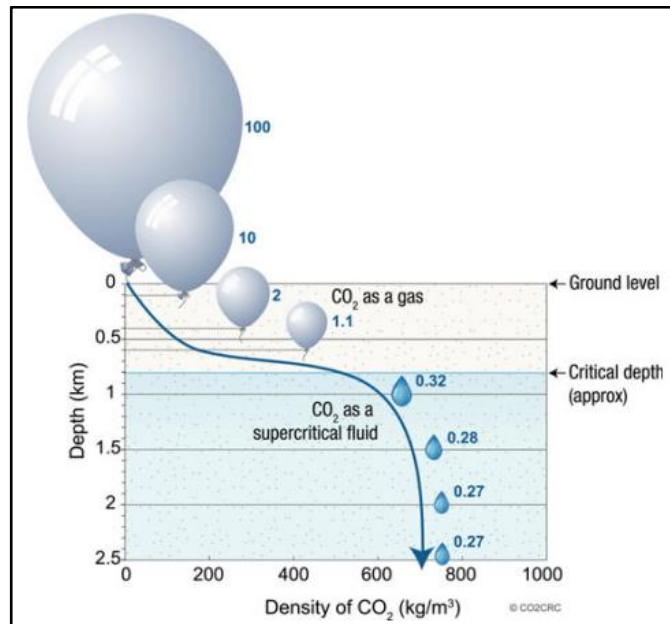


Figura 9: Diagrama simplificado da relação profundidade versus densidade do CO₂. Fonte: Ringrose P., 2020

À medida que nos aproximamos de profundidades de cerca de 1 km ou mais, entramos no domínio de uma maior compactação e cimentação das rochas que potencialmente contém unidades tanto sedimentares como compartimentos estruturais selantes de baixa permeabilidade (por exemplo, folhelhos, unidades de sal, falhas e dobras). A estas profundidades, é sabido por experiência prévia da indústria de hidrocarbonetos que o gás natural ficou aprisionado sob armadilhas geológicas durante milhões de anos e, portanto, o potencial para a estocagem de CO₂ a longo prazo nestas profundidades também é claramente possível.

Considerando que grande parte dos reservatórios de hidrocarbonetos estão em depósitos siliciclásticos de sistema marinho profundo (depósitos de *channel-levee* e/ou lobos e/ou lençóis turbidíticos) o entendimento do sistema deposicional tanto de detalhe como de maneira mais ampla, e o uso de análogos em superfícies e tecnologias como o caso de modelos virtuais de afloramentos, também se aplicam a esses tipos de estudos e são de igual importância para a caracterização de um bom reservatório de CO₂.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo se concentrou em dois afloramentos de diferentes escalas de sistemas turbidíticos: do tipo Lobos (I) e do tipo preenchimento de Canais (II) situados em Doutor Pedrinho – SC/Brasil (Tipo I – Grupo Itararé, Formação Rio do Sul / Bacia do Paraná) e em Annot, comuna localizada no sudeste da França (Tipo II – Formação *Grès d'Annot*).

Para o desenvolvimento deste estudo a metodologia foi subdividida em 3 etapas, sendo elas: etapa preparatória; aquisição de dados em campo; e processamento pós-campo. A etapa preparatória constituiu basicamente na pesquisa bibliográfica, busca dos locais de trabalho, aquisição e avaliação das aerofotografias do afloramento da França cedida pela coorientadora, assim como o entendimento dos *softwares* a serem utilizados no estudo. A etapa de aquisição de dados em campo consistiu na obtenção de aerofotografias por drones e de dados relevantes no afloramento de Dr. Pedrinho/SC. A etapa pós-campo compreendeu o processamento dos dados, a geração dos MVAs e a interpretação e integração de todas as informações trabalhadas.

A seguir, será detalhada cada etapa da metodologia utilizada neste trabalho.

Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica mais robusta consistiu principalmente no estudo pré-campo, contudo foi uma etapa contínua para todo o desenvolvimento do trabalho. Essa etapa tem como principal atividade a aquisição de conhecimento, através da bibliografia, sobre a operação dos drones em campo e produtos relacionados, a respeito do contexto geológico em que os dois afloramentos alvo estão inseridos, assim como o entendimento dos *softwares* utilizados nas etapas seguintes.

A partir do estudo teórico foi possível determinar quais seriam os objetos de interesse da pesquisa. Tanto o afloramento de Doutor Pedrinho/SC como o de afloramento na Annot/França foram escolhidos por terem evidências que caracterizam possíveis reservatórios em sistema de trapas estratigráficas e/ou estruturais.

Aquisição de dados

A etapa de aquisição de dados foi a etapa na qual as aerofotografias dos dois afloramentos de estudo foram obtidas e dados de campo foram coletados. O levantamento por Drone na região de Annot na França foi executado em campanhas de campo anteriores e cedidas para este estudo pela Professora Doutora Victoria Valdez Buso (coorientadora) levando em consideração o foco principal do contexto de turbiditos em sistema de trapas para fins de reservatórios. O afloramento selecionado possui uma dimensão de 95m de altura por 405m de espessura, e neste caso, o estudo realizado foi com foco na geometria das camadas e terminação laterais dos estratos em escala métrica.

No município de Doutor Pedrinho/SC, foi realizada uma campanha de campo com foco no afloramento previamente selecionado. O afloramento de estudo consiste em uma exposição de aproximadamente 15,5m metros de altura por 44m de largura e expõe uma sucessão bastante espessa de depósitos de turbiditos apresentando peculiaridades interessantes ao tema as quais serão posteriormente discutidas. No caso do afloramento de Dr. Pedrinho, por ser de dimensão menor e de maior detalhe, o estudo se focou nas terminações das camadas em escala de fácies e de grandezas centimétricas.

As aerofotografias para a confecção do Modelo Virtual de Afloramento foram obtidas a partir de um voo manual com veículo aéreo não tripulado de modelo *Phantom 4 Pro V2* (Fig. 10). As fotografias foram obtidas, sempre que possível, com um espaçamento entre elas que permitissem uma sobreposição de 70% a 80% tanto na vertical como na lateral. Isso possibilitou a posterior geração de um MVA de qualidade e de alto grau de detalhe. Ao todo foram tiradas 134 fotografias correspondentes ao afloramento de Doutor Pedrinho.



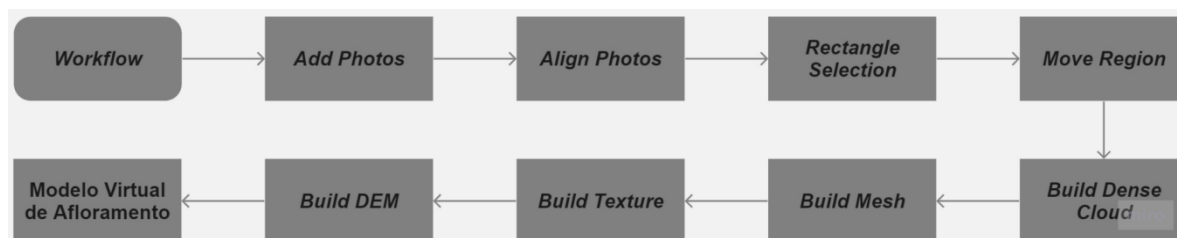
Figura 10: Modelo do drone utilizado para captura das imagens.

Além da aquisição das aerofotografias, também foram coletados dados geológicos e feições de interesse foram fotografadas para fins de comparação e integração com o MVA.

Processamento

Essa etapa consistiu no tratamento dos dados pós-campo na qual os modelos virtuais de afloramentos foram gerados. Os MVAs de ambas as áreas de estudos foram confeccionados utilizando a técnica *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-View Stereo* (MVS) (Westoby et al., 2012; Bilmes et al., 2019; Marques J et al., 2020). Os algoritmos responsáveis pela execução dessa técnica estão embutidos nos *softwares* de processamento e funcionam de maneira automática seguindo um fluxo pré-ordenado destes programas de reconstrução 3D. O *software* utilizado foi o *Agisoft Metashape Professional* o qual possui licença paga, porém, a versão para teste livre por 30 dias foi empregada para essa fase do estudo.

Este programa detém uma interface bastante intuitiva e o *workflow* foi seguido de acordo com o fluxograma 1 apresentado a seguir.



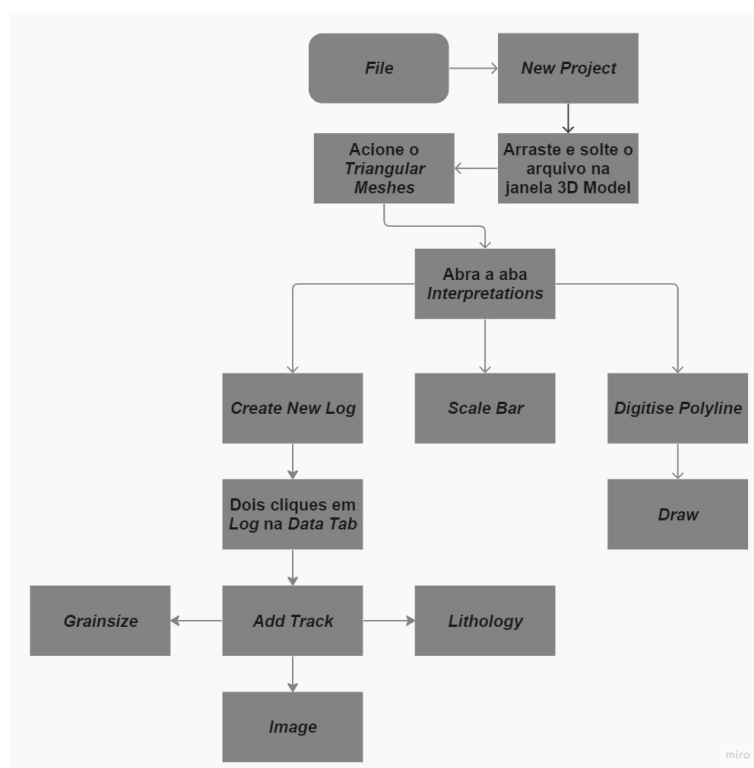
Fluxograma 1: Passo a passo da utilização do *software Agisoft Metashape Pro*.

Interpretação

Terminada a construção dos modelos virtuais 3D de afloramento de ambas as áreas, a interpretação geológica dos mesmos com foco nas estruturas de trapas estratigráficas e/ou estruturais foi realizada através do *software VRGS (Virtual Reality Geological Studio)* da *VRGeoscience*. Este *software* também é de licença paga, no entanto utilizou-se a versão teste de 30 dias para o desenvolvimento deste estudo. Ocasionalmente foi utilizada a licença acadêmica pessoal da Professora Carolina Danielski Aquino.

O programa aceita MVAs de diversos formatos como o obj, ply, slpk, DEM, ASPRS las, GeoTIFF, dentre outros, o que é compatível com os MVAs extraídos do *Metashape*. Neste *software* foi possível além de traçar os limites de interesses como *polylines*, também foi possível a confecção de perfis sedimentológicos virtuais e a integração dos dados obtidos em campo.

A seguir é apresentado o fluxograma simplificado do *workflow* seguido para as principais interpretações geradas no software em questão (Fluxograma 2).



Fluxograma 2: Passo a passo da utilização do VRGeoscience.

4. RESULTADOS

4.1 Modelos Virtuais de Afloramento

A utilização do *software* de construção de MVAs - *Agisoft Metashape Professional* - trouxe consigo a possibilidade de criar os dois modelos propostos com fidedignidade para com os afloramentos reais.

As duas representações possuem as características dos objetos de estudo tanto no quesito de dimensões, respeitando a escala dos afloramentos, quanto na questão geológica, onde é possível observar todas as suas feições com clareza.

Além disso, os modelos criados seguem a mesma paleta de cores registradas nas imagens processadas, fazendo com que fosse possível inferir de acordo com a coloração as litologias de cada afloramento estudado (p.e. cores claras sendo arenitos, e cores escuras sendo folhelhos), separando também o que era rocha e o que era a vegetação do ambiente.



Figura 11: Modelo virtual de afloramento dos turbiditos de Doutor Pedrinho (SC) - Alto Forção.

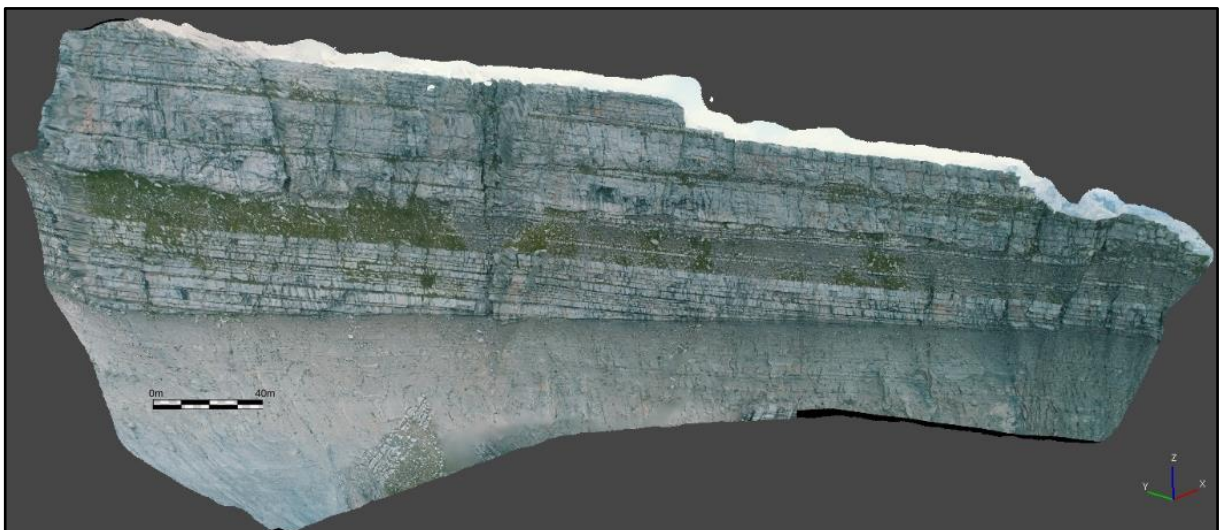


Figura 12: Modelo virtual de afloramento dos turbiditos na bacia de Annot (França).

4.2 Interpretação geológica do modelo virtual de afloramento dos turbiditos de Doutor Pedrinho (SC) - Alto Forcação

Criado o MVA passamos para a etapa de interpretação geológica, na qual foram constatadas as feições de fluidização (Fig. 13 – diapiro de lama), o acunhamento - *pinch-out* – das camadas de arenito formando *onlap* (Fig. 14), intercalação bem definida dos corpos de folhelho com os corpos de arenito (Fig. 15), estruturas de carga (Fig. 15), além do espessamento ascendente dos pacotes turbidíticos e uma grande variedade lateral de espessura de uma mesma camada (Fig. 17).

O diapiro de lama identificado no afloramento se caracteriza por uma elevação montiforme do folhelho Lontras na base do afloramento. Esse movimento pode ter sido causado pela alta frequência e aporte de correntes de turbidez no local que, ao longo do tempo, exercia pressão sobre o material pelítico expulsando a água intersticial, uma vez que o folhelho ainda não se encontrava consolidado e provia de muita água no seu depósito (D'ávila, 2009).



Figura 13: Diapirismo do folhelho. *Scale Bar* possui 3 metros.

Contudo, foi possível observar algumas feições de *onlap* das camadas mais basais terminando em direção a essa feição mais elevada (Fig. 14), o que pode sugerir que esse diapiro pode ter se originado previamente à deposição e à carga exercida pela sucessão turbidítica não ter sido a principal causa do processo de fluidização e soerguimento dessa feição lamosa.

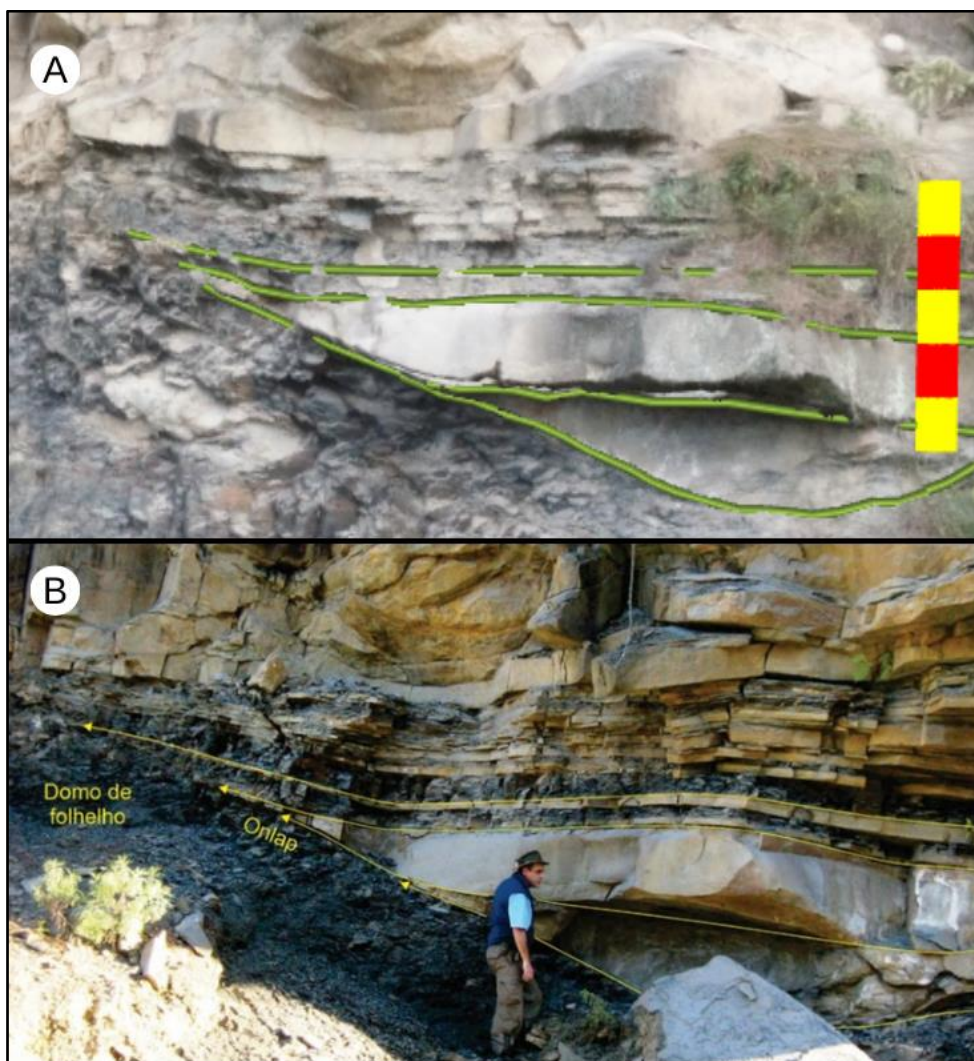


Figura 14: [A] *Onlap* identificado no MVA. *Scale Bar* possui 2 metros. [B] Imagem a partir de fotografia em campo interpretada da mesma feição retirada do trabalho Os Primeiros Turbiditos do Brasil (Vesely et al, 2021).

As estruturas de carga observadas nas bases de diversas camadas de arenitos, principalmente nas camadas mais espessas (Fig. 15) também são associadas à constante chegada de corpos turbidíticos em um material argiloso. As estruturas de carga são produzidas quando a camada de arenito mais densa afunda na camada menos densa do folhelho. Por vezes essa diferença de densidade é tão grande que deforma por completo as camadas subjacentes gerando por exemplo, laminações convolutas, como observado no afloramento estudado (Fig. 15). A Figura 16 também apresenta estruturas de carga, porém com um grau de escala maior, todavia sua representação no MVA teve sua resolução limitada pelo seu entorno.



Figura 15: Intercalação de corpos areníticos e corpos pelíticos com presença de estruturas de carga. Setas indicando a estrutura e a deformação do folhelho que decorre dela. *Scale Bar* possui 3 metros.

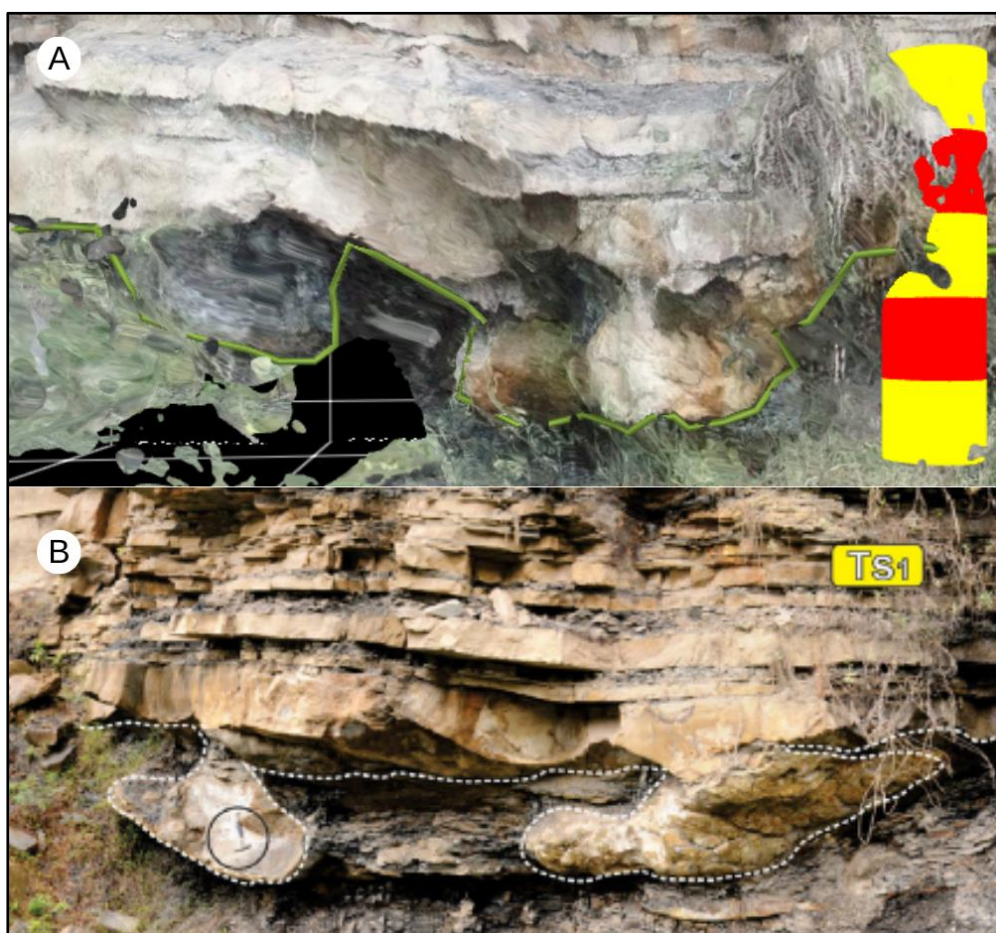


Figura 16: [A] Estruturas de carga resultantes da deformação dos sedimentos moles identificada no MVA. [B] Deformação de sedimentos moles em grande escala. (Modificado de Fallgatter, 2024).

Através do MVA foi possível constatar um espessamento ascendente das camadas de turbiditos na medida que se avança na estratigrafia, além de uma

variedade lateral de espessura das camadas principalmente na porção superior do afloramento (Fig. 17).



Figura 17: Espessamento ascendente dos corpos turbidíticos e variação interna de espessura de uma mesma camada. *Scale bar* possui 5 metros.

Outra análise viabilizada pelo software de interpretação - *VRGeoscience* - foi a construção de uma coluna estratigráfica. O perfil vertical possui cerca de 12 metros de espessura, tendo na sua base depósito do folhelho Lontras indeformado, topo da sequência 2 de Aquino et al. (2016), seguido por aproximadamente 2 metros de intercalação com os corpos turbidíticos e pelíticos. Após esse intervalo predominam camadas de arenitos predominantemente maciços que ficam mais espessas à medida que chegamos ao topo do afloramento, o que pode nos indicar um maior aporte de sedimentos proveniente das correntes de turbidez ou uma mudança da porção axial de um novo lobo turbidítico por sobre a porção da franja (*lobe fringe*) do lobo anterior (Prelat, 2009) (Fig. 18).

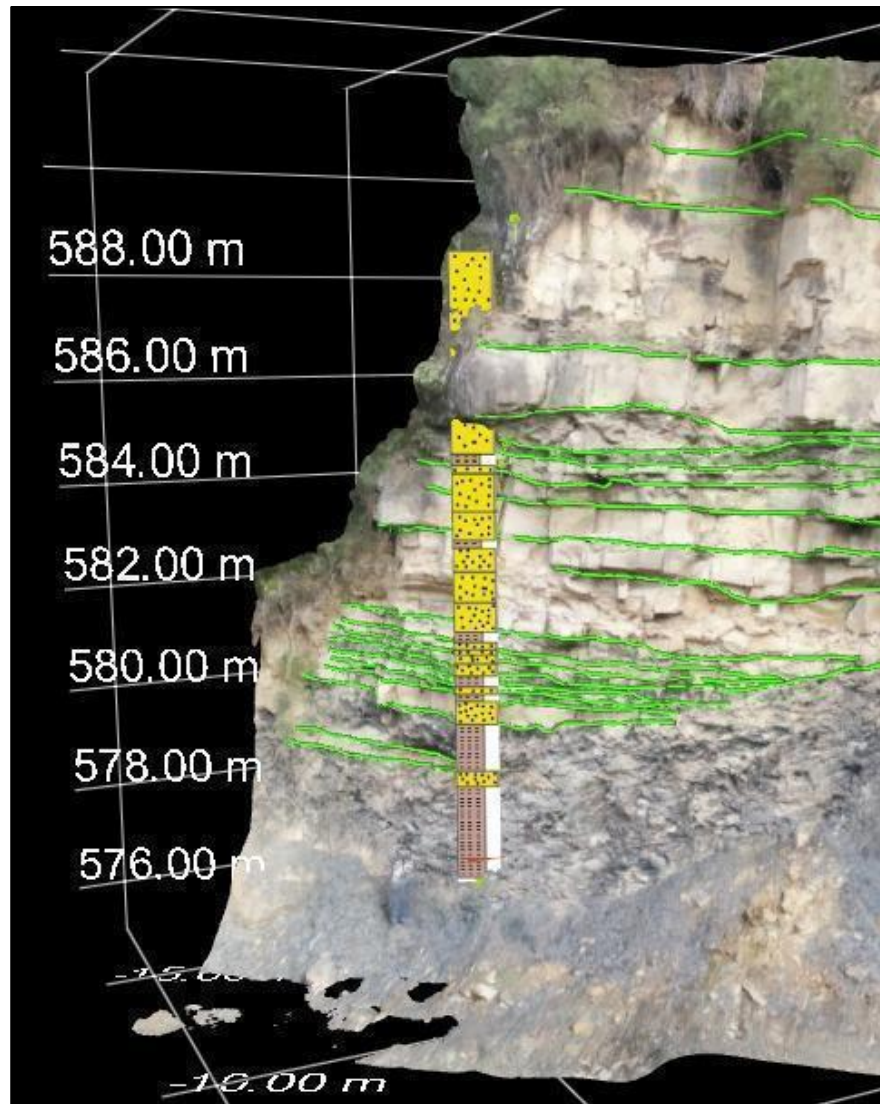


Figura 18: Coluna estratigráfica elaborada no MVA onde é possível separar a sequência 2, folhelho Lontras, da sequência 3, corpos areníticos definido previamente no trabalho de Aquino et.al., 2016. No modelo interpretado, é possível notar na base o acunhamento das camadas de arenitos em direção ao diapiro do folhelho, e o padrão de engrossamento para o topo da sucessão.

4.3 Interpretação geológica do modelo virtual de afloramento dos turbiditos de Annot (França)

A partir do modelo virtual de afloramento gerado, foi possível passar à fase de interpretação geológica. No modelo foi possível observar o acunhamento das camadas arenosas gerando geometrias de *pinch-outs* destes depósitos com a morfologia das unidades mais antigas (Figuras 19 e 22), a presença de uma falha normal (Fig. 20) e a nítida separação das litologias, o que contribui para a análise de um possível reservatório análogo de afloramento, uma vez que afloramento tem

escala sísmica de alta resolução (aproximadamente 380m de largura por 170m de altura).

Na Figura 19 podemos observar uma sequência de rochas com prováveis características de baixa porosidade/permeabilidade - folhelho - intercalada com rochas que possuem alta porosidade/permeabilidade - arenitos turbidíticos. Essa sucessão se repete em macroescala pelo menos duas vezes no afloramento, e diversas vezes quando analisamos com maior grau de detalhe (Fig. 22).

As unidades descritas acima podem nos indicar um sistema de trapeamento estratigráfico, visto que os arenitos estão contidos pelas camadas de folhelhos. Além disso, os corpos arenosos apresentam terminações em *pinch-out* em contato com os pelitos, principalmente na porção basal do afloramento, o que se soma com as outras propriedades das trapas estratigráficas.

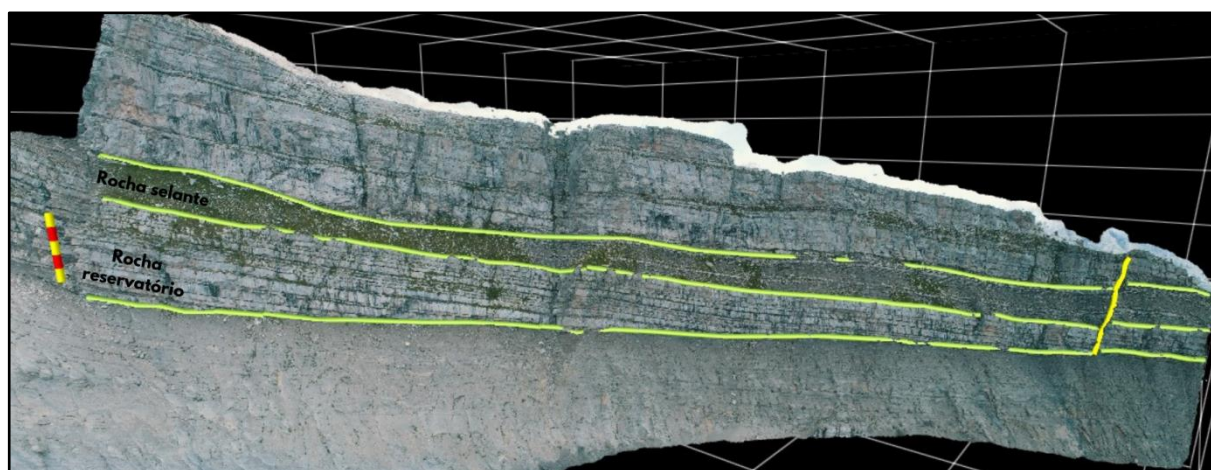


Figura 19: Afloramento virtual indicando possibilidade de reservatório devido a sequência estratigráfica: arenitos em contexto de trapa mista (estratigráfica e estrutural) seguido por camadas de rochas potencialmente de baixa permeabilidade (folhelhos e ritmitos delgados) que pode se configurar como uma rocha selante. Scale bar possui 20 metros.

No MVA foi possível identificar a presença de uma falha normal que se encontra deslocando os *pinch-outs* (Fig. 20). Feição esta que pode contribuir para o escape dos fluidos, uma vez que fornece um caminho para que eles ascendam. As falhas possuem função de condutor dos hidrocarbonetos em sistemas petrolíferos, visto que liberam espaço para que eles possam percorrer até encontrar uma armadilha geológica que contenha seu fluxo. Portanto, essa estrutura poderia indicar um possível comprometimento local na questão de armazenamento das trapas estratigráficas.

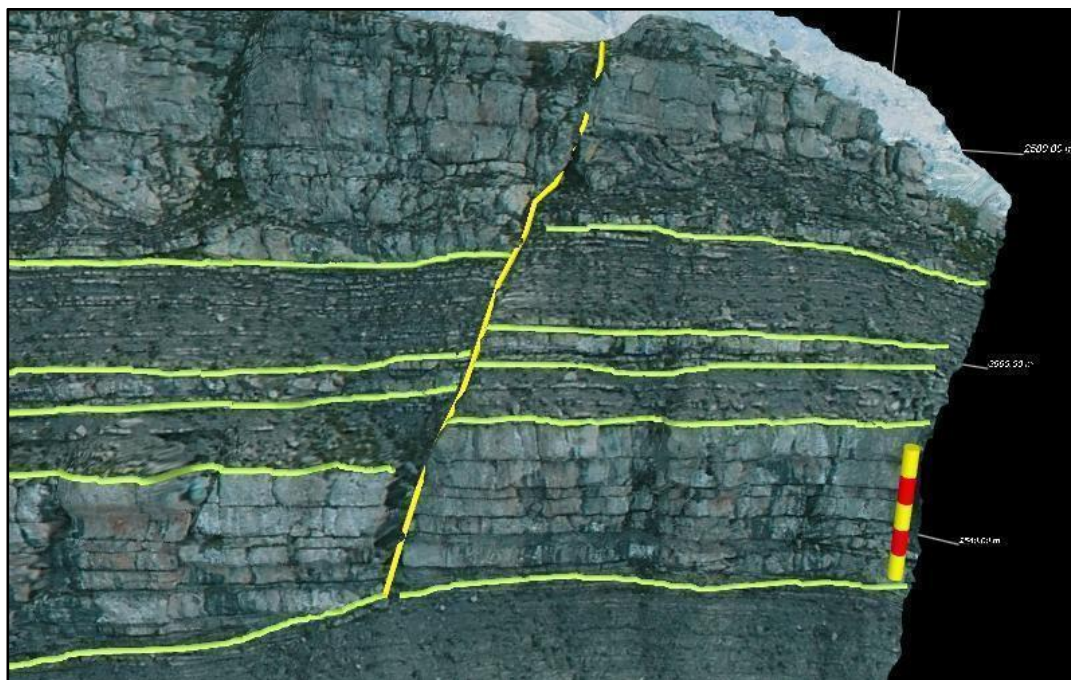


Figura 20: Falha normal, em amarelo, identificada no MVA. *Scale bar* possui 10 metros.

O afloramento possui camadas de turbiditos que apresentam adelgaçamento ao longo da sua extensão lateral. Através do MVA conseguimos confirmar essa feição, graças às ferramentas de interpretação disponíveis, o que nos possibilitou medir os corpos areníticos desde a sua base até seu topo. Na Figura 21 podemos observar essa feição com nitidez, dado que a camada, dentro do limite do afloramento analisado, se inicia com aproximadamente 275 cm de espessura, e que ao se aproximar da região das margens do canal fica mais delgada chegando 100 cm de espessura até desaparecer no encontro com essa unidade mais antiga. A geometria de *pinch-out* é observada na base do afloramento, onde notamos seu confinamento, devido a natureza da rocha antecessora. Essa litologia possui características de porosidade/permeabilidade baixas, o que em uma análise de sistema petrolífero se traduz em uma rocha selante (p.e. folhelhos). Dessa maneira, a acumulação dos hidrocarbonetos ocorreria no interior dos *pinch-outs*, já que estariam impedidos, pelos pelitos, de migrar. Sendo assim, nessa região do afloramento podemos observar um sistema de trapas estratigráficas. Na Figura 22 podemos notar a repetição dessa geometria nas camadas mais basais do afloramento, devido a natureza desses corpos arenosos é possível classifica-los como *Simple Onlap* (Gardiner, 2006).



Figura 21: Camadas de arenito sofrendo um acunhamento progressivo, da porção axial do canal 275cm afinando até atingir 100cm na região próxima à margem. *Scale Bar* possui 5 metros.



Figura 22: Geometrias das camadas de turbiditos conhecidas como *pinch-outs* - acunhamento. *Scale bar* possui 20 metros.

5. DISCUSSÃO

5.1 Importância dos MVA

A geologia desde os seus primórdios traz consigo um modo tradicional de traduzir as informações 3D vistas na natureza - como estruturas, texturas e feições - em 2D, seja através de mapas, croquis ou anotações na caderneta (Viana, 2021).

Como resultado desse modo de pesquisa, ocorrem perdas de informações importantes referentes às relações espaciais do objeto de estudo.

Algumas técnicas foram aplicadas ao longo dos anos, e dos avanços tecnológicos, para conseguir maximizar o ganho de elementos geológicos. Desde a concepção do conceito de “estrutura a partir do movimento” - *structure from motion* - por Shimon Ullman (Ullman, 1979) temos tentado entender como a estrutura tridimensional e movimento de objetos pode ser inferida a partir da transformação bidimensional de suas imagens projetadas.

Os modelos virtuais de afloramento são resultados de anos de pesquisa em torno da técnica de *structure from motion*. A partir dos MVAs temos a possibilidade de obter produtos com uma resolução espacial fidedigna ao afloramento *in natura*, trazendo uma série de informações que não seriam acessadas em uma saída a campo devido a uma porção de fatores, como a dimensão do objeto de estudo que pode chegar a centenas de metros, da mesma forma que ocorre com os depósitos de turbiditos do afloramento estudado de Annot na França.

A possibilidade de estudar afloramentos localizados em outros países demonstra a importância do desenvolvimento dessa ferramenta de pesquisa, inserindo cada vez mais as geociências dentro de um mundo globalizado.

O baixo custo de operação é mais uma condição que contribui para a utilização dos MVAs. Enquanto a aplicação de técnicas tradicionais de fotogrametria, como a utilização de aeronaves de pequeno porte para coleta de fotografias aéreas do objeto de estudo, chega a custar centenas de milhares de reais, a elaboração dos modelos virtuais de afloramento está na casa dos milhares, levando em consideração tanto as questões de hardware como software, e a rapidez de aquisição em campo (Carrivick et al., 2016).

Contudo é importante frisar que os MVAs são apenas uma ferramenta para complementar o trabalho de campo, não tendo a tarefa de substituí-los, já que se faz necessário o levantamento de dados, seja antes, interpretando as estruturas que passarão pelo processo de digitalização, ou depois, para eliminar falsas correspondências.

5.2 Diferença de escala

Os dados de alta resolução estão revolucionando nossa abordagem para mapear e compreender o terreno natural, proporcionando um nível de detalhamento sem precedentes (Viana, 2021).

Embora o modelo seja uma idealização em certo grau - uma amostragem por área, que ainda é uma representação com suavização proporcionada pelo nível de detalhe alcançado pelo MVA -, é importante considerar que mesmo o MVA mais detalhado será uma aproximação discreta do espaço contínuo.

Ao levar em conta o caráter das geometrias estudadas, o uso de modelos digitais emerge como uma ferramenta poderosa, uma vez que o nível de detalhamento obtido é muito superior ao que seria possível em um levantamento tradicional. Além disso, o uso desses modelos amplia significativamente as possibilidades de tratamento dos dados.

É importante entender que os modelos virtuais de afloramento são bem diferentes de modelos de objetos regulares, como prédios, já que estes apresentam padrões repetitivos. A ausência desses padrões e de formas primitivas fazem do afloramento uma geometria muito mais complexa de se lidar computacionalmente. Essa complexidade se reflete em todo o processo, pois fatores como o contexto tectônico, grau de intemperismo, tipo da litologia dentre outros, irão influenciar no MVA, e conseqüentemente na análise. Com isso, o processo se torna mais difícil nesse contexto, exigindo maior profundidade de conhecimento por parte do usuário.

Fatores como a escala e demais aspectos considerados na etapa de planejamento, se relacionam diretamente com o que se deseja obter. Sendo assim, para o objetivo do trabalho, a utilização dessa técnica se mostrou bastante eficaz, devido aos afloramentos terem características geométricas decimétricas a hectométricas.

Todavia, uma interpretação geológica mais robusta, onde se alcança o conhecimento do contexto e evolução geológica, depende do uso de mais ferramentas. O modelo 3D, por melhor resolução e grau de detalhes, não consegue cobrir todas as escalas de uma pesquisa.

5.3 Implicância para reservatórios

As indústrias de matriz energética buscam maximizar a captação de dados referentes a reservatórios de hidrocarbonetos para que dessa forma os riscos relacionados à parte exploratória possam ser reduzidos. Para atingir esse objetivo são utilizadas diversas técnicas de pesquisa, desde as campanhas de campo para análise de afloramentos análogos em superfície, chegando até ao uso dos levantamentos sísmicos.

O emprego do método de construção de modelos virtuais de afloramento tende a auxiliar a indústria a alcançar esse propósito uma vez que diminuem os custos das pesquisas consideravelmente, além de ser uma ferramenta que possibilita uma interpretação ágil de afloramentos que podem atingir dimensões hectométricas.

Os MVAs facilitam o pesquisador notar geometrias que caracterizam uma trapa estratigráfica, por exemplo, pois esses modelos possibilitam observar o afloramento como um todo, de forma contínua, e em uma escala onde essas macro estruturas muitas vezes não seriam avistadas em campo devido à falta de acesso lateral dos afloramentos.

O adelgaçamento das camadas - *pinch outs* - são feições importantes de serem identificadas, pois muitas vezes são neles que os hidrocarbonetos tendem a serem armazenados (Amy, 2019; Counts, 2021). No afloramento Alto Forção, em Dr. Pedrinho/SC, essa geometria se encontra em diferentes escalas quando comparado aos depósitos de Annot. Neste caso, as camadas da porção basal do afloramento estão em *onlap* contra o diapiro de folhelho da unidade mais velha, conforme pode ser observado na Figura 23.

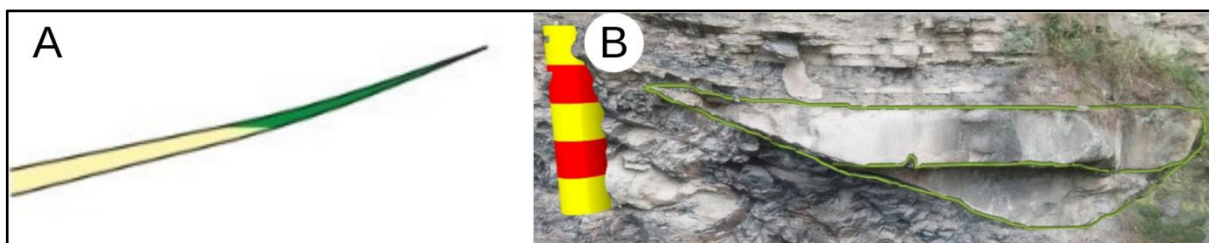


Figura 23: [A] Acunhamento deposicional das camadas de arenitos sem falha associada (modificado de Amy, 2019). A cor amarela representa a litologia enquanto a verde os hidrocarbonetos. [B] Acunhamento das camadas turbidíticas no afloramento Alto Forção de Dr. Pedrinho/SC.

A situação exemplificada na figura acima, mostra um *pinch-out* deposicional das camadas de turbiditos, e que num primeiro momento poderia se configurar em um sistema de trapa puramente estratigráfica, pois não há nenhum elemento estrutural associado (Amy et al., 2019), isso considerando que o diapirismo do folhelho se originou por questões meramente deposicionais. Essas camadas de arenitos que teoricamente apresentam condições petrofísicas de alta porosidade e permeabilidade indo de contra a unidades de baixa permeabilidade (folhelhos) em termos de reservatório de hidrocarbonetos se traduz em uma trapa estratigráfica. Para uma eventual estocagem geológica de CO₂ essa situação também seria ideal.

O afloramento Alto Forção está inserido em um sistema deposicional do tipo Lobo (Fallgater, 2015). A primeira evidência que indica esse contexto passa pelo espessamento ascendente das camadas de arenito (Fig. 18), à medida que avançamos na estratigrafia, sugerindo a passagem de uma região mais distal - *lobe off-axis* - para uma localidade mais próxima ao centro de massa do lobo - *lobe axis*. A existência de um material pelítico entre o processo de engrossamento das camadas oferece indícios de um possível empilhamento de dois *lobes elements*. A outra evidência observada consiste na variação de espessura das camadas arenosas (Fig. 17), uma vez que notamos uma maior concentração de sedimentos ser diluída lateralmente, o que demonstra uma provável passagem da porção axial do lobo para uma região mais distal. A sucessão dessas feições gera um padrão de empilhamento compensatório (Prelat, 2009), característica comum quando tratamos de um sistema turbidítico do tipo Lobo. Contudo, essa interpretação foi realizada em apenas um afloramento, e para atingirmos um resultado mais conclusivo se faz necessária uma análise regional, dessa forma sendo possível averiguar a existência de mais Lobos, configurando assim um provável *lobe complex*.

No afloramento localizado em Annot, na França, também foi possível a identificação das terminações das camadas arenosas, porém esses acunhamentos, observados principalmente na porção basal do afloramento, são resultantes do sistema deposicional que esses depósitos estão inseridos (Joseph & Lomas, 2004). Esses turbiditos se encontram preenchendo irregularidades do talude produto de uma tectónica ativa (bacia de foreland), gerando os diferentes tipos de pinch-outs (Figs. 24 e 25).

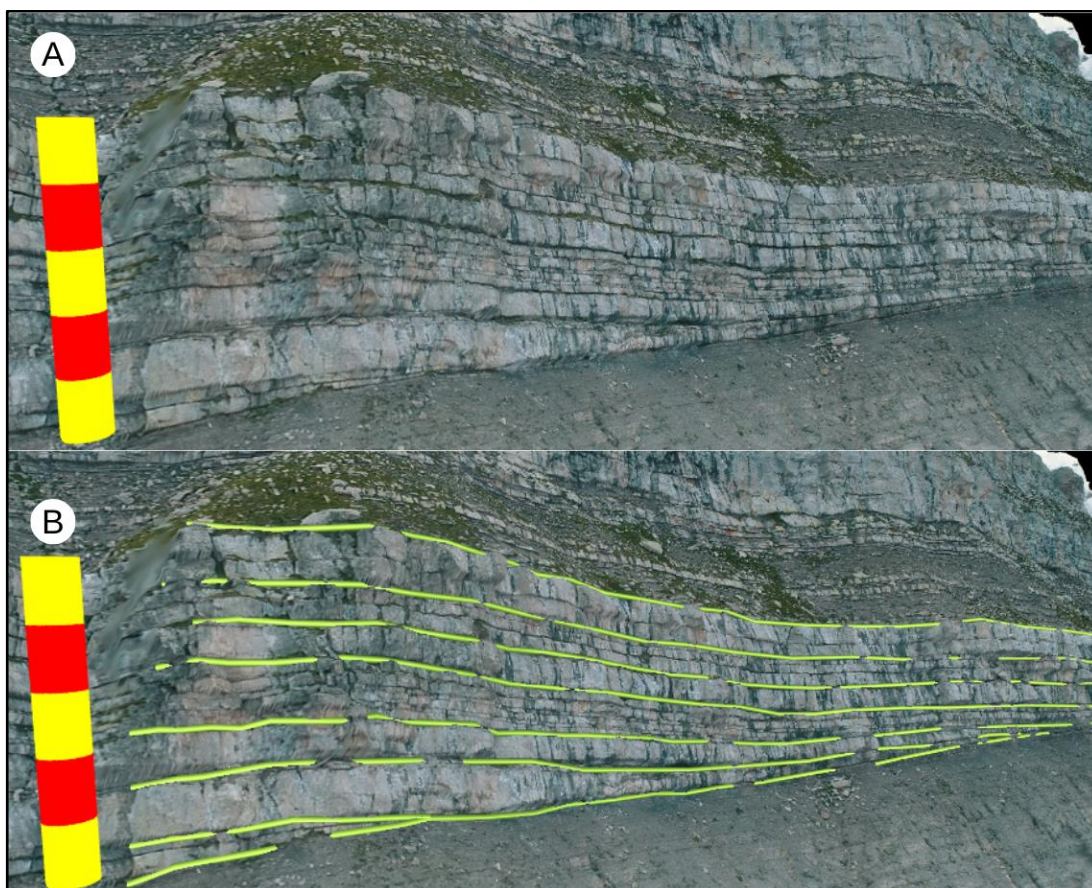


Figura 24: [A] Modelo virtual do afloramento de Annot, França, onde é possível observar a erosão dos depósitos sotopostos. [B] MVA interpretado evidenciando as geometrias de *pinch-out* geradas pelo preenchimento das correntes de turbidez.



Figura 25: Acunhamento das camadas de arenito. [A] Espessura da porção axial do canal 275cm afinando até atingir 100cm na região próxima à margem. [B] Espessura da porção axial do canal 340cm afinando até atingir 145cm na região próxima à margem. A *scale bar* possui 5 metros para ambas as imagens.

Somado à essas feições, em uma outra porção do afloramento estudado é possível associar essas trapas estratigráficas do tipo acunhamentos laterais (*pinch-out*) como sendo uma trapa mista, uma vez que foi observado a presença de uma falha normal. Essa movimentação causada pela falha deixa um pequeno rejeito de 3 metros, o que faz com que uma parte dos depósitos arenosos sejam desconectados e os coloca lateralmente às camadas de mais delgadas e de granulometria mais fina correspondentes ao *levees*. Essa condição favorece a qualidade de um possível reservatórios tanto de hidrocarbonetos e como de CO₂ (Fig. 26).

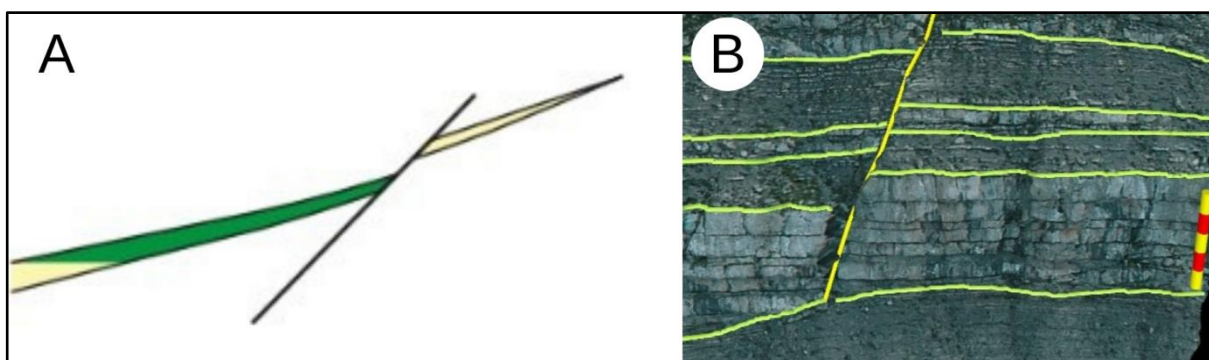


Figura 26: [A] Trapa com falha normal associada (modificado de Amy, 2019). A cor amarela representa a litologia enquanto a verde os hidrocarbonetos. [B] Falha normal deslocando os arenitos de Annot.

A utilização de afloramentos em superfície como possíveis rochas análogas a sistemas petrolíferos em subsuperfície (Vesely, 2021) é comum para as empresas do setor energético, com isso uma análise mais detalhada possibilitada pelos modelos virtuais de afloramento é de extrema importância para o estudo de reservatórios, visto que muitas vezes a sísmica não consegue identificar algumas falhas no fechamento das armadilhas, o que coloca em perigo as operações de exploração. Portanto, os MVAs vêm para complementar as pesquisas na área além de diminuir os riscos e custos para a indústria de energia.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa abordou a utilização dos modelos virtuais de afloramento, o que trouxe consigo a possibilidade de estudar características de reservatórios em afloramentos cujo acesso não é tão simples. Assim, as seguintes conclusões e recomendações são feitas:

A utilização de geotecnologias vem propiciando um novo modo de pensarmos a geologia;

- Através dos MVAs se alcança regiões antes inacessíveis nos afloramentos, possibilitando um estudo mais completo;
- Possibilidade de criação de banco de dados temporal;
- O uso de softwares que possuem em seu escopo todas as etapas de construção do MVA facilita sua criação;
- A interpretação de MVAs através do uso de programas se mostrou uma ótima ferramenta para potencializar os estudos na área da indústria energética;
- Permite uma descrição detalhada das geometrias observadas além da relação espacial das características geológicas dos afloramentos;
- O afloramento Alto Forção, localizado em Dr. Pedrinho/SC, possui um *pinch-out* deposicional e que num primeiro momento poderia se configurar em um sistema de trapa puramente estratigráfica, pois não há nenhum elemento estrutural associado;
- O afloramento de Annot, localizado na *Provence-Alpes-Côte-D'azur* (França), também foi possível a identificação das terminações das camadas arenosas do tipo *pinch-outs tipo simples*.
- Os MVAs trazem consigo uma melhor compreensão das trapas estratigráficas que, por muitas vezes, não podem ser estudadas de forma integral pela sísmica;
- O uso de afloramentos de superfície análogos aos sistemas petrolífero de subsuperfície é algo comum na indústria de hidrocarbonetos, com isso os MVAs auxiliam um maior grau de detalhamento desses objetos de estudo;
- Esse trabalho encaminha uma fórmula de como empregar a tecnologia dos MVAs para a caracterização de reservatórios de hidrocarboneto ou para armazenamento de CO₂;
- Os modelos aqui analisados poderiam constituir bons reservatórios para exploração de hidrocarbonetos e para a estocagem geológica de CO₂.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, P.A., ALLEN, J.R. (EDS). 2005. BASIN ANALYSIS. PRINCIPLES AND APPLICATIONS. WILEY-BLACKWELL, MALDEN, MA. SECOND EDITION. 549P
- AMY L.A. 2019. A REVIEW OF PRODUCING FIELDS INFERRED TO HAVE UPSLOPE STRATIGRAPHICALLY TRAPPED TURBIDITE RESERVOIRS: TRAPPING STYLES (PURE AND COMBINED), PINCH-OUT FORMATION, AND DEPOSITIONAL SETTING. AAPG BULLETIN, 103(12): 2861-2889. [HTTPS://DOI.ORG/10.1306/02251917408](https://doi.org/10.1306/02251917408)
- AQUINO, C. D. 2016. FACIES AND DEPOSITIONAL ARCHITECTURE ACCORDING TO A JET EFFLUX MODEL OF A LATE PALEOZOIC TIDEWATER GROUNDING-LINE SYSTEM FROM THE ITARARÉ GROUP (PARANÁ BASIN), SOUTHERN BRAZIL. JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES. 180-200 P. V. 67.
- BILMES, A., D'ELIA, L., LOPEZ, L., RICHIANO, S., VARELA, A., ALVAREZ, M.D.P., BUCHER, J., EYMARD, I., MURAVCHIK, M., FRANZESE, J., E ARIZTEGUI, D., 2019. DIGITAL OUTCROP MODELLING USING "STRUCTURE-FROM-MOTION" PHOTOGRAMMETRY: ACQUISITION STRATEGIES, VALIDATION AND INTERPRETATIONS TO DIFFERENT SEDIMENTARY ENVIRONMENTS: JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES, V. 96, NO. AUGUST, P. 102,325, DOI: 10.1016/J.JSAMES.2019.102325, URL [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JSAMES.2019.102325](https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2019.102325).
- BOUMA, A. H., & COLEMAN, J. M. (1985). PEIRA-CAVA TURBIDITE SYSTEM, FRANCE. IN *SUBMARINE FANS AND RELATED TURBIDITE SYSTEMS* (PP. 217-222). NEW YORK, NY: SPRINGER NEW YORK.
- BRUHN C.H.L. PINTO A.C.C., JOHANN P.R.S., BRANCO C.C.M., SALOMÃO M.C., FREIRE E.B. 2017. CAMPOS & SANTOS BASINS: 40 YEARS OF RESERVOIR CHARACTERIZATION AND MANAGEMENT OF SHALLOW- TO ULTRA-DEEP WATER, POST- AND PRE-SALT RESERVOIRS - HISTORICAL OVERVIEW AND FUTURE CHALLENGES. PAPER PRESENTED AT THE OTC BRASIL, RIO DE JANEIRO, BRAZIL. PAPER NUMBER: OTC-28159-MS. [HTTPS://DOI.ORG/10.4043/28159-MS](https://doi.org/10.4043/28159-MS)
- BUCKLEY, S.J., RINGDAL, K., NAUMANN, N., DOLVA, B., KURZ, T.H., HOWELL, J.A., AND DEWEZ, T.J.B., 2019, LIME: SOFTWARE FOR 3-D VISUALIZATION, INTERPRETATION,

AND COMMUNICATION OF VIRTUAL GEOSCIENCE MODELS: GEOSPHERE, v. 15, NO. 1, P. 222–235, [HTTPS://DOI.ORG/10.1130/GES02002.1](https://doi.org/10.1130/GES02002.1).

CARRIVICK, J.F., SMITH, M.W., E QUINCEY, D.J., 2016. STRUCTURE FROM MOTION IN THE GEOSCIENCES: JOHN WILEY & SONS.

COUNTS, J. W., AMY, L., GEORGIOPOULOU, A., & HAUGHTON, P., 2021. A REVIEW OF SAND DETACHMENT IN MODERN DEEP MARINE ENVIRONMENTS: ANALOGUES FOR UPSLOPE STRATIGRAPHIC TRAPS. MARINE AND PETROLEUM GEOLOGY, 132, 105184.

DAVILA, R., ARIENTI, L., ARAGÃO, M., VESELY, F., SANTOS, S., VOELCKER, H., VIANA, A., KOWSMANN, R., LOURENCO, J., COURA, A., PAIM, P., MATOS, R., MACHADO, L., (2008). AMBIENTES MARINHOS PROFUNDOS: SISTEMAS TURBIDÍTICOS (DEEP WATER ENVIRONMENTS: TURBIDITE SYSTEMS).

D'AVILA, R. S. F. (2009). SEQUÊNCIAS DEPOSICIONAIS DO GRUPO ITARARÉ (CARBONÍFERO E EOPERMIANO), BACIA DO PARANÁ, NA ÁREA DE DR. PEDRINHO E CERCANIAS, SANTA CATARINA, BRASIL: TURBIDITOS, PELITOS E DEPÓSITOS CAÓTICOS.

ELLIOTT, T., G. APPS, H. DAVIES, M. EVANS, G. GHIBAUDO, AND R. H. GRAHAM, 1985, FIELD EXCURSION B: A STRUCTURAL AND SEDIMENTOLOGICAL TRAVERSE THROUGH THE TERTIARY FORELAND BASIN OF THE EXTERNAL ALPS OF SOUTH-EAST FRANCE, IN P. A. ALLEN AND P. HOMEWOOD, EDS., FIELD EXCURSION GUIDEBOOK: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SEDIMENTOLOGISTS MEETING ON FORELAND BASINS, P. 39–73.

FALLGATTER, C. (2015). CONFINED TO UNCONFINED DEEP-WATER SYSTEMS OF THE PARANÁ (BRAZIL) AND PAGANZO (ARGENTINA) BASINS. *UNPUBLISHED PHD THESIS, UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS*.

FALLGATTER, C., PAIM, P. S. G., BUSO, V. V., AQUINO, C. D., & SIVEIRA, D. M. (2024). A FIELD GUIDE TO THE SAND-RICH TURBIDITE SYSTEMS OF THE TACIBA FORMATION, ITARARÉ GROUP, PARANÁ BASIN, BRAZIL. *JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL VOL, 7(1)*, 57-82.

FLINCH J.F., HUEDO J.L., VERZI H., GONZÁLEZ H., GERSTER R., MANSARAY A.K., PAINULY L.P., RODRIGUEZ-BLANCO L., HERRERA A., BRISSON I., GERARD J. 2009. THE

SIERRA LEONE-LIBERIA EMERGING DEEPWATER PROVINCE. AAPG SEARCH AND DISCOVERY ARTICLE #10224.

FREITAS, B. T., SILVA, L. H., ALMEIDA, R. P., GALEAZZI, C. P., FIGUEIREDO, H. G., TAMURA, L. N., & ASSINE, M. L. (2021). CROSS-STRATA PALAEOCURRENT ANALYSIS USING VIRTUAL OUTCROPS. *SEDIMENTOLOGY*, 68(6), 2397-2421.

Gardiner, AR (2006). A variabilidade do pinchout do corpo de areia turbidítico e seu impacto na recuperação de hidrocarbonetos em campos estratigraficamente capturados. *Geological Society, Londres, Publicações Especiais* , 254 (1), 267-287.

JOSEPH, P. & LOMAS, S.A. (2004) DEEP-WATER SEDIMENTATION IN THE ALPINE FORELAND BASIN OF SE FRANCE: NEW PERSPECTIVES ON THE GRES D'ANNOT AND RELATED SYSTEMS—AN INTRODUCTION. *GEOL. SOC. LONDON. SPEC. PUBL.*, 221, 1–16.

LOWE, D. R. (1982) SEDIMENT GRAVITY FLOWS II: DEPOSITIONAL MODELS WITH SPECIAL REFERENCE TO THE DEPOSITS OF HIGH DENSITY TURBIDITY CURRENTS. *JOUR. SED. PETR.*, 52 (1): 279-297.

MAGOON, L.B., DOW, W.G., 1994. O SISTEMA PETROLÍFERO: CAPÍTULO 1: PARTE I. INTRODUÇÃO.

MARQUES, A., HOROTA, R.K., DE SOUZA, E.M., LUPSSINSKU, L., ROSSA, P., AIRES, A.S., BACHI, L., VERONEZ, M.R., GONZAGA, L., E CAZARIN, C.L., 2020. VIRTUAL AND DIGITAL OUTCROPS IN THE PETROLEUM INDUSTRY: A SYSTEMATIC REVIEW: *EARTH-SCIENCE REVIEWS*, v. 208, NO. JUNE, P. 19, DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2020.103260, URL [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.EARSCIREV.2020.103260](https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2020.103260).

MIDDLETON, G. V. E HAMPTON, M., 1973. SEDIMENT GRAVITY FLOWS: MECHANICS OF FLOW AND DEPOSITION. IN: MIDDLETON G. V. E BOUMA A. (EDS). *TURBIDITES AND DEEP WATER SEDIMENTATION*. LOS ANGELES, SEPM, p. 1-38.

- MILANI E. J. E THOMAZ FILHO A. (2000) SEDIMENTARY BASINS OF SOUTH AMERICA. IN: CORDANI U. G., MILANI E. J., THOMAS FILHO A., CAMPOS D. A. (EDS). TECTONIC EVOLUTION OF SOUTH AMERICA. RIO DE JANEIRO, P. 389-449.
- MILANI, E.J., BRANDÃO, J.A.S.L., ZALÁN, P.V., & GAMBOA, L.A.P., 2001. PETRÓLEO NA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA: GEOLOGIA, EXPLORAÇÃO, RESULTADOS E PERSPECTIVAS. REVISTA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 18, 352-396.
- MULDER, T. E ALEXANDER, J., 2001. THE PHYSICAL CHARACTER OF SEDIMENTARY DENSITY CURRENTS AND THEIR DEPOSITS. SEDIMENTOLOGY 48:269–299
- MUTTI, E., 1992. TURBIDITE SANDSTONE. MILAN, AGIP & I.G.U., 275 P.
- NESBIT, P.R. ET AL. 3-D STRATIGRAPHIC MAPPING USING A DIGITAL OUTCROP MODEL DERIVED FROM UAV IMAGES AND STRUCTURE-FROM-MOTION PHOTOGRAMMETRY: GEOSPHERE, V. 14, NO. 6, P. 2469– 2486
- PICKERING, K. T., HISCOTT, R. N., HEIN, F. J., 1986. DEEP MARINE ENVIRONMENTS: CLASTIC SEDIMENTATION AND TECTONICS. LONDON, 416 P.
- PRELAT, A., HODGSON, D. M., FLINT, S., 2009. EVOLUTION, ARCHITECTURE AND HIERARCHY OF DISTRIBUTARY DEEP-WATER DEPOSITS: A HIGH-RESOLUTION OUTCROP INVESTIGATION FROM THE PERMIAN KAROO BASIN, SOUTH AFRICA. SEDIMENTOLOGY. 56. 2132 - 2154. 10.1111/j.1365-3091.2009.01073.x.
- RINGROSE, P., 2020. GEOLOGICAL STORAGE OF CO₂: PROCESSES, CAPACITY AND CONSTRAINTS. IN: HOW TO STORE CO₂ UNDERGROUND: INSIGHTS FROM EARLY-MOVER CCS PROJECTS. SPRINGERBRIEFS IN EARTH SCIENCES. SPRINGER, CHAM. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-3-030-33113-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33113-9_2)
- ROSA, A. J., DE SOUZA CARVALHO, R., XAVIER, J. A. D., 2006. ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO. INTERCIÊNCIA.
- SCHNEIDER, R. L., MUHLMANN, H., TOMMASI, E., MEDEIROS, R.A., DAEMON, R.A., NOGUEIRA, A. A., 1974. REVISÃO ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ. IN: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. PORTO ALEGRE. ANAIS. V 1: 41-65.
- ULLMAN, S., 1979, THE INTERPRETATION OF STRUCTURE FROM MOTION: PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON. SERIES B, CONTAINING PAPERS OF A BIOLOGICAL

CHARACTER. ROYAL SOCIETY (GREAT BRITAIN), V. 203, NO. 1153, P. 405–426, DOI: 10.1098/RSPB.1979.0006.

VESELY, F. F. ET AL., 2021. OS PRIMEIROS TURBIDITOS DO BRASIL. CURITIBA: BOLETIM PARANAENSE DE GEOCIÊNCIAS, 110-129 P. V. 78.

VIANA, C. D., 2021. FOTOGAMETRIA DIGITAL MULTI-ESCALA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS ESTRUTURAIS (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO).

WESTOBY, M.J., 2012. 'STRUCTURE-FROM-MOTION' PHOTOGRAMMETRY: A LOW-COST, EFFECTIVE TOOL FOR GEOSCIENCE APPLICATIONS. GEOMORPHOLOGY, 300-314 P. V. 179.

WYNN, R. B., CRONIN, B. T., PEAKALL, J., 2007. SINUOUS DEEP-WATER CHANNELS: GENESIS, GEOMETRY AND ARCHITECTURE, MARINE AND PETROLEUM GEOLOGY, VOLUME 24, ISSUES 6–9, PAGES 341-387, ISSN 0264-8172, [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.MARPETGEO.2007.06.001](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.06.001)