

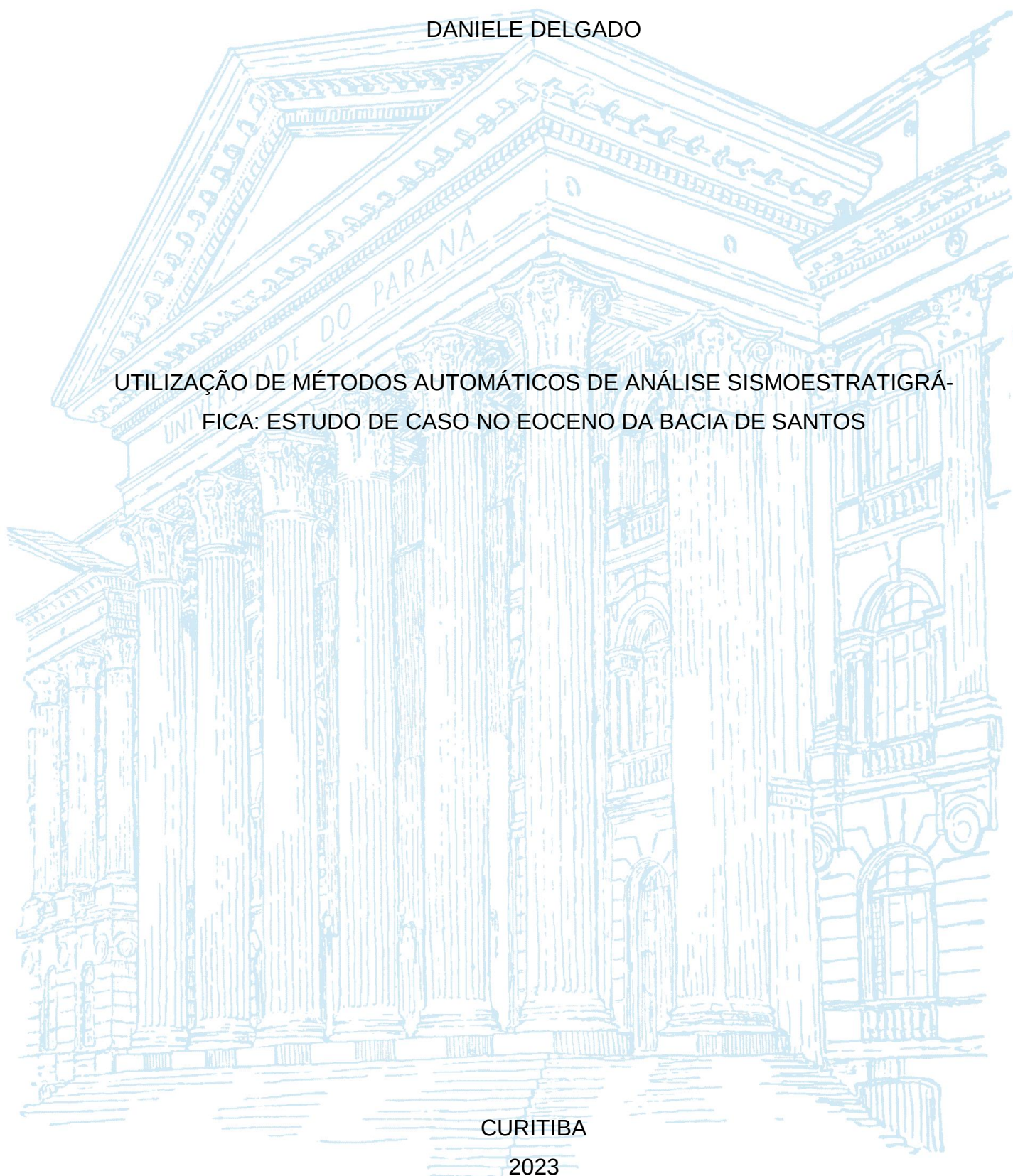
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIELE DELGADO

UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS AUTOMÁTICOS DE ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA: ESTUDO DE CASO NO EOCENO DA BACIA DE SANTOS

CURITIBA

2023



DANIELE DELGADO

UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS AUTOMÁTICOS DE ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁ-
FICA: ESTUDO DE CASO NO EOCENO DA BACIA DE SANTOS

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.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Farias Vesely

CURITIBA

2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Vânia e Marcos, que sempre me apoiaram, me incentivaram e fizeram de tudo para que eu chegasse aonde estou hoje; à minha irmã Emanuele, minha primeira e melhor amiga e companheira.

À Universidade Federal do Paraná, que me proporcionou a plena experiência de uma universidade pública e de qualidade.

Ao professor Fernando Farias Vesely, que além de ser meu orientador no trabalho final também fez parte da minha caminhada durante dois anos de iniciação científica. Agradeço por todas as conversas, todas as trocas de ideias e todo o conhecimento adquirido em todos os trabalhos que desenvolvemos juntos.

Ao LABAP, que foi meu escritório em grande parte da graduação, principalmente nesta reta final; a todos os professores, pós-graduandos e graduandos do laboratório com quem já tive a oportunidade de conversar e compartilhar conhecimento.

À dGB Earth Sciences por ceder licença acadêmica do OpendText Pro para desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas da turma de 2017. Foram tantas experiências e momentos juntos que só posso agradecer por fazer parte de tudo que somos.

Aos meus amigos e amigas de Curitiba Andressa, Cristian, Evelyn, Gabriel, Juliana, Luísa e Yasmin. Se hoje termino a graduação, isso com certeza se dá pela amizade e companheirismo de todos vocês.

Aos meus amigos de Guarapuava Jordana, Delane e Guilherme. Agradeço por mesmo dez anos depois ainda estarem ao meu lado me apoiando em toda essa caminhada.

Ao meu namorado, amigo e companheiro Marcelo. Só tenho a agradecer por cada palavra, cada beijo e cada abraço que foram meu conforto nos momentos em que mais precisei.

E por fim a mim mesma. Só eu sei cada coisa externa e interna que passei ao longo desses seis anos, e se cheguei aqui foi porque tive a força de ver cada dia mais uma melhor versão de mim mesma.

RESUMO

A estratigrafia de sequências é uma das ferramentas mais importantes e mais utilizadas na indústria do petróleo. Suas principais funções consistem em analisar tendências deposicionais a partir de mudanças no nível de base, gerando assim um entendimento sobre o arcabouço estratigráfico de bacias sedimentares. Suas bases estão pautadas na sismoestratigrafia, uma técnica de análise de dados sísmico a partir da interpretação de refletores e das relações de terminações entre eles. Entretanto, o mapeamento manual de refletores em extensos volumes sísmicos 3D é um processo demorado. Como solução tecnológica, diversos programas e ferramentas vem sendo desenvolvidos para melhorar e automatizar a análise de sequências deposicionais a partir de dados sísmicos. Nesse sentido, este trabalho consistiu em testar uma dessas ferramentas automatizadas disponíveis, sendo ela o complemento SSIS (*Sequence Stratigraphic Interpretation System*) do programa OpendTect Pro. Uma de suas funções, que foi executada neste trabalho, é a geração de uma carta cronoestratigráfica, ou diagrama de Wheeler. O objeto de estudo escolhido foi uma porção de 387 km² do bloco sísmico BS-500, localizado na porção norte da bacia de Santos. O intervalo escolhido foi o Eoceno devido ao fato de ele já ter sido analisado mediante métodos manuais de mapeamento sísmico. Além disso, a qualidade do sinal sísmico nesse intervalo é excelente. Para processar o dado utilizando o SSIS foram necessárias três etapas anteriores, executadas dentro do próprio programa, sendo elas: 1) geração de um cubo de atributos, pelo complemento *Dip Steering*; 2) mapeamento de dois horizontes na base e no topo do intervalo analisado e; 3) geração de um cubo de horizontes pelo complemento *Horizon Cube*. O cubo de horizontes foi então processado pelo SSIS para geração do diagrama de Wheeler. A análise de variação do nível relativo do mar (NRM) e a interpretação de sequências deposicionais foi feita para três *inlines* a partir do deslocamento das terminações em *onlap* dos horizontes. Foram identificadas 6 sequências deposicionais principais nas porções central e nordeste do volume sísmico e 4 sequências na porção sudoeste, evidenciando a falta de continuidade dos limites de sequências ao longo do *strike* da bacia. Foi possível ainda observar que, de forma geral, períodos de elevação do nível relativo do mar predominaram sobre períodos de queda. Esses resultados então foram comparados com o diagrama de Wheeler produzido manualmente em estudo anterior no intervalo estratigráfico, porém utilizando linha sísmica 2D localizada cerca de 50 km a NE da área estudada. Uma diferença constatada é o número de sequências deposicionais interpretadas, reforçando a conclusão de que as sequências não são contínuas lateralmente. Notou-se também que, diferentemente do observado no presente trabalho, o estudo anterior identificou predomínio de queda do NRM. Interpreta-se que essa discrepância se deve à diferença na resolução dos dados utilizados em cada trabalho.

Palavras-chave: Interpretação sísmica. Estratigrafia de sequências. Geotecnologias.

ABSTRACT

Sequence stratigraphy is one of the most important and most used tools in oil industry. Sequence stratigraphy main functions consist in analyze the sedimentary response to base level changes, creating then an understanding about the stratigraphic framework of sedimentary basins. It is based in isostratigraphy, a seismic data analyze technique from the interpretation of reflectors and the terminations relations between them. However, manual mapping of reflectors in large 3D seismic volumes is a slow process and as a technological solution, several software and tools have been developed to automate and improve the depositional sequences analyzes from seismic data. Therefore, this research consisted of testing one of these available automatic tools, which is OpendTect Pro software's plugin SSIS (Sequence Stratigraphic Interpretation System). One of its functions, and the one which was executed in this work, is generating a chronostratigraphic chart, or Wheeler diagram. The chosen study object is a 387km² portion of seismic volume BS-500, located in the northern part of Santos basin. The chosen time interval was Eocene due to previous seismic mapping works using manual methods in this interval. Furthermore, the seismic signal quality in this interval is excellent. To data process in the SSIS plugin, there are three previous steps, also executed in the software: 1) create a steering cube, in Dip Steering plugin; 2) mapping two horizons, top and base, of the studied interval and; 3) create a horizon cube in the Horizon Cube plugin. The created horizon cube was then processed in SSIS plugin to create a Wheeler diagram. The relative sea level (RSL) changes analyzes were and the depositional sequences interpretation were made in three inlines from the variations in the horizons onlap terminations. In the central and northeastern portions of the seismic volume, 6 depositional sequences were identified, and in the southwest portion, 4 depositional sequences were identified, evidencing the lack of continuity of sequence limits along basin strike. It was also observed that moment of relative base-level rise prevails over relative fall moments. These results were compared with a Wheeler diagram created with manual methods in previous research made in the same stratigraphic interval. However, this previous research used a 2D seismic line, and is located 50km northeast of this work study area. One difference observed is the number of depositional sequences interpreted, reinforcing the conclusion of no lateral continuity of the sequences. In the previous work it was also noted, unlike the present work, that moments of relative fall of base-level prevail over moments of relative rise. This discrepancy is interpreted as a difference in each work used data resolution.

Keywords: Seismic Interpretation. Sequence stratigraphy. Geotechnology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Terminações estratais na sismoestratigrafia.	9
Figura 2 - Relação entre mudanças no nível de base e taxa de sedimentação e as trajetórias da linha de costa.	11
Figura 3 - Bloco sísmico estudado no trabalho.	16
Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo em relação à área de estudo de Berton & Vesely (2016).	16
Figura 5 - Fluxograma de trabalho.	17
Figura 6 - Configuração e dado gerado pelo <i>Dip Steering</i>	18
Figura 7 - Configurações para gerar um <i>Detailed Steering Cube</i>	19
Figura 8 - Indicação dos horizontes topo e base de Berton & Vesely (2016).	20
Figura 9 - Horizontes traçados	21
Figura 10 - Configurações para a criação de um cubo de horizontes.	22
Figura 11 - Configurações do filtro aplicado ao cubo de horizontes.	23
Figura 12 - Cubo de horizontes gerado pelo complemento <i>Horizon Cube</i>	23
Figura 13 - Localização das seções (<i>inlines</i> e <i>crossline</i>) em relação ao bloco sísmico.	25
Figura 14 - Diagrama de Wheeler gerado pelo complemento SSIS.	26
Figura 15 – Curva de variação do nível do mar para cada <i>inline</i>	27
Figura 16 - Sequências deposicionais interpretadas para cada <i>inline</i>	29
Figura 17 - Diagrama de Wheeler elaborado por Berton & Vesely (2016).	31
Figura 18 - Localização das seções em relação a área de estudo de Berton & Vesely (2016).	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Coordenadas dos vértices do bloco sísmico estudado.....	15
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 SISMOESTRATIGRAFIA	9
2.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS.....	10
2.3 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS NO EOCENO DA BACIA DE SANTOS ...	14
3 MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1 DIP STEERING	17
3.2 HORIZON CUBE.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A sismoestratigrafia forneceu as bases iniciais para o desenvolvimento da estratigrafia de sequências. Essa abordagem conceitual e metodológica é amplamente utilizada na indústria do petróleo por ser uma importante ferramenta que auxilia na identificação e predição de elementos dos sistemas petrolíferos tais como potenciais reservatórios de hidrocarbonetos, trapas estratigráficas e folhelhos geradores.

Entretanto, a análise de sequências deposicionais em seções sísmicas é um processo relativamente demorado, principalmente quando se trabalha com dado 3D, pois envolve o mapeamento de um grande número de horizontes e suas relações de terminação. Visando automatizar esse processo, diversas empresas passaram a modernizar suas ferramentas, desenvolvendo softwares que possibilitam automatizar etapas da análise estratigráfica a partir de dados sísmicos.

Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo testar a aplicação de métodos automatizados de sismoestratigrafia para delimitar e mapear sequências deposicionais em três dimensões. Como área piloto para este trabalho foi escolhido o intervalo eoceno do norte da Bacia de Santos, que dispõe de imageamento sísmico 3D de ótima qualidade e já foi objeto de trabalho anterior utilizando métodos convencionais (manuais) de mapeamento sísmico (Berton & Vesely, 2016). Nesse sentido, é também objetivo do trabalho comparar os resultados com aqueles obtidos por esses autores.

A bacia de Santos é uma das petrolíferas mais importantes do Brasil, que atualmente conta com aproximadamente 450 poços exploratórios e que, em junho de 2022, teve uma produção de cerca de 2,1 milhões de barris por dia, segundo relatório da ANP. Os depósitos eocênicos da bacia fazem parte do estágio tectônico de deriva (*drift*). O intervalo compõe uma importante sucessão progradante, na qual grandes depósitos de movimento de massa e turbiditos foram formados (Moreira & Carminatti, 2003) associados a clinoformas de talude facilmente delineadas no dado sísmico (Berton & Vesely, 2016).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

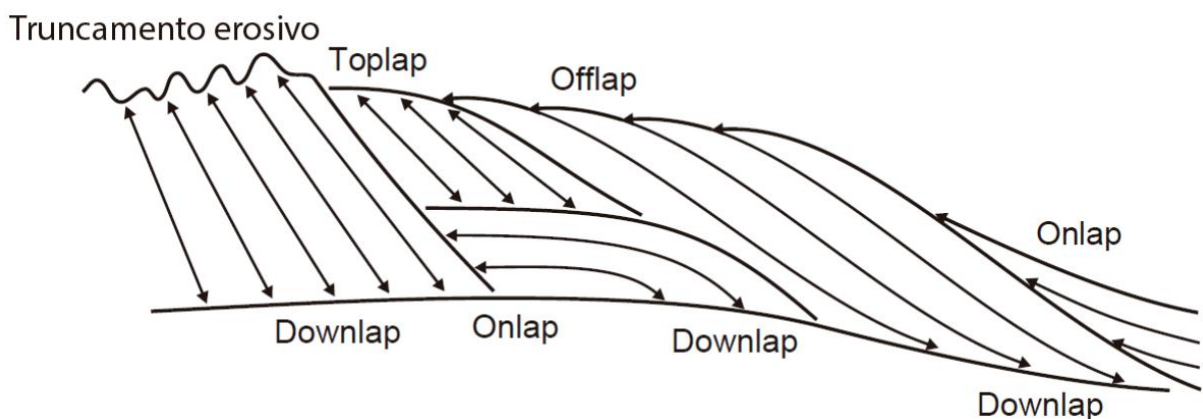
2.1 SISMOESTRATIGRAFIA

Sismoestratigrafia é uma técnica de análise estratigráfica surgida nos anos 60 na indústria do petróleo e muito desenvolvida e popularizada nos anos 70. Pode ser definida como o estudo de sucessões estratigráficas a partir da interpretação de refletores e conjuntos de refletores sísmicos em seções (2D) ou blocos tridimensionais (3D), permitindo melhor compreensão da evolução tectono-sedimentar de uma bacia (Vail et. al, 1977).

As reflexões sísmicas são resultado de contrastes de impedância acústica. Mitchum et. al (1977) consideram que esses contrastes demarcam principalmente superfícies estratais e discordâncias. Segundo Ribeiro (2001), as superfícies estratais correspondem aos níveis de acamamento, sendo, portanto, paleossuperfícies deposicionais síncronas em quase toda sua extensão. Já as discordâncias correspondem a períodos de erosão ou não-deposição, e que tem um importante significado cronoestratigráfico por sempre delimitarem estratos mais antigos abaixo e mais jovens acima.

A unidade fundamental da sismoestratigrafia é a sequência sísmica, que tem seus limites reconhecidos a partir das relações entre as terminações dos refletores sísmicos (Ribeiro, 2001). Essas terminações por sua vez são a relação geométrica entre o estrato e a superfície estratigráfica na qual ele termina (Catuneanu, 2006). São identificadas e de grande importância para a estratigrafia de sequências cinco terminações estratais (Figura 1):

Figura 1 - Terminações estratais na sismoestratigrafia.



Fonte: Correa (2016).

- Truncamento é a terminação dos estratos sob uma superfície erosional e representa tanto um relevo erosivo quando uma discordância angular entre as unidades;
- *Toplap* é a terminação de clinoformas inclinadas sob superfícies de menor ângulo sem evidência de erosão, e são o resultado de um período de não deposição bem como são o limite proximal de uma unidade estratigráfica;
- *Onlap* é a terminação de superfícies de baixo ângulo sobre superfícies mais inclinadas, e delimitam o limite lateral de uma unidade estratigráfica;
- *Downlap* é a terminação de clinoformas progradantes inclinadas sobre uma superfície de menor ângulo, e representam o limite distal de uma unidade estratigráfica;
- *Offlap* é a terminação de clinoformas progradantes sobre estratos concordantes, nas quais os estratos mais jovens deixam expostas porções dos estratos mais antigos, e representa a queda do nível de base e exposição das unidades depositadas, sendo característica de uma regressão forçada.

Com as terminações é possível reconhecer padrões de empilhamento e também determinar mudanças no nível relativo do mar mediante mapeamento das terminações em *onlap* (Vail et. al, 1977). Para isso, parte-se da premissa que deslocamento do *onlap* para o continente indica nível do mar em ascensão, e deslocamento do *onlap* para a bacia indica nível do mar em queda.

2.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

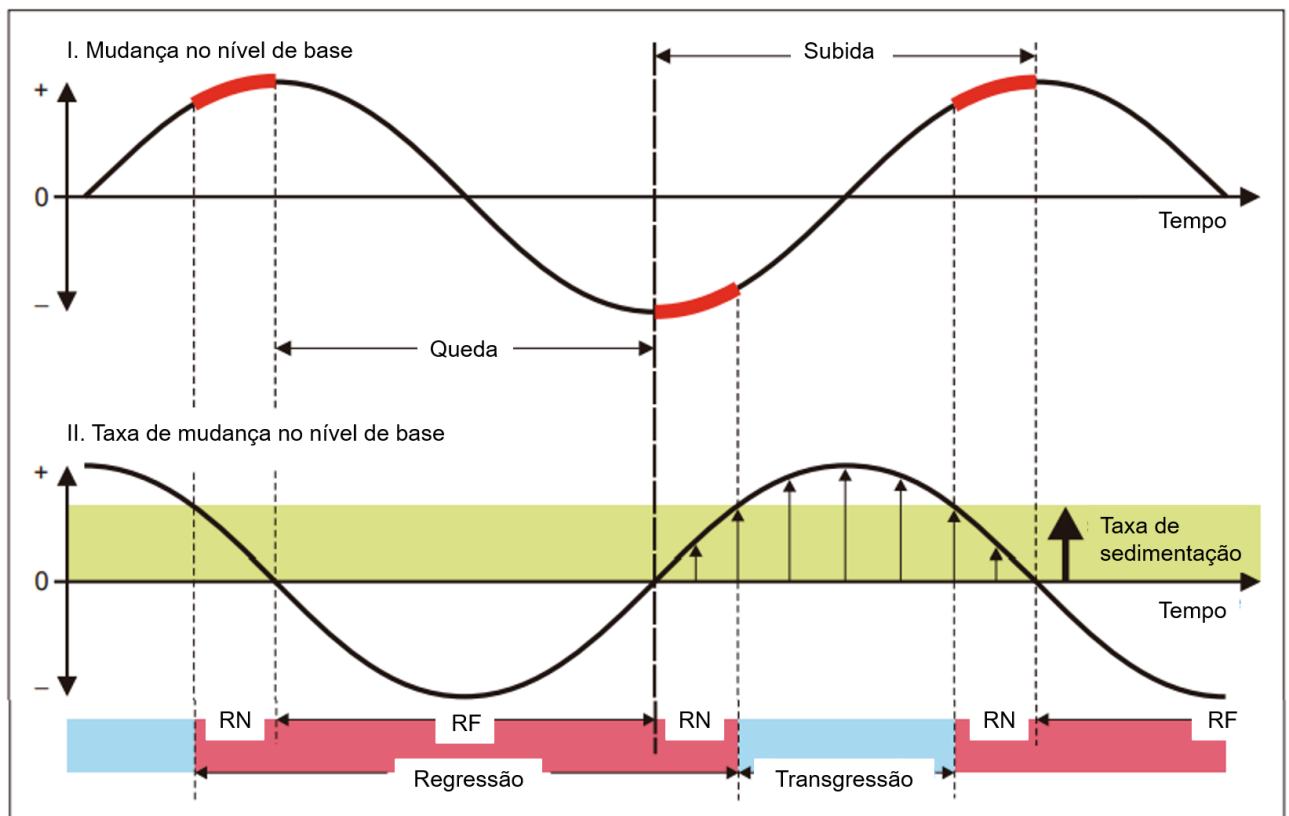
É uma área da geologia que ajuda a compreender como as unidades estratigráficas, fácies e elementos deposicionais se relacionam entre si no tempo e espaço. A ferramenta analisa a resposta sedimentar a mudanças no nível de base, e as tendências deposicionais resultantes do balanço entre taxa de sedimentação e acomodação (Catuneanu, 2006).

A acomodação é todo espaço disponível para o preenchimento sedimentar e é diretamente influenciado pela combinação dos efeitos do clima, tectônica e eustasia. O nível de base regional em bacias marginais, para fins de simplificação, corresponde ao nível do mar (Jervy, 1988 e Schumm, 1993 *apud* Catuneanu, 2006).

Dessa forma, variações relativas do nível do mar modificam o espaço de acomodação nessas bacias. Já o aporte sedimentar se refere à quantidade (ou fluxo) e ao tipo (ou granulometria) do sedimento que chega na bacia, e taxa de sedimentação se refere à velocidade com que o sedimento se acumula em um determinado local sobre a superfície deposicional.

A relação entre acomodação e taxa de sedimentação é o que determina as trajetórias da linha de costa (Figura 2) tais como transgressão, regressão normal e regressão forçada, conforme descrito a seguir:

Figura 2 - Relação entre mudanças no nível de base e taxa de sedimentação e as trajetórias da linha de costa.



Fonte: Adaptado de Catuneanu (2006).

- Transgressão é a migração da linha de costa em direção ao continente, e ocorre quando a taxa de acomodação, pelo aumento no nível de base, é maior do que a taxa de sedimentação. Isso resulta em um padrão de empilhamento retrogradacional, no qual fácies distais são depositadas sobre fácies proximais (Catuneanu, 2006);

- Regressão normal é a migração da linha de costa em direção a bacia, ocorrendo durante elevação do nível de base na condição em que a taxa de sedimentação é maior do que a taxa de criação de espaço de acomodação (Catuneanu, 2006);

- Regressão forçada é a migração da linha de costa em direção à bacia devido à queda no nível de base, independente da taxa de sedimentação. Tanto a regressão forçada quanto a normal formam padrões de empilhamento prográdacional, no qual fácies proximais se depositam sobre fácies distais (Catuneanu, 2006).

Além de determinarem as trajetórias da linha de costa, a relação entre sedimentação e mudança no nível de base cria diversas superfícies estratigráficas, que registram mudanças espaço-temporais no regime deposicional (ambiente deposicional, aporte sedimentar e/ou energia de fluxo do ambiente) e variações do estilo de empilhamento estratigráfico. As superfícies fornecem informações importantes para a interpretação de sucessões estratigráficas, e podem ser identificadas a partir de vários critérios, tais como natureza do contato, natureza das fácies em contato, tendências deposicionais dos estratos acima e abaixo das superfícies, características fósseis, minerais diagenéticos e terminações estratais (Catuneanu, 2006).

Como já mencionado, sedimentação e mudança no nível de base controlam as trajetórias da linha de costa que, por sua vez, são os grandes formadores das sequências deposicionais e das superfícies estratigráficas. De acordo com Catuneanu (2006), existem quatro eventos importantes nos ciclos de transgressão e regressão para a formação dessas superfícies, sendo eles:

- Início da regressão forçada: momento de queda no nível de base, acompanhado por uma mudança da fase de sedimentação para a fase de erosão;
- Final da regressão forçada: momento final da queda no nível de base, acompanhado por uma mudança de uma fase de degradação para agração em ambientes fluviais e marinhos;
- Final da regressão: momento de subida no nível de base em que a linha de costa sofre uma inversão na trajetória, passando de regressão para transgressão;
- Final da transgressão: momento de subida do nível de base em que a linha de costa sofre uma inversão na trajetória, passando de transgressão para regressão.

Cada um desses eventos forma uma superfície estratigráfica importante para a estratigrafia de sequências, pois delimitam também os tratos de sistemas. Vale ressaltar que existem inúmeras superfícies estratigráficas, mas as mais importantes para o estudo das sequências estratigráficas são:

- Discordância subaérea: é uma superfície de erosão ou não deposição, gerada durante a queda no nível de base (regressão forçada), quando o substrato fica exposto e é afetado por processos subaéreos como incisões fluviais, degradação eólica ou pedogênese (Catuneanu, 2006). Gradualmente se estende em direção à bacia e atinge seu máximo ao final da regressão forçada, correspondendo ao maior *hiatus* na sedimentação, colocando em contato estratos sem nenhuma correlação genética (Catuneanu, 2006).
- Conformidade correlativa: se forma em ambiente marinho ao final da queda do nível de base (Hunt & Tucker, 1992), e se aproxima do paleo fundo oceânico ao final da regressão forçada, correspondente à clinoforma mais jovem associada ao *offlap* de regressão forçada. A superfície é correlata da terminação da discordância subaérea em direção ao mar, separando depósitos de regressão forçada abaixo e depósitos de regressão normal acima (Catuneanu, 2006). É correspondente, portanto, à porção que não foi exposta a processos subaéreos, mas que, no entanto, possui a mesma idade e tempo de formação da discordância subaérea.
- Superfície basal de regressão forçada: foi definida por Hunt & Tucker (1992) como a base dos depósitos formados durante a regressão forçada, sendo que abaixo dela ocorrem os depósitos de regressão normal. A superfície separa dois depósitos com tendências progradantes, mas as clinoformas depositadas acima da superfície possuem uma terminação em *downlap* sobre a mesma (Catuneanu, 2006).
- Superfície regressiva de erosão marinha: ocorre durante a queda do nível de base quando a ação das ondas provoca erosão e retrabalhamento do substrato marinho para que se iguale ao perfil de equilíbrio das ondas. Esse processo só ocorre quando o gradiente do substrato marinho é menor que o gradiente do perfil de equilíbrio das ondas (Catuneanu, 2006).
- Superfície de regressão máxima: ocorre durante a subida do nível de base, quando a acomodação passa a superar a taxa de sedimentação e a trajetória regressiva se inverte para uma trajetória transgressiva. A superfície separa abaixo

depósitos com tendência progradacional, agradacional mais próximo a superfície, de depósitos com tendência retrogradacional acima (Catuneanu, 2006).

- Superfície de inundação máxima: marca o fim da transgressão, separando sequências retrogradacionais abaixo e progradacionais acima. A mudança entre os dois regimes acontece durante a subida do nível de base, em um momento em que a taxa de sedimentação ultrapassa a acomodação. Em seções sísmicas, ela é identificada como uma superfície de *downlap*, com sequências progradantes logo acima (Catuneanu, 2006).

- Superfície transgressiva de ravinamento: é formada por feições erosivas e de remobilização de sedimentos causadas pela ação de ondas e maré durante o deslocamento da linha de costa em direção ao continente. Essa superfície se forma durante todo o trato transgressivo e fica cada vez mais jovem em direção ao continente (Catuneanu, 2006).

A discordância subaérea e a conformidade correlativa delimitam sequências deposicionais, unidade fundamental da estratigrafia de sequências conforme definido inicialmente por Vail et. al (1977). Sendo assim, o tempo de formação do limite de sequência corresponde ao máximo rebaixamento do nível relativo do mar que, na sismoestratigrafia, é indicado pela mudança na trajetória do *onlap*.

2.3 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS NO EOCENO DA BACIA DE SANTOS

A Bacia de Santos está localizada na margem continental leste brasileira, limitada a norte com a Bacia de Campos, pelo Alto de Cabo Frio e a sul com a Bacia de Pelotas, pela Plataforma de Florianópolis. As primeiras descrições da litoestratigrafia da bacia foram realizadas na década de 70, e Pereira & Feijó (1994) *apud* Moreira et. al (2007) estabelecem um arcabouço cronoestratigráfico da bacia, em termos de sequências deposicionais.

O intervalo Eoceno da bacia corresponde a depósitos da fase drift do Oceano Atlântico, caracterizado por uma fase progradante, que representa um trato de sistemas regressivo de nível baixo, e uma fase agradante, que representa os tratos de sistemas transgressivo e de nível alto (Moreira et. al, 2001; Moreira & Carminatti, 2003).

Berton & Vesely (2016) realizaram um estudo no intervalo eoceno na porção norte da Bacia de Santos, utilizando dados sísmicos 2D e dados de poços, que teve

por objetivo avaliar os fatores que controlam a geometria dos estratos e os padrões de empilhamento, assim como o momento de deposição dos turbiditos e os depósitos de transporte de massa em águas profundas. No trabalho, os autores utilizam de conceitos e ferramentas da estratigrafia de sequências e da sismoestratigrafia, interpretando padrões de terminação em refletores sísmicos, fácies sísmicas, sequências deposicionais e definindo tendências deposicionais.

Além disso, os autores apresentam um diagrama de Wheeler (carta cronoestratigráfica) para o Eoceno, gerado a partir da interpretação manual de horizontes sísmicos em uma seção 2D. Esse diagrama possibilita a interpretação de tendências gerais de mudanças no nível de base, limites de sequências deposicionais e hiatos deposicionais ou por erosão. A partir do diagrama gerado, os autores observaram que o intervalo foi depositado durante um período de tendência geral regressiva, no qual a regressão forçada foi o padrão dominante. São identificados também depósitos agradacionais gerados por regressão normal, que, no entanto, são eventos significativos em apenas três das sete sequências identificadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

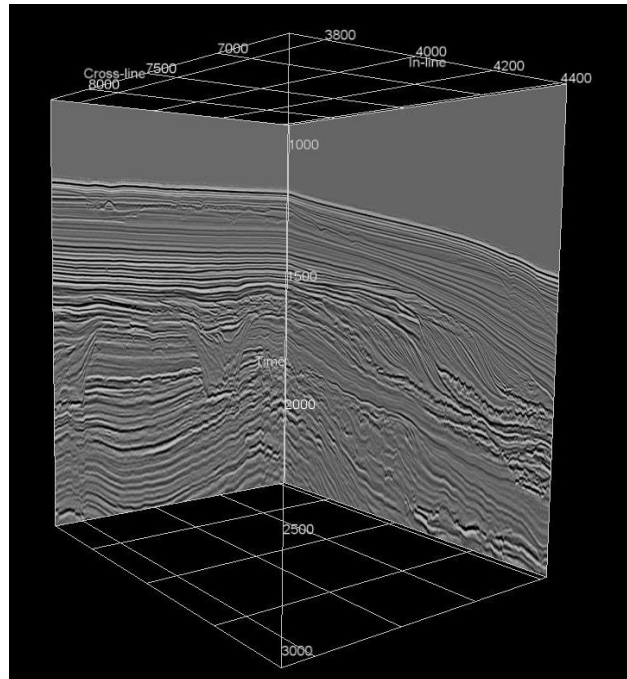
O dado utilizado no trabalho é uma porção de 387km² do bloco sísmico BS-500 (Figura 3), cedido ao Laboratório de Análise de Bacias (LABAP) pela ANP, mediante solicitação formal (Processo UFPR-136867 de 26/09/2018). O levantamento sísmico 3D BS-500 é um dado sísmico post-stack com intervalo de 2 milissegundos (ms) adquirido em 2000. O bloco está localizado na região norte da Bacia de Santos, e a área de estudo deste trabalho se encontra entre as coordenadas apresentadas no Quadro 1, cerca de 12km a sudoeste da área de estudo de Berton & Vesely (2016), que será utilizada como comparação para os resultados gerados (Figura 4).

Quadro 1: Coordenadas dos vértices do bloco sísmico estudado

Coordenada UTM X	Coordenada UTM Y
734774	7327877
743192	7307019
718868	7321543
727171	7300624

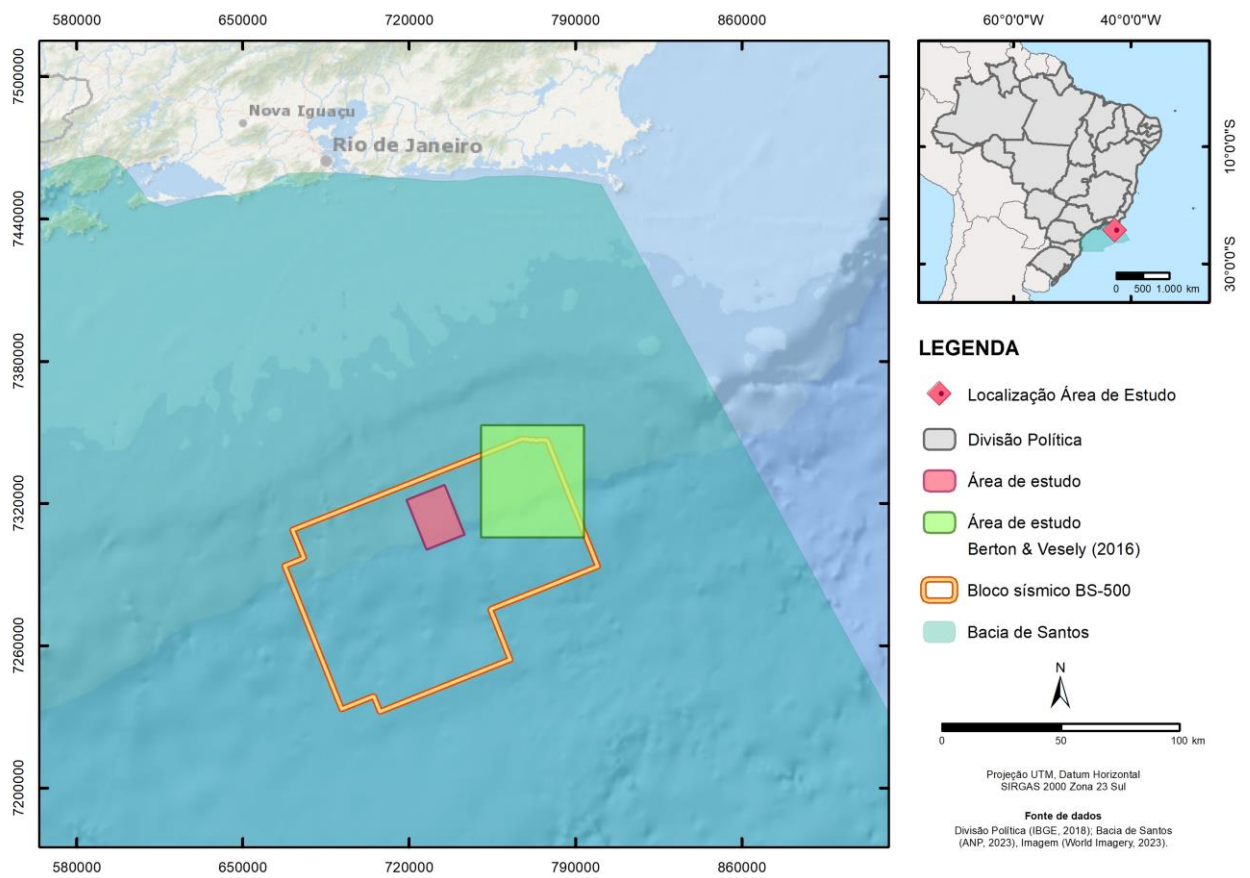
Fonte: A autora (2023).

Figura 3 - Bloco sísmico estudado no trabalho.



Fonte: A autora (2023).

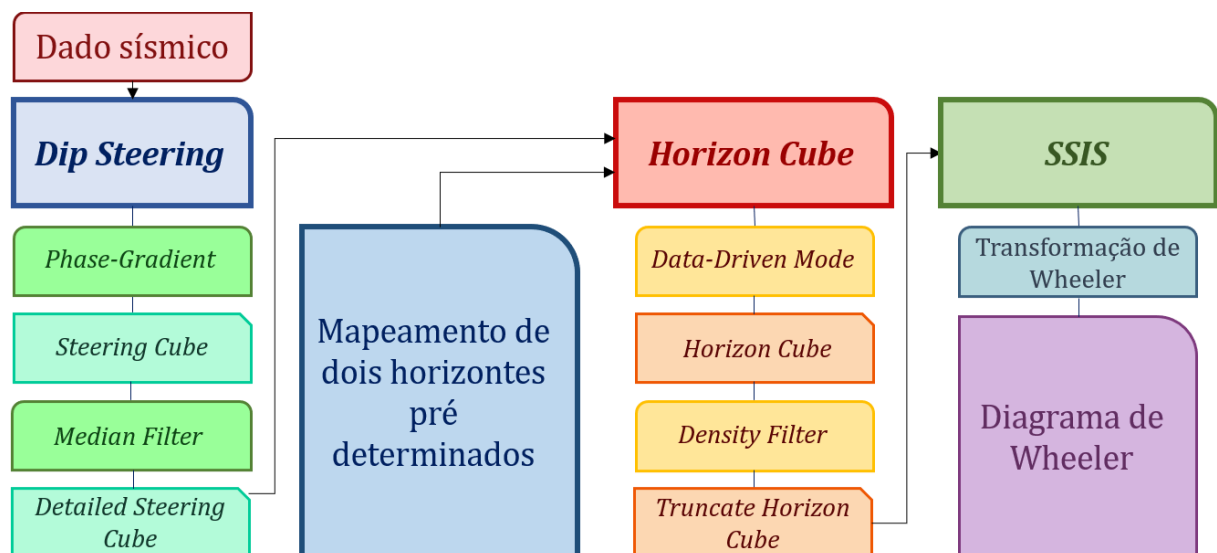
Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo em relação à área de estudo de Berton & Vesely (2016).



Fonte: A autora (2023).

O dado sísmico foi manipulado no programa OpendTect Pro 6.6.0, cuja licença acadêmica foi cedida para o LABAP. A principal ferramenta testada foi o complemento SSIS (*Sequence Stratigraphic Interpretation System*). Para aplicação do SSIS, é necessária anteriormente a utilização de outras duas ferramentas, tais como os complementos *Dip Steering* e *Horizon Cube*, que preparam o dado para ser rodado no SSIS e para que o diagrama de Wheeler seja gerado. O fluxograma com as etapas do trabalho está apresentado na Figura 5. Como o objetivo do trabalho consiste em testar a ferramenta, a sequência de trabalho realizada e que será apresentada, assim como os valores dos parâmetros utilizados, foram baseados no *OpendTect Pro & dGB Plugins Documentation – 6.6* (dGB Beheer B. V, 2022), um manual elaborado pela própria empresa desenvolvedora do software.

Figura 5 - Fluxograma de trabalho.



Fonte: A autora (2023).

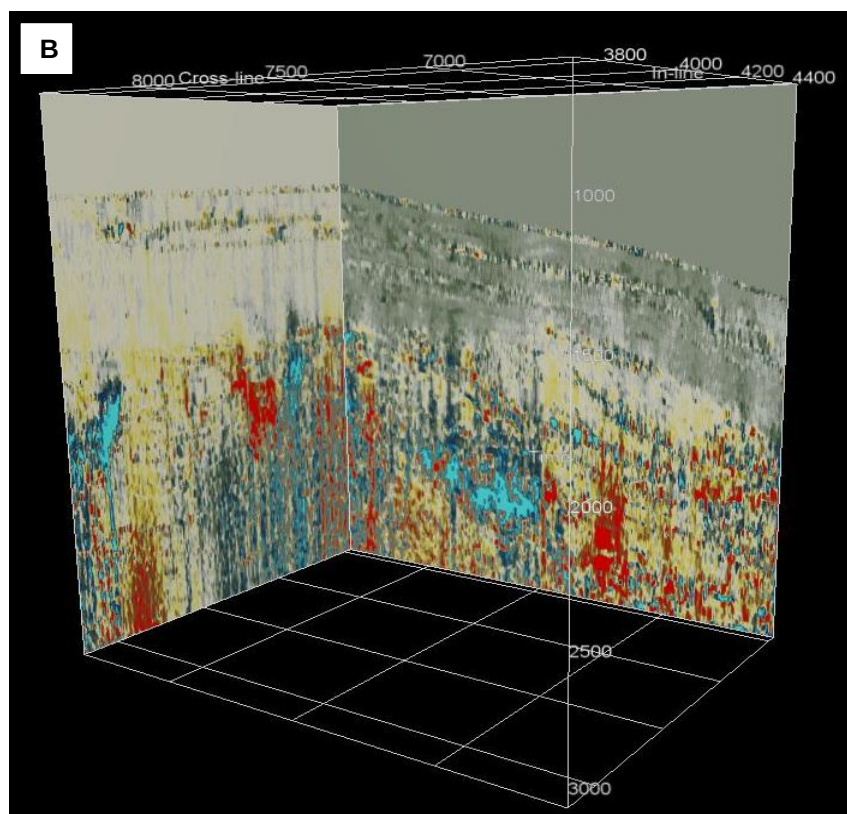
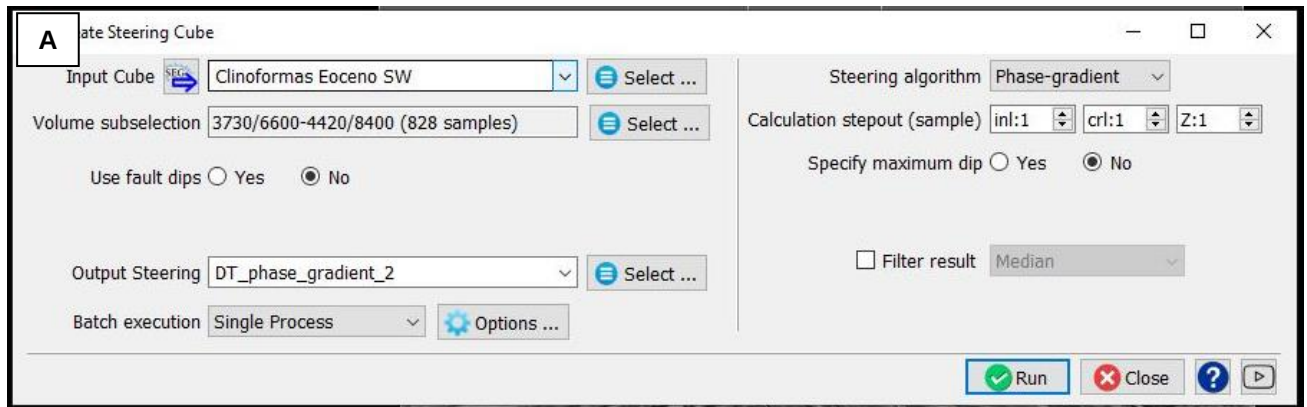
3.1 DIP STEERING

O primeiro complemento utilizado foi o *Dip Steering*, uma ferramenta que calcula o azimute e mergulho ao longo de todos os refletores, tanto na *inline* quanto na *crossline*, e armazena essas informações em um *Steering Cube*, ou cubo de atributos (dGB Beheer B. V, 2022).

Para aplicação da ferramenta existem três algoritmos disponíveis: PCA, *Phase-Gradient* e FFT. O algoritmo escolhido de acordo com o manual foi o *Phase-*

Gradient, que tem seu funcionamento baseado na análise do gradiente da amplitude dos dados, tanto na horizontal quanto verticalmente (dGB Beheer B. V, 2022). As configurações e os valores dos parâmetros utilizados para a criação do *Steering Cube*, bem como o dado gerado, estão presentes na Figura 6.

Figura 6 - Configuração e dado gerado pelo *Dip Steering*.

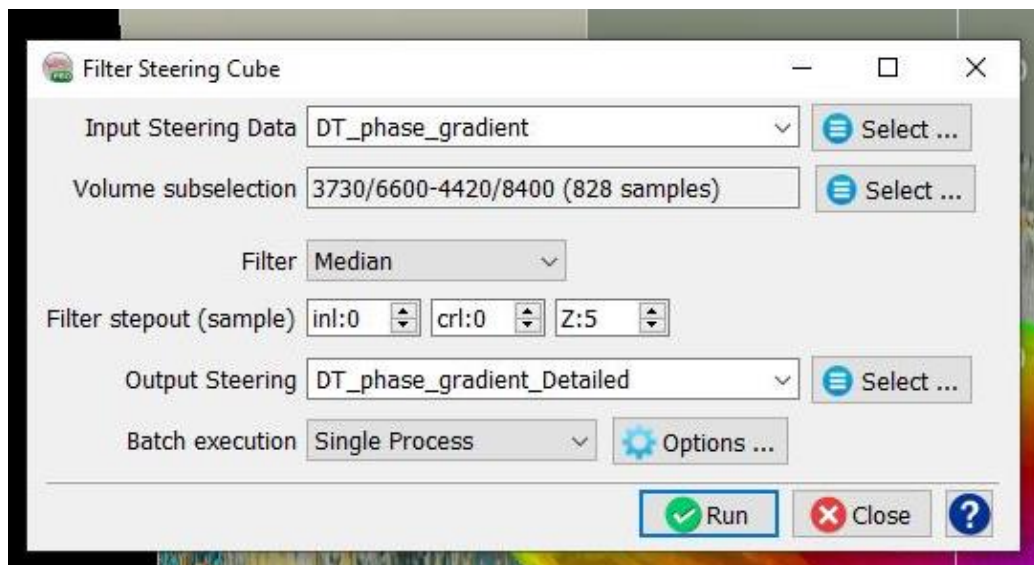


Fonte: A autora (2023).

Legenda – A: Configurações para criação do *Steering Cube* utilizando o algoritmo *Phase-Gradient*; B: Dado gerado pelo complemento.

O algoritmo *Phase-Gradient*, apesar de ser rápido em sua execução, é muito suscetível a ruídos, por isso é necessário passar o *Steering Cube* gerado por um filtro (dGB Beheer B. V, 2022). Seguindo o que é apresentado no manual, o tipo de filtro utilizado foi o *Median*, que gerou um *Detailed Steering Cube*, que, além de ter os ruídos amenizados, preserva as informações de azimuth e mergulho de maneira detalhada. As configurações utilizadas na aplicação do filtro estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Configurações para gerar um *Detailed Steering Cube*.



Fonte: A autora (2023).

3.2 HORIZON CUBE

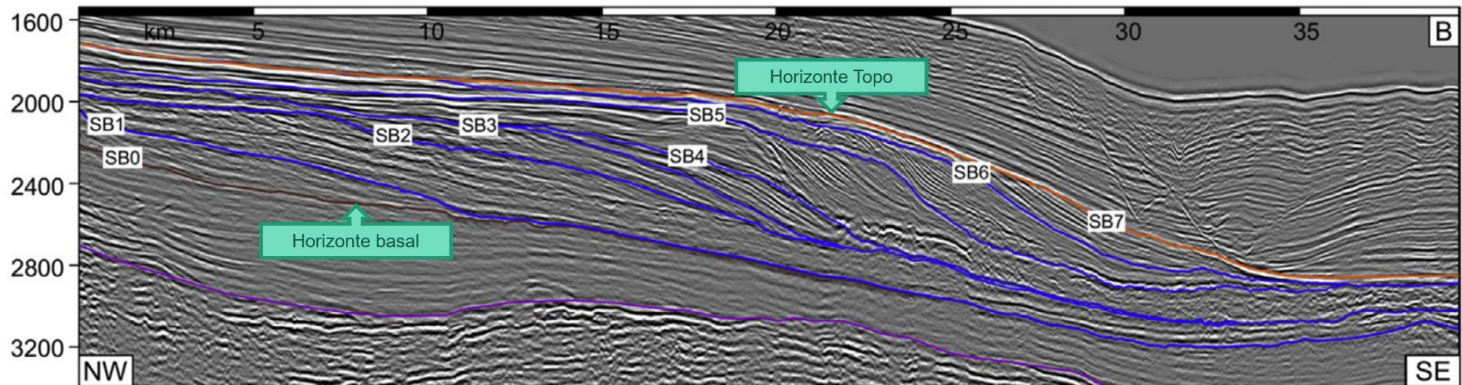
Após o processamento do dado nas etapas já citadas, o passo seguinte foi a aplicação do complemento *Horizon Cube*, uma ferramenta que mapeia automaticamente um grande número de superfícies estratigráficas em três dimensões, e as armazena em um cubo de horizontes (dGB Beheer B. V, 2022).

Para que seja criado o cubo de horizontes, há duas informações principais que precisaram ser carregadas no programa. A primeira delas é o *Detailed Steering Cube* gerado na etapa anterior, e a segunda foram dois horizontes previamente mapeados que limitam o topo e a base de um pacote, no qual os horizontes intermediários foram interpretados automaticamente (dGB Beheer B. V, 2022).

Esses dois horizontes foram previamente gerados no próprio programa utilizando a ferramenta *Auto and Manual Tracking* para criar novos horizontes. Com essa ferramenta, podem ser colocadas em cada *inline* e *crossline* várias sementes (*seeds*), ou pequenos pontos, no horizonte a ser traçado, e que servirão de base para o traçado automático do horizonte utilizando a opção *Tracking* da ferramenta (dGB Beheer B. V, 2022).

Neste trabalho, os horizontes escolhidos inicialmente foram os definidos por Berton & Vesely (2016), como o topo e base do intervalo Eoceno nesta porção da bacia (Figura 8). Entretanto, o horizonte basal possuía muitas irregularidades e se encontrava afetado inclusive pelo que pode ser interpretado como uma feição turbidítica, e para que não houvesse influência desse evento posterior nos resultados finais, o horizonte base foi deslocado para cerca de 3 refletores acima. O Horizonte superior também possuía algumas irregularidades, e para amenizar o efeito delas no resultado final foi traçado um horizonte acima do inicialmente definido.

Figura 8 - Indicação dos horizontes topo e base de Berton & Vesely (2016).

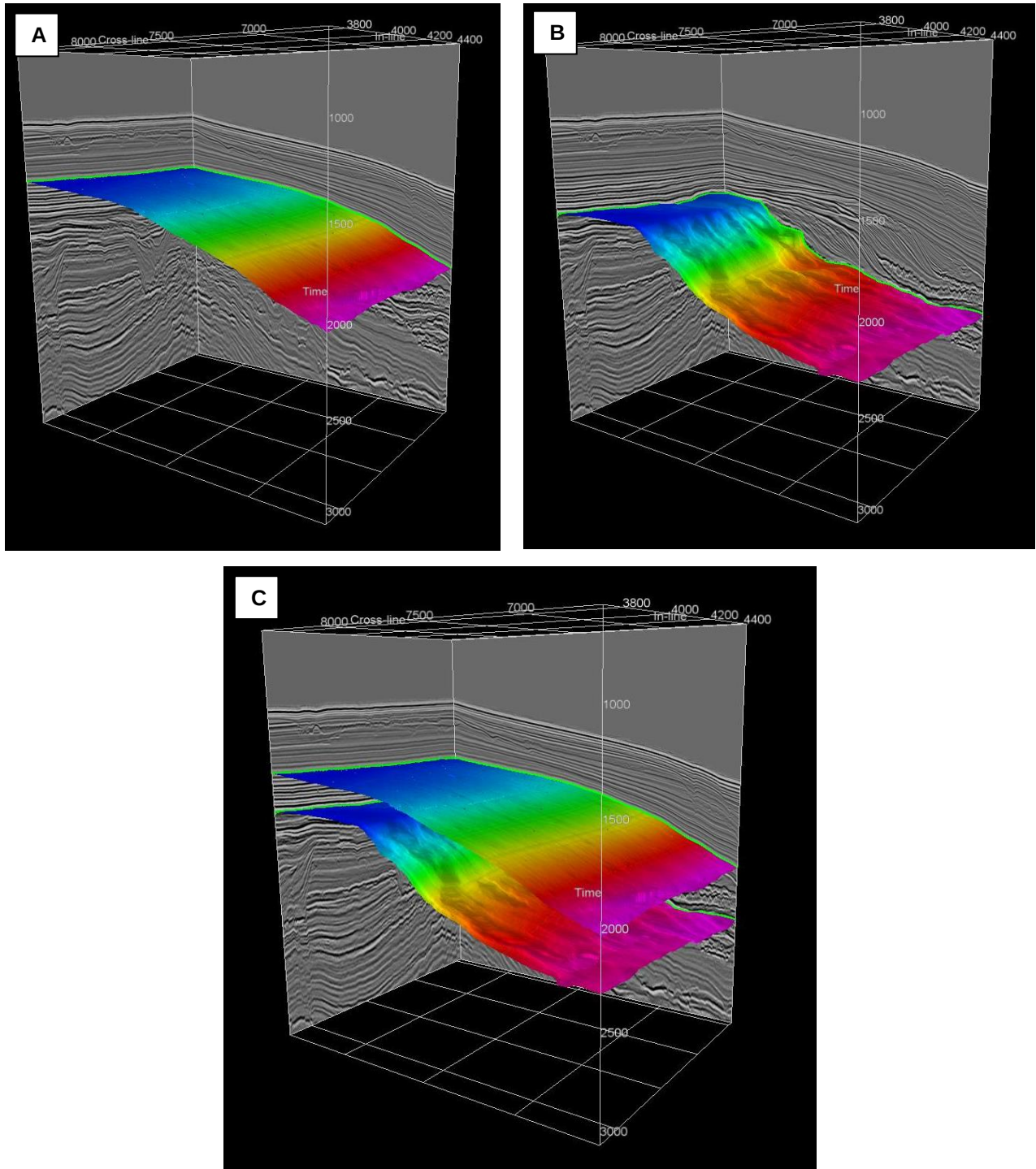


Fonte: Modificado de Berton & Vesely (2016).

Os horizontes de topo e base foram traçados com um espaçamento de 2 em 2 na *inline* e 4 em 4 na *crossline*. Após a utilização da opção *Tracking*, a ferramenta *Gridding* foi usada para finalizar o rastreamento do horizonte em toda a extensão do volume sísmico. Para a gridagem do horizonte base, foi utilizado o algoritmo Triangulação, que é o apresentado no manual, e o espaçamento da *inline* e *crossline* foi respectivamente 2 e 4, o mesmo utilizado na colocação das sementes. O horizonte de topo, após a utilização do *Tracking*, não apresentou nenhum buraco e, portanto,

não foi aplicada a ferramenta *Gridding*. Os dois horizontes traçados são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Horizontes traçados

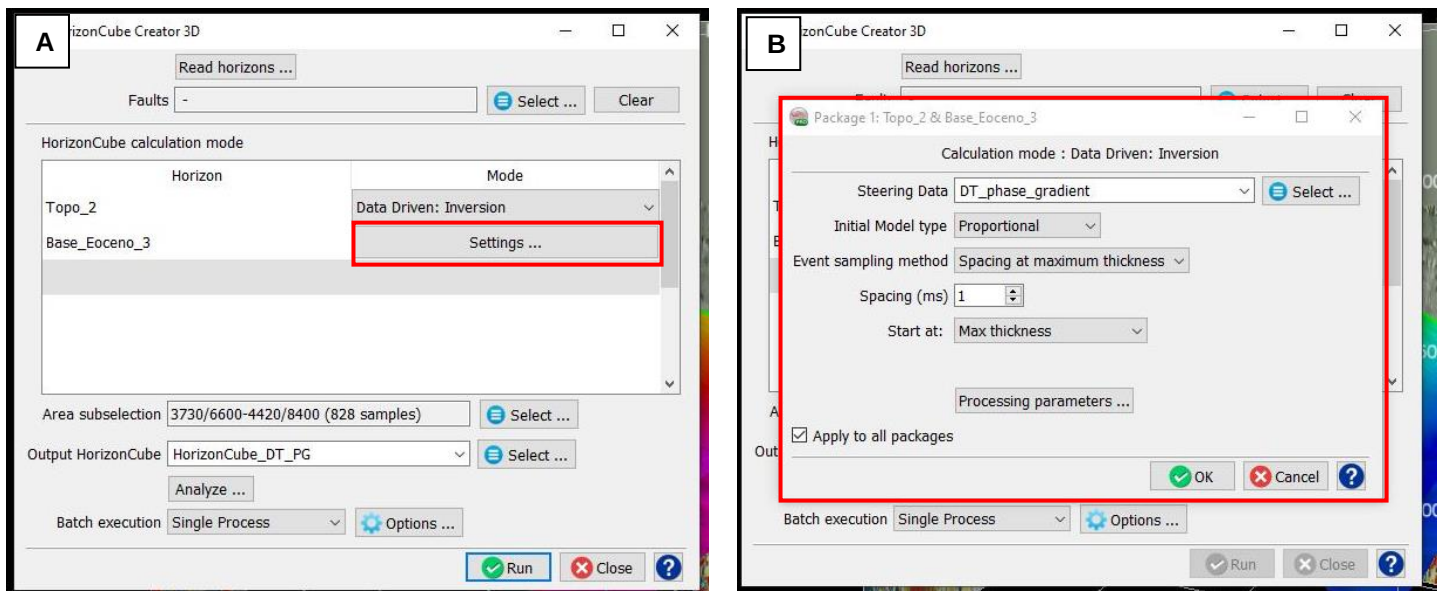


Fonte: A autora (2023).

Legenda – A: Horizonte topo; B: Horizonte base; C: Horizontes topo e base juntos.

Com ambas as informações, o cubo de horizontes pôde ser gerado. O complemento possui dois modos de funcionamento, o *Model Driven* e *Data Driven*, e para este trabalho, foi escolhido o modo *Data Driven* que, dentre os dois, é o que funciona de maneira mais automática e que utiliza os dados do *steering cube* para o processamento (dGB Beheer B. V, 2022). Os parâmetros utilizados são os mesmos apresentados no manual (Figura 10), e o valor utilizado para o espaçamento foi de 1ms. Foi realizado um teste com o valor do espaçamento em 4ms como mostrado no manual, entretanto, o resultado obtido com 1ms foi mais satisfatório e, portanto, decidiu-se manter esse para as próximas etapas do trabalho.

Figura 10 - Configurações para a criação de um cubo de horizontes.

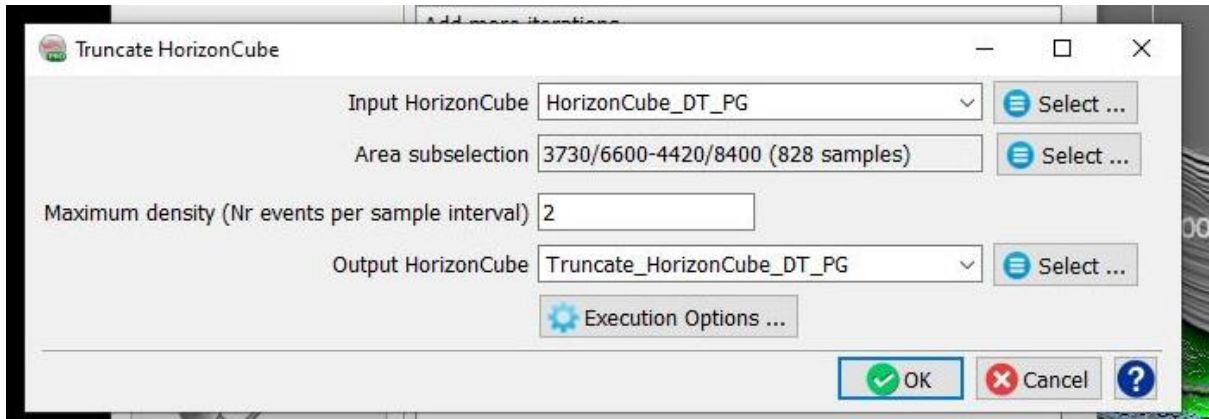


Fonte: A autora (2023).

Legenda – A: Configurações gerais; B: Configurações do *mode* mostrando o *Steering Cube* utilizado.

O cubo de horizontes gerado possui um número de eventos, ou horizontes mapeados, muito próximos e que não deixam evidenciados *hiatus* e terminações estratais, e para corrigir isso, é preciso aplicar um filtro de densidade (*density filter*) sobre o dado. Esse filtro pode ser feito na ferramenta *Truncate HorizonCube*, no menu de opções do complemento *Horizon Cube* (dGB Beheer B. V, 2022). As configurações utilizadas foram as mesmas do manual e estão apresentadas na Figura 11.

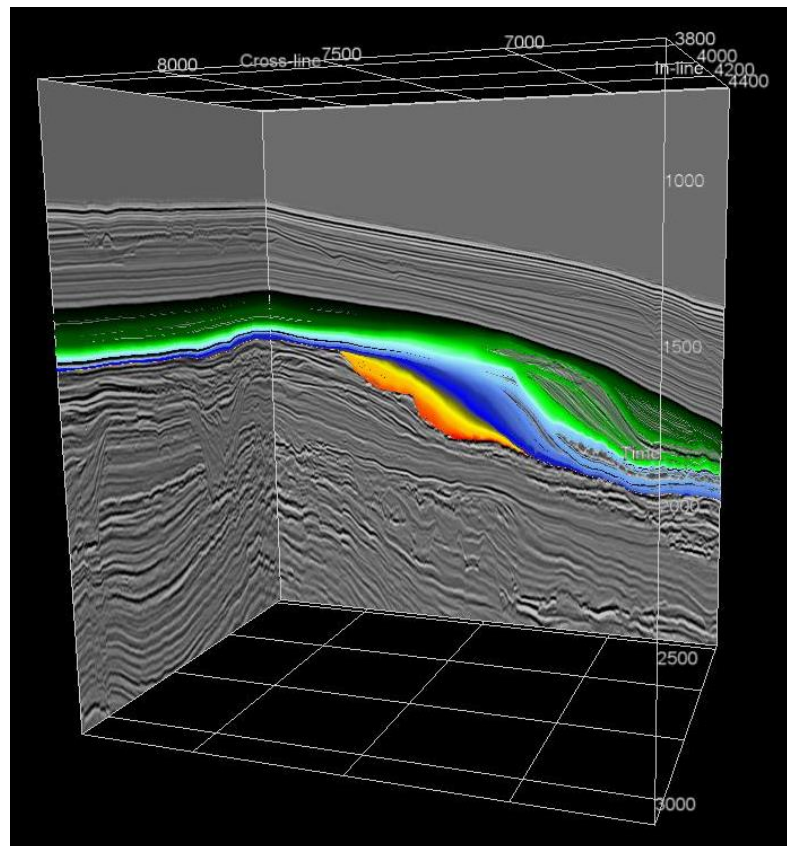
Figura 11 - Configurações do filtro aplicado ao cubo de horizontes.



Fonte: A autora (2023).

Com o complemento *Horizon Cube* foram gerados 243 horizontes intermediários (Figura 12) que, posteriormente, passaram por um filtro de densidade para que pudessem ser utilizados no complemento SSIS.

Figura 12 - Cubo de horizontes gerado pelo complemento *Horizon Cube*.



Fonte: A autora (2023)

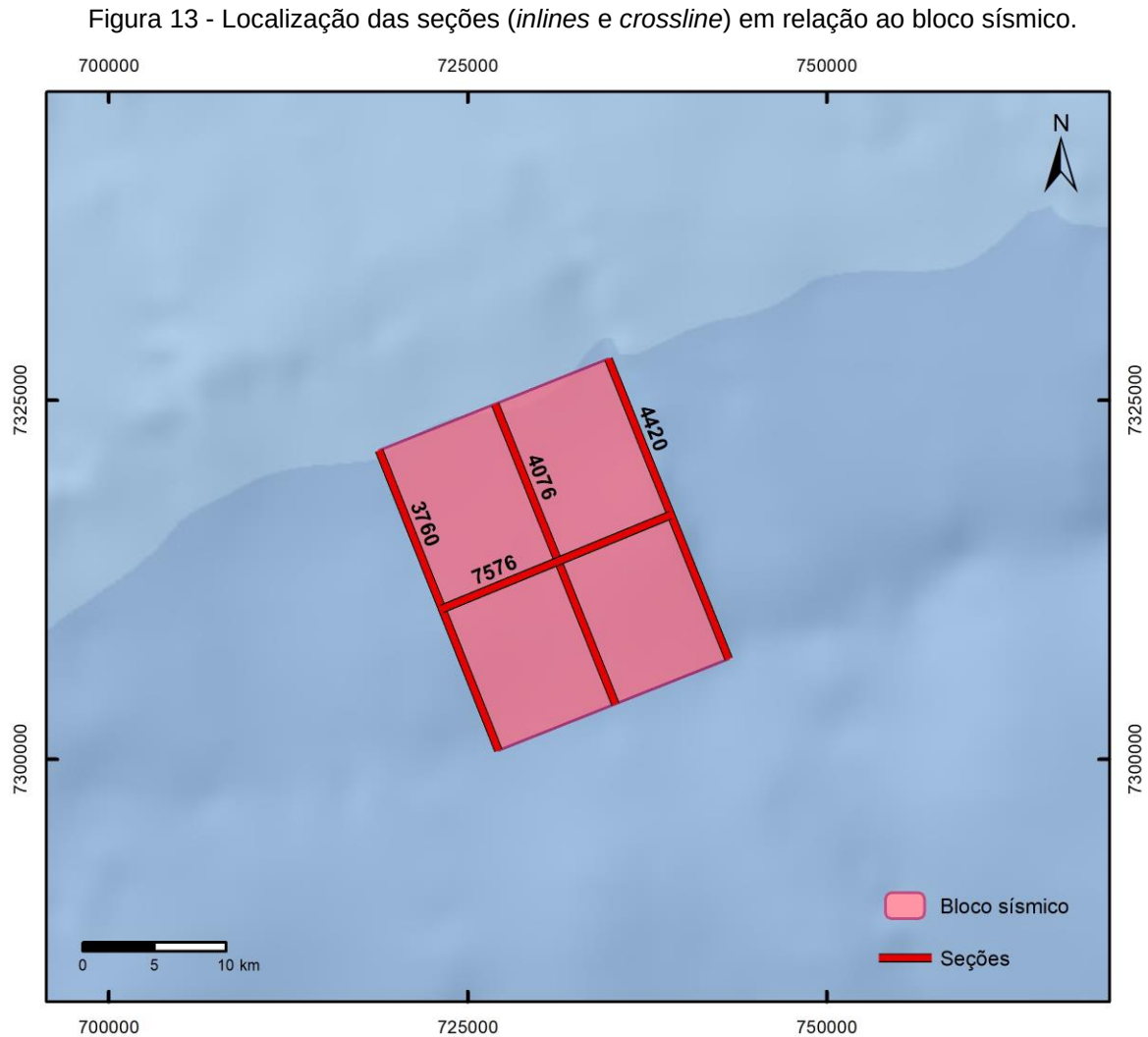
O SSIS é um complemento utilizado para análise sismoestratigráfica de maneira automatizada, que dentre várias funções consegue transformar os dados gerados em um diagrama cronoestratigráfico, ou um diagrama de Wheeler (dGB Beheer B. V, 2022).

O complemento tem como dado de entrada o cubo de horizontes filtrado e já gerado. Cada horizonte intermediário do cubo de horizontes corresponde a um evento cronoestratigráfico, e é identificado com um índice que representa a idade relativa do evento. Cada índice é atribuído aos horizontes de acordo com a sua posição estratigráfica e espessura, sendo que o horizonte que representa a base de uma sequência acima dele, e o topo da sequência abaixo dele, possui o mesmo índice (dGB Beheer B. V, 2022).

Esses dados foram colocados na cena de Wheeler, parte do complemento onde o diagrama é gerado a partir da transformação, ou achatamento (*flattening*) do cubo de horizontes na escala de tempo geológico relativo.

Posteriormente, com o diagrama gerado, foi feita então a identificação no diagrama de momentos de subida e queda relativa do nível do mar, e também das sequências deposicionais de acordo com o definido por Vail et. al (1977). As subidas relativas do nível do mar são marcadas por *onlap* dos refletores em direção ao continente, enquanto que as quedas são marcadas por *onlap* dos refletores em direção a bacia (Vail et. al, 1977).

A comparação entre a variação relativa do nível do mar foi feita para três *inlines* do bloco sísmico, sendo seus números 4420, 4076 e 3760. Foram selecionadas as duas *inlines* das extremidades do bloco e uma *inline* no centro do bloco (Figura 13) para que a variação lateral e longitudinal desses padrões de subida e descida relativa do mar, de sequências deposicionais e também de tempo de deposição fossem observadas.

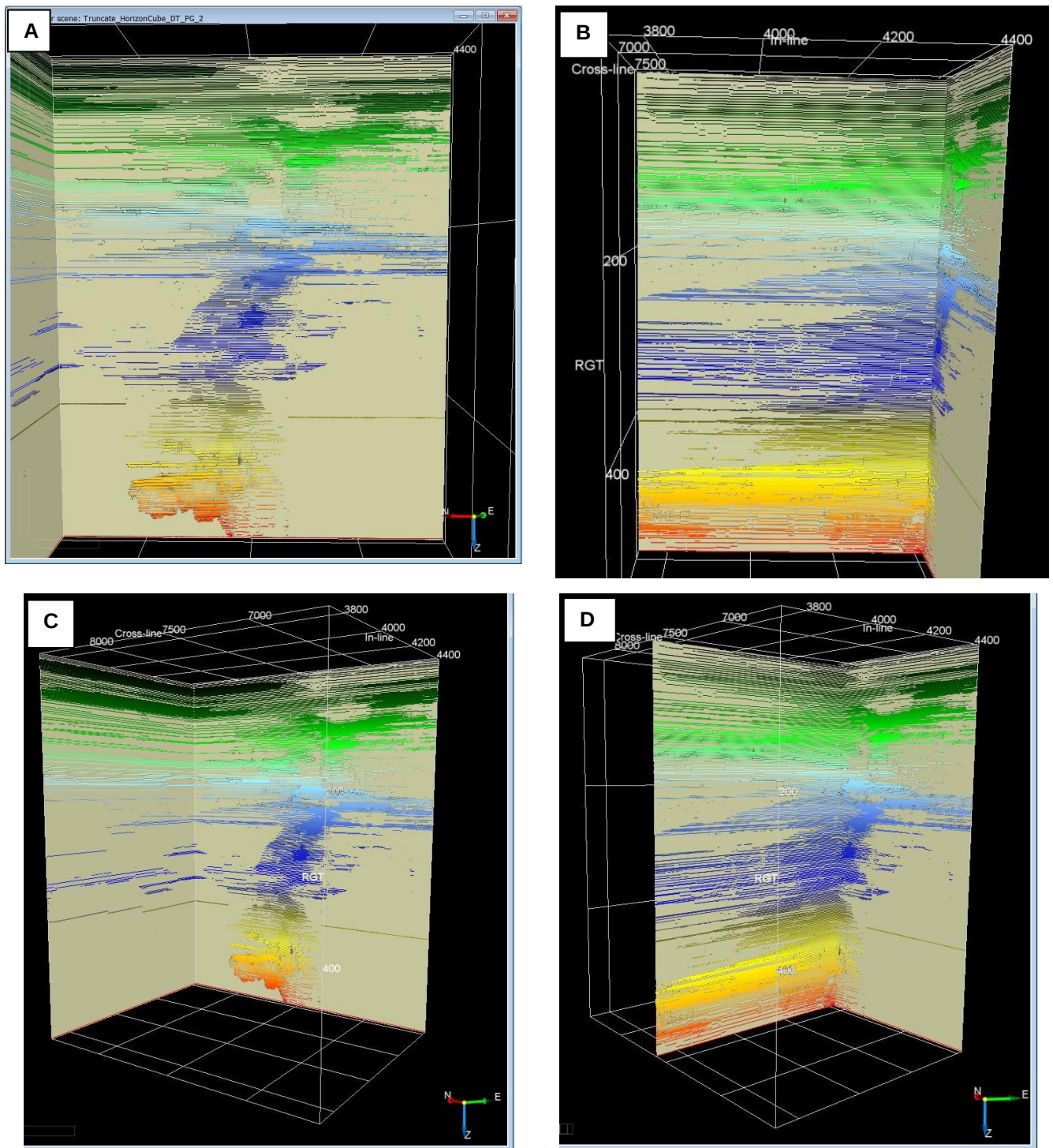


Fonte: A autora (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram gerados diagramas de Wheeler em seções longitudinais (*inline*) e seções transversais (*crossline*) (Figura 14). As trajetórias de subida e descida relativa do nível do mar (Figura 15) foram interpretadas nas seções *inline* a partir da migração do *onlap* costeiro (e.g., Vail et. al, 1977), sendo que migração do *onlap* para a bacia indica queda e migração do *onlap* para o continente indica subida.

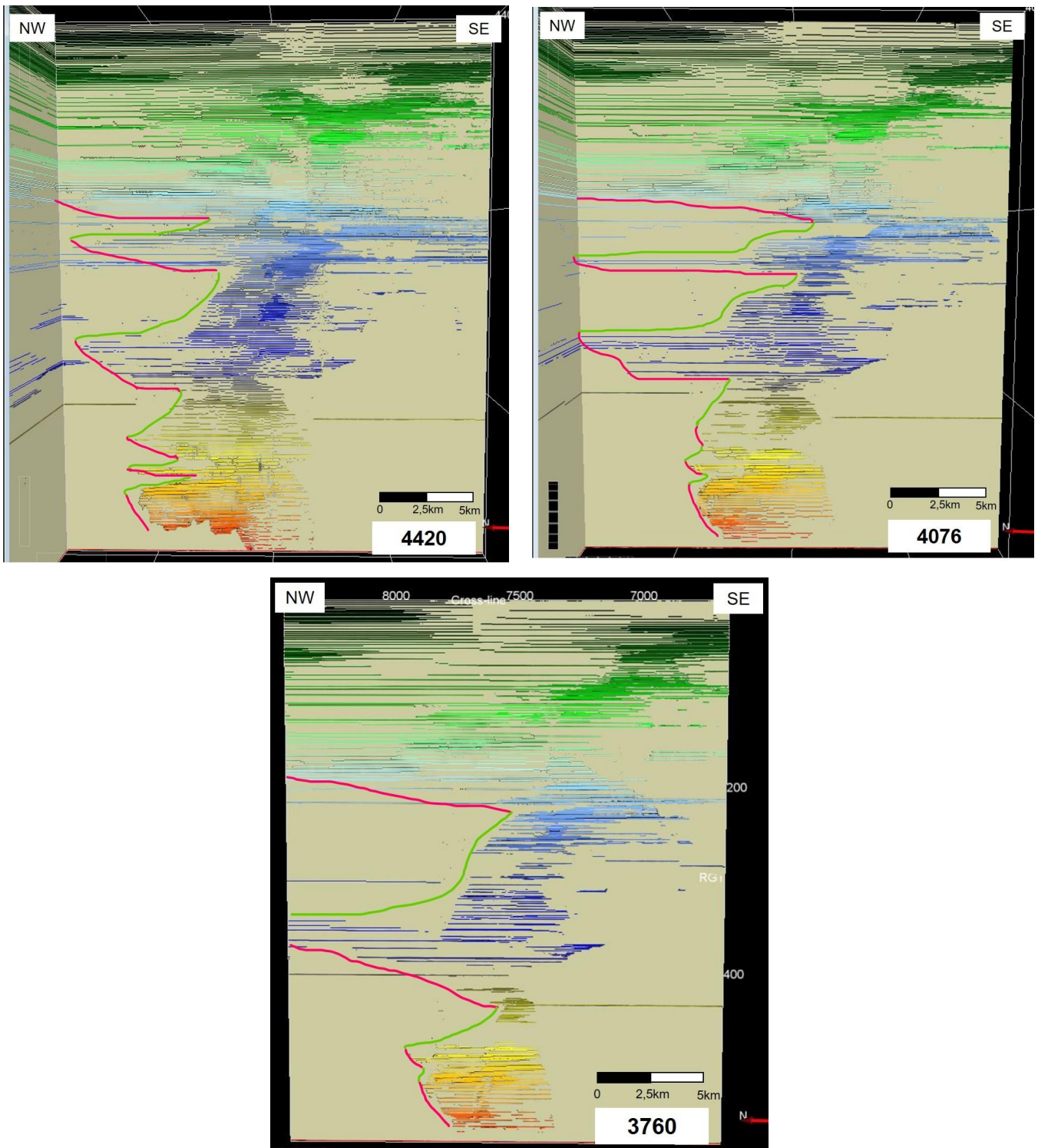
Figura 14 - Diagrama de Wheeler gerado pelo complemento SSIS.



Fonte: A autora (2023).

Legenda – A: Diagrama na *inline* 4420; B: Diagrama na *crossline* 7576; C e D: Diagrama em 3D.

Figura 15 – Curva de variação do nível do mar para cada *inline*.



Fonte: A autora (2023).

Legenda - Traços em verde indicam tendência de rebaixamento do nível relativo do mar, e traços em rosa indicam tendência de subida do nível relativo do mar.

Nas três seções, o que é possível observar em um primeiro momento é uma tendência geral de rebaixamento do nível do mar, até um ponto em que há uma su-

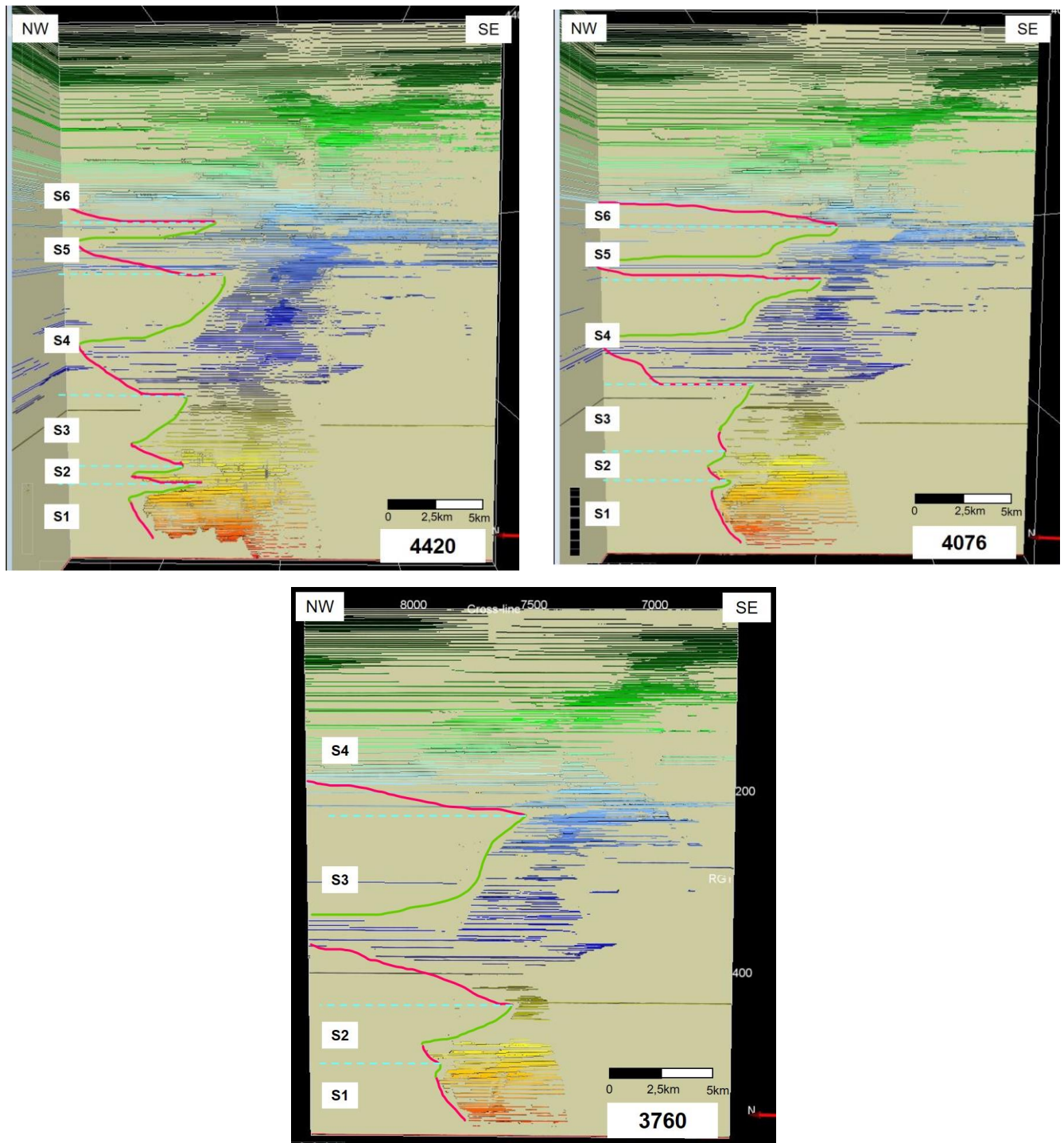
bida e a deposição fica contínua ao longo do tempo. Entretanto, calculando o tempo relativo em que houve subida e descida do nível do mar no intervalo em que essas variações acontecem (intervalo com curva de variação traçada na Figura 15), se observa o seguinte:

- Na seção 4420 em 55,5% do tempo o nível relativo do mar esteve subindo, e em apenas 44,5% do tempo esteve em queda;
- Na seção 4076 em 54,5% do tempo o nível relativo do mar esteve subindo, e em 45,5% do tempo esteve em queda;
- Na seção 3760 em 51,4% do tempo o nível relativo do mar esteve subindo, e em 48,6% do tempo esteve em queda.

Essas informações nos permitem confirmar o que é possível observar na curva de variação, que há realmente mais momentos de subida do nível do mar do que momentos de queda. Além disso, há também uma mudança espacial nessas tendências e nessa variação do nível relativo ao longo da direção do paleotalude, pois, deslocando-se de nordeste para sudoeste, ou da *inline* 4420 para a *inline* 3760, observa-se que a predominância de momentos de subida do nível do mar vai diminuindo, e quase se iguala no limite sudoeste do bloco.

A identificação dos principais picos de rebaixamento do nível do mar permite subdividir o intervalo estudado sequências deposicionais conforme ilustrado na Figura 16. Nas seções 4420 e 4076 foram identificadas seis sequências deposicionais, enquanto na seção 3760 foram identificadas apenas quatro (Figura 16). Essa variação espacial na distribuição pode estar relacionada a distribuição de momentos de subida e queda no nível do mar, apresentada anteriormente, pois como as subidas diminuem e as quedas se mantem por mais tempo, um mesmo intervalo de tempo corresponde a uma mesa sequência deposicional, e não a várias como nos locais das duas primeiras seções.

Figura 16 - Sequências deposicionais interpretadas para cada *inline*.



Fonte: A autora (2013)

Nas três seções é possível observar uma sequência muito importante, que possui um longo tempo de duração de subida do nível do mar e também um longo tempo de queda do nível do mar. Nas seções 4420 e 4076 esta é a sequência S4 e na seção 3760 é a sequência S3. Além disso, a última sequência registrada nas três

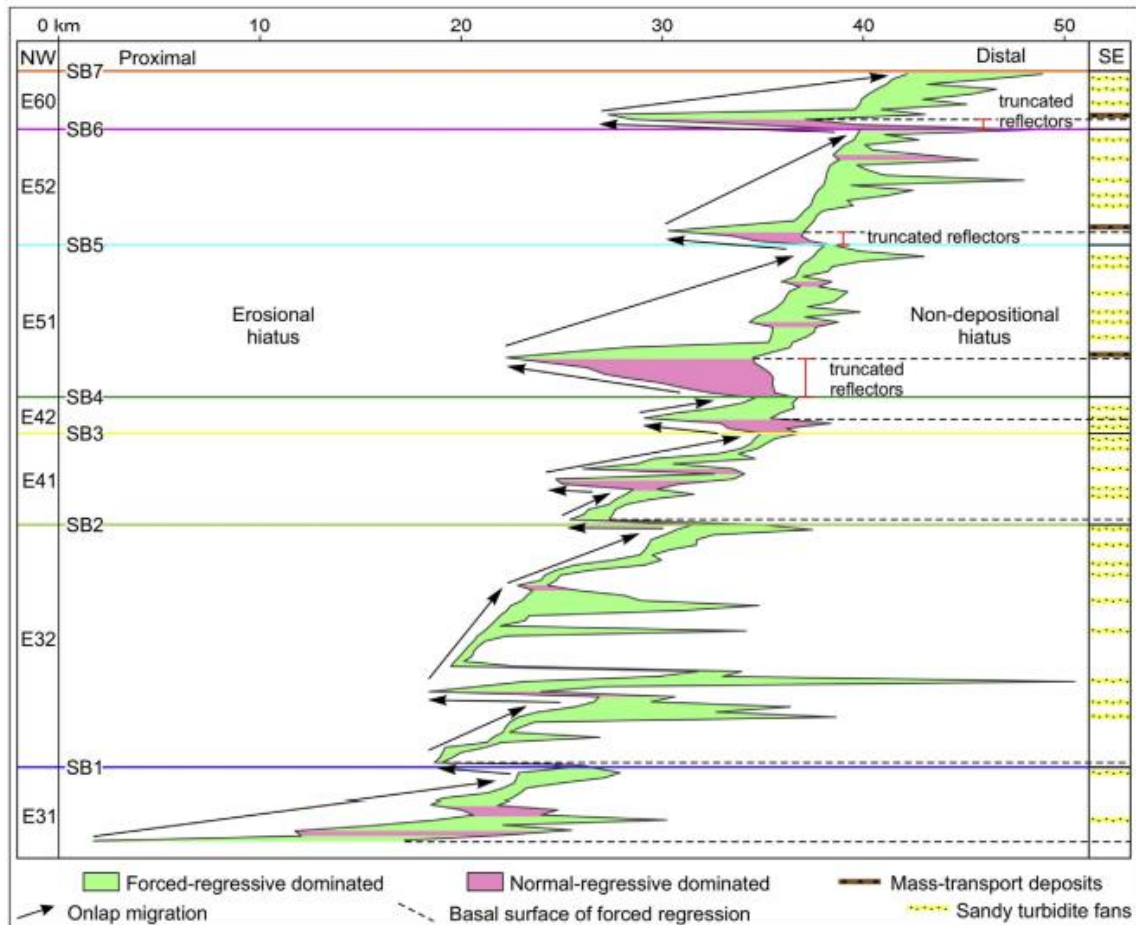
seções é apenas representada por um momento de subida do nível do mar, não sendo mais registrados momentos de queda.

O diagrama elaborado por Berton & Vesely (2016) (Figura 17) possui um padrão muito semelhante ao gerado pelo complemento SSIS, com uma grande variação no nível relativo do mar e também subidas e quedas mais expressivas, com sete sequências deposicionais interpretadas.

A sequência SB5, interpretada por Berton & Vesely (2016), se assemelha e pode ser correlata às sequências S4 e S3 identificadas neste trabalho, pois possui um tempo de duração bem elevado quando comparada às sequências subjacentes e está próximo ao topo do intervalo, logo abaixo de uma grande inflexão da curva que indica subida no nível do mar, assim como o registrado neste trabalho.

Apesar de possuírem essas semelhanças, os dois diagramas apresentam algumas diferenças, como o predomínio de queda do nível do mar registrada por Berton & Vesely (2016), enquanto que o diagrama interpretado neste trabalho mostrou uma predominância de elevação do nível do mar. Além disso, o diagrama interpretado neste trabalho se inicia e acaba com um momento de subida no nível relativo, já o diagrama de Berton & Vesely (2016) inicia e termina com um momento de queda no nível relativo, e essa também pode ser uma das razões para a diferença no número de sequências deposicionais entre os dois diagramas.

Figura 17 - Diagrama de Wheeler elaborado por Berton & Vesely (2016).



Fonte: Berton & Vesely (2016)

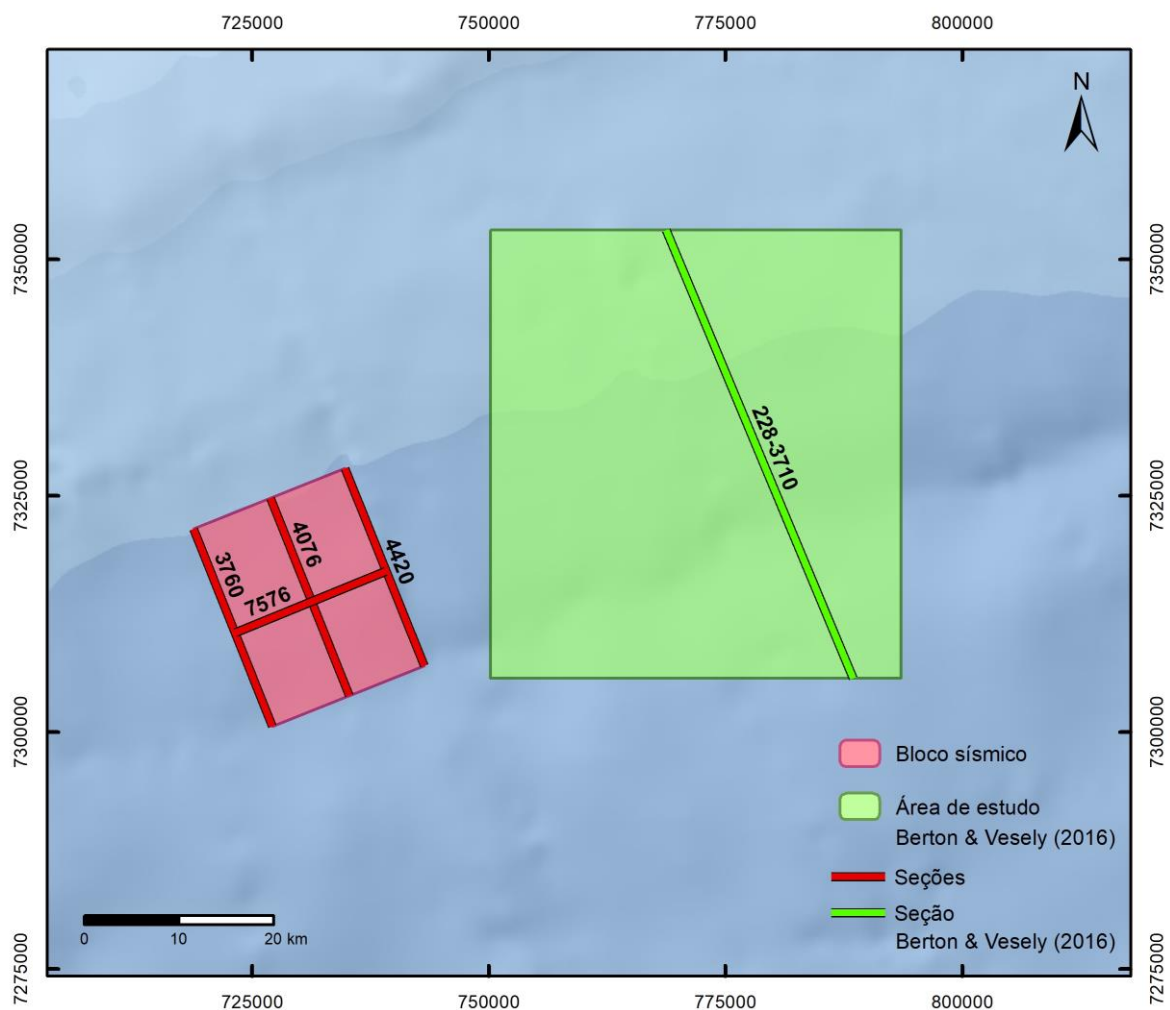
Essas diferenças entre os dois diagramas, apesar de terem sido feitos para o mesmo intervalo, podem estar relacionadas à resolução do dado, pois o bloco sísmico utilizado neste trabalho possui uma resolução maior que a seção 2D utilizada por Berton & Vesely (2016). A resolução mais baixa do dado sísmico 2D utilizado por Berton & Vesely (2016) deve ter limitado a visualização das terminações em *onlap* na plataforma durante períodos de subida do nível do mar, fazendo com que os períodos de queda fossem superestimados.

A resolução do dado também teve influência na amostragem, já que no trabalho dos autores supracitados foram traçados manualmente cerca de 100 horizontes, enquanto a ferramenta automática utilizada neste trabalho traçou 243 horizontes.

Além desses fatores, outro fato que pode ter influenciado nessas variações é a posição da seção sísmica utilizada por Berton & Vesely (2016) em relação ao blo-

co e as seções escolhidas neste trabalho. Como se pode observar, houve uma pequena variação na curva de nível relativo e nas sequências interpretadas dentro do próprio bloco, no qual as duas seções extremas estão separadas por aproximadamente 17km. A linha sísmica utilizada por Berton & Vesely (2016) está a aproximadamente 40km de distância do bloco sísmico (Figura 18), sendo assim uma distância que permite e justifica algumas diferenças entre os diagramas gerados e as interpretações feitas.

Figura 18 - Localização das seções em relação a área de estudo de Berton & Vesely (2016).



Fonte: A autora (2023)

Legenda – A seção 288-3710 de Berton & Vesely (2016), foi a escolhida pelos autores para a confecção do diagrama de Wheeler.

De todo modo, variações estratigráficas e de comportamento do nível relativo do mar ao longo do *strike* deposicional sugerem que fatores locais foram determi-

nantes, além da eustasia global. Um fator local que deve ser considerado é a subsidência diferencial causada pela movimentação do sal situado estratigraficamente abaixo do intervalo de estudo (Guerra & Underhill, 2012).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego da ferramenta SSIS (*Sequence Stratigraphic Interpretation System*) do programa OpendTect Pro, que tem como uma das funções gerar uma carta cronoestratigráfica, ou diagrama de Wheeler, permitiu analisar a praticidade e funcionalidade de método automatizado de análise na estratigrafia de sequências.

Todas as etapas do processamento levaram cerca de 5 dias, sendo que a etapa que demandou mais tempo foi a interpretação manual dos dois horizontes utilizados como dado de entrada no complemento *Horizon Cube*.

O dado gerado permitiu observar em três dimensões e em diversas seções longitudinais os deslocamentos do *onlap*, possibilitando interpretar as variações do nível relativo do mar e delimitar 6 sequências deposicionais. Também foi possível verificar que alguns limites de sequências não possuem continuidade ao longo do *strike*, o que reflete complexidades possivelmente associadas a variações locais do espaço de acomodação.

O diagrama foi comparado ao diagrama de Wheeler gerado de forma manual por Berton & Vesely (2016). Os dois resultados possuem grande similaridade, porém observou-se diferenças nas tendências gerais de variação do nível do mar, e na quantidade de sequências deposicionais interpretadas.

Essas diferenças foram atribuídas às resoluções dos dados utilizados nos dois trabalhos, já que neste trabalho foi utilizado um bloco sísmico 3D, que possui uma resolução maior que as seções sísmicas 2D utilizadas por Berton & Vesely (2016).

A distância entre as duas áreas de estudo também foi considerada como um fator para as diferenças entre os dois diagramas, já que elas estão a cerca de 40 km uma da outra. Isso pode ser explicado pela variação existente dentro do próprio bloco sísmico deste trabalho, que apresentou diferenças entre as duas seções extremas, que possuem entre si apenas 17 km de distância.

O complemento SSIS possui outras funcionalidades além de gerar diagramas de Wheeler, como a interpretação de superfícies estratigráficas, sequências

deposicionais e tratos de sistemas. Sugere-se que essas funções sejam testadas para que o complemento possa ser avaliado em sua totalidade.

REFERÊNCIAS

- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural**. ANP. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2022/boletim-junho.pdf>>. Acesso em 14 de agosto de 2022.
- BERTON, F.; VESELY, F. F. Stratigraphic Evolution of Eocene Clinofolds from Northern Santos. **Marine and Petroleum Geology**, v. 78, p 356-372, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.09.007>
- CATUNEANU, O. **Principles of Sequence Stratigraphy**. Canadá: Elsevier, 2006.
- CORREA, S. A. S. **Estratigrafia de sequências e cronoestratigrafia sísmica da porção central da Bacia de Pelotas, Brasil**. p 99. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2016.
- DGB BEHEER B. V. **OpendTect Pro & dGB Plugins Documentation** – 6.6. © 2002-2022.
- GUERRA, M. C. M.; UNDERHILL, J. R. Role of halokinesis in controlling structural styles and sediment dispersal in the Santos Basin, offshore Brazil. **Geological Society, Special Publication**, Londres, v. 363, p175-206, 2012. DOI: doi: 10.1144/SP363.9
- HUNT, D.; TUCKER, M. E. 1992. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall. **Sedimentary Geology**, v. 81, p 1-9.
- MOREIRA, J. L. P.; CARMINATTI, M. Sistemas deposicionais de talude e de bacia no Eoceno da Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p 73-87, 2003.
- MOREIRA, J. L. P.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M. A. P. Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p 531-549, 2007.
- MOREIRA, J. L. P.; NALPAS, T.; JOSEPH, P.; GUILLOCHEAU, F. Stratigraphie sísmique de la marge éocène du Nord du bassin de Santos (Brésil) : relations plate-forme/systèmes turbiditiques ; distorsion des séquences de dépôt. **Earth and Planetary Sciences**, Paris, v. 332, p 491-498, 2001.
- RIBEIRO, H. J. P. S. **Estratigrafia de sequências, fundamentos e aplicações**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2001.
- MITCHUM JUNIOR, R. M.; VAIL, P. R; SANGREE, J. B. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C. E (ed) **Seismic Stratigraphy**

Applications to Hydrocarbon Explorations. Tulsa, 1977, American Association of Petroleum Geologists (Memoir #26), p 117-133, 1977a.

VAIL, P. P.; MITCHUM JUNIOR, R. M.; THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap. **Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Explorations.** Tulsa, 1977, American Association of Petroleum Geologists (Memoir #26), p 63-81, 1977.