

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO DINÂMICA
DOS OCEANOS E DA TERRA



DIEGO DE CASTRO RODRIGUES

**O IMPACTO DE INCERTEZAS DE INTERPRETAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADES NO
IMAGEAMENTO SUB-SAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Niterói, RJ
2020**

DIEGO DE CASTRO RODRIGUES

**O IMPACTO DE INCERTEZAS DE INTERPRETAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADES NO
IMAGEAMENTO SUB-SAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Orientador

Prof. Marco Antonio Cetale Santos

**Niterói, RJ
2020**

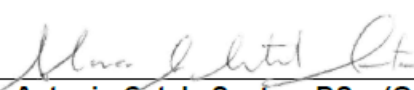
DIEGO DE CASTRO RODRIGUES

**O IMPACTO DE INCERTEZAS DE INTERPRETAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DO
MODELO DE VELOCIDADES NO IMAGEAMENTO SUB-SAL**

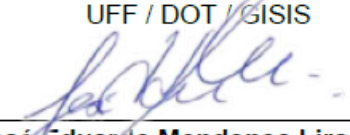
Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

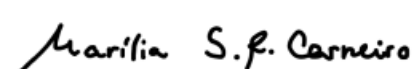
Aprovada em 17/12/2020 pela banca examinadora abaixo:



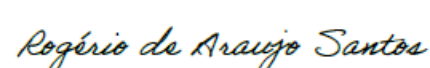
Prof. Marco Antonio Cetale Santos, DSc. (Orientador)
UFF / DOT / GISIS



José Eduardo Mendonça Lira, PhD.
PETROBRAS



Marília da Silva Ramos Carneiro, DSc.
UFF / DOT / GISIS



Prof. Rogério de Araujo Santos, DSc.
UFF/ GGO e PETROBRAS

**Niterói, RJ
2020**

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R696i Rodrigues, Diego de Castro
O Impacto de Incertezas de Interpretação na Construção
do Modelo de Velocidades no Imageamento Sub-sal / Diego de
Castro Rodrigues ; Prof. Marco Antonio Cetale Santos,
orientador. Niterói, 2020.
106 f.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2020.m.03132737747>

1. Geofísica. 2. Pré-Sal. 3. Construção de Modelo de
Velocidade. 4. Top-Down Approach. 5. Produção intelectual.
I. Santos, Prof. Marco Antonio Cetale, orientador. II.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.
III. Título.

CDD -

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores da Universidade Federal Fluminense, que durante toda a minha formação foram bastante atenciosos, sempre me proporcionando as melhores condições de aprendizado.

Aos meus familiares que fizeram o possível e o impossível para que eu pudesse chegar até aqui. Em especial ao meu filho Nicolas, fonte de força e motivação para vencer qualquer obstáculo da vida a cada dia, e aos meus pais, que sempre me apoiaram em qualquer escolha que fiz para minha vida.

Aos meus amigos que me acompanharam durante toda essa jornada e que, sem dúvida alguma, tornaram os dias muito mais prazerosos. Prefiro não citar nomes, porque assim, não cometo a injustiça de esquecer alguém.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos, que sempre me acompanhou em diversas etapas da minha formação, lecionando, orientando e oferecendo novas oportunidades de aprendizado acadêmico e profissional. Assim como a todos os demais professores do Departamento de Geologia e Geofísica da UFF, que também foram imprescindíveis para minha formação.

A todos os integrantes do Grupo de Imageamento Sísmico e Inversão Sísmica (GISIS), que me transmitiram experiências e aprendizados que ajudaram na evolução do meu conhecimento. Em especial, aos meus colegas de equipe e amigos, Ammir Ayman Karsou, Lucas Lima Navarro de Andrade e Matheus do Valle Francis, sem os quais não teria realizado este trabalho se não fosse por suas contribuições diretas (seja por ideias, experiência profissional ou algoritmos disponibilizados) e apoio dos mesmos. Assim como a Bruna De Lucca Carbonesi, Danielle Martins Tostes e Marília da Silva Ramos Carneiro, as quais também contribuíram muito com suas revisões do trabalho e opiniões profissionais de grande valia.

E aos demais profissionais e funcionários do Departamento de Geologia e Geofísica da UFF, assim como do próprio Instituto de Geociências, que de alguma forma, desde a mais simples possível, possam ter me ajudado e/ou influenciado para que eu pudesse concluir essa etapa da minha trajetória profissional.

RESUMO

A construção de modelos de velocidades (e/ou de propriedades) precisos é essencial para formação de imagens sísmicas. A forma convencional de construção de modelos de velocidades é conhecida como *Top-down approach*, uma metodologia de atualização por camadas de subsuperfícies de cima para baixo utilizando técnicas de inversão. No entanto, em alvos profundos e ultra-profundos e com presença de estruturas geometricamente complexas e com altos contrastes de velocidades, como ocorrem nas bacias de Santos e Campos, as técnicas comuns de inversão não solucionam modelos de velocidades confiáveis, gerando incertezas na formação da imagem sísmica. Com isso, uma metodologia que vem sendo implementada na indústria é incluindo à metodologia convencional de construção de modelos de velocidades, atualizando de cima para baixo, integração da interpretação humana das estruturas que formam camadas de sal. Portanto, esta dissertação tem como propósito apresentar, num ambiente controlado sinteticamente, o impacto da interpretação estrutural na construção de modelos de velocidades para o imageamento sísmico. Para tal, modelos geológicos sintéticos representativos de subsuperfícies da bacia de Santos – como um *overhang* e um pacote de sedimentos encapsulados no sal – e dados modelados sinteticamente foram gerados. Ao todo três estudos de casos são realizados: o primeiro ilustra o funcionamento da metodologia de atualização de modelos de velocidades de cima para baixo com interpretação de estruturas que formam a geometria do sal. O segundo caso demonstra impactos na imagem quando se utiliza valores errados de velocidades e o terceiro, representa um caso de quando ocorre rocha capeadora de anidrita sobre a camada de sal, gerando incertezas para a interpretação e impactando o imageamento. Para melhor compreensão deste trabalho, são incluídos levantamentos de estudos das ferramentas essenciais para construção de modelos de velocidades com integração de conhecimentos geológicos, sendo essas: descrição sobre o movimento do sal observado nas bacias de margem atlântica divergente, as principais técnicas de migração sísmica e de inversão utilizadas na indústria.

Palavras-chave: *Top-down approach*. Modelo de Velocidade. *Overhang*.

ABSTRACT

The construction of accurate velocity (and / or properties) models is essential for the formation of seismic images. The conventional way of building velocity models is known as the Top-down approach, a subsurface model update methodology starting from shallower to deeper layers. However, in deep and ultra-deep targets and with the presence of geometrically complex structures with high velocity contrasts, as occur in the Santos and Campos basins, the usual inversion techniques do not solve reliable velocity models, generating uncertainties in the formation of the seismic image. With this, a methodology that has been implemented in the industry is to include to the conventional methodology of velocity model buildings, the top-down approach, the integration of the human interpretation of the geological structures that form the salt layers. Therefore, this dissertation aims to demonstrate, in a synthetically controlled environment, the impact of structural interpretation in the construction of velocity models for seismic imaging. To this end, representative synthetic geological models of Santos Basin subsurface – such as an overhang and a packet of sediments encapsulated into the salt – and synthetically modeled data were generated. Altogether three case studies are carried out: the first illustrates the operation of the top-down approach with interpretation of structures that form the geometry of the salt. The second case shows impacts on the image when using wrong velocities values and the third one represents a case of when anhydrite capping rock occurs over the salt layer, generating uncertainties for the interpretation and impacting the imaging. For a better understanding of this work, essential description of seismic tools for velocity model buildings with integration of geological knowledge are included, which are: review of the salt movement observed in the diverging Atlantic margin basins, the most used in industry seismic migrations and inversion techniques.

Palavras-chave: *Pre-salt. Overhang. Velocity Model. Top-Down Approach.*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Efeito da sobrecarga sobre o sal. Fonte: Mohriak *et al*, 2008.....26
- Figura 2: Modelo esquemático com visão 3D das estruturas halocinéticas entre a região proximal e distal da Bacia Zechstein, com almofadas, troncos e muralhas de sal. Fonte: Mohriak, 2008.....27
- Figura 3: Gráfico de Claerbout mostrando a relação entre o campo que consiste na distribuição espacial de propriedades internas de longo comprimento de onda, tais como velocidade e densidade, e outro campo que compreende a distribuição de propriedades de contorno de curto comprimento de onda, tais como refletividade sísmica e dispersões. E os objetivos futuros do VMB de minimizar esta lacuna (linha amarela). Fonte: Modificado de Dias, Bulcão e Soares Filho (2016) e adaptado de Claerbout, 1985.....29
- Figura 4: Princípios de migração: o segmento de reflexão C'D' na seção de tempo como em (a), quando migrado, é movido para cima do mergulho, acentuado, encurtado e mapeado em sua verdadeira localização CD subterrânea como em (b). Fonte: Adaptado de Yilmaz, 1987.....30
- Figura 5: (a) Um empilhamento CMP (*Common midpoint*) CMP antes da migração. (b) Um empilhamento CMP após a migração. A migração desata os laços de “gravata borboleta” na seção empilhada e os transforma em sinclinais. Fonte: Yilmaz, 1987.....31
- Figura 6: (a) Resolução da escala comprimento - escala de comprimento da anomalia da velocidade maior que o comprimento da onda sísmica - a teoria dos raios funciona. (b) Resolução da escala comprimento – escala comprimento da anomalia de velocidade comparável ao comprimento da onda sísmica – teoria dos raios falha e teoria da difração (espalhamento) é melhor para descrever a propagação de ondas. Fonte: Jones, 2010.....34

- Figura 7: Um ponto que representa a fonte secundária de Huygens (a) produz uma hipérbole de difração na seção de tempo de deslocamento zero (b) e um semicírculo na seção em profundidade. Fonte: Yilmaz, 1987.....36
- Figura 8: Sobreposição das respostas em zero-*offset* (b) de um número discreto de fontes secundárias da Huygens, como em (a). Fonte: Yilmaz, 1987.37
- Figura 9: Sobreposição das respostas em zero-*offset* (b) de fontes secundárias de Huygens contínuas, como em (a). Fonte: Yilmaz, 1987.....37
- Figura 10: A migração de Kirchhoff copia a energia do traço de entrada para todos os locais ao longo da resposta ao impulso. A resposta ao impulso é calculada até algum mergulho máximo específico e abertura lateral. Fonte: Jones, 2010.....38
- Figura 11: Migração pelo somatório Kirchhoff de vários semicírculos. Macpherson, 2019.....38
- Figura 12: Princípios de migração baseados no somatório de difração. (a) Seção em zero-*offset* de um modelo de velocidade constante, (b) migração. A amplitude no local de rastreamento da entrada B ao longo do flanco da hipérbole do tempo de trânsito é mapeada no local de rastreamento da saída A no ápice da hipérbole. Fonte: Yilmaz, 1987.....39
- Figura 13: Exemplo ilustrativo dos contornos do tempo de trânsito derivados do traçado de raios através do modelo de velocidade-profundidade especificado. Fonte: Yilmaz, 1987.....40
- Figura 14: Desenho esquemático ilustrando a extrapolação da onda na direção reversa com relação à direção da propagação das ondas a partir da fonte, ambas em direção à um refletor em profundidade, e a correlação entre os dois campos de onda. Fonte: Lumb, 2015.....42
- Figura 15: Explicação pictórica da imagem RTM: as colunas 1, 2 e 3 correspondem a três imagens instantâneas diferentes nos tempos $t_1 = 0: 150$ s, $t_2 = 0: 275$ s e

$t_3 = 0: 500$ s. As linhas 1 a 4 correspondem, respectivamente, ao campo de onda da fonte, ao campo de onda do receptor, à multiplicação dos campos de onda da fonte e do receptor e à imagem acumulada ao longo do tempo. Na coluna 4 podemos observar a correlação dos componentes dispersos propagados e/ou retroespalhados dos campos de onda da fonte e do receptor. Fonte: Pantin, 2014.....43

Figura 16: Desenho esquemático ilustrando a abordagem de remoção de camadas ou do topo para baixo. A esquerda vemos um desenho representativo de um conjunto de traços com quatro eventos agrupado em afastamento (*offset*) por profundidade. (a) Mesmo grupamento de traços “inundado” com a velocidade da água, onde o evento do fundo do mar é corrigido para a posição correta. (b) O modelo é “congelado” com a velocidade da água até o fundo do mar, e a partir dele “inundamos” o modelo com a nova velocidade que irá corrigir o segundo evento. (c) Mesmo procedimento para o terceiro evento. (D) Todos os eventos corrigidos de cima para baixo com o modelo de velocidade completo.45

Figura 17: Fluxograma da Abordagem de Cima pra Baixo.....47

Figura 18: Um mesmo grupamento migrado após oito iterações da tomografia convergindo para uma representação suave do dado. Fonte: Jones, 2010.....48

Figura 19: O fluxo FWI. Fonte: Wehner, 2015.....50

Figura 20: Seções transversais mostrando a complexidade da geometria do sal na bacia profunda de Santos; a) grande saliência localizada na área de compressão; b) sal estratificado em uma sequência evaporítica contínua, coberta com uma camada de carbonato albio de alta velocidade. Exemplos de testes de cenário: c) no lado esquerdo, o modelo de sal completo leva a uma queda da base de sal e destruição parcial dos carbonatos do pré-sal; d) no lado direito, o modelo de sedimento encapsulado corrige esse erro. Fonte: Alterado de Marpeau e Belz, 2019.....52

- Figura 21: Exemplo de modelagem de traços de raios para um modelo de sal mostrando o típico caminho adotado pelos raios que iluminam a zona-alvo. A geometria do sal gera pouca iluminação no nível do alvo. Fonte: Jones, 2014..52
- Figura 22: Duas iluminações diferentes do flanco do sal por uma única fonte e raios associados a (a) reflexões primárias que produzem a imagem do flanco do sal em (b), e (c) reflexões que ressaltam um limite da camada mais profunda que produz a imagem do flanco do sal. em (d). Fonte: Yilmaz, 1987.....53
- Figura 23: Diapiro de sal Klødwa na Polônia mostrando uma rocha capeadora de anidrita bem desenvolvida (velocidade sísmica de 6500 m/s). Fonte: Burliga *et al.*, 2005, *apud* Jones, 2014.....53
- Figura 24: Visão tridimensional das linhas ortogonais.....55
- Figura 25: Vista do modelo de velocidade estratificado mostrando (a) uma estrutura de *overhang* com uma cobertura angular (apontadas pelas setas amarelas) do topo do sal sobre o sedimento circundantes. A linha branca que corta a estrutura indica a posição da secção transecta (b) mostrando os sedimentos encapsulados na parede de sal; e a linha branca que corta esta indica a posição da secção transecta 'a'56
- Figura 26: a) Vista do modelo de velocidade simples mostrando a mesma estrutura de *Overhang* com uma cobertura angular do topo do sal sobre o sedimento circundantes. A linha branca que corta a estrutura indica a posição da secção transecta (b) mostrando os sedimentos encapsulados na parede de sal; e a linha branca que corta esta indica a posição da secção transecta 'a'57
- Figura 27: Modelo simples com velocidade dos sedimentos errada. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....58
- Figura 28: Modelo simples com velocidade do sal errada. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....59

Figura 29: Modelo simples com interpretação do topo do sal errada. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	59
Figura 30: Modelos de sedimento constante e com capa de anidrita. Em a) modelo de velocidade com <i>overhang</i> e em b) modelo com sedimento encapsulado. A linha branca nos indica seção transecta.....	60
Figura 31: Modelo simples com interpretação do topo do sal englobando a anidrita. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	61
Figura 32: Modelo simples com interpretação do topo do sal abaixo da anidrita. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	61
Figura 33: Geometria de aquisição planejada para todos os modelos sintéticos utilizados. a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista dos sedimentos encapsulados.....	62
Figura 34: Migração sintética RTM com sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	63
Figura 35: Migração sintética RTM sem sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	63
Figura 36: Migração sintética Kirchhoff com sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	64
Figura 37: Migração sintética Kirchhoff sem sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	64
Figura 38: Migração sintética RTM com sobreposição do modelo de referência simples. a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	65
Figura 39: Migração sintética RTM sem sobreposição do modelo de referência simples. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	65

Figura 40: Migração sintética RTM com sobreposição do modelo de referência simples com capa de anidrita. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	66
Figura 41: Migração sintética RTM sem sobreposição do modelo de referência simples com capa de anidrita. a) Vista da <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	66
Figura 42: Fluxograma elucidando a metodologia.....	68
Figura 43: RTM migrada com o modelo de velocidade d'água e sobreposta por este para display. a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	70
Figura 44: RTM migrada com o modelo de velocidade d'água. a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	70
Figura 45: RTM (migrada com a velocidade d'água) com sobreposição do modelo de velocidade inicial de sedimentos. O fundo marinho é interpretado e o modelo, então, é “congelado” até este horizonte e “inundado” de sedimento abaixo deste. a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	71
Figura 46: RTM (migrada com a velocidade d'água) com sobreposição do modelo de velocidade de sedimentos simulando uma atualização por Tomografia (M02). a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	72
Figura 47: RTM (migrada com a velocidade d'água) com sobreposição do modelo de velocidade de sedimentos simulando uma atualização pela FWI (M03). a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	72
Figura 48: RTM (migrada com a velocidade de sedimento – M03) com sobreposição do primeiro modelo de velocidade de sal (M04). O topo do sal é interpretado e o modelo, então, é “congelado” até este horizonte e “inundado” de sal abaixo deste, omitindo-se a base do <i>overhang</i> e os flancos do sal. a) Vista do <i>Overhang</i> ; b) Vista Sedimento Encapsulado.....	73

Figura 49: RTM migrada com o primeiro modelo de sal (M05). A imagem é relevante da superfície da água até a base do *overhang* ou topo secundário (seta amarela) do sal e errôneo abaixo do mesmo e onde houver sedimentos encapsulados. Podemos observar os artefatos de ondas retroespalhadas visíveis no topo do sal (quadro vermelho). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....74

Figura 50: Kirchhoff migrada com o primeiro modelo de sal. A imagem é relevante da superfície da água até esta primeira base ou topo secundário do *overhang* e errôneo abaixo do mesmo e onde houver sedimentos encapsulados. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....75

Figura 51: RTM (migrada com a primeira velocidade de sal) com sobreposição do segundo modelo de sedimentos. A base do *overhang* e topo dos sedimentos encapsulados são interpretados e o modelo é “congelado” até este horizonte e “inundado” de sedimento abaixo destes, omitindo-se os flancos do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....75

Figura 52: RTM (migrada com a primeira velocidade de sal) com sobreposição do segundo modelo de sedimentos simulando uma atualização pela inversão abaixo do *overhang* e do topo dos sedimentos encapsulados. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....76

Figura 53:RTM (migrada com a segunda velocidade de sedimentos) com sobreposição do segundo modelo de sal. O flanco do sal abaixo do *overhang* e dos sedimentos encapsulados é interpretado e o modelo é “inundado” de sal abaixo deste, omitindo-se a base regional do sal e o pré-sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....76

Figura 54: RTM migrada com a segunda velocidade de sal e sobreposta a este. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....77

Figura 55: RTM migrada com o modelo completo incluindo pré-sal e sobreposta por este. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....77

- Figura 56: RTM migrada com o modelo completo gerado pela bordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de ‘cima pra baixo’ (*Top-down approach*).....78
- Figura 57: Kirchhoff migrada com o modelo completo gerado pela abordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de ‘cima pra baixo’ (*Top-down approach*). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....78
- Figura 58: Modelo de velocidade estratificado de referência. a) Vista do *Overhang*’(setas amarelas); b) Vista Sedimento Encapsulado.....80
- Figura 59: Modelo completo gerado pela nossa abordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de ‘cima pra baixo’ (*Top-down approach*). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....80
- Figura 60: RTM migrado com modelo de velocidade estratificado correto e sobreposto pelo mesmo. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....81
- Figura 61: RTM migrada e sobreposta pelo o modelo construído pelo *top-down approach*. Notamos uma sutil subida da base do sal e do evento subjacente do pré-sal (seta amarela), muito provavelmente porque o aumento local pronunciado da velocidade sísmica no mergulho da mini-bacia não fora completamente contabilizado no modelo de velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....81
- Figura 62: RTM migrado com o modelo de velocidade estratificado de referência. a) Vista do ‘*Overhang*’; b) Vista Sedimento Encapsulado.....82
- Figura 63: RTM migrada com o modelo completo gerado pela nossa abordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de ‘cima pra baixo’ (*Top-down approach*). Notamos uma sutil subida da base do sal e do evento subjacente do pré-sal (seta amarela), muito provavelmente porque o aumento local pronunciado da velocidade sísmica no mergulho da mini-bacia não fora completamente contabilizado no modelo de velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....82

- Figura 64: RTM migrado com o modelo de velocidade simples correto e sobreposto por este. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....83
- Figura 65: RTM migrado com o modelo de velocidade simples de referência. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....84
- Figura 66: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) com sobreposição do modelo simples com velocidade dos sedimentos errada. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....84
- Figura 67: RTM migrado com o modelo simples com velocidade dos sedimentos errada e com sobreposição do mesmo. A velocidade reduzida do pacote de sedimentos desloca para cima todas os eventos subjacentes a ele. Isso acontece pois, pela abordagem de cima para baixo, os eventos mais profundos são influenciados pela correção das velocidades das camadas superiores. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....85
- Figura 68: RTM migrado com o modelo simples com velocidade dos sedimentos errada. A velocidade reduzida do pacote de sedimentos desloca para cima todas os eventos subjacentes a ele. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....86
- Figura 69: RTM (migrado com o modelo de velocidade de referência) sobreposto do modelo simples com velocidade do sal errada. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....87
- Figura 70: RTM migrado com o modelo simples com velocidade do sal errada e com sobreposição deste. Os eventos logo abaixo das maiores porções do corpo de sal são deslocados para baixo devido ao aumento da velocidade do sal (quadro vermelho), o que causa um puxão pra cima (*pull-up*) aparente na porção mais fina da bacia (setas amarelas) em virtude da imprecisão do modelo. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....87

- Figura 71: RTM migrado com o modelo simples com velocidade do sal errada. Observamos um deslocamento para baixo dos eventos abaixo do corpo com mais sal e um puxão pra cima (*pull-up*) aparente na porção mais fina da bacia ou abaixo do sedimento encapsulado. b) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....88
- Figura 72: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) sobreposto do modelo simples com interpretação topo do sal errada. Podemos ver que este erro de profundidade coincide com o comprimento de onda da *wavelet* refletida no topo do sal (o conjunto pico preto-vale branco apontado). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....89
- Figura 73: RTM migrado com o modelo simples com interpretação do topo do sal errada e com sobreposição deste. A diminuição da energia do topo do sal e o puxão para cima da base e dos eventos subjacentes (setas) são indícios de algum desacerto na construção da velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....89
- Figura 74: RTM migrado com o modelo simples com interpretação do topo do sal errada. A diminuição da energia do topo do sal e o puxão para cima da base e dos eventos subjacentes são indícios de algum desacerto na construção da velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....90
- Figura 75: RTM migrado com o modelo simples de rocha capeadora acima do topo do sal e com sobreposição deste. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....91
- Figura 76: RTM migrado com o modelo simples de rocha capeadora acima do topo do sal. Como a espessura da anidrita coincide com o comprimento de onda da sísmica, podemos ver que a imagem com o modelo de anidrita se assemelha em muito ao dado sem esta (Figura 63), diferenciando apenas na reflexão mais 'brilhante' no topo do corpo de sal. Esta é uma armadilha comum dados provenientes de bacias evaporíticas. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....91

Figura 77: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) sobreposto do modelo simples com interpretação do topo do sal englobando a anidrita. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....92

Figura 78: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal englobando a anidrita e sobreposto por este. Esta interpretação soluciona razoavelmente o modelo de sal, embora percebamos uma leve diminuição da energia da base do sal abaixo da anidrita erroneamente interpretada. Esta é uma estratégia algumas vezes usadas pela indústria para processamentos rápidos. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....93

Figura 79: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal englobando a anidrita. Esta interpretação soluciona razoavelmente o modelo de sal, embora percebamos uma leve diminuição da energia da base do sal abaixo da anidrita erroneamente interpretada. Esta é uma estratégia algumas vezes usadas pela indústria para processamentos rápidos. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....93

Figura 80: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) sobreposto do modelo simples com interpretação do topo do sal abaixo da anidrita. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....94

Figura 81: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal abaixo da anidrita e sobreposto por este. Neste caso vemos um um puxão pra cima (*pull-up*) da base e uma piora do topo do sal ao atribuímos uma velocidade muito baixa à rocha capeadora acima do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....94

Figura 82: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal abaixo da anidrita. Neste caso vemos um puxão pra cima (*pull-up*) da base e uma piora do topo do sal ao atribuímos uma velocidade muito baixa à rocha capeadora acima do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....95

Figura A 1: Modelo de velocidade preenchido com uma velocidade constante de 1500 m/s. a) Vista do 'Overhang'; b) Vista Sedimento Encapsulado.....103

Figura A 2: Criação dos horizontes constantes como o fundo marinho, a base do sal e um refletor no pré-sal, e posterior inserção de velocidades constantes a partir desses horizontes, como, 2.000 m/s abaixo do topo do mar, 4.000 m/s após a base do sal e uma deliberada inversão de velocidade de 3.800 m/s depois do refletor do pré-sal. a) Vista do 'Overhang'; b) Vista Sedimento Encapsulado.....103

Figura A 3: Criação dos horizontes representando essa geometria "genérica" da tectônica de sal das bacias brasileiras e mostrando uma forma do sal apresentando uma crista (*overhang*) Vista da seção do *overhang* desenhada pelo próprio autor (horizontes amarelos), a qual é inserida uma velocidade constante de 4.500 m/s (em vermelho). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....104

Figura A 4: Horizontes subsequentes criados seguindo uma sequência deposicional/estratigráfica lógica, e a velocidade variando de 2.000 a 3550 m/s distribuídos dentre camadas sedimentares com um gradiente de 75 m/s seguindo a tectônica do sal até alcançar seu topo. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado.....105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
2. TECTÔNICA DE SAL	25
3. IMAGEAMENTO SÍSMICO	28
3.1. Processamento sísmico	28
3.2. Migração sísmica	30
3.2.1. Migração Kirchhoff	32
3.2.2. Migração Reversa no Tempo	41
3.3. Construção de modelos de velocidades (abordagem de cima para baixo)	44
3.4. Tomografia	48
3.5. FWI	49
3.6. Desafios no imageamento de corpos de sal	50
4. METODOLOGIA	54
4.1. Cenários geológicos	55
4.1.1. Modelo Estratificado	56
4.1.2. Modelo sedimento constante	56
4.1.3. Modelo de rocha capeadora	60
4.2. Geração dos dados sintéticos	62
4.3. Atualização de cima para baixo	67
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	69

5.1. Atualização cima para baixo	69
5.1.1. Estimativa da camada de velocidade da água:	69
5.1.2. Estimativa da camada de sedimentos:	71
5.1.3. Estimativa da camada de sal:	73
5.1.4. Estimativa da camada de pré-sal:	77
5.1.5. Comparação do resultado entre modelo de referência e modelo construído:	79
5.2. Modelo com sedimento constante	83
5.3. Modelo com rocha capeadora	90
6. CONCLUSÕES	96
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE A	102
A.1. CRIAÇÃO DOS MODELOS	102

1. INTRODUÇÃO

O processamento sísmico é o método mais largamente utilizado na indústria atualmente para se mapear as estruturas e propriedades da subsuperfície a fim de se prospectar hidrocarbonetos. Dentre as etapas de processamento, a migração sísmica é o processo que visa reposicionar os refletores (impedância entre camadas da subsuperfície) do dado sísmico nas suas verdadeiras localizações (Yilmaz, 1987). Para tal, esse processo requer um dado pré-processado em tempo e um modelo de velocidades preciso, pois este último é o que mais impacta no resultado nesse posicionamento.

A construção de modelos de velocidades (VMB, do inglês, *Velocity Model Building*) vem sendo implementada com sucesso nos últimos anos através do método conhecido como *Top-down approach* (Jones, 2010), em que se estima velocidades por camadas de cima para baixo (camadas mais recentes para mais antigas). No entanto, à medida que se explora regiões profundas e ultra profundas, de altos contrastes de velocidades e de estruturas geometricamente complexas, como ocorrem nas bacias da margem brasileira de Santos e Campos, os algoritmos de inversão para estimativa de VMB e de propriedades ficam instáveis e falham (Marpeau e Belz, 2019).

A formação de imagens sísmicas de corpos evaporíticos, por sua vez, é notoriamente difícil devido às formas complexas de flancos salinos acentuados, camadas de sobrecarga adjacentes e os contrastes de impedância acústica e velocidade são fortes na interface sedimento-evaporito (Jones, 2014). O movimento do sal observado nas bacias de margem atlântica divergente, em particular, geralmente resulta em estruturas de formato extremamente complexo, com mergulhos íngremes e que

representam desafios significativos para a construção de modelos de velocidade e migração sísmica.

Eventos geológicos complexos formados por rochas evaporíticas, como *overhangs* (formas complexas de abas salientes) e camadas de sedimento encapsuladas em rochas salinas, não são precisamente resolvidos por técnicas comuns de inversão, como tomografias de alta resolução por tempo de trânsito (Nolet, 1987) e inversão completa da forma da onda (do inglês, *Full Waveform Inversion* – FWI. Referências: Tarantola 1984, Virieux e Operto 2009). Portanto, eventos profundos em regiões de interesse, como camadas do pré-sal, são mal imageadas, não fornecendo confiança para interpretação estrutural e inversões petrofísicas (Marpeau e Belz, 2019).

Para contornar estas limitações dos algoritmos de inversão, técnicas de interpretação vêm sendo integradas ao fluxo de construção de modelos de velocidades. Neste contexto, a interpretação do sal tem cada vez mais requerido um esforço significativo de geofísicos e geólogos intérpretes durante a construção do próprio modelo de velocidade, trabalhando em conjunto com as equipes de processamento para alternar entre métodos de inversão de velocidade e esforços de interpretação de corpos salinos em ciclos até resultar em modelos de velocidade aprimorados (Marpeau e Belz, 2019).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho se concentra em testar as estratégias atuais da construção de modelos de velocidade da subsuperfície da Terra baseadas pela aproximação de cima para baixo integrada a interpretação humana das estruturas geológicas complexas. Para tal, este trabalho realiza experimento utilizando dois cenários geológicos isotrópicos representativos da bacia de Santos, gerados sinteticamente, sendo um incluindo um *overhang* e outro com sedimento encapsulado por rochas evaporíticas. Além disso, também foram analisadas as consequências dos erros na construção de um modelo de velocidade com foco nos desafios da formação de imagens dos complexos corpos evaporíticos comumente presentes nas bacias da margem atlântica brasileira.

Para tanto, este trabalho expõe, no capítulo 2, um breve contexto geológico e revisão da tectônica do sal e suas principais estruturas mais desafiadoras ao imageamento sísmico. No capítulo 3 é realizado levantamento sobre as técnicas de processamento sísmico para o imageamento sísmico, como principais métodos de

migração, inversões, que são essenciais para atualização e controle de qualidade para construção de modelos de velocidades. Além disso, esse capítulo apresenta limitações que motivam a integração da interpretação estrutural ao fluxo de construção de modelos de velocidade. No capítulo 4 são descritas as metodologias para realização do experimento. Este capítulo é dividido entre a geração dos dados sintéticos e a demonstração da construção de modelos de velocidade seguindo a abordagem de cima para baixo com integração de técnicas de interpretação. Com este experimento é possível avaliar as consequências dos erros no modelo de velocidade para a migração em profundidade, assim como as fontes de incertezas na construção do mesmo associadas a determinadas armadilhas de sal. O apêndice A apresenta a construção dos modelos geológicos sintéticos gerados para este experimento. Em seguida, no capítulo 5, são analisados os resultados. E por fim, a conclusão.

2. TECTÔNICA DE SAL

Este capítulo aborda o contexto geológico de tectônica do sal na margem do atlântico sul que servem de inspiração para criação para modelos de subsuperfície a serem implementados sinteticamente neste trabalho.

A geologia em questão apresenta complexidades originando cenários de interpretação como saliências, que tendem a ocultar a geologia logo abaixo, sedimentos encapsulados com velocidades diferentes do sal circundante e a ambiguidade da posição do evento exato do topo do sal devido aos altos padrões de estratificações em uma sequência evaporítica contínua, coberta por uma camada de anidrita e/ou de carbonato albiano de alta velocidade.

Devido às suas propriedades físicas diferentes das demais rochas, o sal flui a baixas temperaturas e pressões e forma estruturas peculiares em bacias sedimentares evaporíticas, observadas tanto na superfície da Terra quanto nas regiões de águas profundas dos oceanos. A movimentação do sal é denominada halocinese (Trusheim, 1960 *apud* Mohriak *et al*, 2008) e a tectônica de sal refere-se aos mecanismos responsáveis pela deformação de camadas de sal e, assim, pela formação de estruturas diapíricas em escala regional.

O regime de esforços, responsável pela formação das estruturas halocinéticas em bacias intracratônicas e margens passivas, apresenta um esforço principal na direção vertical, resultando em estruturas diversas como domos de sal, muralhas de sal, falhas de crescimento, etc. O processo de formação dessas estruturas pode ser associado a forças halocinéticas ou gravitacionais, forças extensionais e forças compressionais. Os princípios básicos da deformação do sal seguem o comportamento dos fluidos (Barton, 1933; Nettleton, 1934, Weijermars *et al.*, 1993 *apud* Mohriak *et al*, 2008) e a pressão

resultante da sobrecarga sedimentar diferencial tende a mover o sal das regiões de alta pressão para as de baixa pressão geostáticas (Figura 1), assim como para uma posição onde ocorra um equilíbrio isostático.

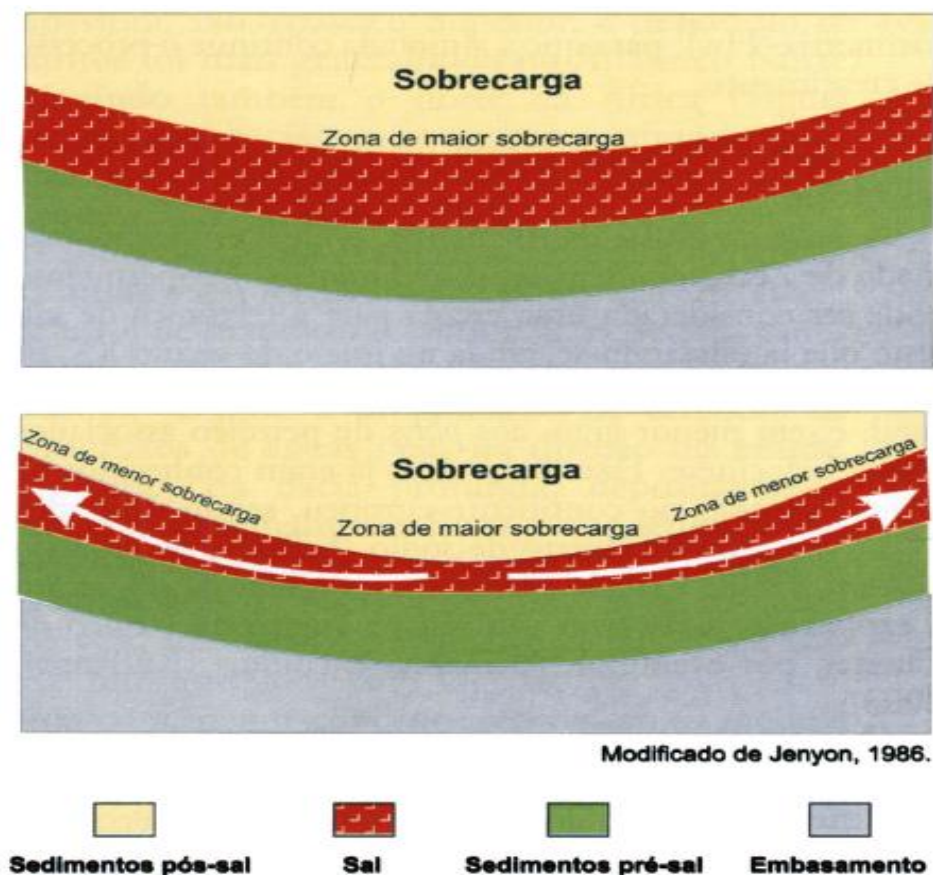


Figura 1: Efeito da sobrecarga sobre o sal. Fonte: Mohriak *et al*, 2008.

Em geral, os anticlinais halocinéticos estão associados aos processos gravitacionais, sendo comuns em bacias intracratônicas do tipo do Mar do Norte e parte emersa do Golfo do México. Por outro lado, margens continentais, além dos diápiros extensionais, também ocorrem anticlinais extensionais e contracionais com núcleo de sal.

Uma almofada e um anticlinal de sal são feições estruturais positivas associadas à subida do sal, geralmente com forma subcircular, associadas à subida do sal com camadas sedimentares concordantes. Para o crescimento de almofadas de sal é

necessário que a pressão nos flancos laterais seja maior que a pressão nas cristas da almofada.

Já um tronco de sal pode ser definido como um diápiro de sal de geometria subcircular, apresentando contatos discordantes com rochas da sobrecarga sedimentar sobrejacente. E uma muralha de sal como um diápiro de sal bastante alongado numa direção, também apresentando contatos discordantes com as rochas da sobrecarga sedimentar sobrejacente (Mohriak *et al*, 2008). Um exemplo dessas estruturas é apresentado na Figura 2.

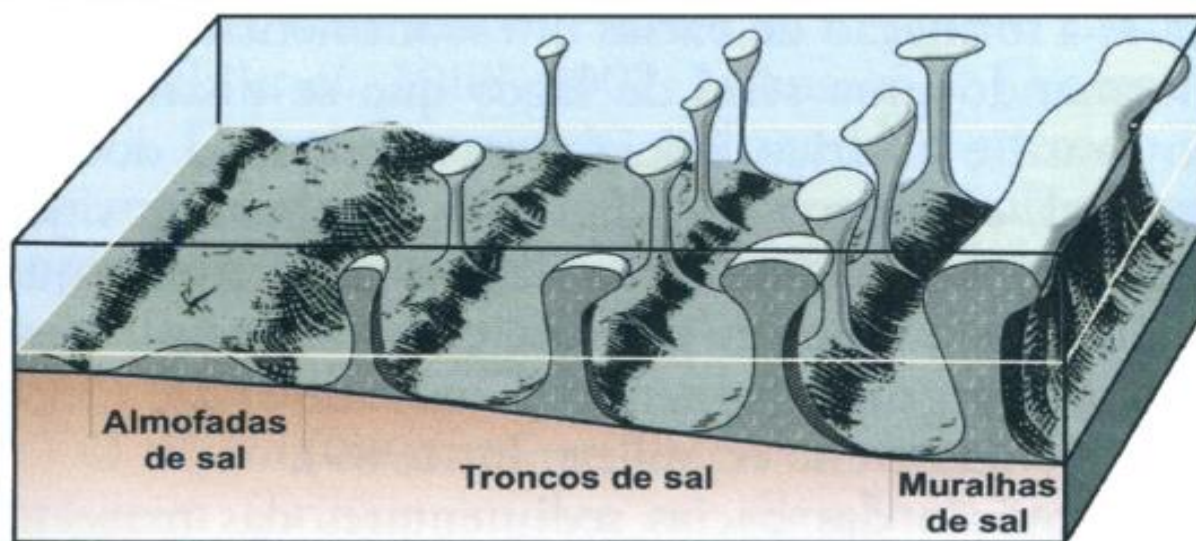


Figura 2: Modelo esquemático com visão 3D das estruturas halocinéticas entre a região proximal e distal da Bacia Zechstein, com almofadas, troncos e muralhas de sal. Fonte: Mohriak, 2008.

3. IMAGEAMENTO SÍSMICO

Neste capítulo, são abordados os principais métodos de imageamento sísmico utilizados na indústria, além das principais limitações e desafios destes para o imageamento de corpos de sal que estes apresentam que motivaram a proposta deste trabalho: construção de modelos de velocidades com interpretação estrutural integrada. Este trabalho utiliza dados sintéticos e, portanto, não é abordado maior aprofundamento sobre processamento em tempo.

3.1. Processamento sísmico

A imagem sísmica da subsuperfície da Terra corresponde a uma superposição de dois campos: um campo que consiste na distribuição espacial de propriedades internas de longo comprimento de onda, tais como velocidade e densidade, e outro campo que compreende a distribuição de propriedades de contorno de curto comprimento de onda, tais como refletividade sísmica e dispersões. Para traçar um modelo da Terra, aplica-se a metodologia de Construção de Modelo de Velocidade (VMB – *Velocity Model Building*) para estabelecer os modelos de referência que irão conter a variação dos comprimentos de onda longos (os valores absolutos da velocidade e densidade) e é utilizada a migração para mapear a refletividade sísmica e os valores relativos de velocidade e densidade sísmica (a variação dos comprimentos de onda curtos). Os processos de construção do modelo de velocidade e de migração sísmica se complementam, porque o VMB usa as imagens de refletividade para estabelecer as interfaces de velocidade e, em contrapartida, a migração precisa usar um modelo de velocidade de referência (Figura 3).

O dado proveniente da aquisição sísmica é resultado da propagação de ondas geradas por fontes energéticas que atravessaram uma subsuperfície terrestre, refletiram e foram registradas por sensores próximos à superfície (Yilmaz, 2001). Para se obter um

dados sísmicos é necessário todo um arranjo entre fontes e receptores com suficiente amostragem e abertura para que os caminhos das propagações das ondas possam ser recuperados pelo processamento sísmico.

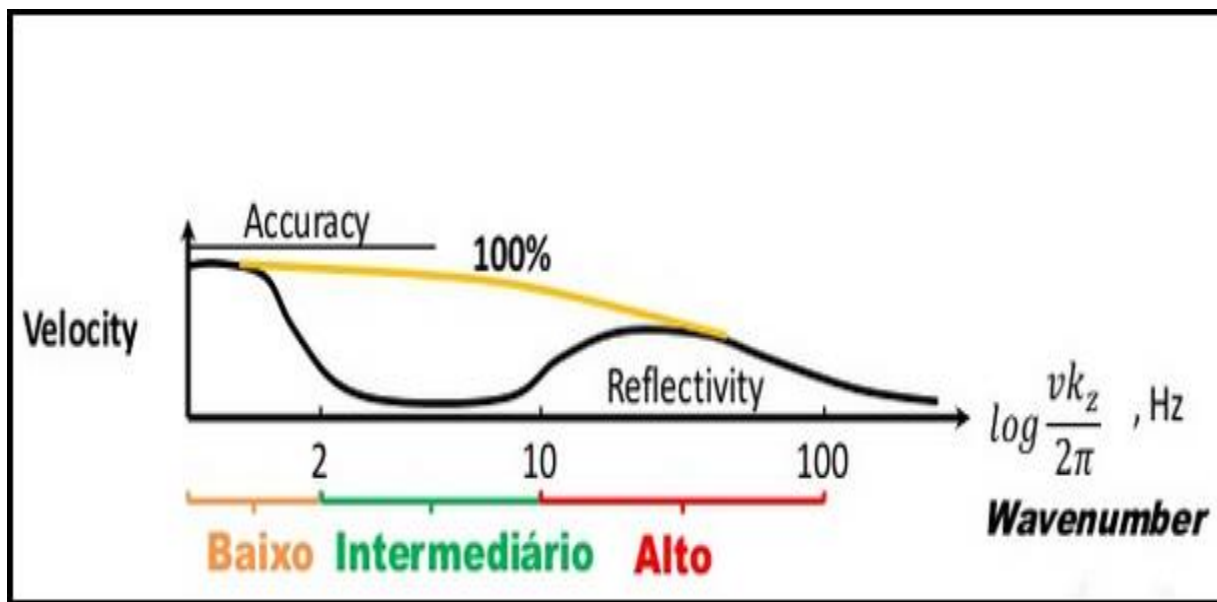


Figura 3: Gráfico de Claerbout mostrando a relação entre o campo que consiste na distribuição espacial de propriedades internas de longo comprimento de onda, tais como velocidade e densidade, e outro campo que compreende a distribuição de propriedades de contorno de curto comprimento de onda, tais como refletividade sísmica e dispersões. E os objetivos futuros do VMB de minimizar esta lacuna (linha amarela). Fonte: Modificado de Dias, Bulcão e Soares Filho (2016) e adaptado de Claerbout, 1985.

O processamento sísmico pode ser dividido em três etapas: processamento em tempo, construção de modelos de velocidades (VMB) e migração. Na primeira etapa o dado é proveniente da aquisição e é tratado por diversas transformações de domínios matemáticos a fim de se atenuar ruídos do sinal de interesse, além de preparação do mesmo para determinado tipo de algoritmo de migração. A etapa VMB, que é a etapa abordada neste trabalho, busca estimar modelo de subsuperfícies fazendo uso de técnicas de inversão e de migrações intermediárias que auxiliam para as inversões e interpretações estruturais. A migração dita final é a imagem resultante do VMB estimado com o dado processado em tempo. Após a migração também são realizadas técnicas de pós processamento. Para maior aprofundamento sobre processamento em tempo e migração, indica-se Yilmaz (2001) e construção de modelos de velocidades Jones (2010).

3.2. Migração sísmica

A etapa de migração sísmica é o momento em que se obtém a posição final dos refletores do imageamento sísmico. O propósito é reposicionar os eventos de reflexão registrados e processados em tempo na localização verdadeira e depende de um modelo de velocidades preciso (Yilmaz, 1987)

O processo de migração move reflexões inclinadas para as suas verdadeiras posições subterrâneas e colapsa as difrações, aumentando assim a resolução espacial e produzindo uma imagem sísmica da subsuperfície (Figura 4). Portanto, tem como objetivo fazer com que a seção empilhada pareça semelhante à seção transversal geológica em profundidade ao longo da sísmica (Figura 5) (Yilmaz, 1987).

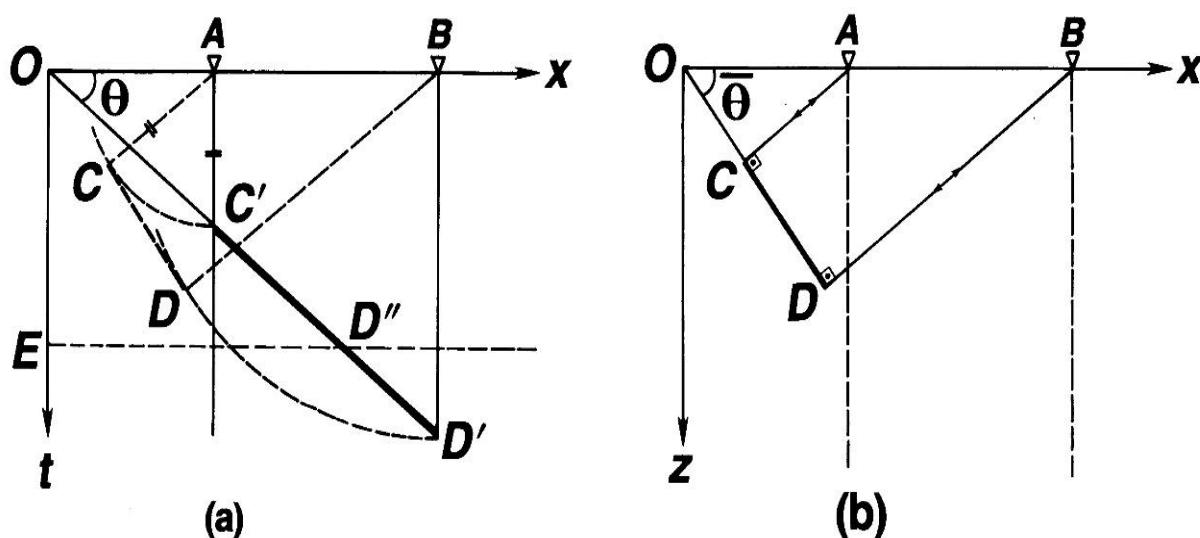


Figura 4: Princípios de migração: o segmento de reflexão $C'D'$ na seção de tempo como em (a), quando migrado, é movido para cima do mergulho, acentuado, encurtado e mapeado em sua verdadeira localização CD subterrânea como em (b). Fonte: Adaptado de Yilmaz, 1987.

A migração atualmente tem sido realizada de forma pré-empilhada e em profundidade (em inglês *Pre-Stack Depth Migration* - PSDM). Na migração em profundidade (PSDM) os tempos de reflexão migrados são convertidos para profundidades usando-se informações de velocidades adequadas (Gray *et. al*, 2001). A migração em profundidade

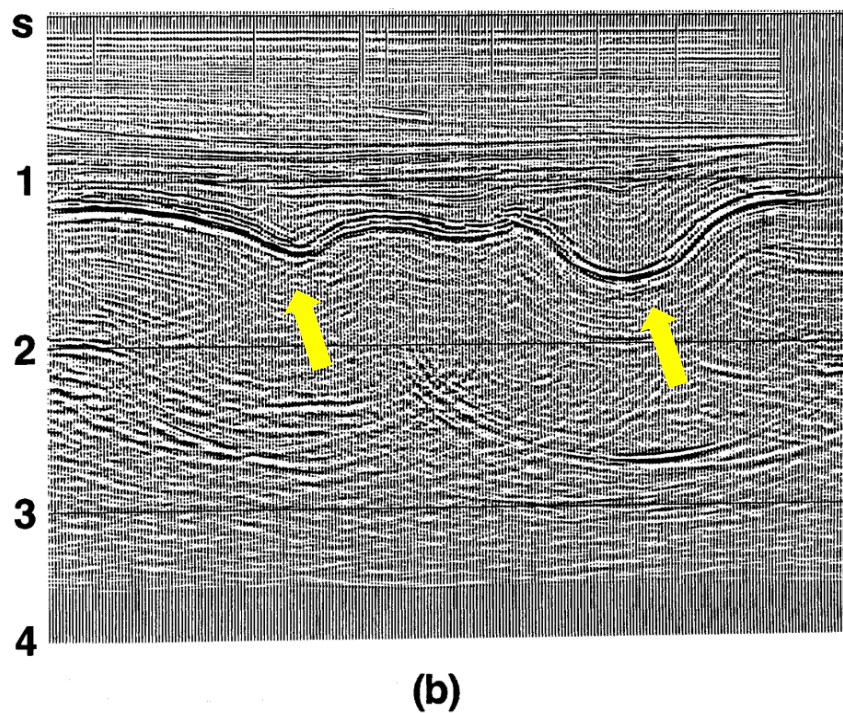
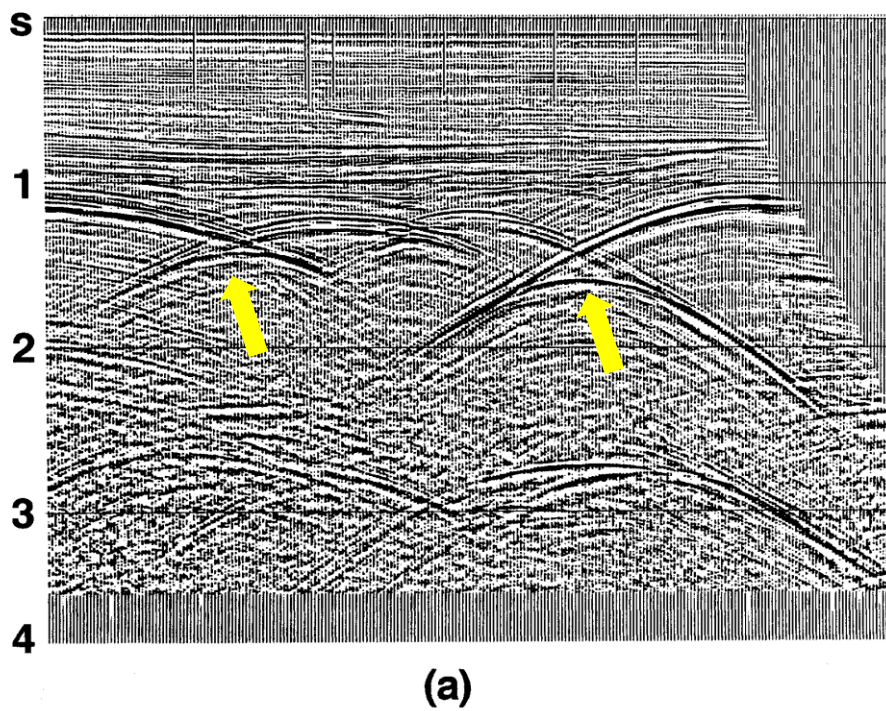


Figura 5: (a) Um empilhamento CMP (*Common midpoint*) CMP antes da migração. (b) Um empilhamento CMP após a migração. A migração desata os laços de “gravata borboleta” na seção empilhada e os transforma em sinclinais. Fonte: Yilmaz, 1987.

utiliza um modelo de velocidades intervalares mais confiável possível obtido como uma média das propriedades físicas das camadas e, além de colapsar as difrações inerentes aos dados sísmicos, cuida para que os eventos de reflexão sejam reposicionados sob suas corretas localizações em superfície (Kearey *et al*, 2009).

Dentre os métodos de migração, os dois amplamente utilizados são migração Kirchhoff e migração reversa no tempo (RTM, do inglês *Reverse Time Migration*). Ambos são usualmente complementares tanto para construção de VMB's e para as entregas finais de imagens. Essas duas técnicas se diferenciam em aspectos teóricos, quantitativos e qualitativos. Ambas buscam realizar o procedimento de reposicionar os refletores. Enquanto a Kirchhoff utiliza aproximação por teoria dos raios, a RTM utiliza métodos diferenciais. Uma vantagem da migração Kirchhoff é utilizar conteúdo de números de ondas mais altos de forma eficiente, respeitando Nyquist do dado de entrada para a migração (geralmente frequência máxima útil de aproximadamente 100 Hz). Já a RTM é capaz de imagear estruturas mais profundas e complexas do que a Kirchhoff, no entanto por ser computacionalmente mais cara e por depender computacionalmente no valor máximo de frequência (devido ao espaçamento da malha e de tiros), geralmente fica limitada em 45 Hz. Com isso, sabendo que nas regiões mais profundas as frequências mais altas são atenuadas, a migração RTM é esperada de se fornecer imagem mais confiável que a Kirchhoff, enquanto nas regiões mais rasas com menor complexidade estrutural, a Kirchhoff possui maior resolução.

3.2.1 Migração Kirchhoff

A migração Kirchhoff (Schneider, 1978) é uma técnica integral que utiliza aproximação da teoria dos raios, que são vetores que fornecem uma indicação ou a direção do movimento da frente da onda e seus tempos de chegada ao longo do caminho do raio associado. Enquanto as ondas podem ser descritas em termos de funções seno ou cosseno com uma frequência específica, tamanho (amplitude) e valor no tempo zero (fase), na sua forma mais simples, os raios são inerentes de informações sobre amplitude ou fase. A descrição do raio fornece o tempo que uma frente de onda leva para viajar de um ponto para outro, e/ou a direção em que a onda se move.

Técnicas integrais, como Kirchhoff, resolvem uma aproximação de alta frequência da equação de onda, assim cada chegada é tratada como um evento de pico, e a soma desses eventos com escala de amplitude apropriada, reconstrói a imagem final através da superposição de componentes da fase estacionária (Gao *et al.*, 2006 *apud* Jones, 2010).

Uma característica fundamental das técnicas integrais é que a imagem pode ser calculada para um subconjunto de dados (por exemplo, para um grupo de traços, uma fatia de profundidade, uma linha de imagem etc.) e isso as torna muito econômicas na produção de conjuntos de traços para análise de velocidade (Gao *et al.*, 2006 *apud* Jones, 2010).

Usar raios para descrever como uma frente de onda progride é uma aproximação aceitável se o comprimento de onda da onda sonora for várias vezes menor que o comprimento de escala das variações de velocidade encontradas (Figura 6a). Uma vez que a velocidade anômala é pequena em comparação com o comprimento de onda sísmico, a onda se dispersa ao invés de refratar quando encontra a anomalia (Figura 6b). Por esse motivo, as técnicas de raios, como a migração Kirchhoff, são algumas vezes descritas como uma 'aproximação de alta frequência' (Jones, 2010).

Na prática, a implementação da migração Kirchhoff consiste em dois estágios: computação dos tempos de trânsito dos raios ao longo do modelo de velocidade e o somatório das informações associadas a esses parâmetros de trânsito. De modo geral, este método de migração constitui-se na soma de amostras ao longo de uma superfície – que é o lugar geométrico das difrações previstas pelo campo de velocidades – a partir de uma tabela de tempos de trânsito (Jones, 2010).

A assinatura de uma fonte secundária de Huygens (Figura 7a) corresponde a um semicírculo no plano $x - z$ (Figura 7c) e uma hipérbole de difração é a resposta no plano $x - t$ (Figura 7b). Refletores no subsolo podem ser visualizados como sendo compostos de muitos pontos que atuam como fontes secundárias da Huygens (Figura 8). Uma seção zero-*offset* consiste em uma superposição de muitas respostas hiperbólicas no tempo de trânsito (Figura 9).

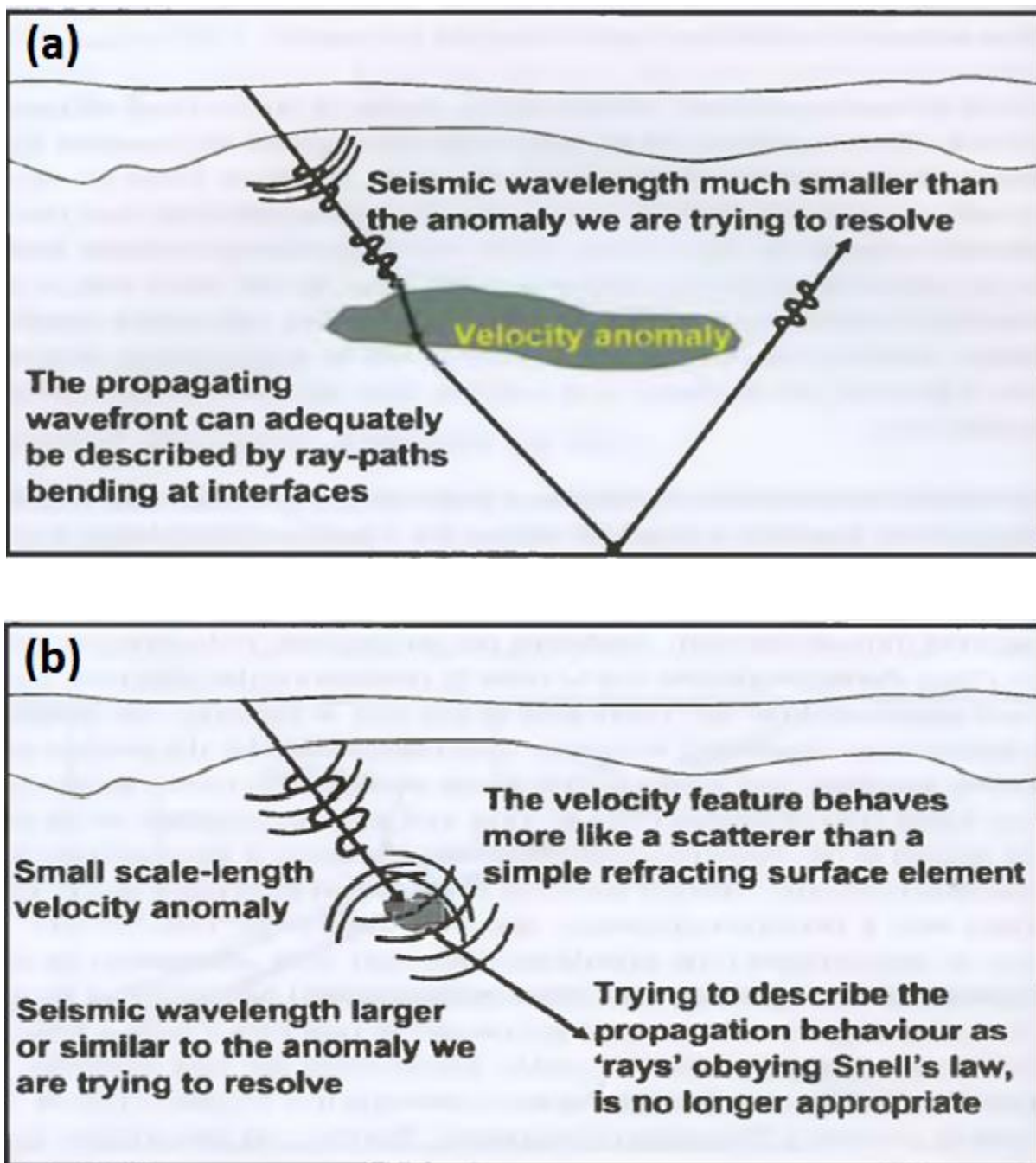


Figura 6: (a) Resolução da escala comprimento - escala de comprimento da anomalia da velocidade maior que o comprimento da onda sísmica - a teoria dos raios funciona. (b) Resolução da escala comprimento - escala comprimento da anomalia de velocidade comparável ao comprimento da onda sísmica - teoria dos raios falha e teoria da difração (espalhamento) é melhor para descrever a propagação de ondas. Fonte: Jones, 2010.

Essa caracterização de fontes pontuais na subsuperfície nos leva a entender o método de migração Kirchhoff de duas formas: baseado na superposição de semicírculos e baseado no somatório de amplitudes ao longo de caminhos hiperbólicos. O primeiro consiste em mapear a amplitude em uma amostra no plano $x-t$ de entrada da seção em tempo não migrada em um semicírculo no plano $x-z$ de saída (Figura 10). A seção migrada será formada como resultado da superposição de muitos semicírculos (Figura 10). Por sua vez, o esquema de migração baseado no somatório de difração consiste em pesquisar os dados de entrada no plano $x-t$, somando as amplitudes ao longo da curva de difração em busca da energia que corresponde à fonte secundária de Huygens em cada ponto do plano $x-z$ de saída. O resultado da soma é, na verdade, mapeado no plano $x-\tau$, onde τ é o tempo do evento na posição migrada (plano $x-z$). A curvatura da trajetória hiperbólica para soma de amplitude é governada pela função de velocidade usada para calcular a trajetória do tempo de trânsito no ápice da hipérbole. Colocando de uma maneira simplificada (Figura 12), tendo-se calculado o tempo de entrada (t), a amplitude no local de entrada (B) é colocada na seção de saída (local A), correspondendo ao tempo de saída (τ) no ápice da hipérbole (Yilmaz, 1987).

É importante atentar-se que, devido ao fato dos tempos de viagem de reflexão em camadas na Terra aproximarem-se de hipérboles de difração truncada, isso pode impor uma restrição à largura da abertura no processo somatório devido à extensão lateral das mesmas. Em geral, na migração de Kirchhoff, os parâmetros importantes são a largura da abertura usada no somatório e o mergulho máximo a ser migrado. Quanto menor a abertura, menor a capacidade da migração em colapsar a hipérbole de difração. Uma pequena abertura causa a remoção de quedas acentuadas; gera eventos horizontais espúrios e adiciona ruído aleatório não correlacionado com o rastreamento (Yilmaz, 1987).

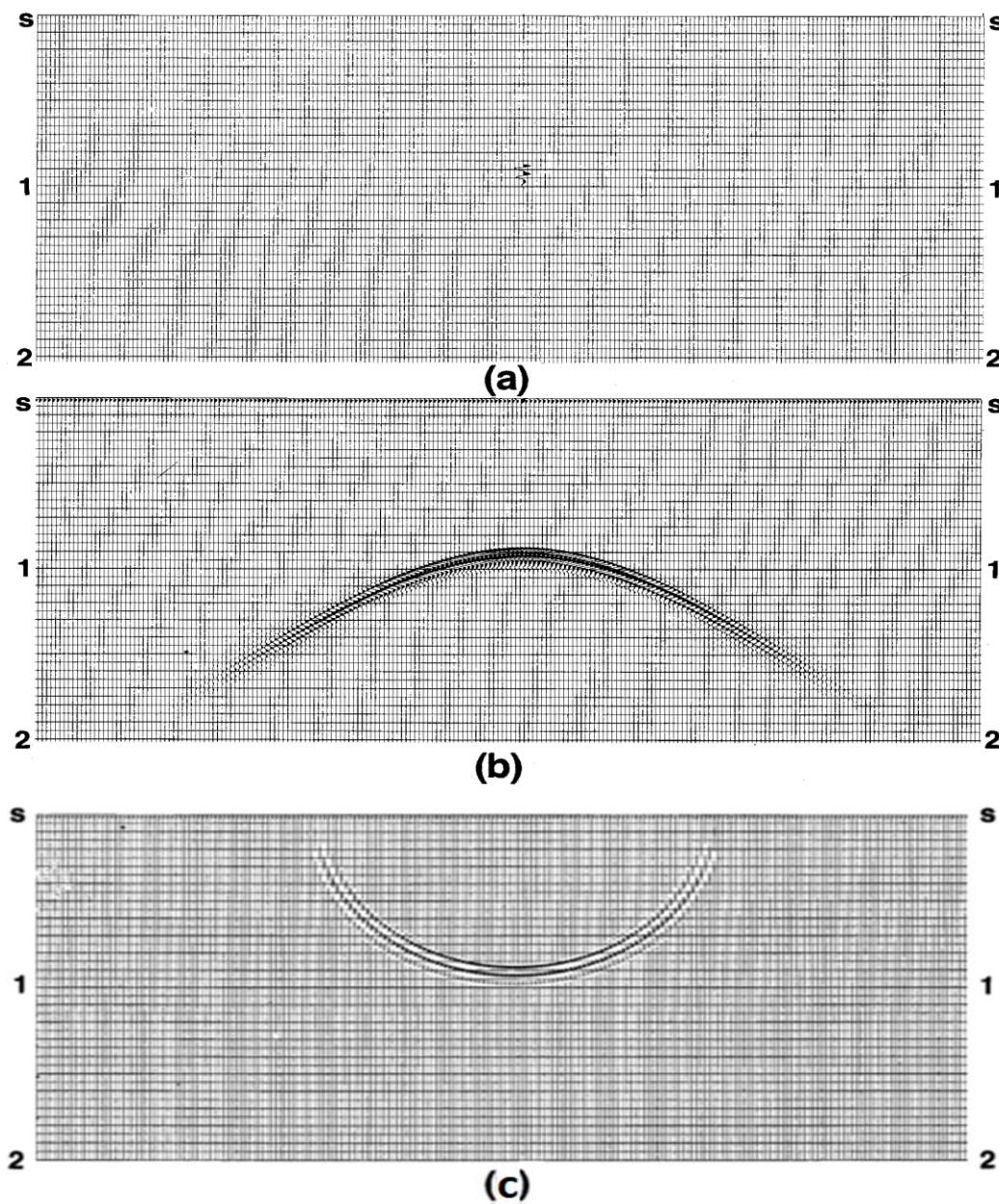


Figura 7: Um ponto que representa a fonte secundária de Huygens (a) produz uma hipérbole de difração na seção de tempo de deslocamento zero (b) e um semicírculo na seção em profundidade. Fonte: Yilmaz, 1987.

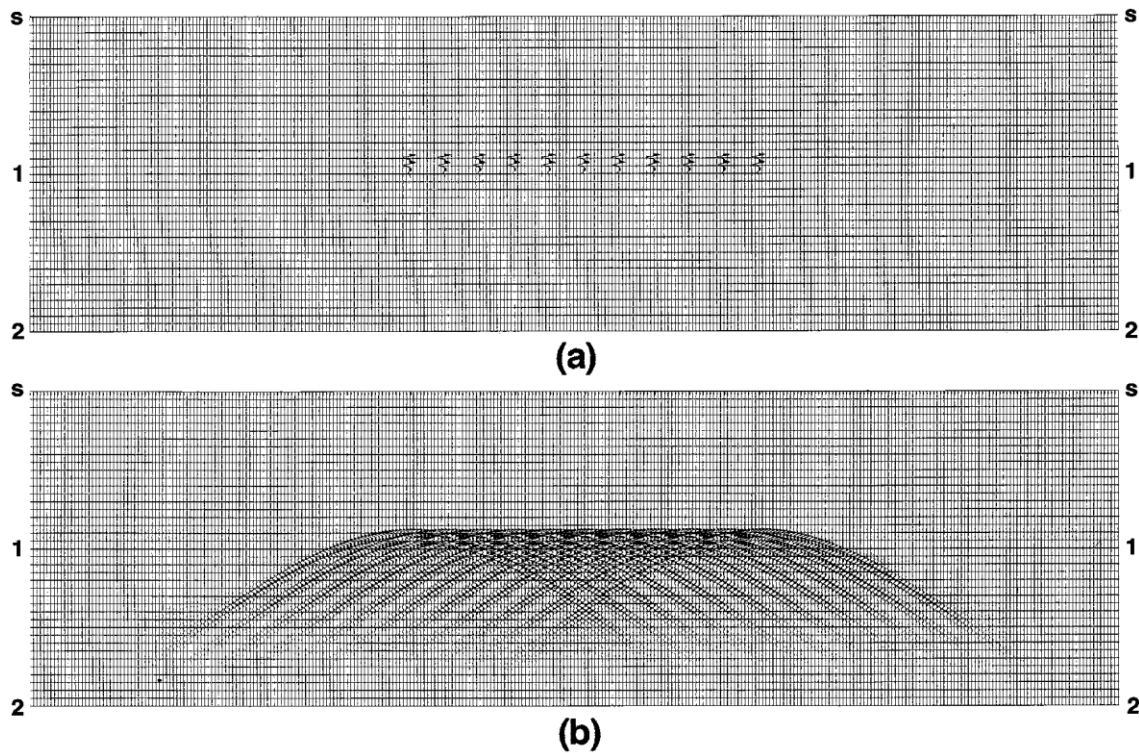


Figura 8: Sobreposição das respostas em zero-offset (b) de um número discreto de fontes secundárias da Huygens, como em (a). Fonte: Yilmaz, 1987.

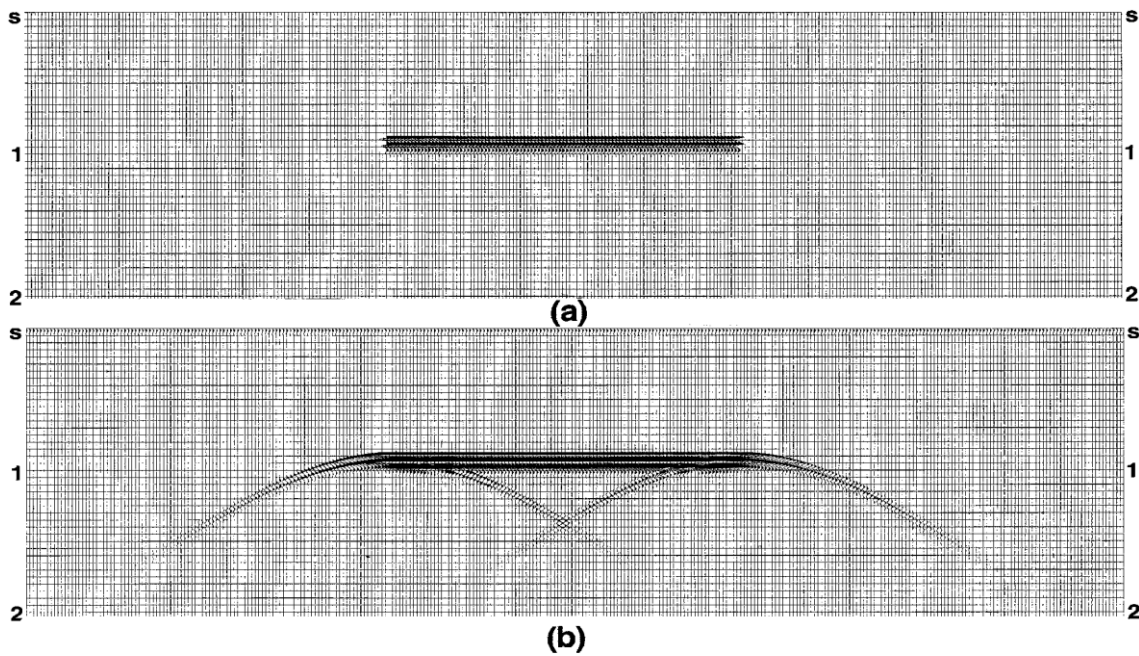


Figura 9: Sobreposição das respostas em zero-offset (b) de fontes secundárias de Huygens contínuas, como em (a). Fonte: Yilmaz, 1987.

Embora os esquemas de Kirchhoff possam lidar com muitos caminhos de raios possíveis, como o par fonte-receptor de um determinado elemento refletivo, é mais comum que um único caminho de raio seja usado. Um método direto para calcular os tempos de viagem é o rastreamento de raios através do modelo de velocidade-profundidade especificado. Um raio que emerge de uma localização de origem na superfície pode ser espalhado para baixo na terra e rastreado através da subsuperfície

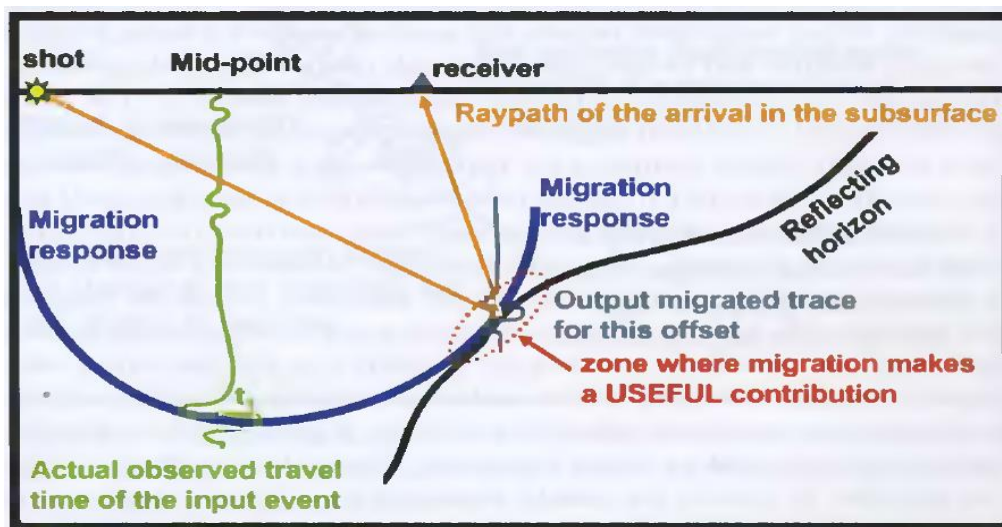


Figura 10: A migração de Kirchhoff copia a energia do traço de entrada para todos os locais ao longo da resposta ao impulso. A resposta ao impulso é calculada até algum mergulho máximo específico e abertura lateral. Fonte: Jones, 2010.

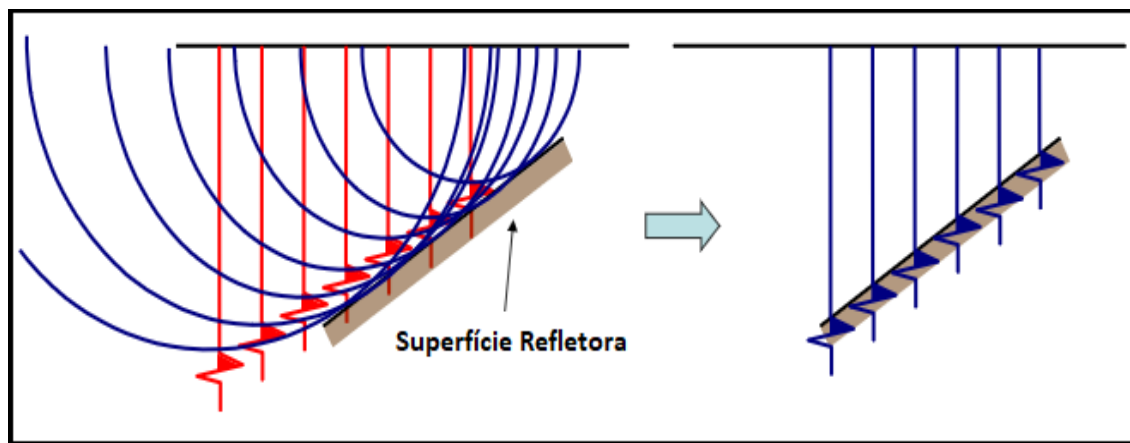


Figura 11: Migração pelo somatório Kirchhoff de vários semicírculos. Macpherson, 2019.

enquanto se calcula a inclinação do raio causada por mudanças no gradiente de velocidade e refração nos limites das camadas com contraste de velocidade. O tempo de trânsito, a partir da localização da fonte e do receptor na superfície e um ponto de reflexão, é então calculado integrando os elementos de distância ao longo da trajetória do raio dividido pela velocidade associada a esse elemento. Para um determinado par de receptor e fonte na superfície e um ponto de reflexão, o tempo de trânsito total é calculado adicionando o tempo de trânsito da fonte ao ponto de reflexão com o tempo de trânsito do ponto de reflexão para o receptor (Figura 13).

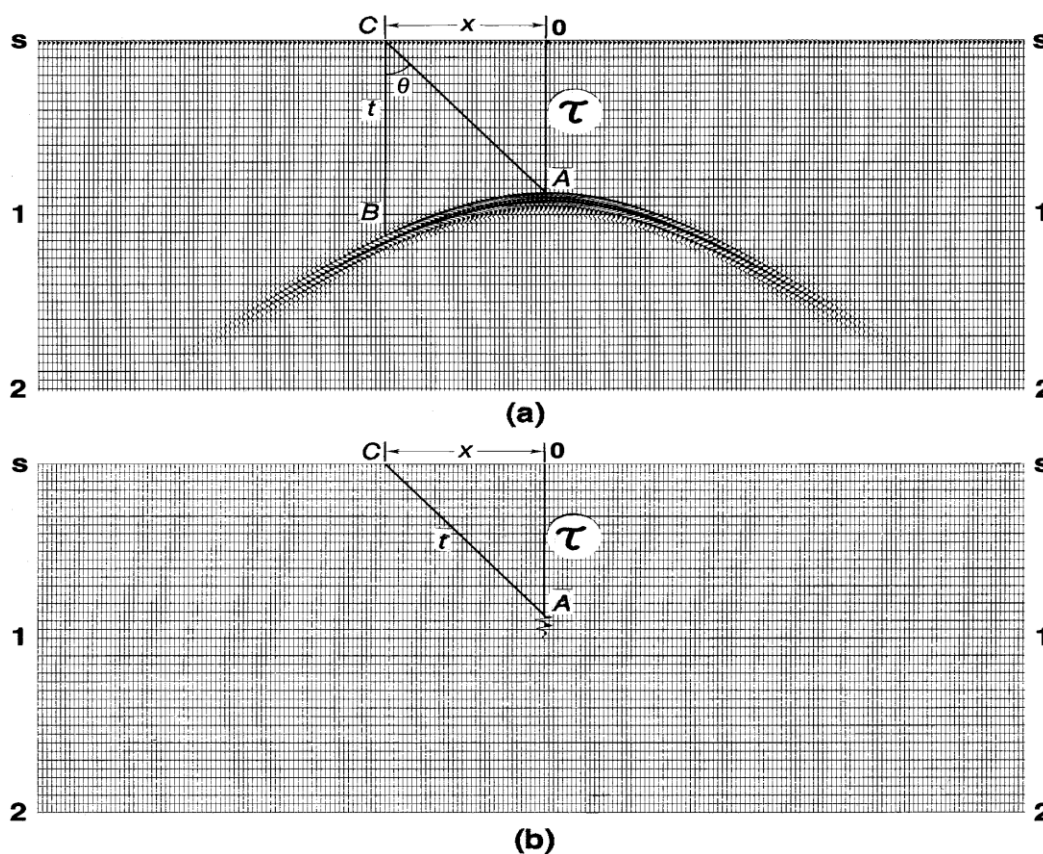


Figura 12: Princípios de migração baseados no somatório de difração. (a) Seção em zero-offset de um modelo de velocidade constante, (b) migração. A amplitude no local de rastreamento da entrada B ao longo do flanco da hipérbole do tempo de trânsito é mapeada no local de rastreamento da saída A no ápice da hipérbole. Fonte: Yilmaz, 1987.

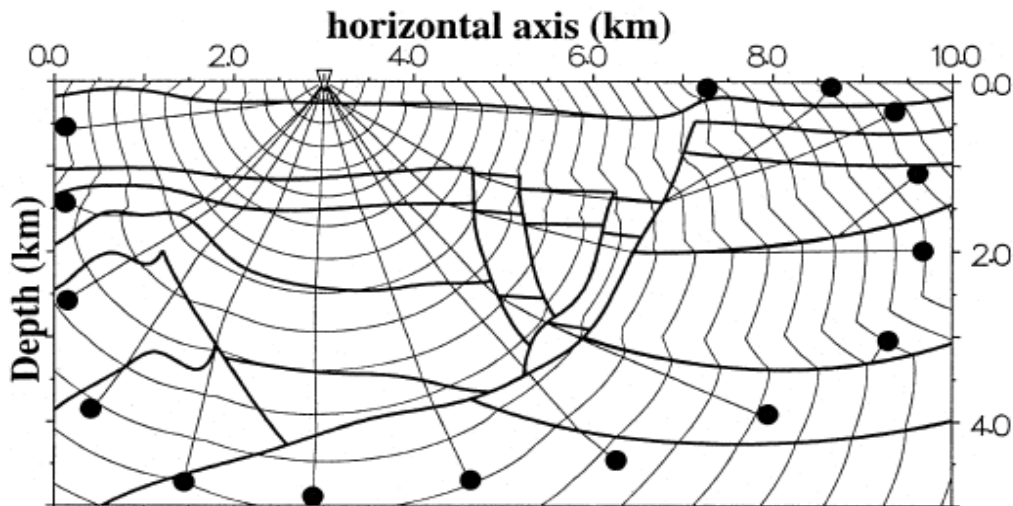


Figura 13: Exemplo ilustrativo dos contornos do tempo de trânsito derivados do traçado de raios através do modelo de velocidade-profundidade especificado. Fonte: Yilmaz, 1987.

O traçado de raios descrito acima pode ser conceitualmente simples, mas computacionalmente intensivo e o rastreamento eficiente de raios através de modelos complexos de velocidade (como aqueles que contém corpos de sal com velocidade maior que os sedimentos ao redor, por exemplo) não é uma tarefa trivial. Dadas essas circunstâncias, pode-se identificar possíveis problemas com o traçado de raios através de um modelo complexo os quais causam variações rápidas fisicamente implausíveis nos contornos do tempo de trânsito. Nem sempre haverá uma combinação de caminho de raio associada à um par fonte-receptor e um ponto de reflexão. Dependendo da geometria de aquisição e da complexidade do modelo de velocidade, podem existir zonas através das quais alguns raios podem ser perdidos. Essa complicação é agravada pela carga computacional envolvida no próprio traçado de raios (Yilmaz, 1987).

3.2.2. Migração Reversa no Tempo

A RTM (Baysal *et al.*, 1983) é um método de migração sísmica que utiliza métodos diferenciais de modo a utilizar todo o campo de onda para o imageamento. Sua capacidade em lidar com todo o campo de onda evita artefatos, sendo possível imagear estruturas complexas e em profundidade que a Kirchhoff não resolve por lidar apenas com um caminho de raio. Por outro lado, a RTM é limitada em seu conteúdo de frequência, devido ao seu custo computacional ser superior. Os tipos de ondas utilizáveis incluem reflexões primárias, ondas convertidas, onda frontal, ondas mergulhantes, reflexões múltiplas, refrações, difrações e ondas de superfície (Zhou *et al.*, 2018).

O método de migração RTM é realizado utilizando a equação completa da onda (*two-way wave equation*) e consiste em realizar uma correlação cruzada da propagação sintética dos tiros com a retropropagação dos dados dos receptores, como condição de imagem (Youn e Zhou, 1999 *apud* Zhou *et al.*, 2018). Este método de migração sísmica envolve extrapolar os dados gravados nos receptores para os refletores em subsuperfície. Os dados registrados nos receptores são extrapolados na direção reversa em relação à direção da propagação das ondas a partir da fonte, que é um campo modelado pelo método de diferenças finitas utilizando o modelo de velocidades. Tratando o campo de onda gravado como uma distribuição de fonte secundária dependente do tempo ao longo dos receptores (Levin, 1984 *apud* Zhou *et al.*, 2018), a RTM extrapola cada traço de dados do registro sísmico invertido no tempo desde o espaço dos dados para o espaço da imagem, onde as imagens de saída dos refletores de subsuperfície são obtidas com base em uma condição de imagem (Figura 14 e Figura 15). Essa ideia nos arremete ao princípio de Claerbout (1971, *apud* Zhou *et al.*, 2018) de que "o refletor existe em pontos no solo onde a primeira chegada da onda descendente é coincidente com o tempo de uma onda ascendente". A condição de imagem visa adequar, no espaço da imagem, as formas de onda extrapoladas do espaço dos dados com as previsões feitas a partir do modelo de velocidade estimado e os parâmetros de origem (Zhou *et al.*, 2018).

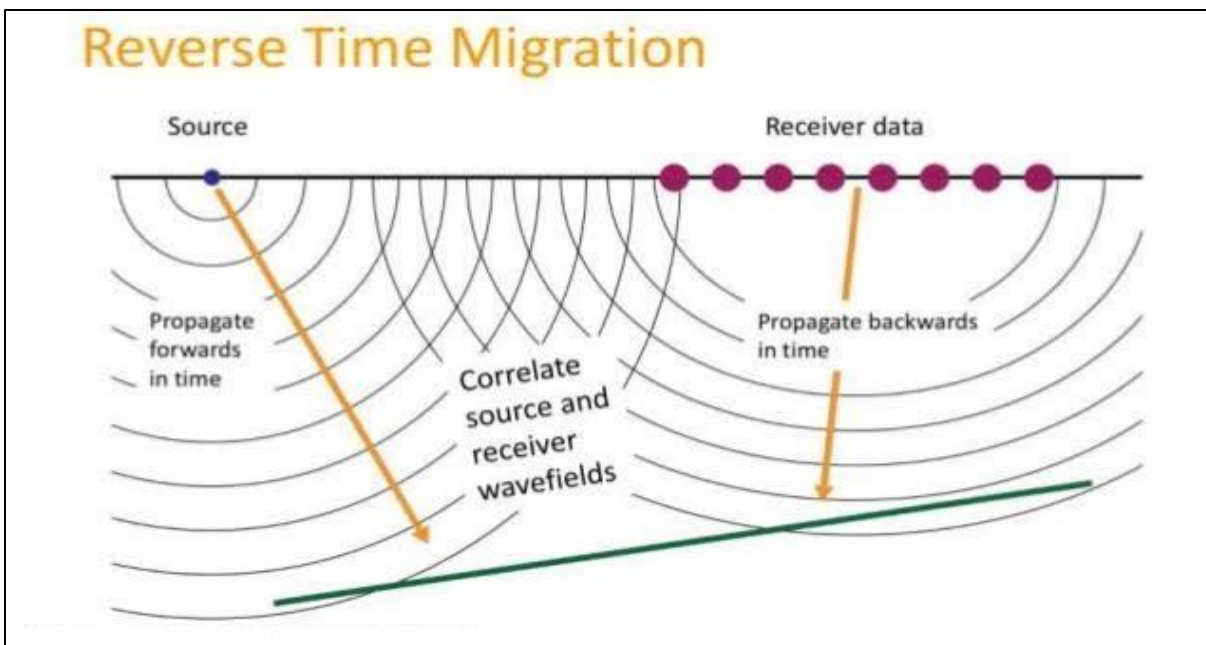


Figura 14: Desenho esquemático ilustrando a extrapolação da onda na direção reversa com relação à direção da propagação das ondas a partir da fonte, ambas em direção a um refletor em profundidade, e a correlação entre os dois campos de onda. Fonte: Lumb, 2015.

De modo geral, para cada grupo de tiro comum, a RTM consiste nas seguintes etapas:

1. Para cada grupo de tiro comum, calcula-se o campo de onda direto da fonte, usando uma *wavelet* de fonte estimada e o modelo de velocidade de referência: Marchando uma função de fonte (*wavelet*) para frente com base na equação de onda escalar bidirecional completa do local da fonte para todas as posições do espaço de imagem;

2. Retropropaga-se o campo de ondas para trás de todos os receptores do grupo de tiro usando dados invertidos no tempo e o modelo de velocidade de referência: Marchando o traço de dados invertidos no tempo de cada receptor do grupo de tiro com base na equação completa da onda escalar bidirecional em todas as posições do espaço da imagem e o campo de ondas para trás é formado pelo empilhamento dos campos de ondas extrapolados de todos os receptores;

3. Aplica-se a condição de imagem: o tempo correlacionando os campos de onda para frente e para trás em todas as posições do espaço da imagem, os valores de correlação com atraso zero constituem o quadro de imagem correlacionado de cada grupo de tiro comum e o empilhamento de cada quadro de imagem correlacionados de todos os campos de grupos de tiros comuns gera a imagem RTM bruta;

4. Imagem RTM de saída: a imagem RTM de saída é o resultado da aplicação de um filtro de reconstrução de imagem do Laplaciano à imagem RTM bruta.

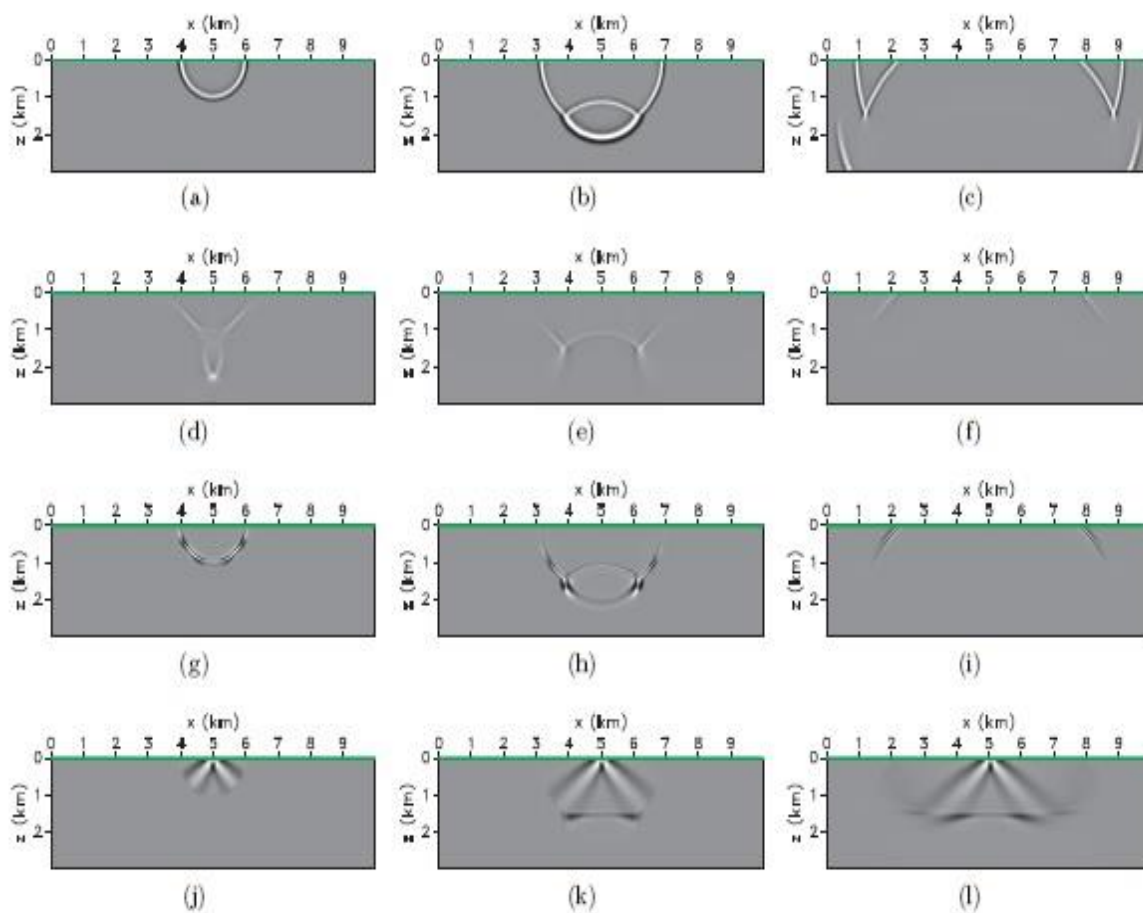


Figura 15: Explicação pictórica da imagem RTM: as colunas 1, 2 e 3 correspondem a três imagens instantâneas diferentes nos tempos $t_1 = 0: 150$ s, $t_2 = 0: 275$ s e $t_3 = 0: 500$ s. As linhas 1 a 4 correspondem, respectivamente, ao campo de onda da fonte, ao campo de onda do receptor, à multiplicação dos campos de onda da fonte e do receptor e à imagem acumulada ao longo do tempo. Na coluna 4 podemos observar a correlação dos componentes dispersos propagados e/ou retroespalhados dos campos de onda da fonte e do receptor. Fonte: Pantin, 2014.

3.3 Construção de modelos de velocidades (abordagem de cima para baixo)

A migração sísmica requer, além dos dados pré-processados, um modelo de velocidades preciso. O modelo de velocidades geralmente é construído em paralelo ao processamento dos traços da aquisição. Os traços sísmicos processados e pré condicionados por sua vez, são utilizados para auxiliar a atualização do modelo em construção através de recursivas migrações para validar e para realizar controles de qualidade do modelo.

A migração deve resultar, para cada grupo de traços ordenados por CDP e *Offset* (CIG, do inglês *Common Image Gather*), que qualquer evento refletor esteja plano, sem curvatura. Quando um evento não se encontra plano após a migração, ele possui curvatura conhecida como *Residual Moveout* (RMO) e indica que os valores de velocidades usados para a migração não estão precisos. Por exemplo, quando a curvatura do evento está para cima, indica que a velocidade para localização de tal evento está menor, quando está para baixo, indica que a velocidade está maior. Na construção de modelos de velocidades esse é o principal controle de qualidade para aprovação ou não das etapas de atualização. Para corrigir essas velocidades, técnicas de inversão como tomografia por tempo de trânsito e FWI são utilizadas para tornar esses eventos ordenados em CIG com RMO igual ou próximo a zero (planos).

Estimativas iniciais do modelo devem ser realizadas antes de iniciar inversões para correção dos eventos com RMO. Dentre os possíveis modelos iniciais, incluem-se uma análise de velocidade RMS em tempo e convertidas para intervalar e profundidade, informações de perfis sônicos de poços, gradientes de velocidades, ou modelos de processamentos antigos suavizados (para a inversão não cair em mínimos locais). A partir deste modelo inicial, migra-se (geralmente por Kirchhoff) e avalia-se o quanto os refletores ordenados em CIG estão horizontalizados.

A abordagem de cima para baixo (*Top-down approach*) é o método convencional de se atualizar modelos de velocidades. O modelo é atualizado por camadas da profundidade mais rasa (cronologicamente mais recente) à última camada de interesse (cronologicamente mais profunda e mais antiga), geralmente até o embasamento. Uma vez que a migração resulte em CIG com eventos horizontalizados, significa que a

velocidade acima está correta (Figura 16). Desta forma, fixa-se os valores das camadas de cima e passa-se a atualizar eventos abaixo. Esses eventos podem ser interpretados através da imagem empilhada (Marpeau 2019). A partir dos horizontes interpretados (ou combinação de pares de horizontes), pode-se preencher (inundar, ou em inglês *flood*) com valores aproximados esperados em tal camada, para servir de entrada para atualizações com técnicas de inversão. E assim sucessivamente, atualiza-se das camadas de cima para baixo. Através de técnicas de inversão, como tomografia por tempo de trânsito e inversão da forma da onda (do inglês, *Full Waveform Inversion - FWI*), busca-se se obter os refletores dos CIG planos. À medida em que se atinge boa estatística de eventos planos dos CIG em uma determinada camada, faz-se um empilhamento da migração utilizando este modelo aprovado e realiza-se interpretação do evento seguinte (um topo ou uma base de alguma camada).

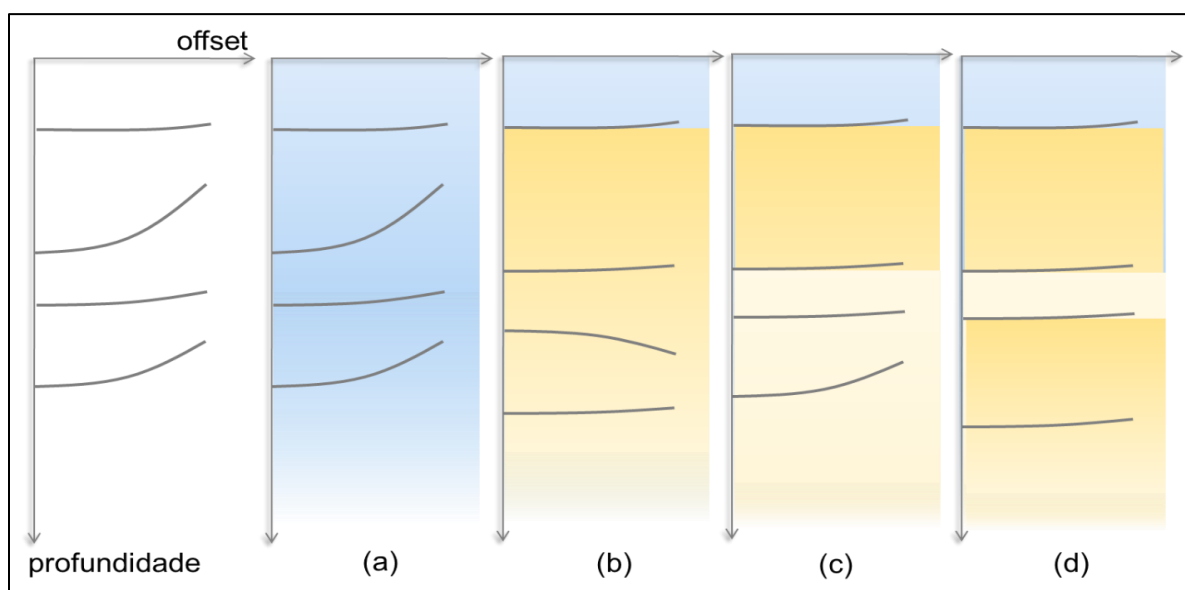


Figura 16: Desenho esquemático ilustrando a abordagem de remoção de camadas ou do topo para baixo. A esquerda vemos um desenho representativo de um conjunto de traços com quatro eventos agrupado em afastamento (*offset*) por profundidade. (a) Mesmo grupamento de traços “inundado” com a velocidade da água, onde o evento do fundo do mar é corrigido para a posição correta. (b) O modelo é “congelado” com a velocidade da água até o fundo do mar, e a partir dele “inundamos” o modelo com a nova velocidade que irá corrigir o segundo evento. (c) Mesmo procedimento para o terceiro evento. (D) Todos os eventos corrigidos de cima para baixo com o modelo de velocidade completo.

A atualização de modelos de velocidades típicos da Bacia de Santos, por exemplo, teria um fluxo da seguinte forma (Figura 17):

- 1) Cria-se modelo preenchido com velocidade da água. Testa-se alguns valores constantes aproximados de 1500 m/s, ou média de perfis de temperatura e salinidade registrados durante a aquisição, com escalar da velocidade estimada da correção da coluna da água;
- 2) Migra-se com algumas velocidades teste e verifica-se o evento do fundo do mar nos CIG. A velocidade que prover este evento mais horizontalizado nos CIG é a velocidade aprovada.
- 3) Migra-se com a velocidade aprovada e empilha-se para interpretar o horizonte do fundo do mar.
- 4) Fixa-se a velocidade acima do fundo do mar e preenche-se o modelo com velocidade de sedimentos abaixo do horizonte do fundo do mar. Esse preenchimento geralmente é feito com um gradiente de velocidades, modelo de velocidades antigos, ou por uma velocidade RMS convertida para intervalar e em profundidade.
- 5) Migra-se, verifica-se CIG.
- 6) Realiza-se uma tomografia. Para tal, utilizase os CIG's do item 5 com condicionamento e extrai-se informações dos RMO's. A entrada da tomografia requer o modelo de 5 e RMO's demigrados.
- 7) Realiza-se atualização com FWI entrando com o modelo resultante da tomografia.
- 8) Quando chega-se a uma boa estatística de RMO's corrigidos dos CIG's, migra-se com Kirchhoff, empilha-se e inicia-se a interpretação do topo do sal (TOS, do inglês *Top of Salt*).
- 9) Fixa-se a velocidade acima do TOS e preenche-se abaixo por velocidade constante do sal (~4500m/s da halita). Esta etapa é conhecida como *salt flood*.
- 10) Aqui, recomenda-se migrar com RTM empilhada, com frequência mais baixa, para salvar custo computacional. Desta forma a interpretação na base dos *overhangs* fica mais evidente, devido às limitações da Kirchhoff sob estruturas complexas.
- 11) Realiza-se tomografia para identificar sal estratificados. Dependendo do offset e se a aproximação do algoritmo permitir, FWI também deve ser aplicado.

- 12) A(s) base(s) do sal também devem ser interpretadas, geralmente utilizando RTM.
- 13) As etapas de 9 a 12 podem ser repetidas recursivas vezes para delinear com precisão a camada salina. Podendo haver um ou mais pares de topo e base do sal, caso existam sedimentos encapsulados.
- 14) Preenche-se com velocidades do pré-sal abaixo da camada salina e realiza-se tomografia até se obter CIG's estatisticamente satisfatórios em todo o volume do modelo.

Observa-se que as migrações intermediárias para verificar CIG's e extrair informações do RMO's não devem utilizar malha densa. Isso vai depender do tamanho do número de onda sendo atualizado.

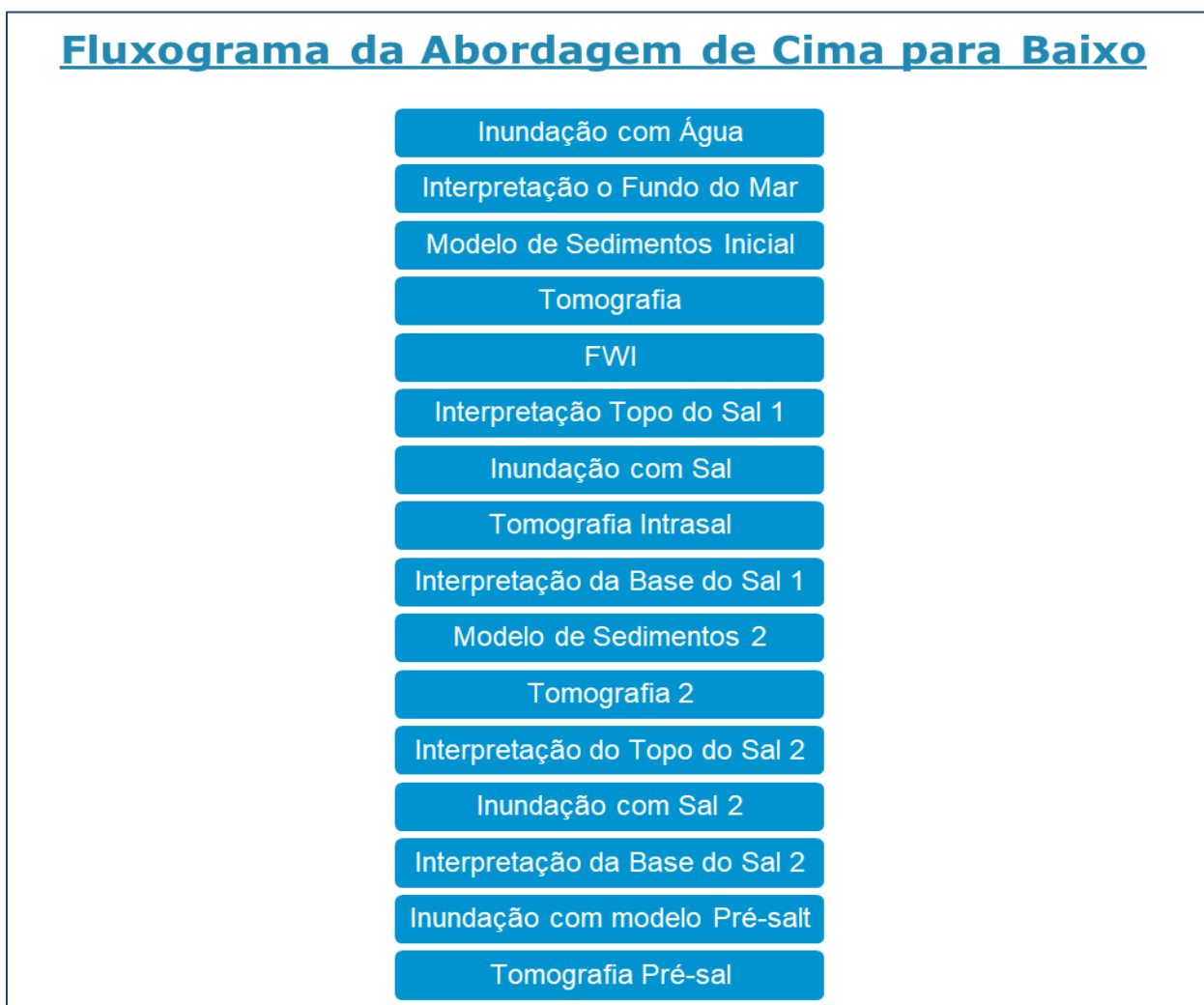


Figura 17: Fluxograma da Abordagem de Cima pra Baixo

3.4 Tomografia

A tomografia por tempo de trânsito, assim como a migração Kirchhoff, também utiliza aproximação de traçado de raios para determinar os vários caminhos possíveis. Para realizar a inversão por tomografia é necessária uma medida dos tempos de trânsito dos eventos com RMO, que são extraídos de *gathers* migrados (usualmente chamados por CIG, do inglês, *Common Image Gathers*) utilizando um modelo de velocidades, que será entrada para a tomografia. A inversão pode ser resolvida iterativamente pelo método de mínimos quadrados.

A tomografia busca traçar o raio de volta e redistribuir o erro de medição de maneira equitativa ao longo do volume, de modo a atualizar valores de velocidades onde houver refletor com curvatura se tornar horizontalizado. A Figura 18 ilustra oito resultados de interação para um CIG. É possível verificar que na primeira iteração há mais eventos com RMO, enquanto na iteração 8 os eventos estão planos.

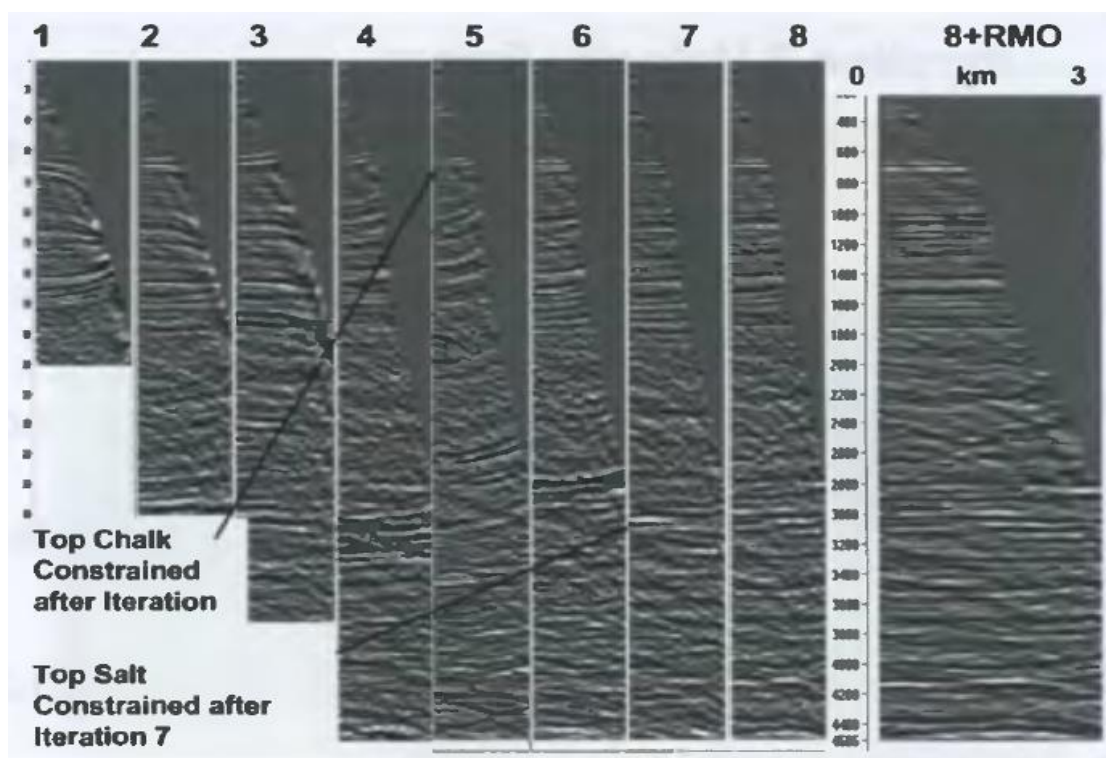


Figura 18: Um mesmo grupamento migrado após oito iterações da tomografia convergindo para uma representação suave do dado. Fonte: Jones, 2010.

3.5 FWI

Em contrapartida ao método tomográfico, queremos deixar de lidar apenas com os tempos de chegada dos raios e lidar com a amplitude, a fase e os tempos de chegada dos eventos refletidos e refratados presentes nos dados sísmicos medidos. E é isso que a inversão completa da forma de onda se propõe a fazer. No entanto, para realizar a inversão com base em todos os atributos da forma de onda completa, é preciso iterar diversas vezes, dentro da inversão, usando um procedimento de modelagem caro, cuja cada iteração tem um custo semelhante ao RTM (Jones, 2010).

A inversão de forma de onda completa é uma técnica de imagem sísmica de alta resolução baseada na minimização de uma função de custo que mede a diferença entre os dados calculados e adquiridos também usualmente chamados de dados modelados e observados, respectivamente). Para minimizar a função de custo, diversas modelagens por propagação da onda e depropagações do resíduo são necessárias para atualizar gradualmente o campo de velocidade (Figura 19). Para isso, utiliza-se a equação completa da onda como na modelagem e na RTM (VIGH *et al*, 2009).

No fluxo FWI, as entradas para a iteração são o modelo de velocidade inicial e os dados registrados. Inicialmente os dados sintéticos modelados são criados a partir do modelo de velocidade inicial com os mesmos locais de fonte e receptor que os dados gravados. Posteriormente, é calculada a diferença entre os dados gravados e os dados sintéticos, a qual é inserida na migração reversa como um cálculo do “gradiente. O escalar de comprimento do passo μ determinado que escala o gradiente em uma perturbação da velocidade. Finalmente a perturbação da velocidade é adicionada ao modelo inicial para formar o modelo de velocidade atualizado que é inserido na próxima iteração.

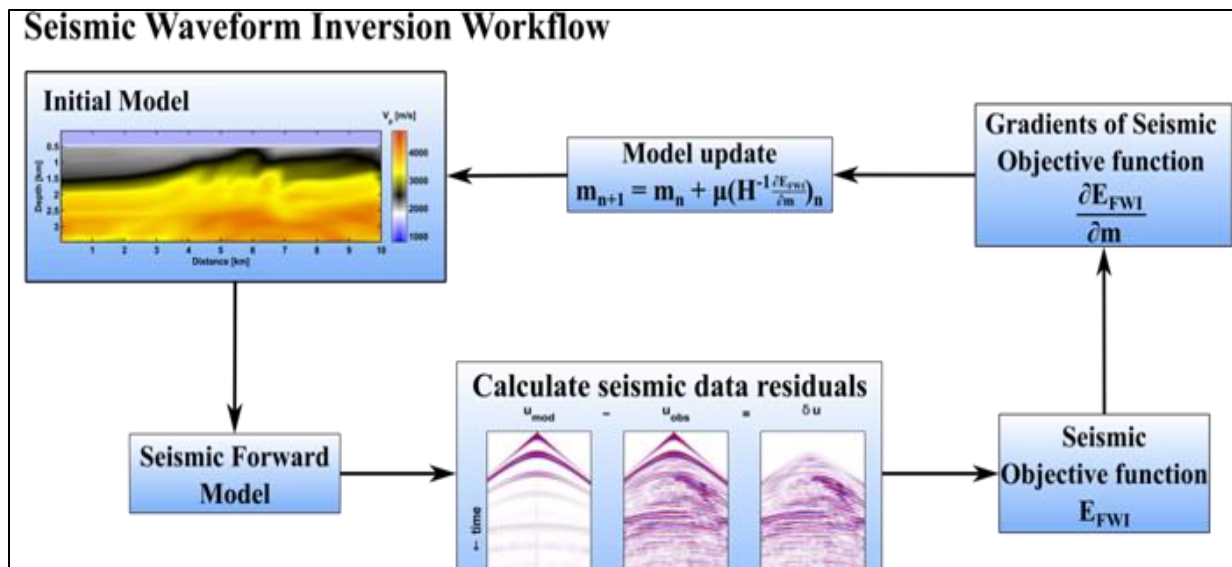


Figura 19: O fluxo FWI. Fonte: Wehner, 2015.

3.6 Desafios no imageamento de corpos de sal

Como já comentado anteriormente, a imagem sísmica está entre os meios mais eficazes para mapear as estruturas e propriedades da subsuperfície, usando dados sísmicos. No entanto, a formação de imagens sísmicas de corpos evaporíticos pode ser difícil devido às formas complexas de flancos salinos acentuados, camadas de sobrecarga adjacentes e os contrastes de impedância acústica e velocidade normalmente fortes na interface sedimento-evaporito.

Nos últimos anos, novas explorações exibiram estruturas salinas cada vez mais complexas nas bacias brasileiras. Assim sendo, devemos considerar a geologia dos corpos salinos e os problemas e armadilhas associados à sua geração de imagens, como:

- 1) Nossa capacidade de descrever adequadamente a realidade geológica das complexas bacias brasileiras; formas complexas de *overhangs* e flancos íngremes, e pacotes de sedimentos encapsulados dentro do sal. A Figura 20 apresenta seções transversais mostrando a complexidade da geometria do sal

- na bacia profunda de Santos; a) grande saliência localizada na área de compressão; o sal sub saliente exibe vários pacotes de sedimentos separados por soldas de compressão; a imagem adequada do sub-sal é difícil, mas essencial para a imagem correta do pré-sal; b) sal estratificado em uma sequência evaporítica contínua, coberta com uma camada de carbonato albio de alta velocidade, a qual faz com que a posição do evento exato do topo do sal seja ambígua. Exemplos de testes de cenário: c) no lado esquerdo, o modelo de sal completo leva a uma queda da base de sal e destruição parcial dos carbonatos do pré-sal; d) no lado direito, o modelo de sedimento encapsulado corrige esse erro (Alterado de Marpeau e Belz, 2019);
- 2) Problemas de imagiologia de propagação unidirecional versus bidirecional e limitações de aquisição que resultam em pouca iluminação e pouca amostragem (Jones, 2014). A Figura 21 ilustra um exemplo de modelagem de traços de raios para um modelo de sal mostrando o típico caminho adotado pelos raios que iluminam a zona-alvo;
 - 3) Percursos complexos associados a chegadas sísmicas relacionadas com o sal. A Figura 22 ilustra duas iluminações diferentes do flanco do sal por uma única fonte e raios associados a (a) reflexões primárias que produzem a imagem do flanco do sal em (b), e (c) reflexões que ressaltam um limite da camada mais profunda que produz a imagem do flanco do sal. em (d). Fonte: Yilmaz, 1987;
 - 4) A formação de rochas capeadoras de forte contraste de impedância e velocidade acústicas em corpos salinos, frequentemente simplificadas na construção do modelo. A Figura 23 mostra um diapiro de sal com uma rocha capeadora de anidrita bem desenvolvida com velocidade sísmica de 6500 m/s (Burliga *et al.*, 2005, *apud* Jones, 2014);

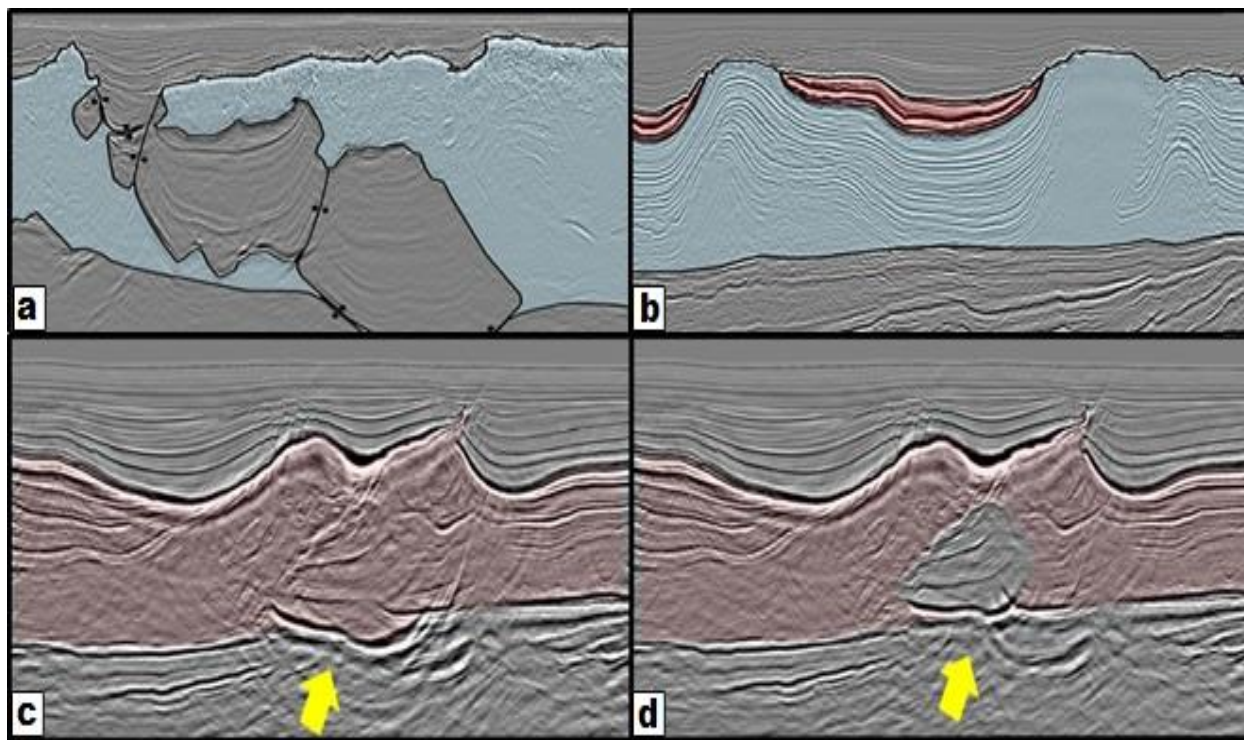


Figura 20: Seções transversais mostrando a complexidade da geometria do sal na bacia profunda de Santos; a) grande saliência localizada na área de compressão; b) sal estratificado em uma sequência evaporítica contínua, coberta com uma camada de carbonato albiiano de alta velocidade. Exemplos de testes de cenário: c) no lado esquerdo, o modelo de sal completo leva a uma queda da base de sal e destruição parcial dos carbonatos do pré-sal; d) no lado direito, o modelo de sedimento encapsulado corrige esse erro. Fonte: Alterado de Marpeau e Belz, 2019.

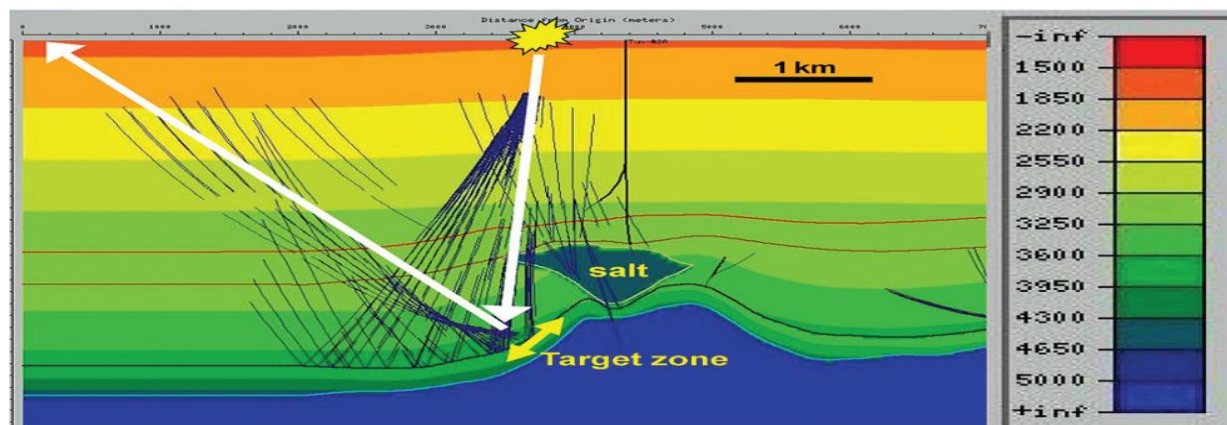


Figura 21: Exemplo de modelagem de traços de raios para um modelo de sal mostrando o típico caminho adotado pelos raios que iluminam a zona-alvo. A geometria do sal gera pouca iluminação no nível do alvo. Fonte: Jones, 2014.

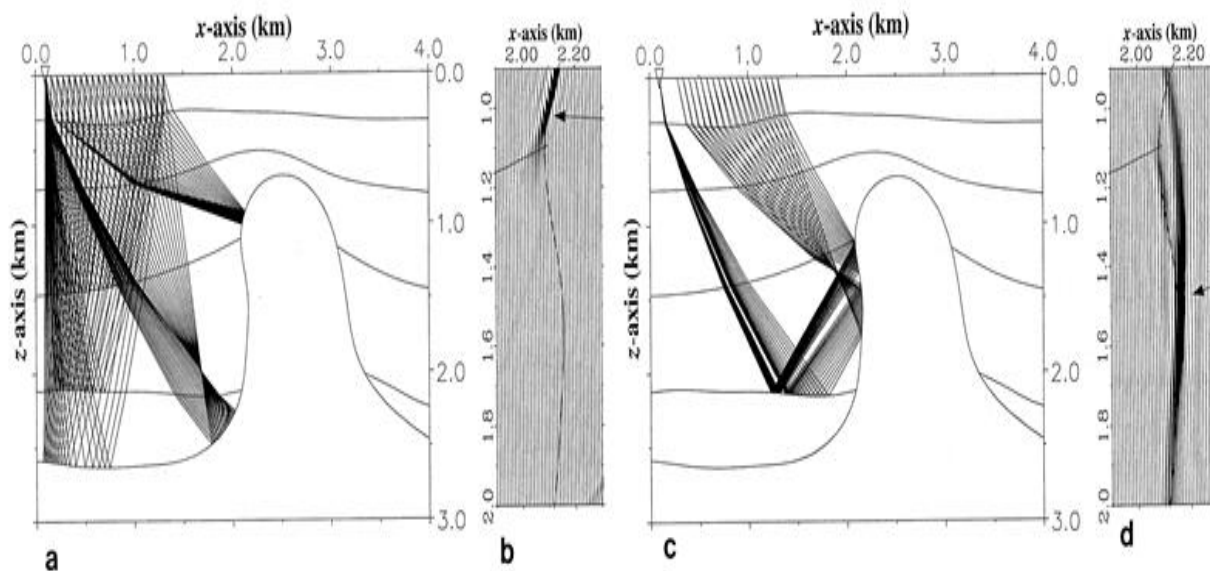


Figura 22: Duas iluminações diferentes do flanco do sal por uma única fonte e raios associados a (a) reflexões primárias que produzem a imagem do flanco do sal em (b), e (c) reflexões que ressaltam um limite da camada mais profunda que produz a imagem do flanco do sal. em (d). Fonte: Yilmaz, 1987.

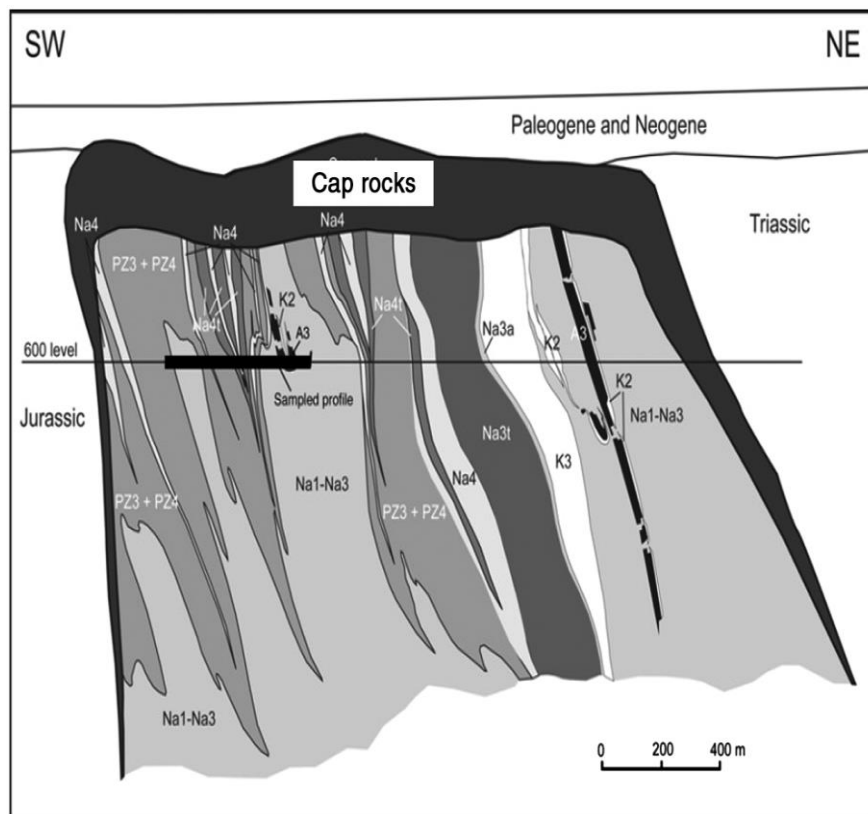


Figura 23: Diapiro de sal Klødwa na Polônia mostrando uma rocha capeadora de anidrita bem desenvolvida (velocidade sísmica de 6500 m/s). Fonte: Burliga *et al.*, 2005, *apud* Jones, 2014.

4 METODOLOGIA

A abordagem deste trabalho é, além de demonstrar a atualização das camadas rasas para as mais profundas, a integração da interpretação de estruturas através de combinações de horizontes realizada por especialistas (geólogos e geofísicos intérpretes). Isso é realizado, pois as técnicas usuais não resolvem de forma satisfatória eventos de subsuperfície estruturalmente complexos com alto contraste de velocidades.

O experimento consiste em, primeiramente, ilustrar sinteticamente a atualização de modelos de velocidades utilizando a aproximação de cima para baixo com integração de interpretação dos horizontes, conforme descrito na seção VMB do 3.3. O segundo experimento consiste em demonstrar o impacto na imagem quando se utiliza velocidades erradas no modelo e quando se interpreta horizontes em profundidade errada. O terceiro experimento ilustra uma das clássicas incertezas da interpretação quando existe rocha capeadora de anidrita sobre o topo do sal.

Neste trabalho, utilizou-se do pacote de código aberto de *softwares* geofísicos, *Seismic Unix* (SU) – mantido pelo *Center for Wave Phenomena* (CWP) na *Colorado School of Mines* (CSM) – para realizar as migrações Kirchhoff epilhadas. E, para a modelagem sísmica e migração RTM, fora utilizado o código concedido pelo Grupo de Imageamento Sísmico e Inversão Sísmica (GISIS) e desenvolvido por Karsou (2020).

Para a realização dos experimentos foram criados modelos geológicos 2D representativos de estruturas complexas típicas da Bacia de Santos, sendo um com *overhang* e outro com sedimento encapsulado no sal. A fim de se validar cada etapa e para realização de interpretação de horizontes, é necessário realizar migrações em fluxos de atualização de modelos de velocidades. Portanto, para este trabalho, foram

gerados dados sintéticos, através do método de diferenças finitas e utilizando modelos de referências para cada caso descritos na última seção desse capítulo.

A construção dos modelos geológicos está demonstrada no Apêndice A.

4.1. Cenários geológicos

A Figura 24 mostra uma visão tridimensional de diferentes ângulos de observação das linhas ortogonais para elucidar melhor a geometria do corpo de sal. A geometria do sal aqui apresentada caracteriza um caso particular de uma estrutura de calha (*Overhang*), que representa um desafio comumente observado nessas bacias. A Figura 25a ilustra uma seção 2D com estrutura de *overhang*. Sua forma é caracterizada por uma crista, cobertura ou ressalto angular do topo do sal sobre o sedimento circundantes. A Figura 25b ilustra uma seção transecta em que se observa sedimentos encapsulados dentro da estrutura de sal. Estes dois cenários particularizam um desafio atual para a indústria da área petrolífera nas bacias de sal brasileiras para o imageamento sub-sal.

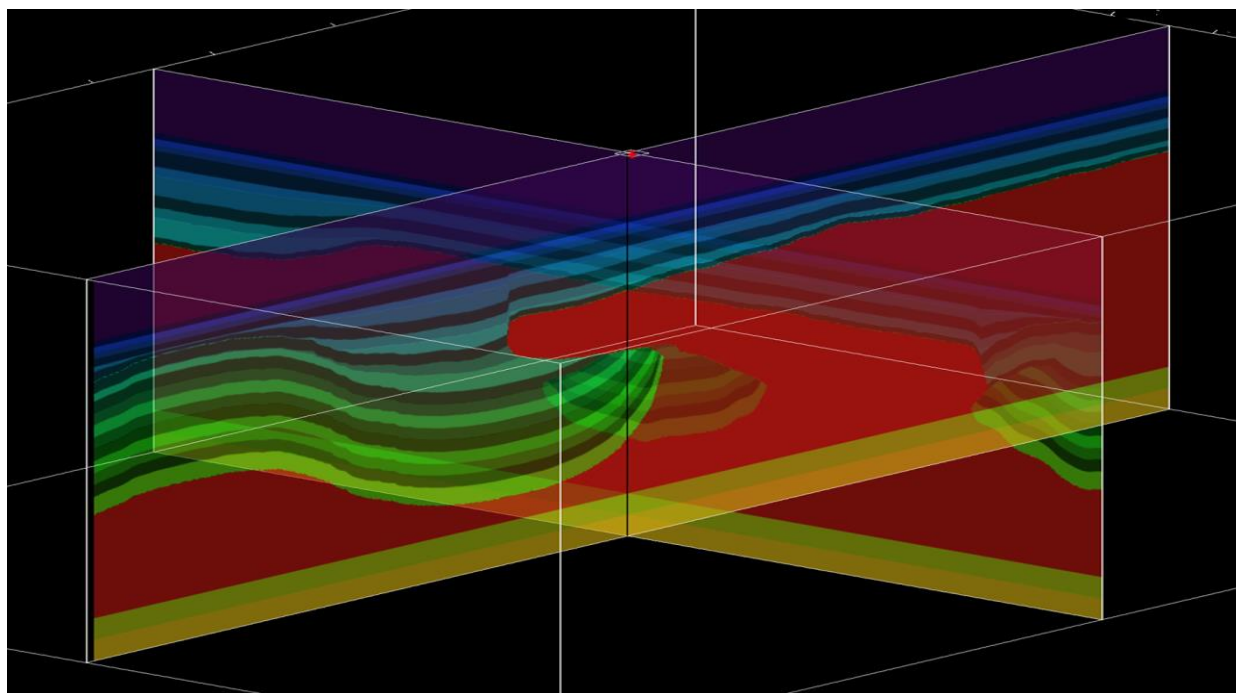


Figura 24: Visão tridimensional das linhas ortogonais

4.1.1 Modelo Estratificado

O modelo estratificado possui camada d'água constante de 1.500 m/s, sedimentos que variam de 2.000 m/s à 3550 m/s distribuídos dentre 21 camadas sedimentares utilizando um gradiente de 75 m/s e um pré-sal com uma camada de 4.000 m/s e uma inversão de velocidade de 3.800 m/s. O propósito do uso deste modelo é ilustrar o fluxo padrão de atualização de modelos de velocidades. Os dados sintéticos utilizados nas migrações para o experimento de atualização de cima para baixo são gerados com os modelos da Figura 25, a fim de representar o dado verdadeiro de uma aquisição.

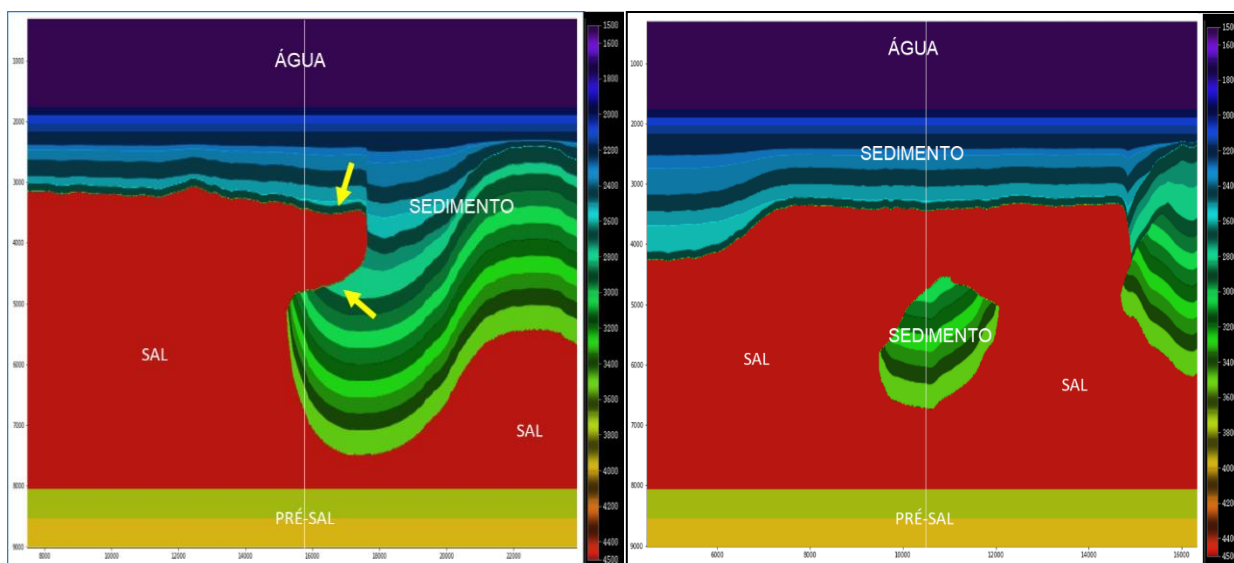


Figura 25: Vista do modelo de velocidade estratificado mostrando (a) uma estrutura de *overhang* com uma cobertura angular (apontadas pelas setas amarelas) do topo do sal sobre o sedimento circundantes. A linha branca que corta a estrutura indica a posição da secção transecta (b) mostrando os sedimentos encapsulados na parede de sal; e a linha branca que corta esta indica a posição da secção transecta 'a'.

4.1.2 Modelo sedimento constante

Neste cenário, a camada de sedimento possui valor constante. Os modelos da Figura 26 representam o modelo verdadeiro (de referência) e os das Figura 27-29 representam modelos com valores errados. Uma vez que o dado é gerado com o modelo de referência, este experimento visa ilustrar as consequências de tais erros na imagem

migrada quando se insere valores de velocidade errados, induzindo a interpretação errada dos horizontes.

O primeiro teste, caso da Figura 27, considera uma atualização velocidade do sedimento menor que o de referência, de 2200 m/s. Com isso, espera-se um erro significativo na formação do corpo de sal, principalmente o seu topo, assim como todas as demais superfícies subjacentes ao mesmo, pois, como visto nas seções sobre a construção do modelo pela abordagem de cima pra baixo (*Top-Down Approach*), presume-se que os eventos mais profundos serão influenciados pela correção das velocidades das camadas superiores.

No segundo teste, ilustra-se quando se considera velocidade do sal mais rápida (Figura 28), em que os eventos que ficam abaixo do sal são erroneamente deslocados para baixo.

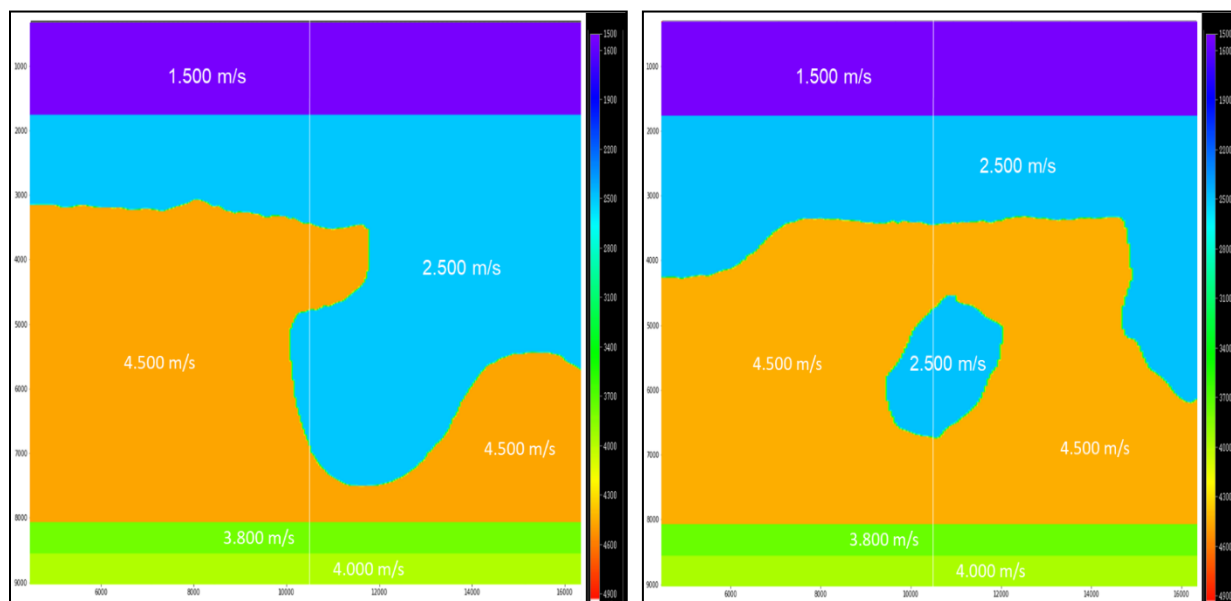


Figura 26: a) Vista do modelo de velocidade simples mostrando a mesma estrutura de *Overhang* com uma cobertura angular do topo do sal sobre o sedimento circundantes. A linha branca que corta a estrutura indica a posição da secção transecta (b) mostrando os sedimentos encapsulados na parede de sal; e a linha branca que corta esta indica a posição da secção transecta 'a'.

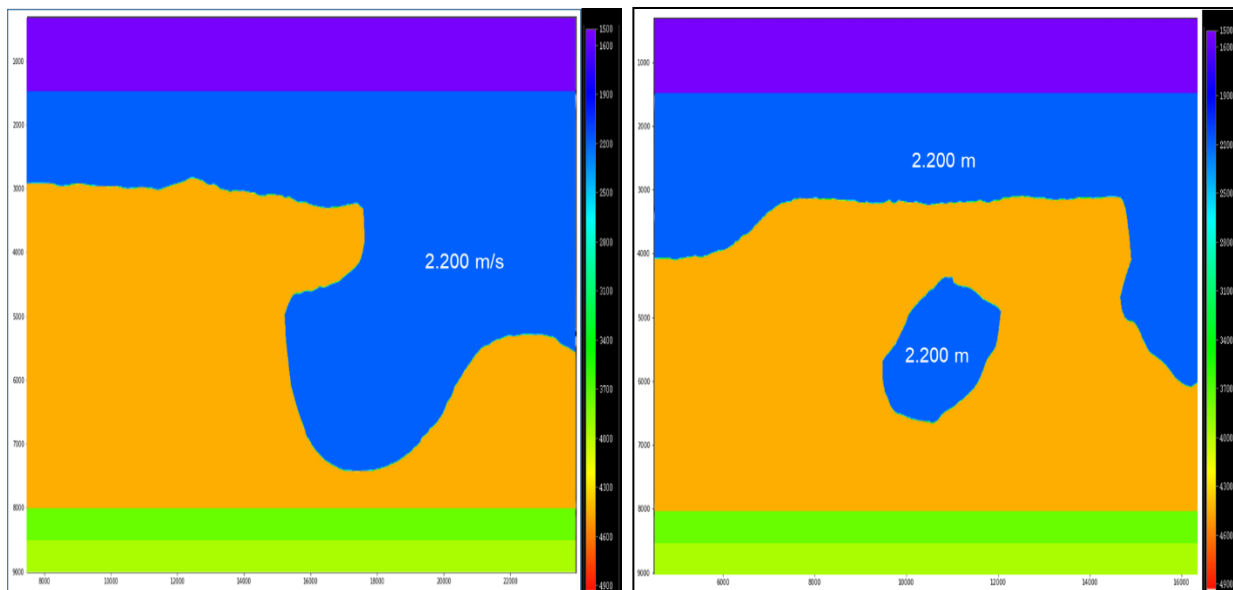


Figura 27: Modelo simples com velocidade dos sedimentos errada. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

O terceiro teste ilustra o caso quando se interpreta o topo do sal 200 metros abaixo do evento correto (Figura 29). Este caso pode ocorrer quando se suspeita de presença de carbonatos ou anidrita acima do topo do sal, em que o evento migrado possui profundidade que coincide com o comprimento de onda do topo do sal, tornando a interpretação ambígua. Este erro poderia ser justificado baseado em estudos geológicos prévios da região, quando suspeita-se da presença de carbonatos ou anidrita junto ao topo do sal e resolve-se interpretar o mesmo como o pico logo abaixo da forte reflexão relativa aquela. No entanto, a diminuição da energia do topo do sal e um puxão para cima da base e dos eventos subjacentes na imagem gerada por este modelo podem representar indícios de erros de interpretação na construção da velocidade.

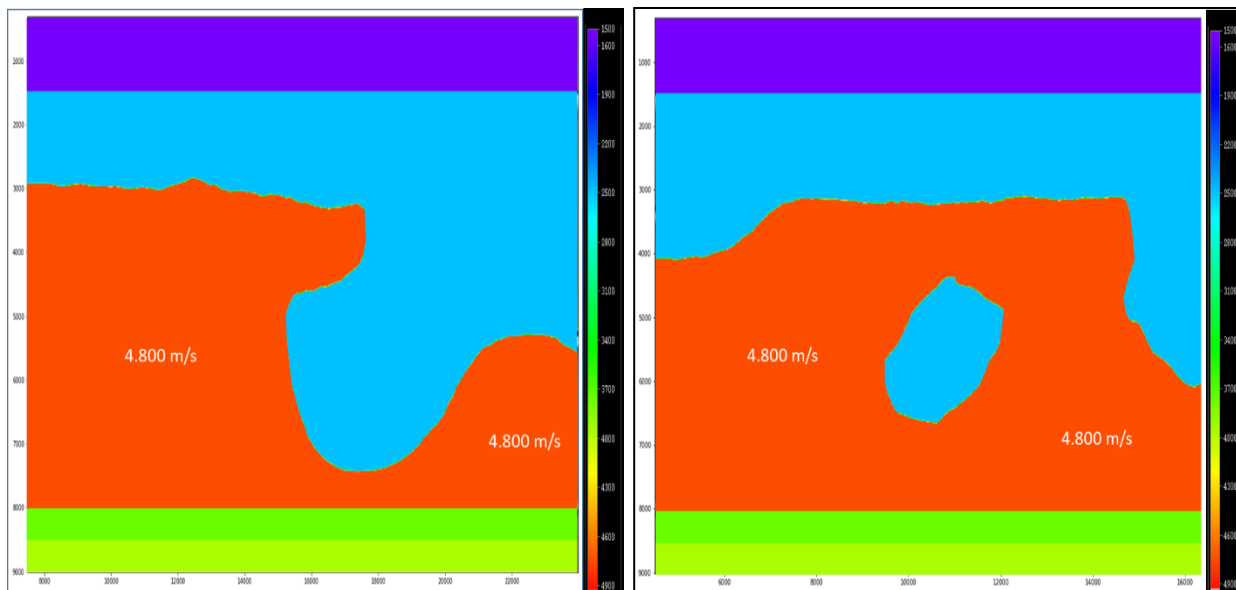


Figura 28: Modelo simples com velocidade do sal errada. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

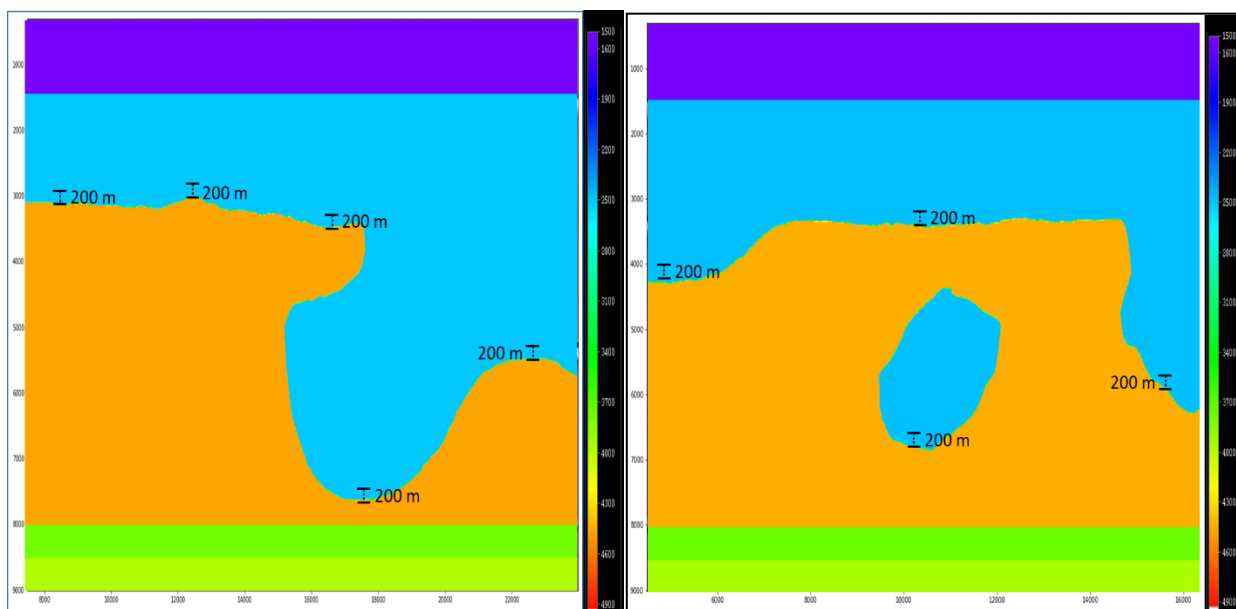


Figura 29: Modelo simples com interpretação do topo do sal errada. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

4.1.3 Modelo de rocha capeadora

Tendo em vista que as rochas capeadoras podem se caracterizar como uma armadilha para a interpretação foi inserida uma rocha capeadora de anidrita de alta velocidade, com espessura de 200 m, logo acima do todo do sal. A espessura da anidrita coincide com o comprimento da onda dentro dessa resolução sísmica, onde se espera que a imagem migrada com o modelo de anidrita se assemelhe ao dado de referência com sua ausência. A Figura 30 ilustra o caso com uma rocha capeadora de anidrita logo acima do sal. O dado de entrada para migração é gerado por este modelo.

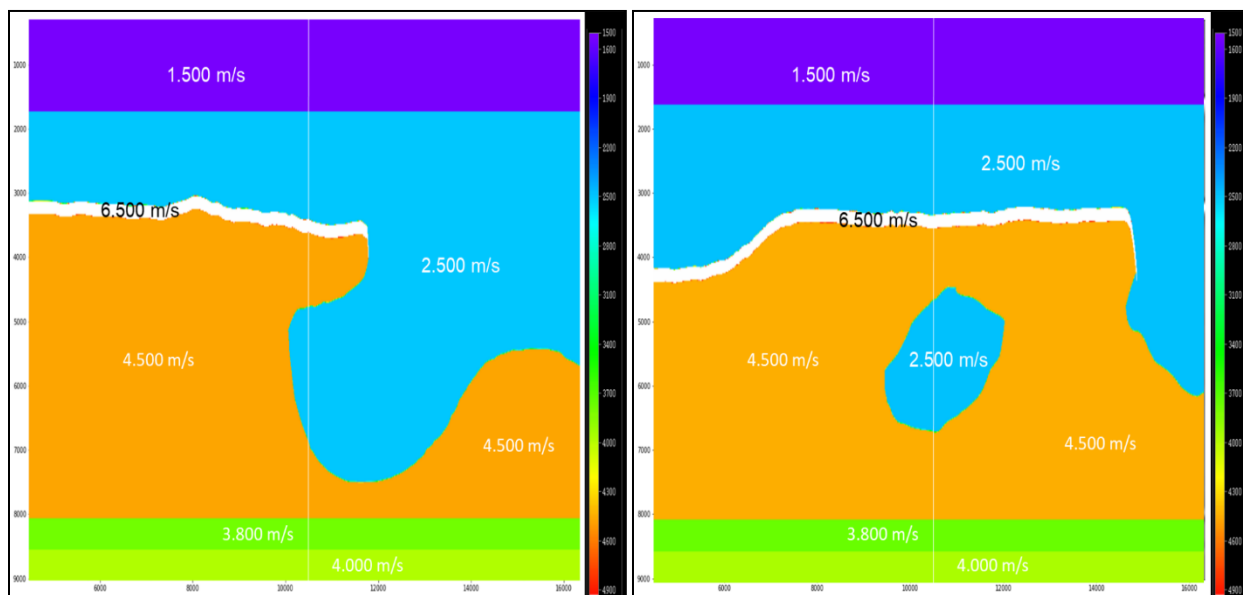


Figura 30: Modelos de sedimento constante e com capa de anidrita. Em a) modelo de velocidade com overhang e em b) modelo com sedimento encapsulado. A linha branca nos indica seção transecta.

Neste cenário, os testes realizados são: anidrita englobada dentro do corpo de sal (Figura 31) e interpretação do topo do sal logo abaixo da reflexão da anidrita (Figura 32).

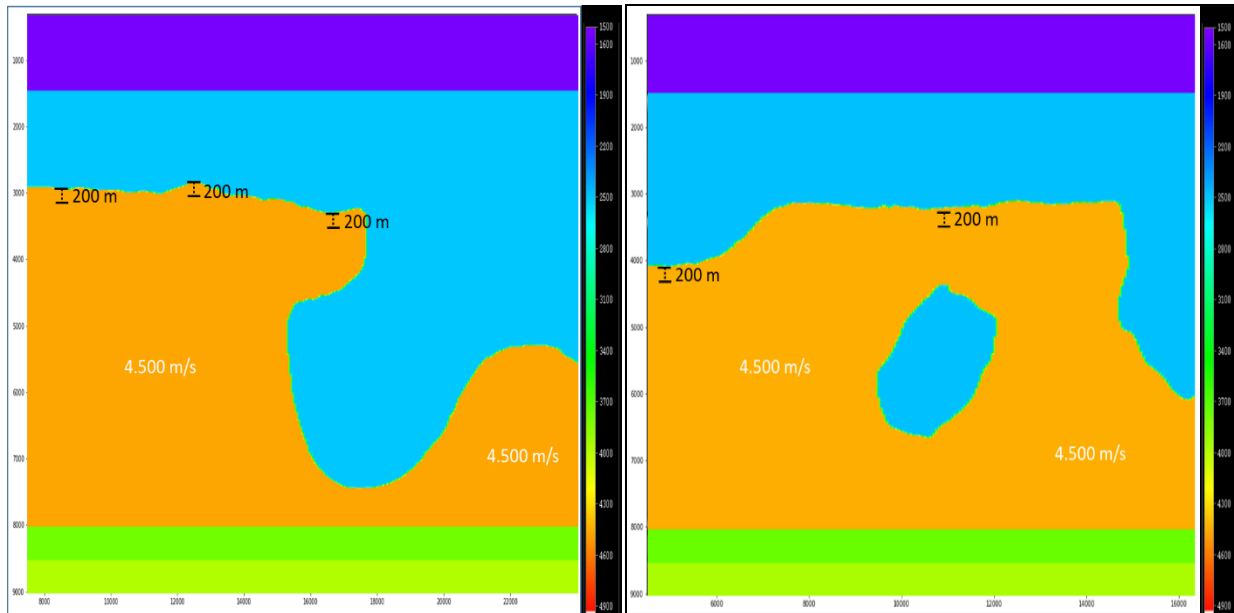


Figura 31: Modelo simples com interpretação do topo do sal englobando a anidrita. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

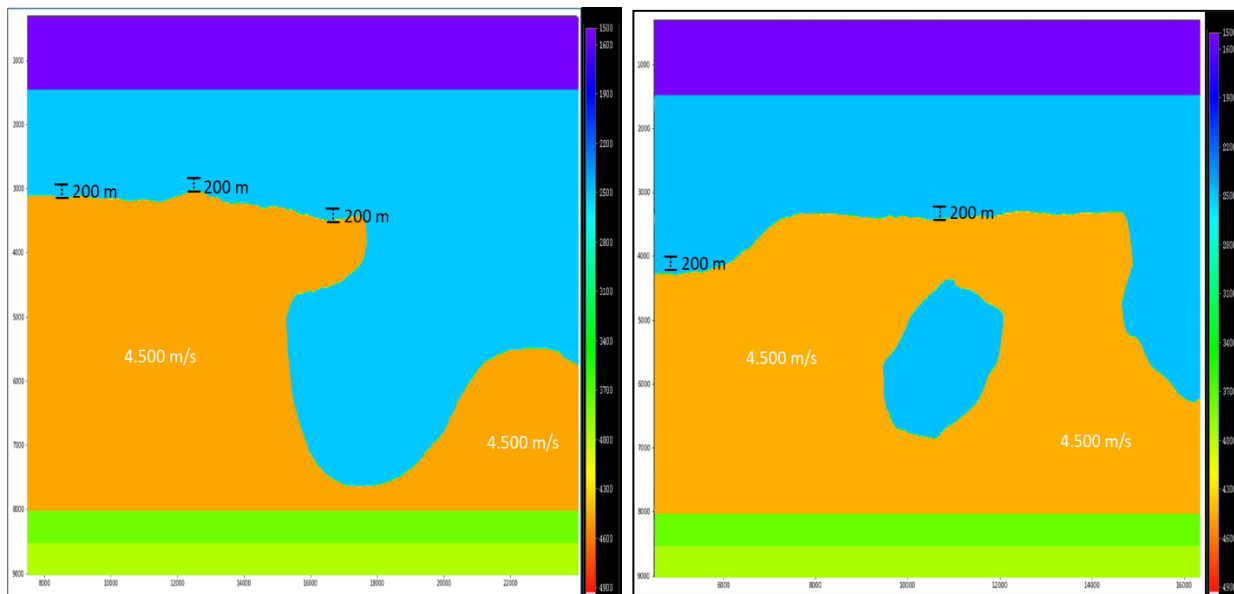


Figura 32: Modelo simples com interpretação do topo do sal abaixo da anidrita. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

4.2 Geração dos dados sintéticos

Os dados utilizados nas migrações do fluxo de construção de modelos de velocidades deste trabalho foram gerados de forma sintética. Para tal, três modelagens utilizando método de diferenças finitas foram geradas para os cenários de modelo estratificado, sedimento constante e com rocha capeadora. A modelagem simula tiros convencionais de *streamers* em que se registra propagação das ondas em cabos levados por navios (*end-on*), com espaçamento (*offset*) aumentando da esquerda para a direita. As fontes sísmicas estão atiradas a cada 100 metros e receptores com espaçamento de 10 metros, num cabo de 3 km. A geometria da aquisição está ilustrada na Figura 33.

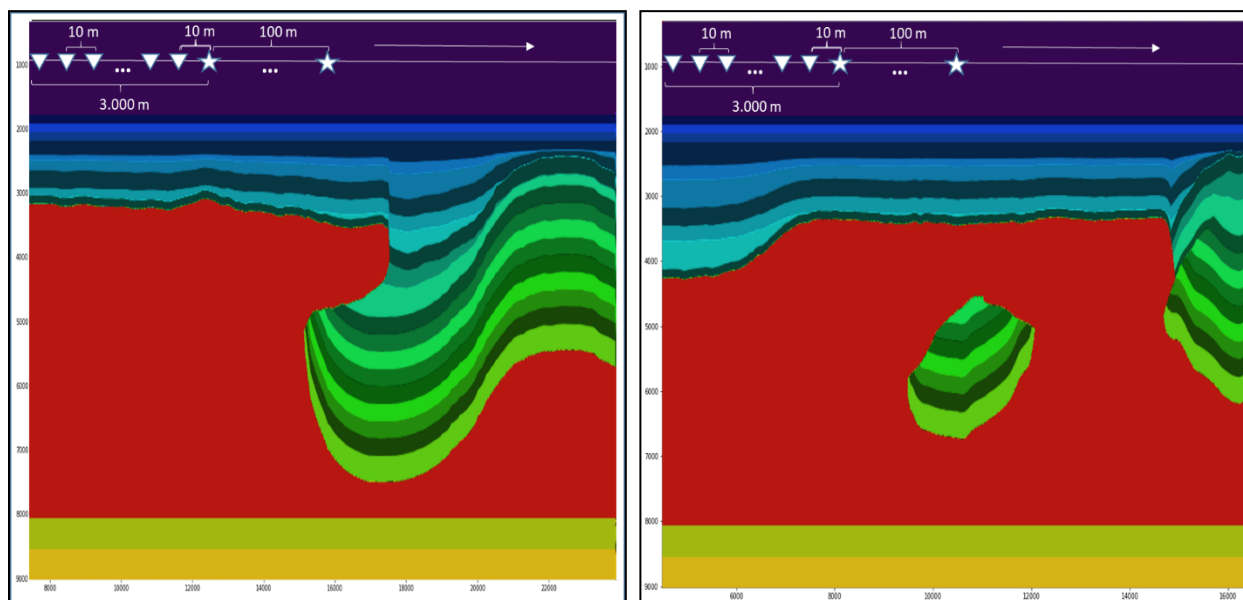


Figura 33: Geometria de aquisição planejada para todos os modelos sintéticos utilizados. a) Vista do *Overhang*; b) Vista dos sedimentos encapsulados.

Nas Figura 34-41 estão ilustradas as migrações Kirchhoff e RTM para cada um dos três cenários de modelos geológicos verdadeiros com e sem sobreposição das respectivas velocidades sobre a imagem migrada.

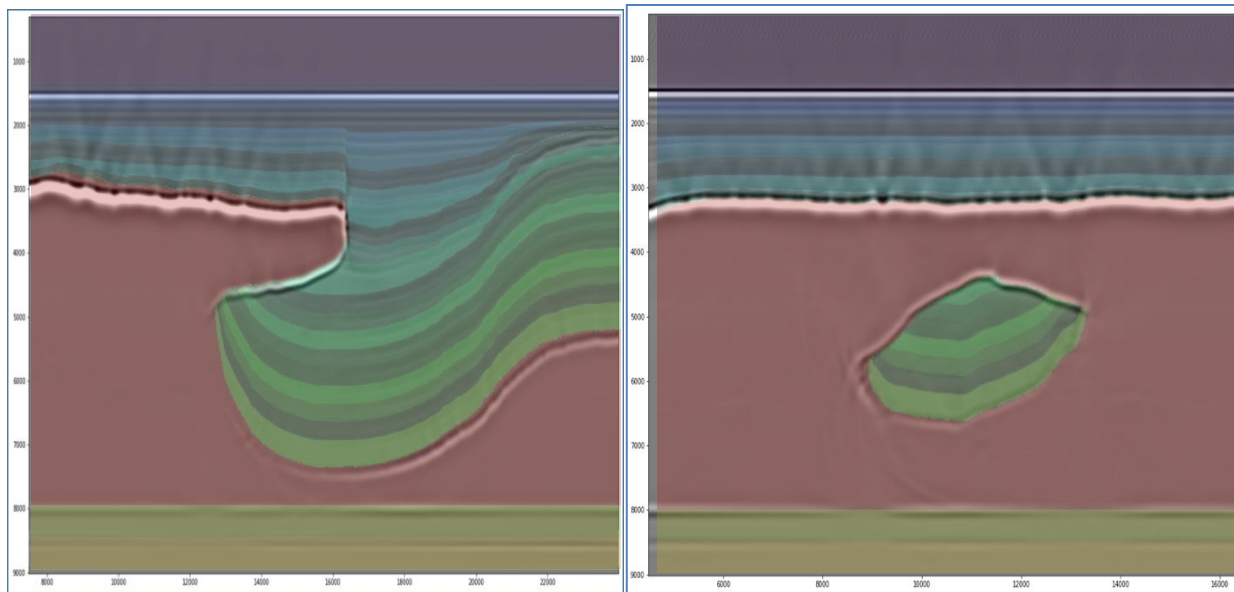


Figura 34: Migração sintética RTM com sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

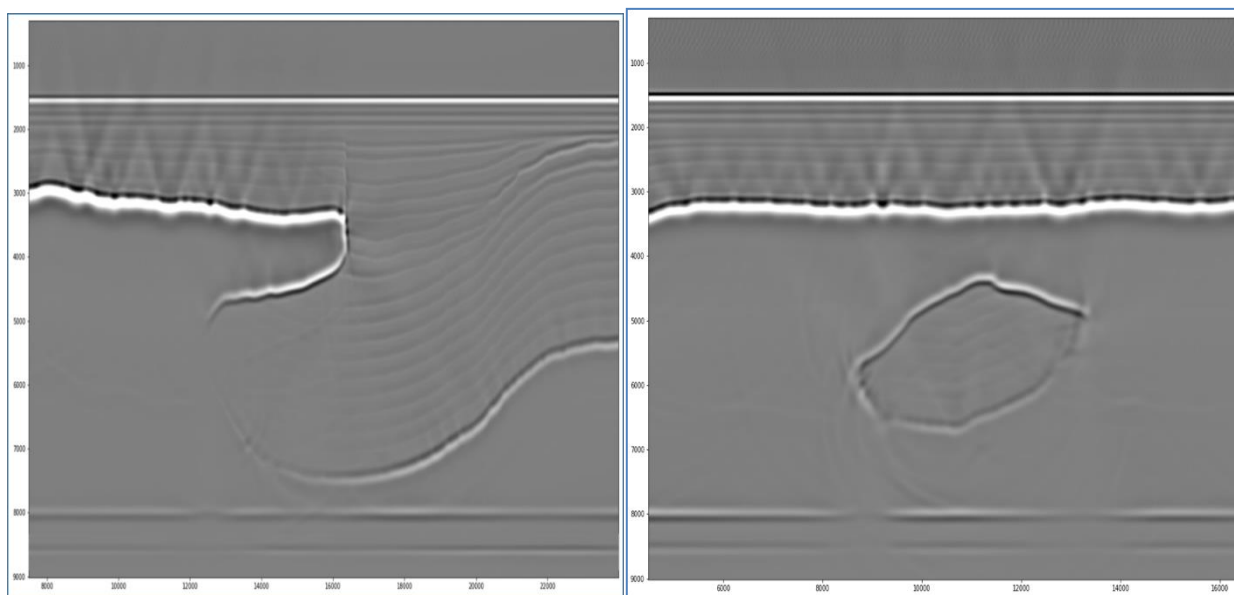


Figura 35: Migração sintética RTM sem sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

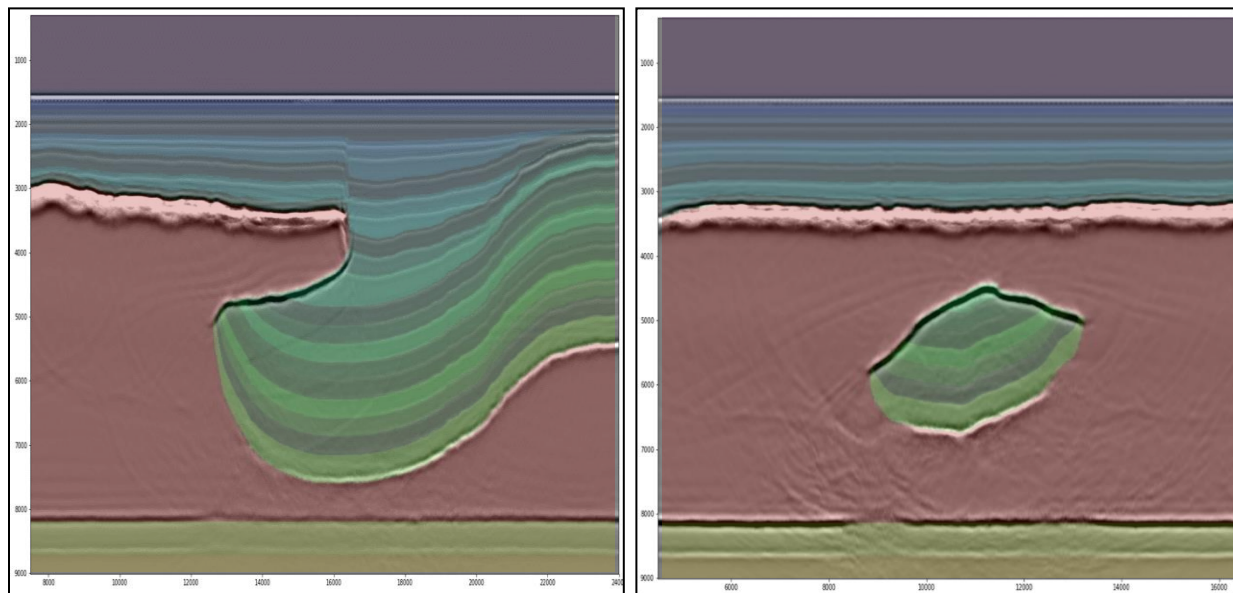


Figura 36: Migração sintética Kirchhoff com sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

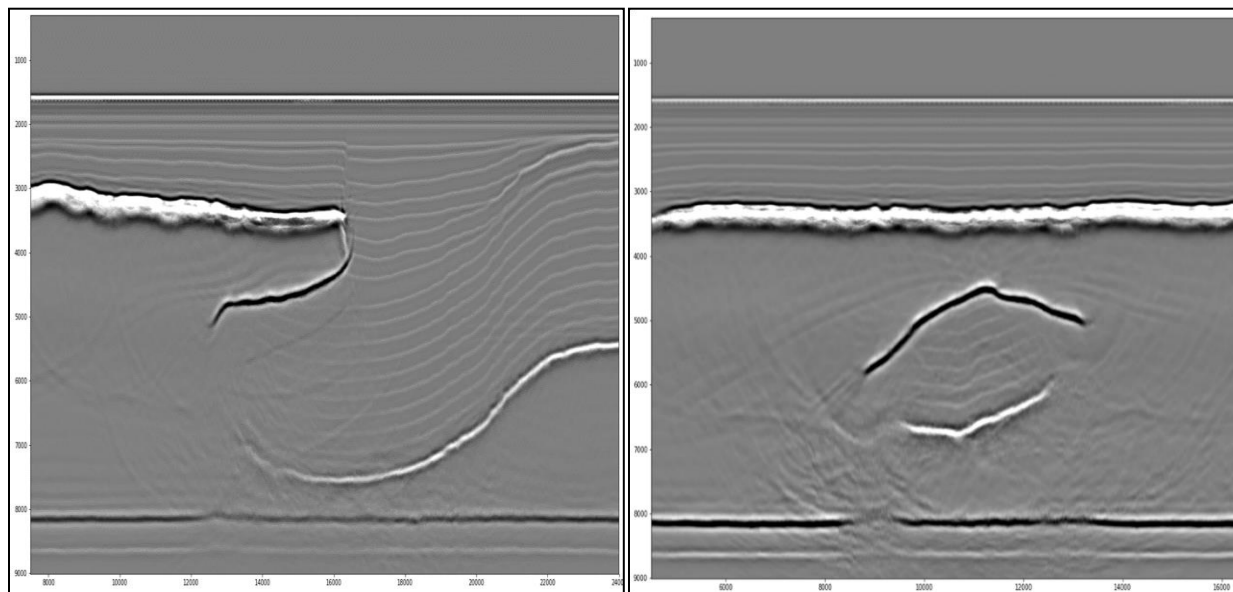


Figura 37: Migração sintética Kirchhoff sem sobreposição do modelo de referência estratificado. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

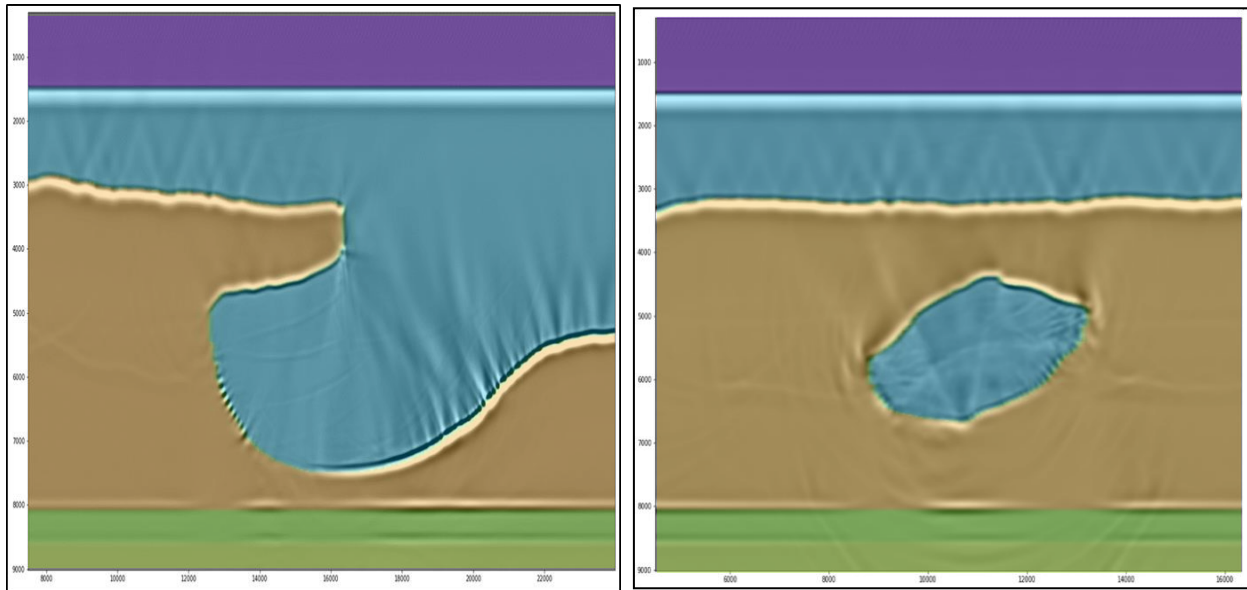


Figura 38: Migração sintética RTM com sobreposição do modelo de referência simples. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

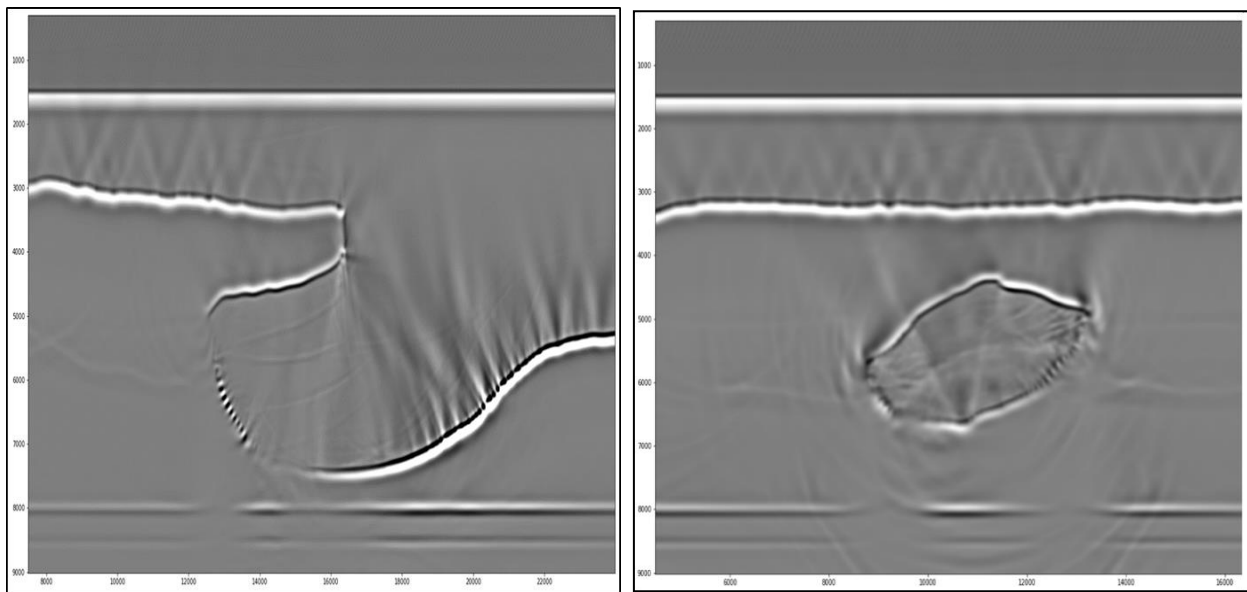


Figura 39: Migração sintética RTM sem sobreposição do modelo de referência simples. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

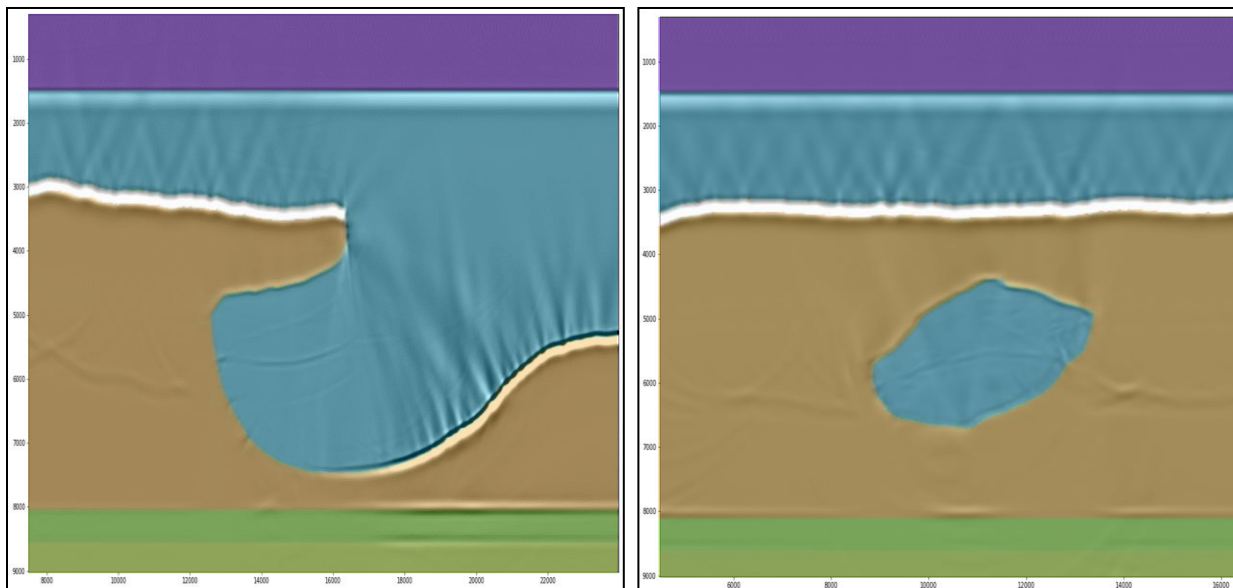


Figura 40: Migração sintética RTM com sobreposição do modelo de referência simples com capa de anidrita. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

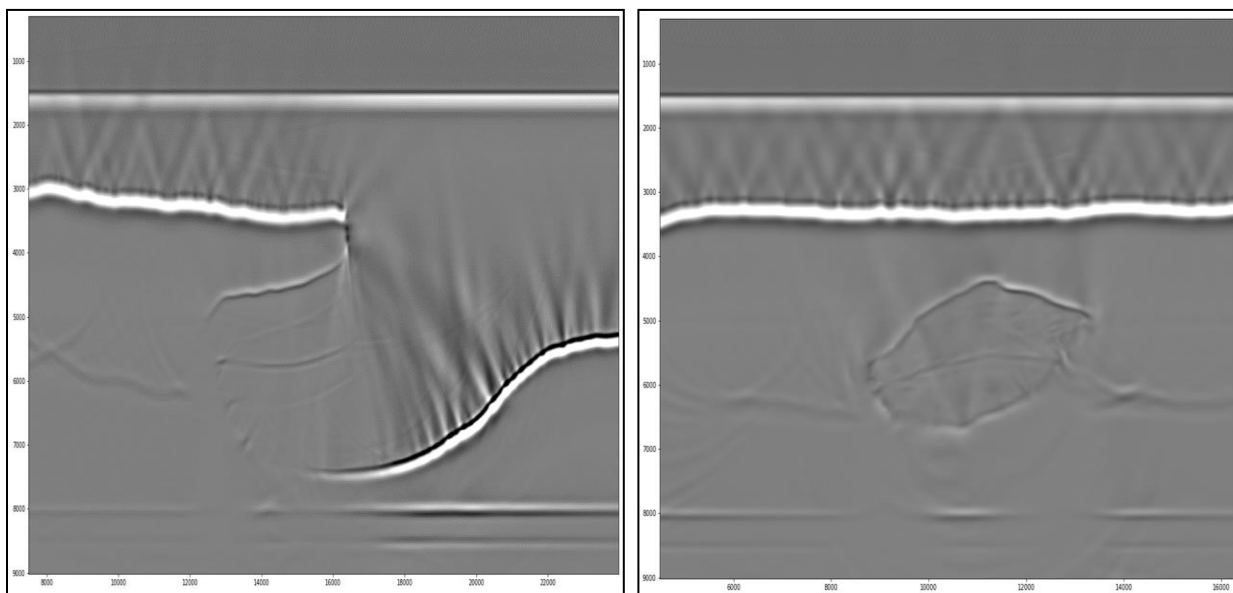


Figura 41: Migração sintética RTM sem sobreposição do modelo de referência simples com capa de anidrita. a) Vista da *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

4.3. Atualização de cima para baixo

A fim de facilitar a ordem de cada etapa com o fluxo de atualização de velocidades com aproximação de cima para baixo (*top-down approach*) para este trabalho, apresentamos a seguinte nomenclatura:

- M00 (modelo preenchido com velocidade da água),
- M01 (modelo inicial com sedimento),
- M02 (modelo com sedimento atualizado por tomografia),
- M03 (modelo atualizado por FWI),
- M04 (modelo com salt-flood),
- M05 (segundo modelo incluindo sedimentos após interpretação de bases do sal),
- M06 (segundo modelo incluindo sedimentos após interpretação de bases do sal atualizado com inversão)
- M07 (segundo modelo com salt-flood após interpretação flancos de sal e/ou base dos sedimentos encapsulados)
- M08 (modelo com base regional interpretada e inserção de velocidades na camada do pré-sal) --> Modelo final do top-down approach

O fluxograma da Figura 42 elucida as etapas dos processos realizados na metodologia:

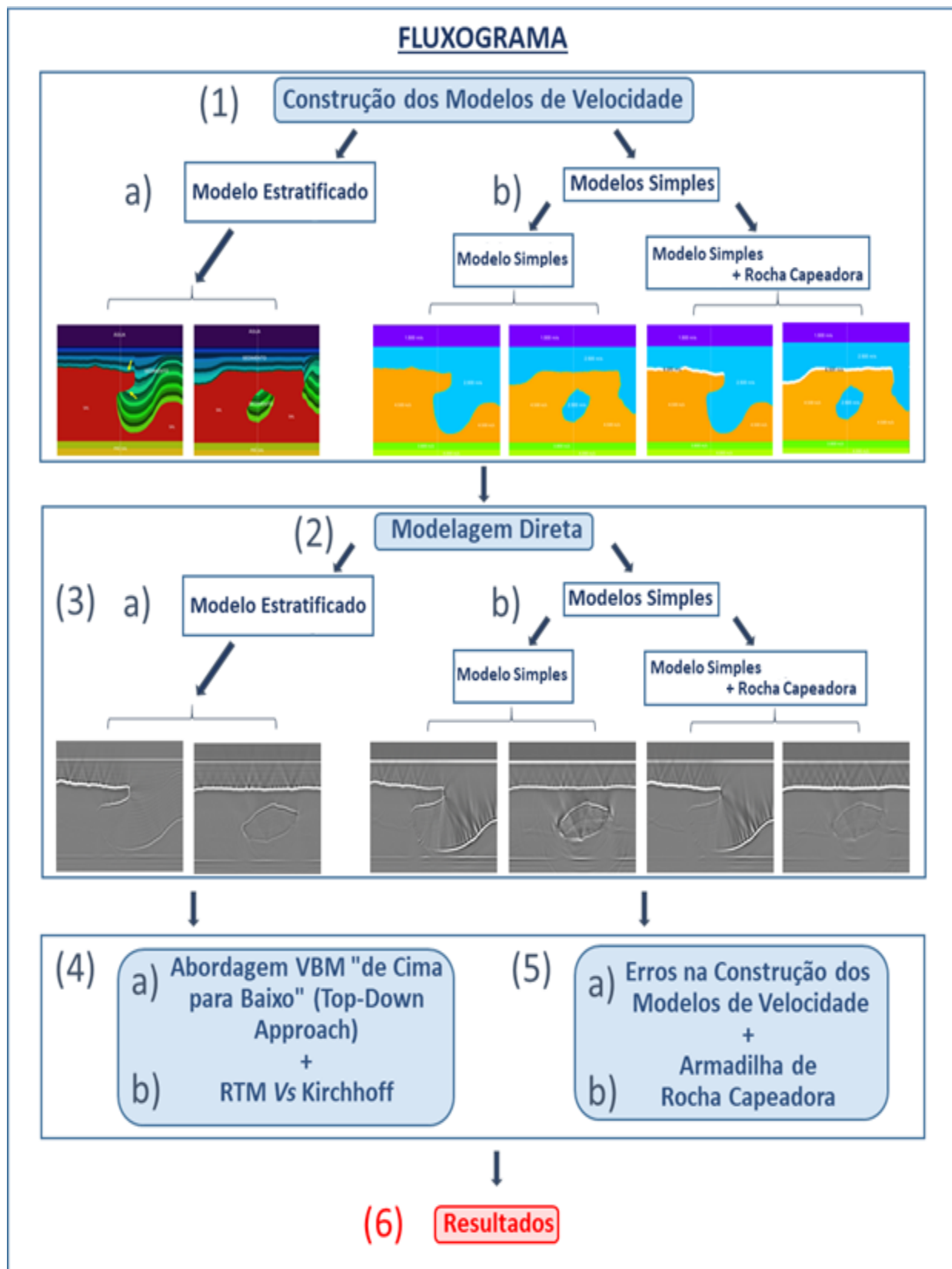


Figura 42: Fluxograma elucidando a metodologia.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para o presente experimento sintético 2D, seguem os resultados do fluxo de atualização de modelos de velocidades descrito na seção 3.3 de VMB. Para cada etapa, são apresentados os resultados empilhados. Os CIG não estão abordados, pois as incertezas para este caso sintético são possíveis de serem observadas através da imagem empilhada.

Os resultados de cada etapa são ilustrados com migrações RTM e Kirchhoff com e sem sobreposição dos modelos. Observe que muitas vezes o modelo sobreposto nas imagens migradas não será necessariamente o modelo utilizado na respectiva migração. O propósito dessas ilustrações é demonstrar, a partir da imagem migrada, onde é possível interpretar horizontes para preencher camadas com valores aproximados das rochas em questão.

5.1 Atualização cima para baixo

Este experimento utiliza o modelo com sedimento estratificado para demonstrar uma atualização de cima para baixo num processo ideal, atualizando com as velocidades próximas do modelo verdadeiro (que gerou os dados para migração).

5.1.1 Estimativa da camada de velocidade da água:

O processo inicia-se com uma estimativa da velocidade da lâmina d'água. Cria-se um modelo com as dimensões finais em que se preenche totalmente com velocidade da

água. Para este experimento, em que a velocidade é constante, utilizou-se a velocidade verdadeira do modelo de referência, de 1500 m/s. Com este modelo, migra-se a Figura 43, que ilustra uma migração RTM com o modelo de velocidade da água sobreposto. A Figura 44 ilustra a mesma migração sem essa sobreposição. A partir desta imagem é possível interpretar o fundo do mar e fixar os valores de velocidade acima deste horizonte.

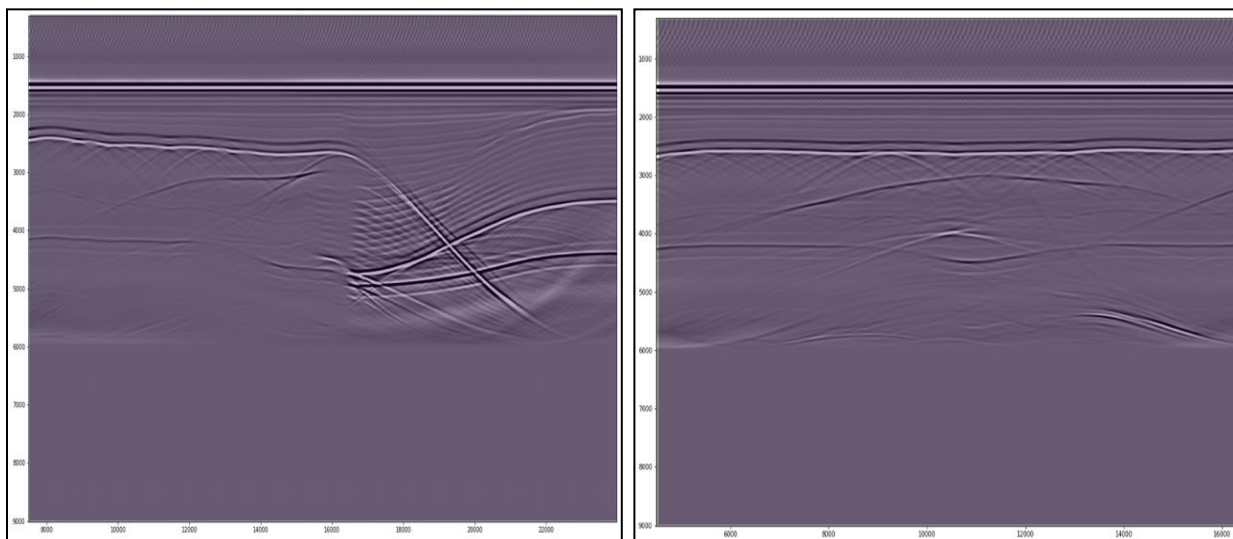


Figura 43: RTM migrada com o modelo de velocidade d'água e sobreposta por este para display. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

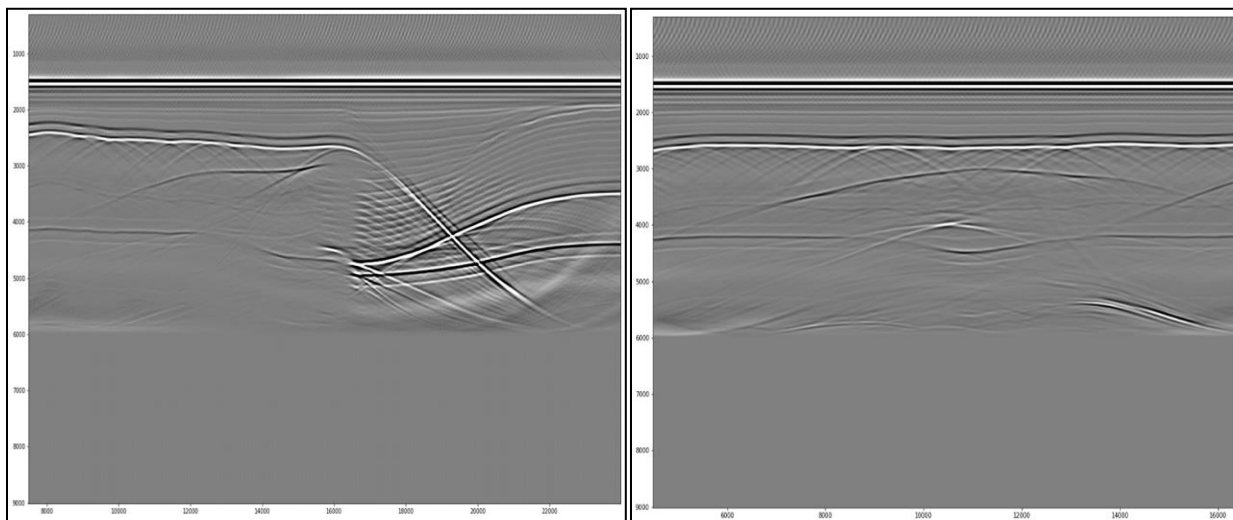


Figura 44: RTM migrada com o modelo de velocidade d'água. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

5.1.2 Estimativa da camada de sedimentos:

A partir do horizonte do fundo marinho insere-se um campo de velocidades formado por um gradiente de velocidades de sedimentos de 75 m/s variando de 2.000 m/s à 4000 m/s. Migra-se e analisa-se. A Figura 45 ilustra a migração RTM sobreposta da primeira velocidade do sedimento.

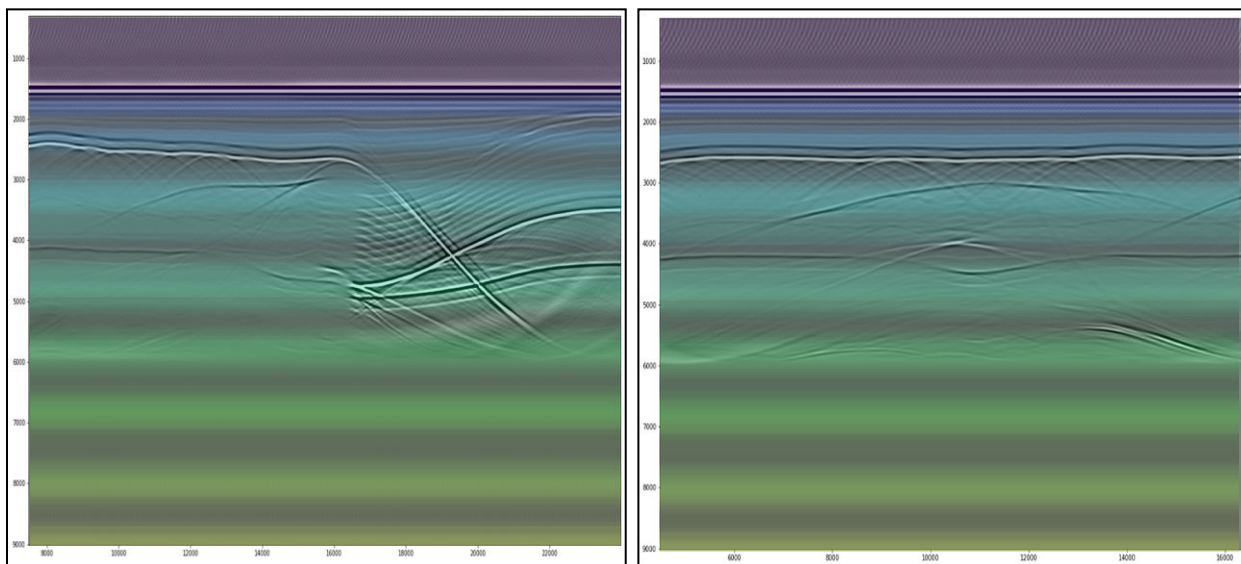


Figura 45: RTM (migrada com a velocidade d'água) com sobreposição do modelo de velocidade inicial de sedimentos. O fundo marinho é interpretado e o modelo, então, é “congelado” até este horizonte e “inundado” de sedimento abaixo deste. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Este modelo geralmente serve para uma inversão por tomografia, bem como os CIG's desta migração são utilizados para extração de *picks* de RMO's. Neste experimento não foi realizada uma tomografia, ao invés disso, o modelo foi atualizado com horizontes simulando o mergulho dos eventos para se aproximar do padrão de uma tomografia de tempo de trânsito (Figura 46).

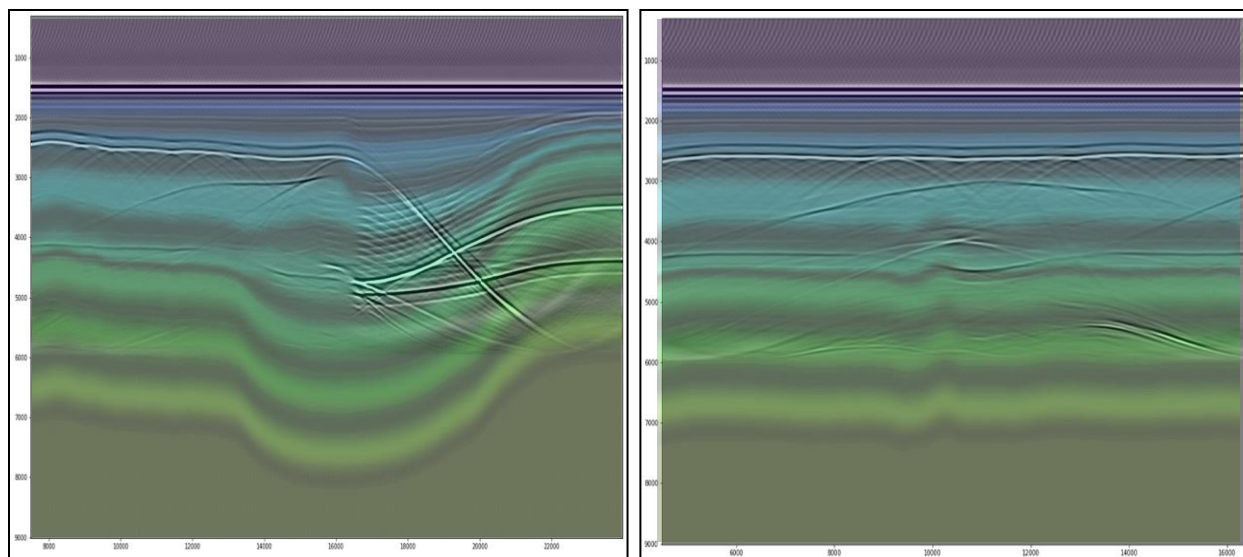


Figura 46: RTM (migrada com a velocidade d'água) com sobreposição do modelo de velocidade de sedimentos simulando uma atualização por Tomografia (M02). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

A partir do modelo resultante da tomografia, geralmente utiliza-o para servir de modelo inicial na FWI (Figura 47), que também não foi implementado e sim, simulado (inserido manualmente através de horizontes interpretados) por altas velocidades de sal e inserindo-se um gradiente próximo ao do modelo base, o qual passou por uma suavização nem tanto radical e nem tanto conservadora.

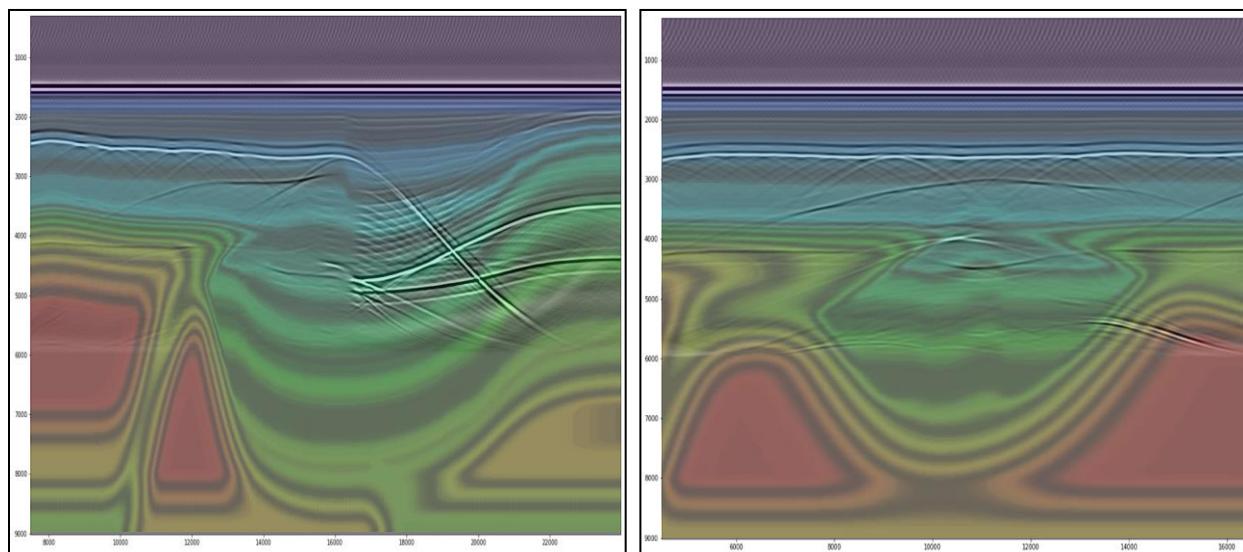


Figura 47: RTM (migrada com a velocidade d'água) com sobreposição do modelo de velocidade de sedimentos simulando uma atualização pela FWI (M03). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

5.1.3 Estimativa da camada de sal:

Após resolver as velocidades do sedimento, migra-se e empilha-se para interpretação do topo do sal (TOS) na imagem resultante (Figura 48). Com o TOS interpretado, fixa-se os valores das velocidades do sedimento acima do TOS e preenche-se com valores de velocidade do sal (halita 4500 m/s) abaixo deste horizonte (etapa conhecida como *salt-flood*). A Figura 48 ilustra o RTM migrada com o M03 sobreposto pelo modelo M04, com sedimentos corrigidos e preenchimento de velocidade do sal abaixo do horizonte TOS.

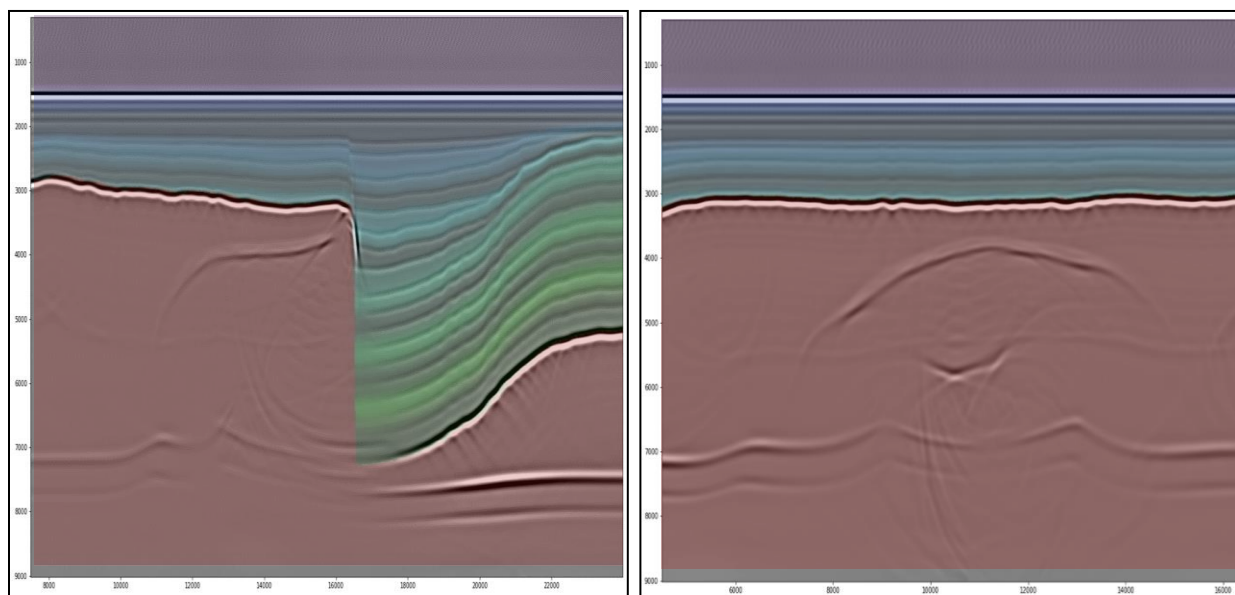


Figura 48: RTM (migrada com a velocidade de sedimento – M03) com sobreposição do primeiro modelo de velocidade de sal (M04). O topo do sal é interpretado e o modelo, então, é “congelado” até este horizonte e “inundado” de sal abaixo deste, omitindo-se a base do *overhang* e os flancos do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Com este modelo, migra-se e interpreta-se possíveis bases do sal (BOS) ou bases de *overhangs* e, no caso do modelo de sedimento encapsulado, topo do sedimento (ou base 1 do sal). Observa-se na Figura 49 e Figura 50 imagens migradas com RTM e Kirchhoff, em que é possível, em ambas as linhas, observar um evento refletor da base do *overhang* e base do sal 1 (BOS) na linha com sedimento encapsulado. Desta forma, é possível gerar pares de horizontes para delinear a camada do sal.

Pode-se observar artefato de baixa frequência na imagem migrada com RTM (Figura 49). Esse artefato é intrínseco a este algoritmo de RTM. Até o momento da realização deste trabalho, não havia um filtro Laplaciano para atenuar devidamente o *backscattering* (artefato de baixa frequência acima do sal), artefato que ocorre em migrações RTM *stack*.

A Figura 51 ilustra os modelos com a base 1 do sal interpretada e, portanto, é possível delinear a geometria da camada do sal. Com isso, preenche-se com velocidade de sal dentro dessa camada geométrica delimitada por dois horizontes (TOS1 e BOS1) e com a velocidade de sedimento fora do sal. Neste estágio, também pode-se realizar tomografias ou FWI para atualização das velocidades dos sedimentos, conforme o resultado ilustrado nas Figura 51 e Figura 52. Quando tais flancos de sal e/ou base dos sedimentos encapsulados são interpretados, a complexa geometria de sal é desvendada e, agora podemos “inundar” o modelo com a velocidade do sal abaixo de todos os topos e flancos de sal interpretados (Figura 53).

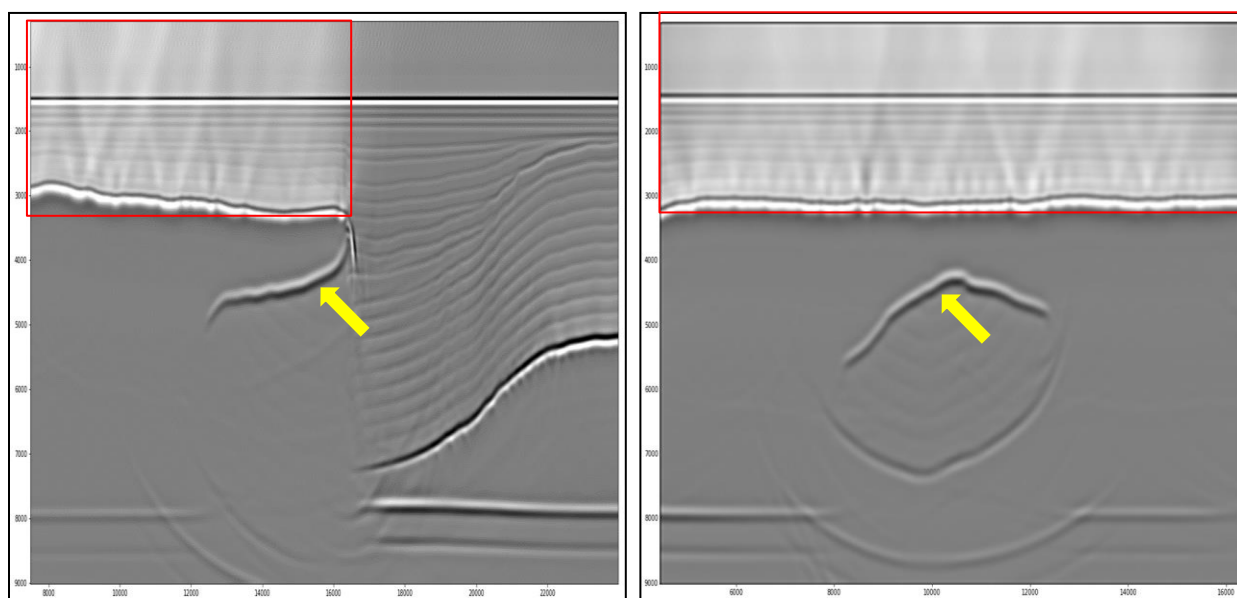


Figura 49: RTM migrada com o primeiro modelo de sal (M05). A imagem é relevante da superfície da água até a base do *overhang* ou topo secundário (seta amarela) do sal e errôneo abaixo do mesmo e onde houver sedimentos encapsulados. Podemos observar os artefatos de ondas retroespalhadas visíveis no topo do sal (quadro vermelho). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

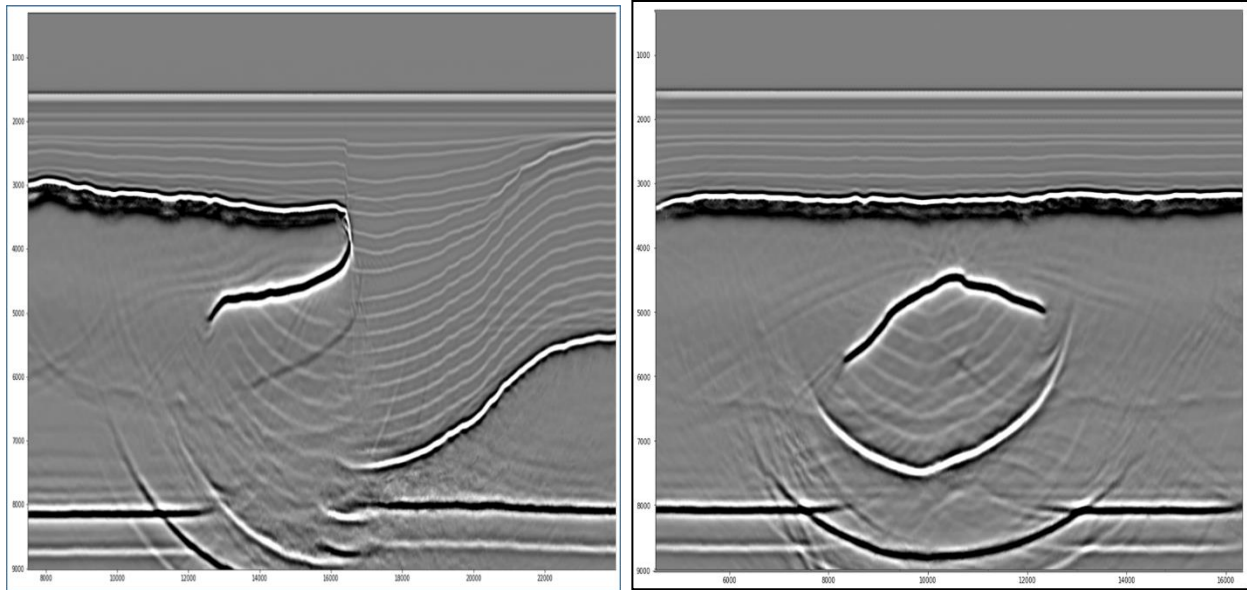


Figura 50: Kirchhoff migrada com o primeiro modelo de sal. A imagem é relevante da superfície da água até esta primeira base ou topo secundário do *overhang* e errôneo abaixo do mesmo e onde houver sedimentos encapsulados. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

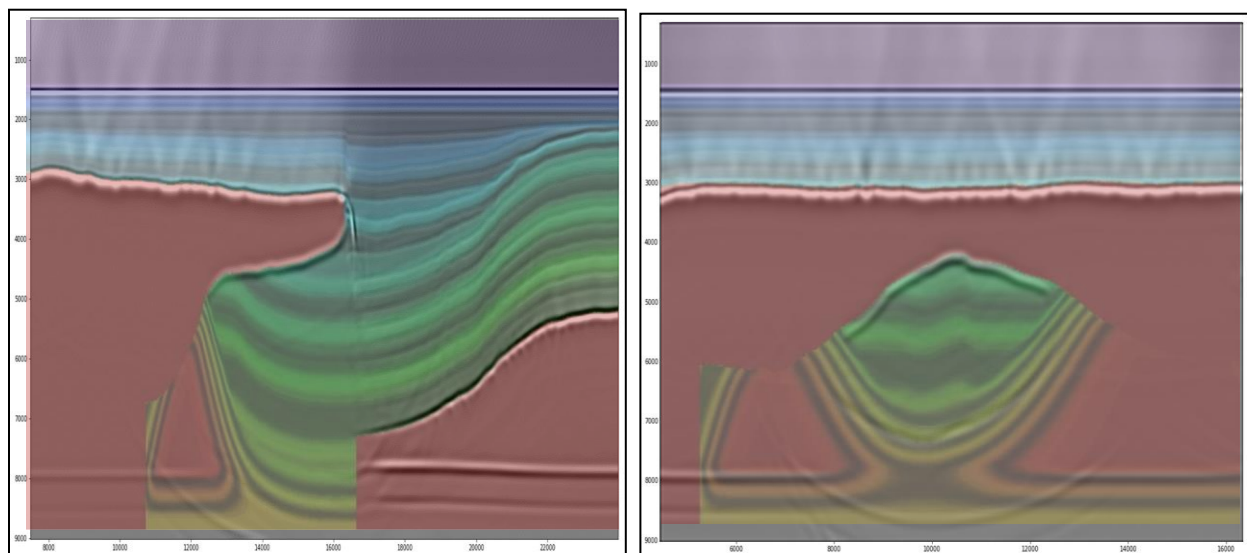


Figura 51: RTM (migrada com a primeira velocidade de sal) com sobreposição do segundo modelo de sedimentos. A base do *overhang* e topo dos sedimentos encapsulados são interpretados e o modelo é “congelado” até este horizonte e “inundado” de sedimento abaixo destes, omitindo-se os flancos do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

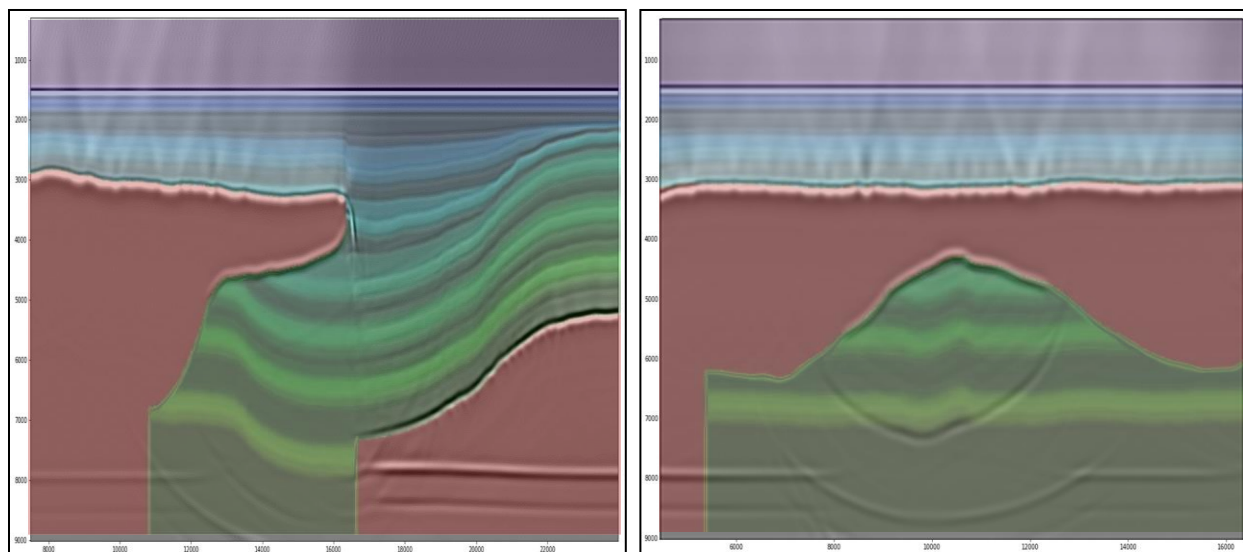


Figura 52: RTM (migrada com a primeira velocidade de sal) com sobreposição do segundo modelo de sedimentos simulando uma atualização pela inversão abaixo do *overhang* e do topo dos sedimentos encapsulados. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

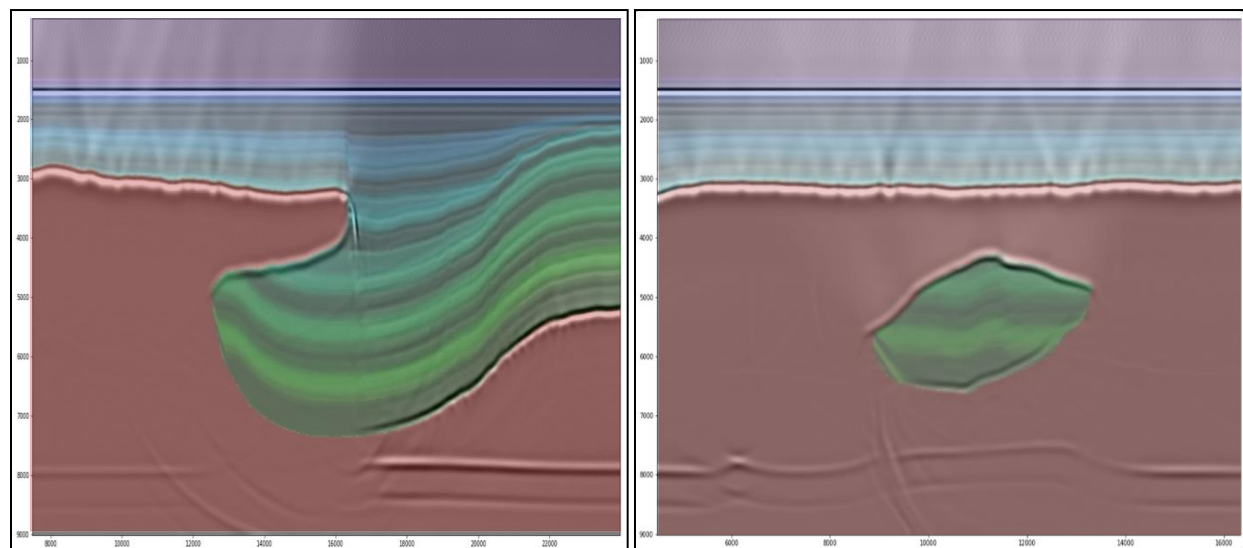


Figura 53: RTM (migrada com a segunda velocidade de sedimentos) com sobreposição do segundo modelo de sal. O flanco do sal abaixo do *overhang* e dos sedimentos encapsulados é interpretado e o modelo é “inundado” de sal abaixo deste, omitindo-se a base regional do sal e o pré-sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

A migração resultante nos revelará a base regional do sal e, com isso, é possível interpretar tal horizonte. A partir da interpretação realizada na Figura 54, pode-se, a partir desta, preencher com velocidades esperadas no pré-sal, como ilustra a Figura 55.

5.1.4 Estimativa da camada de pré-sal:

Abaixo da base regional podemos atualizar a velocidade do pré-sal. A migração com este modelo produz as imagens mostradas na Figura 55, Figura 56 e Figura 57. O modelo final obtido pelo fluxo de construção de 'cima para baixo' (*top-down approach*) é apresentado na Figura 59.

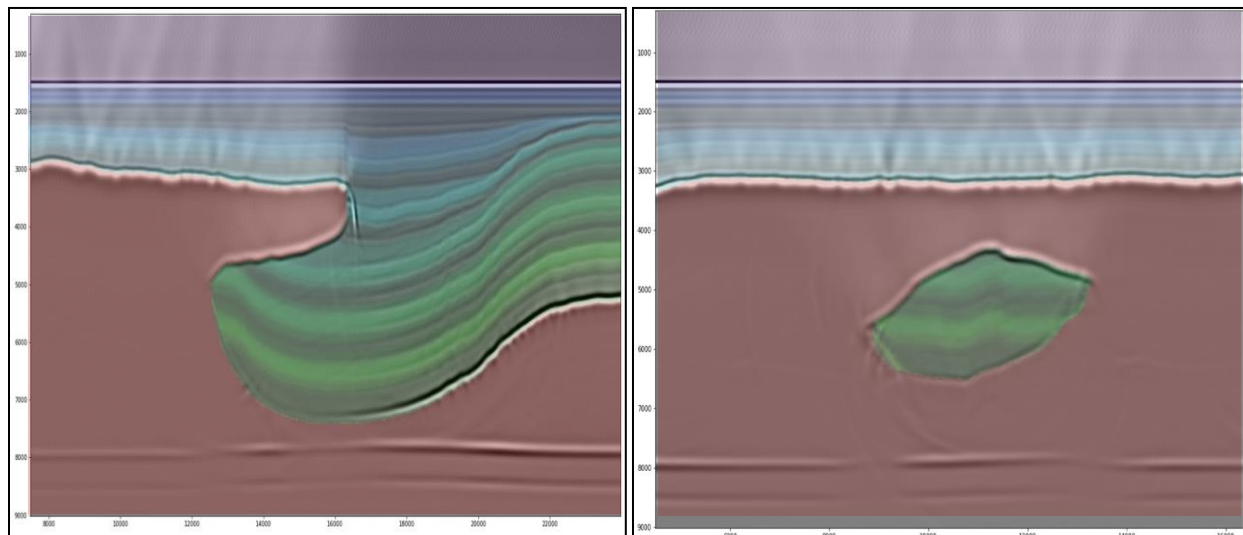


Figura 54: RTM migrada com a segunda velocidade de sal e sobreposta a este. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

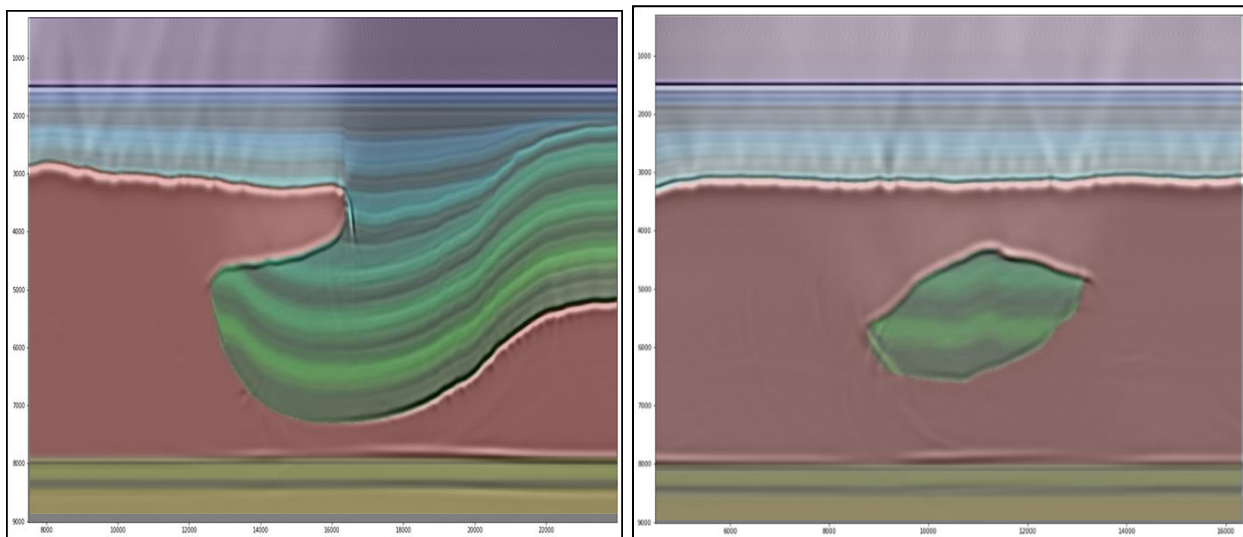


Figura 55: RTM migrada com o modelo completo incluindo pré-sal e sobreposta por este. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Como pode ser observado, a migração Kirchhoff resolveu bem a camada de sedimentos (pós-sal), devida à baixa complexidade dos eventos, além de preservar conteúdo de frequências dos dados de entrada, combinados à resolução do modelo. Comparando-se a Figura 56 com a Figura 57 é possível observar que, nos eventos abaixo do *overhang* com a Kirchhoff (circulado em vermelho na Figura 57) ocorram artefatos gerando ambiguidade na interpretação e, na linha encapsulada, é possível verificar que o delineamento do sal em volta do sedimento (indicado por setas amarelas na Figura 57) é mais contínuo com a RTM (Figura 56).

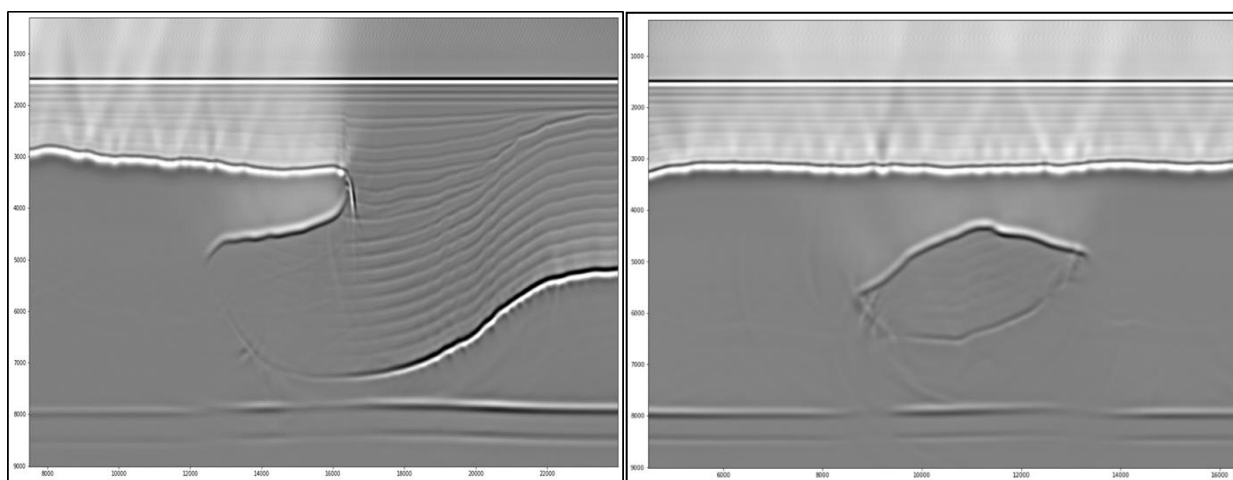


Figura 56: RTM migrada com o modelo completo gerado pela bordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de 'cima pra baixo' (*Top-down approach*).

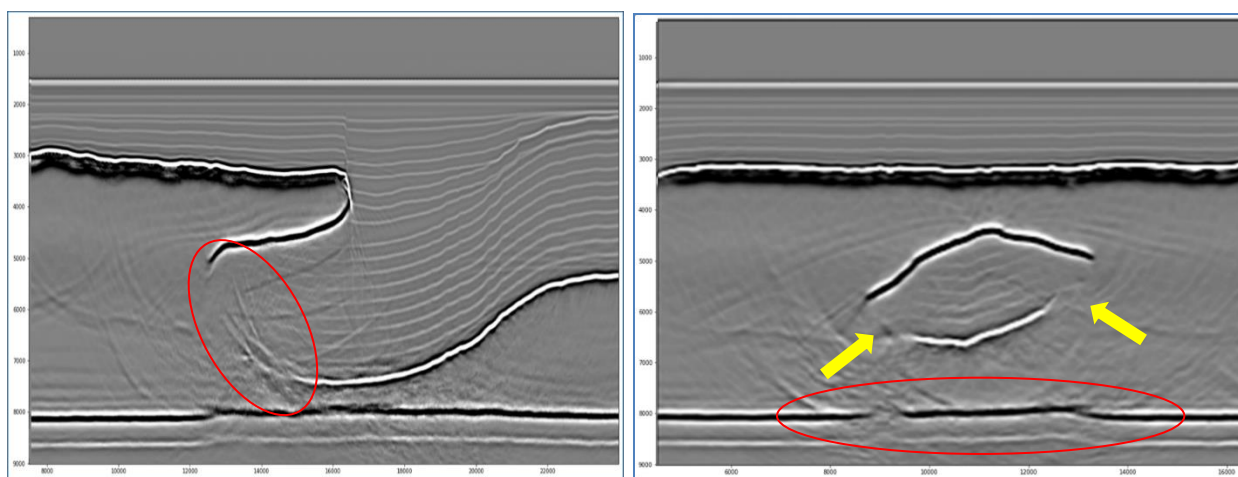


Figura 57: Kirchhoff migrada com o modelo completo gerado pela abordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de 'cima pra baixo' (*Top-down approach*). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Embora a migração Kirchhoff seja muito boa para o método devido a velocidade se aproximar muito da correta, ainda assim, vemos como o flanco sal, as bordas íngremes do sedimento e a base do sal, assim como eventos subjacentes, não ficam tão bem resolvidos para um esquema de migração de chegada única (setas amarelas e círculo vermelho), assim como eventos subjacentes, abaixo do *overhang* não ficam tão bem resolvidos para um esquema de migração de chegada única (círculo vermelho na Figura 57)

5.1.5 Comparação do resultado entre modelo de referência e modelo construído:

A Figura 59 apresenta o modelo final resultante da metodologia de atualização de modelos de velocidades de cima para baixo com interpretação de horizontes. Com isso, pode-se comparar com o modelo original (Figura 58), que representa o modelo que gerou o dado utilizado nas migrações.

Comparando-se o efeito do modelo final resultante nas migrações, a Figura 60 e a Figura 62 ilustram a RTM migrada com modelo original e a Figura 61 e a Figura 63 a RTM migrada com modelo final resultante do experimento. Essas últimas apresentam uma sutil subida da base do sal e do evento subjacente do pré-sal, muito provavelmente porque o aumento local pronunciado da velocidade sísmica no mergulho da mini-bacia não fora completamente contabilizado no modelo de velocidade. Essas peculiaridades são as incertezas encontradas pelos geólogos e geofísicos no dia a dia, no entanto, o modelo gerado, ainda assim, se aproxima muito bem ao modelo de referência (Figura 58, Figura 60 e Figura 62). da indústria.

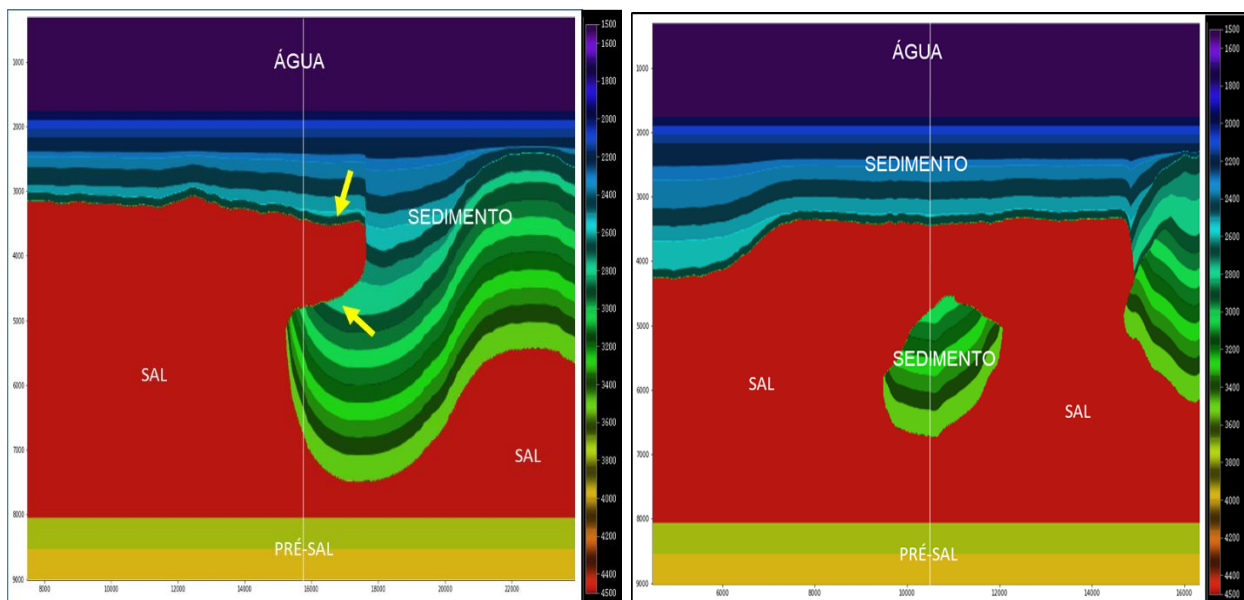


Figura 58: Modelo de velocidade estratificado de referência. a) Vista do *Overhang*'(setas amarelas); b) Vista Sedimento Encapsulado

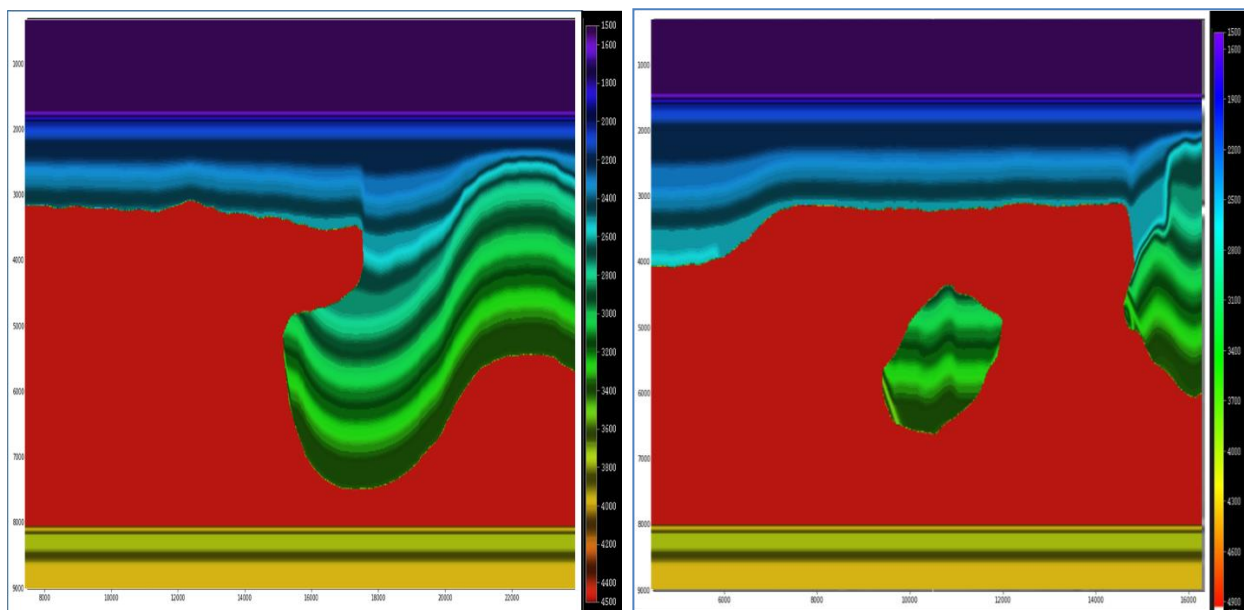


Figura 59: Modelo completo gerado pela nossa abordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de 'cima pra baixo' (*Top-down approach*). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

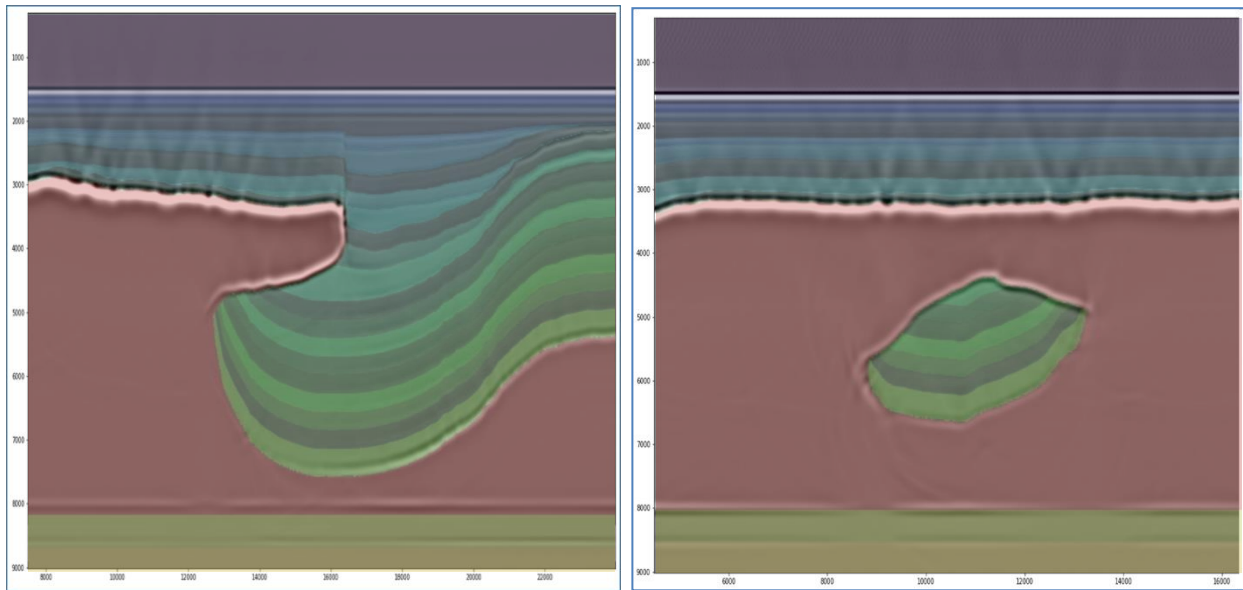


Figura 60: RTM migrado com modelo de velocidade estratificado correto e sobreposto pelo mesmo. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

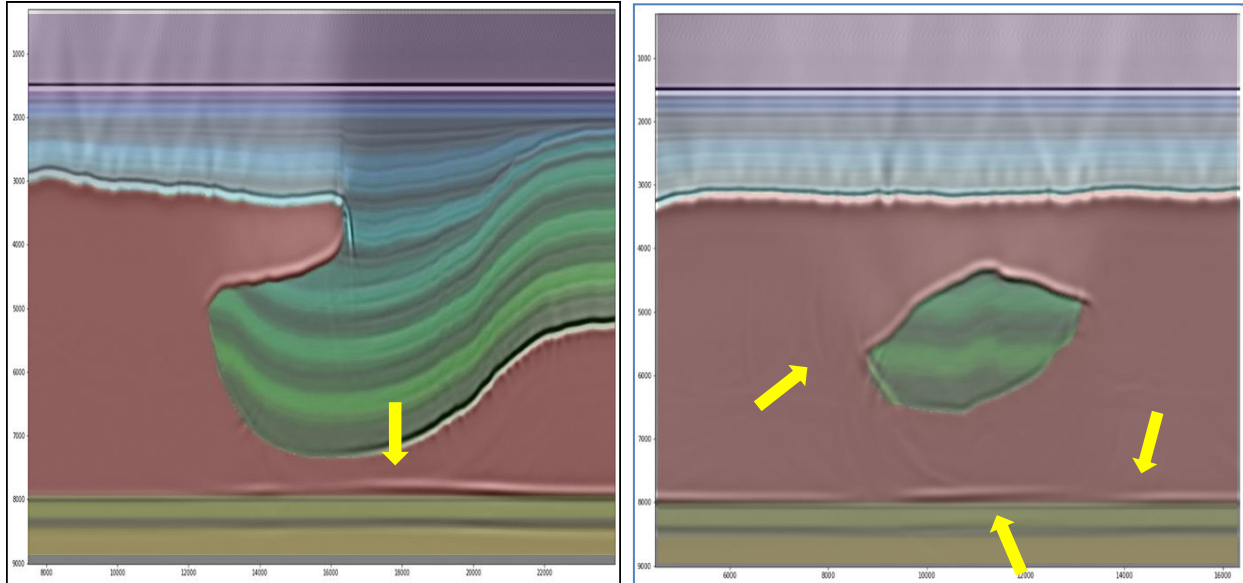


Figura 61: RTM migrada e sobreposta pelo o modelo construído pelo *top-down approach*. Notamos uma sutil subida da base do sal e do evento subjacente do pré-sal (seta amarela), muito provavelmente porque o aumento local pronunciado da velocidade sísmica no mergulho da mini-bacia não fora completamente contabilizado no modelo de velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

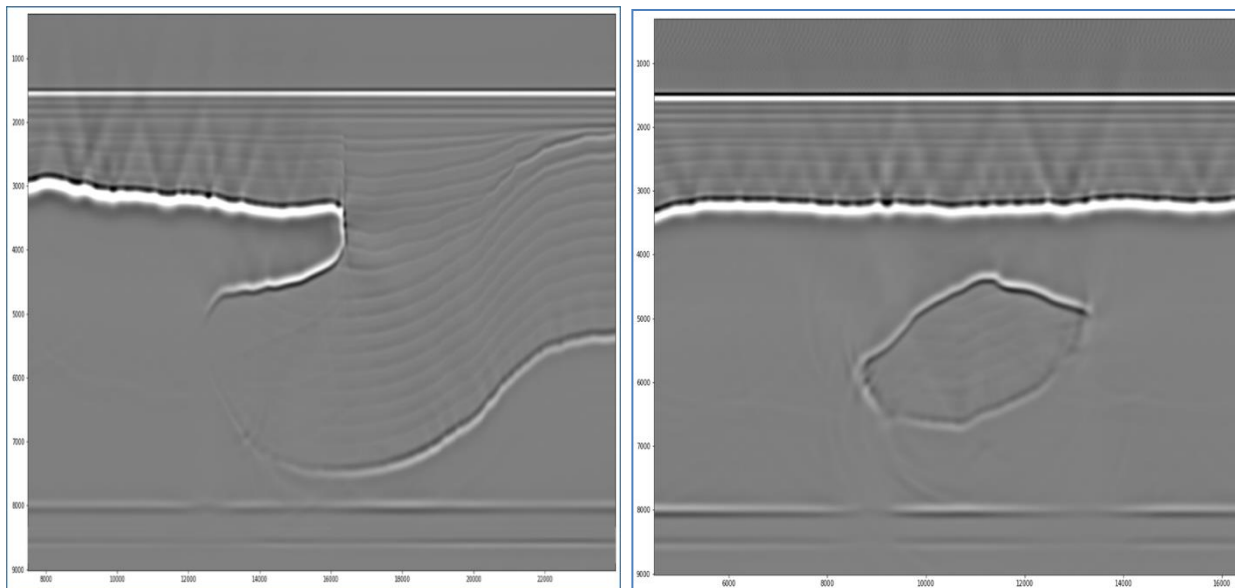


Figura 62: RTM migrado com o modelo de velocidade estratificado de referência. a) Vista do 'Overhang'; b) Vista Sedimento Encapsulado

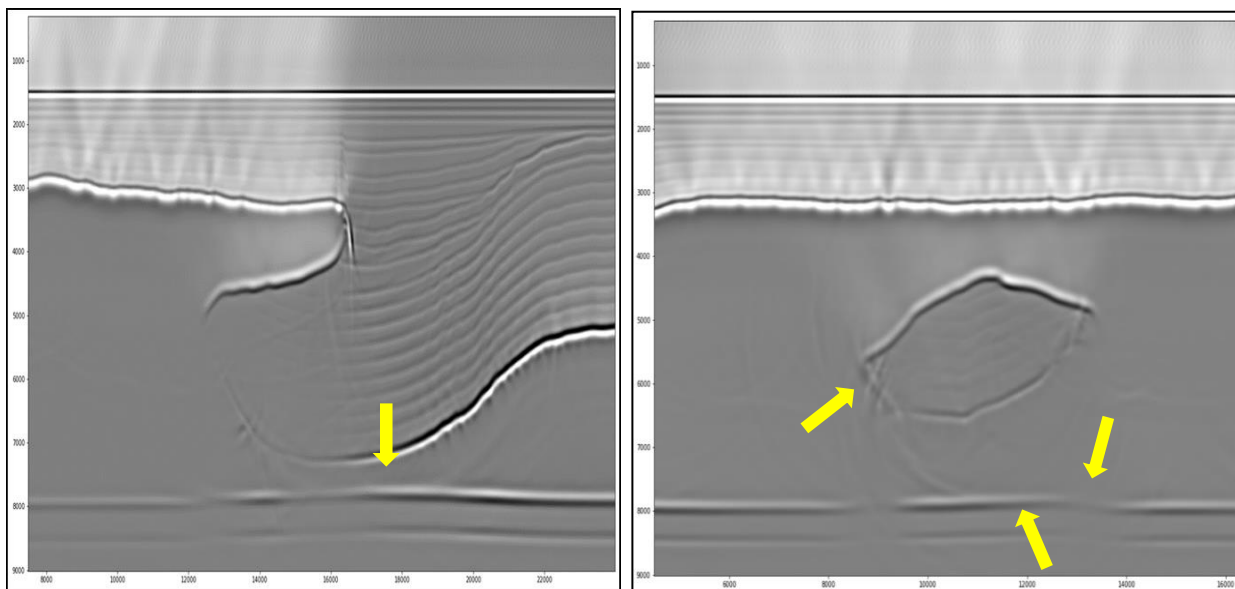


Figura 63: RTM migrada com o modelo completo gerado pela nossa abordagem de construção de modelo de velocidade (VMB) de 'cima pra baixo' (*Top-down approach*). Notamos uma sutil subida da base do sal e do evento subjacente do pré-sal (seta amarela), muito provavelmente porque o aumento local pronunciado da velocidade sísmica no mergulho da mini-bacia não fora completamente contabilizado no modelo de velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

5.2 Modelo com sedimento constante

Neste experimento é utilizado como referência um modelo simples com velocidade de sedimento constante. A Figura 64 e a Figura 65 ilustram o resultado da migração RTM, sendo a primeira com o respectivo modelo sobreposto na imagem. A fim de ilustrar de forma simplificada as consequências de erros na inserção de valores de velocidade e interpretação de eventos em profundidades erradas na construção de modelos de velocidades em geologias complexas, três experimentos são realizados: no primeiro, a velocidade do sedimento é menor que a do verdadeiro (menos 300 m/s), no segundo, a velocidade da camada de sal é aumentada (mais 300 m/s) e, no terceiro, o topo de sal é interpretado 200 m abaixo da posição verdadeira. O dado sintético é gerado a partir do modelo de referência.

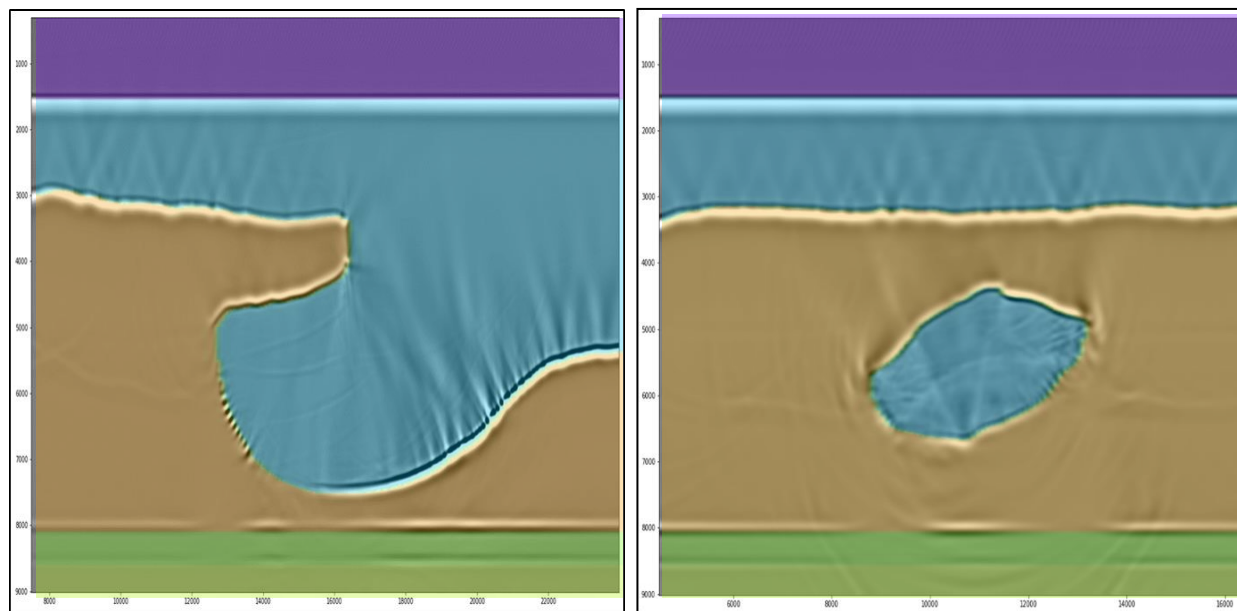


Figura 64: RTM migrado com o modelo de velocidade simples correto e sobreposto por este. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

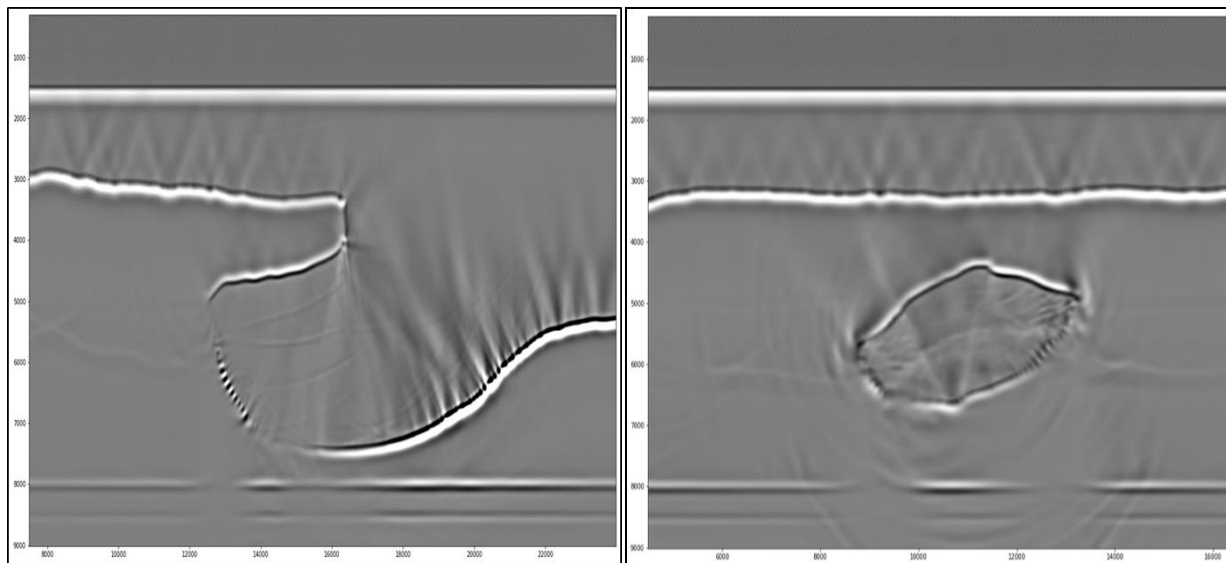


Figura 65: RTM migrado com o modelo de velocidade simples de referência. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

A Figura 66 ilustra a migração com o modelo de referência com sobreposição do modelo estimado com velocidade errada.

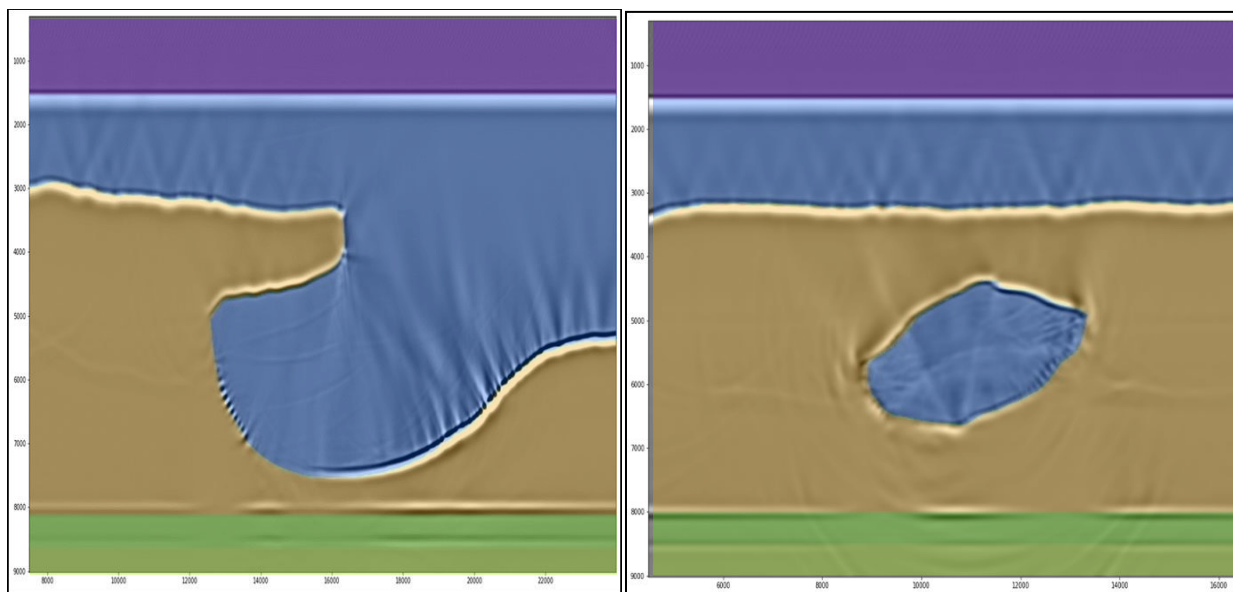


Figura 66: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) com sobreposição do modelo simples com velocidade dos sedimentos errada. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

O resultado da migração utilizando velocidade do sedimento errada está ilustrado na Figura 67 e na Figura 68. Nota-se um erro significativo na formação do corpo de sal. O topo do sal, assim como todas os demais eventos subjacentes ao sedimento, como a base da calha do *overhang* e dos sedimentos encapsulados, os flancos e as bases do sal, e a camada intermediária do pré-sal, são deslocados para cima, devido a velocidade reduzida do pacote de sedimento. Isso é de se esperar, pois, como visto nas seções sobre a construção do modelo pela abordagem de cima pra baixo, além dos eventos mais profundos serem influenciados pela correção das velocidades das camadas superiores, velocidades menores que a correta geram *movouts* curvados para cima nos CIG's, que influenciam no resultado da imagem empilhada, em que a média das amplitudes dos refletores se apresentam posicionadas acima das verdadeiras profundidades. A velocidade reduzida do pacote de sedimentos desloca para cima todas os eventos subjacentes a ele.

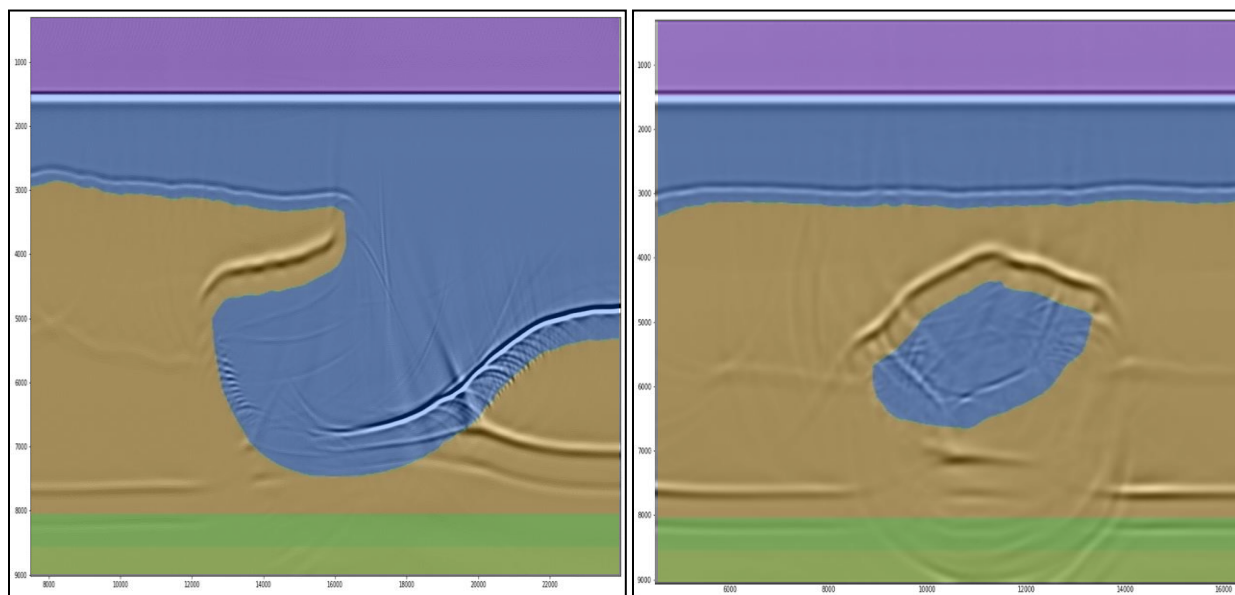


Figura 67: RTM migrado com o modelo simples com velocidade dos sedimentos errada e com sobreposição do mesmo. A velocidade reduzida do pacote de sedimentos desloca para cima todas os eventos subjacentes a ele. Isso acontece pois, pela abordagem de cima para baixo, os eventos mais profundos são influenciados pela correção das velocidades das camadas superiores. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

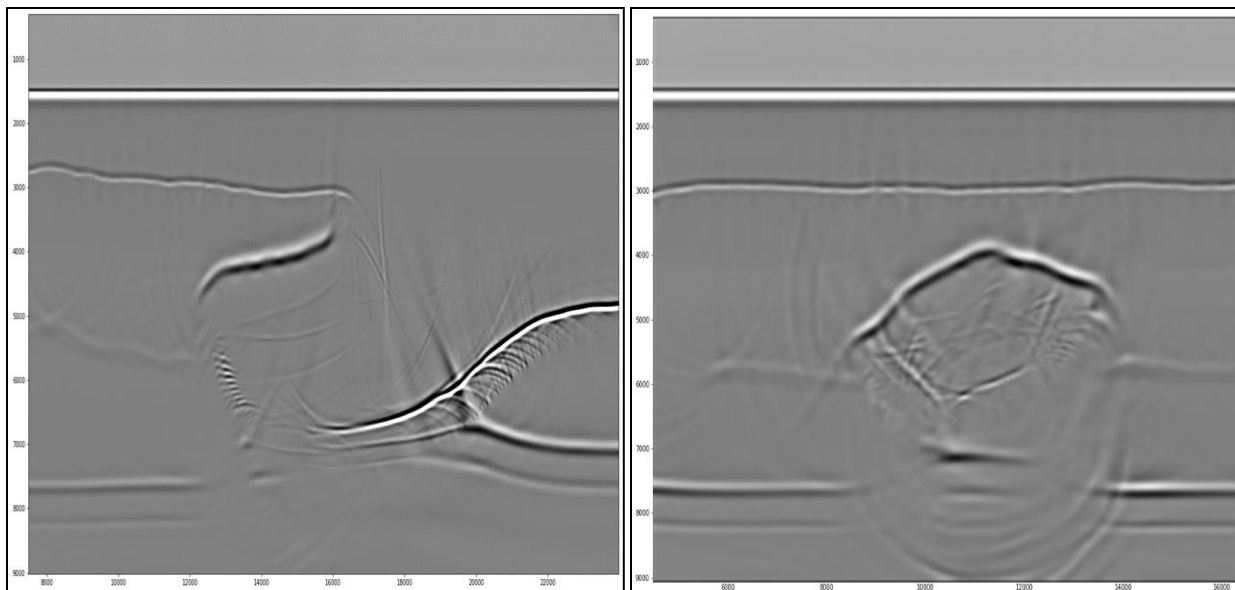


Figura 68: RTM migrado com o modelo simples com velocidade dos sedimentos errada. A velocidade reduzida do pacote de sedimentos desloca para cima todas os eventos subjacentes a ele. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

O próximo teste foi colocando-se a velocidade do sal 300 m/s mais com relação ao modelo original de referência (Figura 69). Observando as imagens da Figura 70 e Figura 71, vemos que os eventos logo abaixo das maiores porções do corpo de sal são deslocados para baixo devido ao aumento da velocidade do sal, o que causa um puxão pra cima (*pull-up*) aparente na porção mais fina da bacia em virtude da imprecisão do modelo. É interessante notar que o topo do sal continua na sua posição correta, pois, como visto na abordagem de cima pra baixo (*top-down approach*), este depende da correção da velocidade de fundo dos sedimentos circundantes e, uma vez que o evento imageado é posicionado corretamente, ele é interpretado e a velocidade é fixada acima. A velocidade do sal, independente se errada ou não, é inserida verticalmente abaixo do horizonte interpretado.

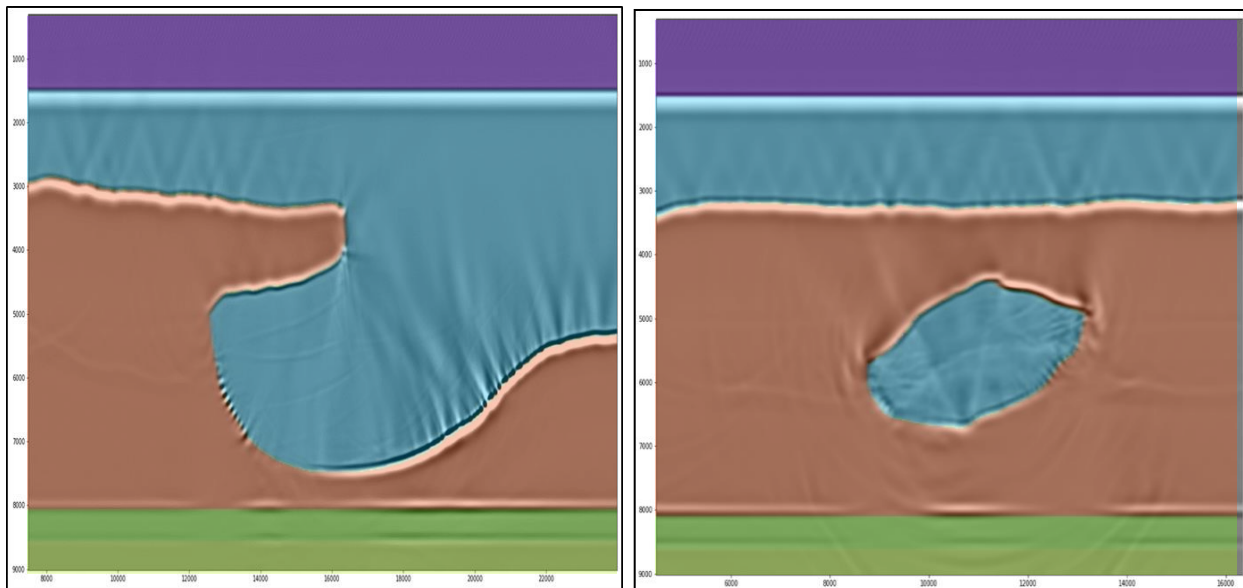


Figura 69: RTM (migrado com o modelo de velocidade de referência) sobreposto do modelo simples com velocidade do sal errada. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

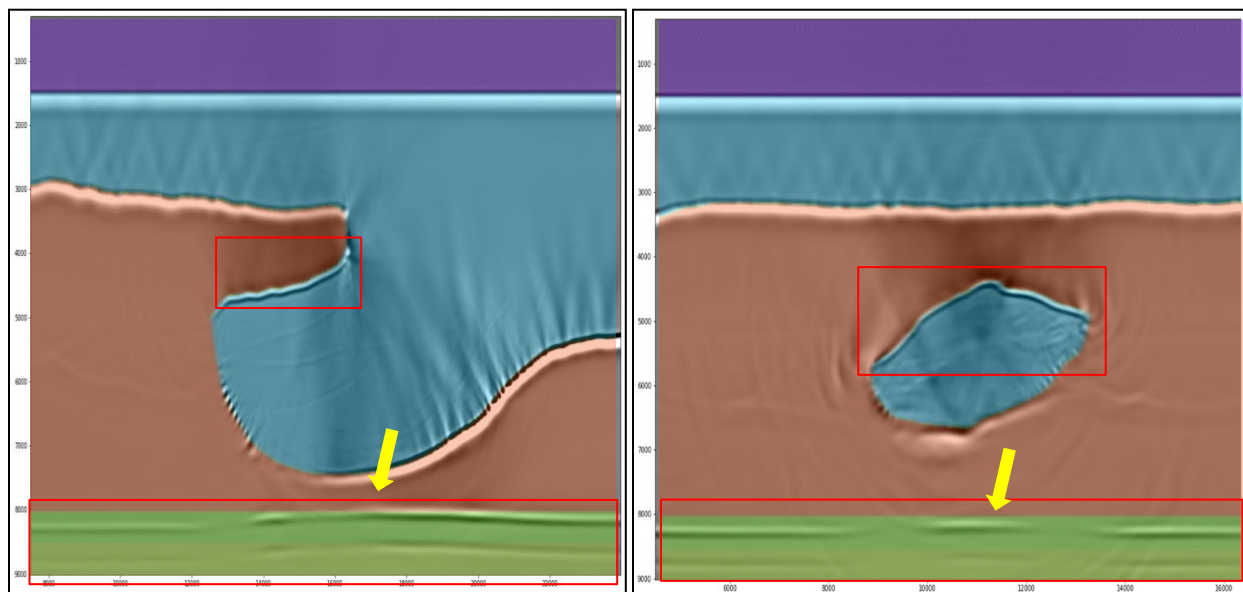


Figura 70: RTM migrado com o modelo simples com velocidade do sal errada e com sobreposição deste. Os eventos logo abaixo das maiores porções do corpo de sal são deslocados para baixo devido ao aumento da velocidade do sal (quadro vermelho), o que causa um puxão pra cima (*pull-up*) aparente na porção mais fina da bacia (setas amarelas) em virtude da imprecisão do modelo. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

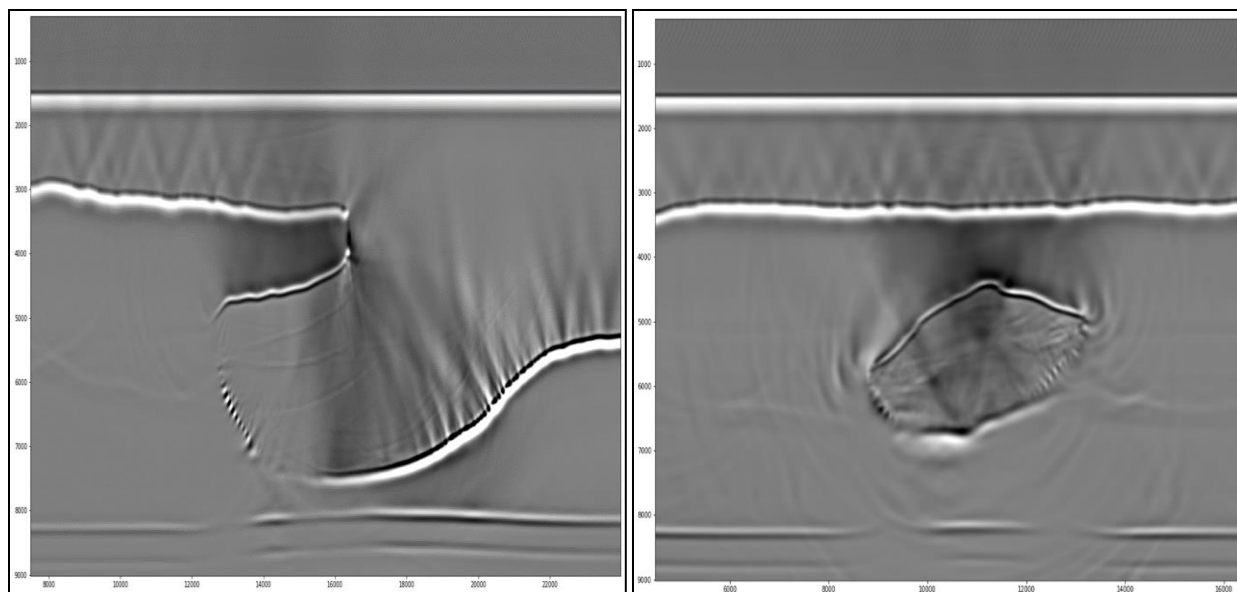


Figura 71: RTM migrado com o modelo simples com velocidade do sal errada. Observamos um deslocamento para baixo dos eventos abaixo do corpo com mais sal e um puxão pra cima (*pull-up*) aparente na porção mais fina da bacia ou abaixo do sedimento encapsulado. b) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

O terceiro experimento realizado corresponde à um erro de interpretação do topo, posicionando o mesmo 200 m abaixo de sua profundidade correta (Figura 72). Este erro de profundidade foi escolhido para ilustrar um erro comum de interpretação devido a alguns eventos se enquadrarem dentro da resolução vertical de um método sísmico de prospecção. Além disso, podemos ver que este erro de profundidade coincide com o comprimento da onda refletida no topo do sal (o conjunto pico preto-vale branco). Este erro, num caso com dados reais muito mais complexos, seria justificado se os intérpretes, baseados num estudo geológico prévio da região, suspeitassem da presença de carbonatos ou anidrita junto ao topo do sal e resolvessem interpretar o mesmo como o pico logo abaixo da forte reflexão relativos aqueles.

Como pode ser observado na Figura 73 e Figura 74, a diminuição da energia do topo do sal e o puxão para cima da base e dos eventos subjacentes na imagem gerada por este modelo são indícios de algum erro na construção do modelo de velocidade.

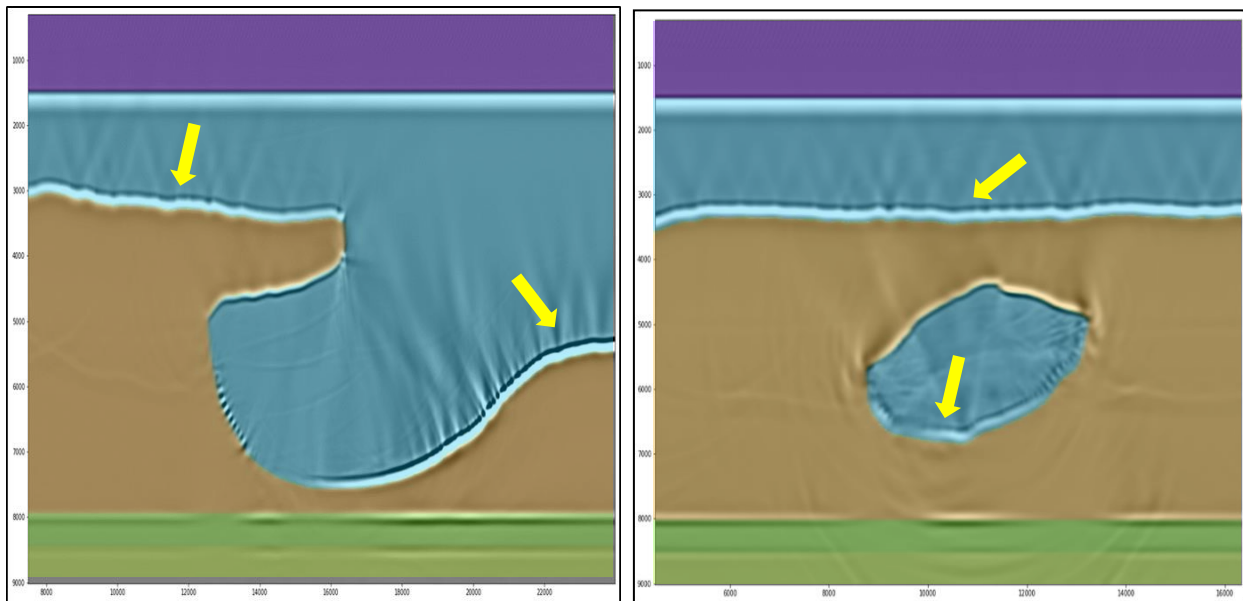


Figura 72: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) sobreposto do modelo simples com interpretação topo do sal errada. Podemos ver que este erro de profundidade coincide com o comprimento de onda da *wavelet* refletida no topo do sal (o conjunto pico preto-vale branco apontado). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

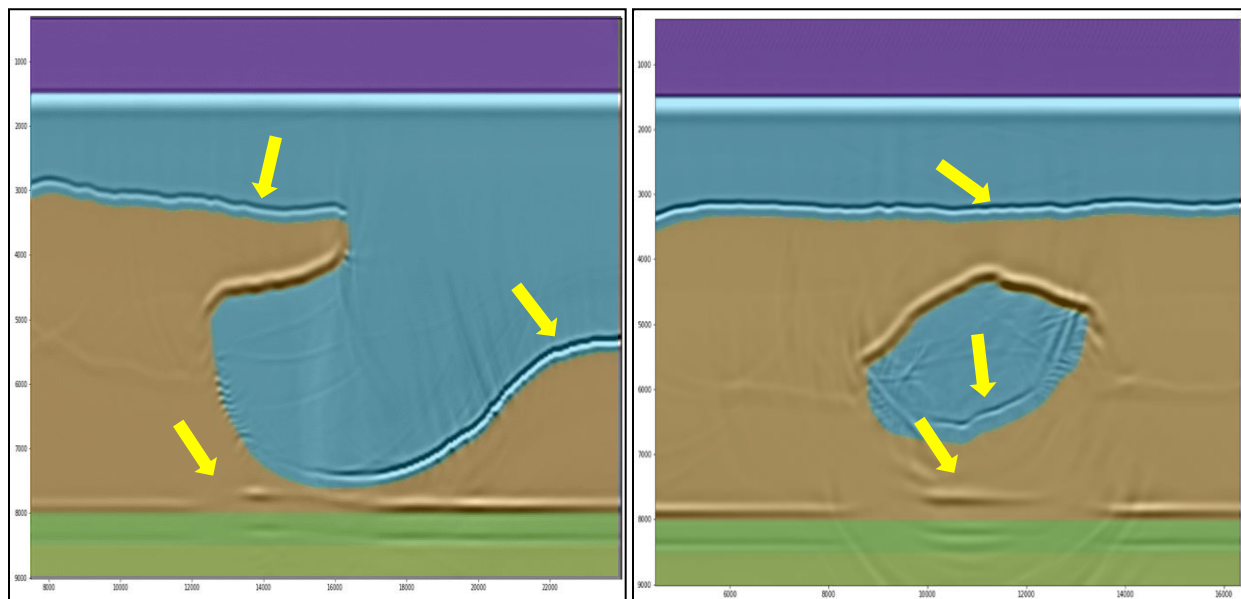


Figura 73: RTM migrado com o modelo simples com interpretação do topo do sal errada e com sobreposição deste. A diminuição da energia do topo do sal e o puxão para cima da base e dos eventos subjacentes (setas) são indícios de algum desacerto na construção da velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

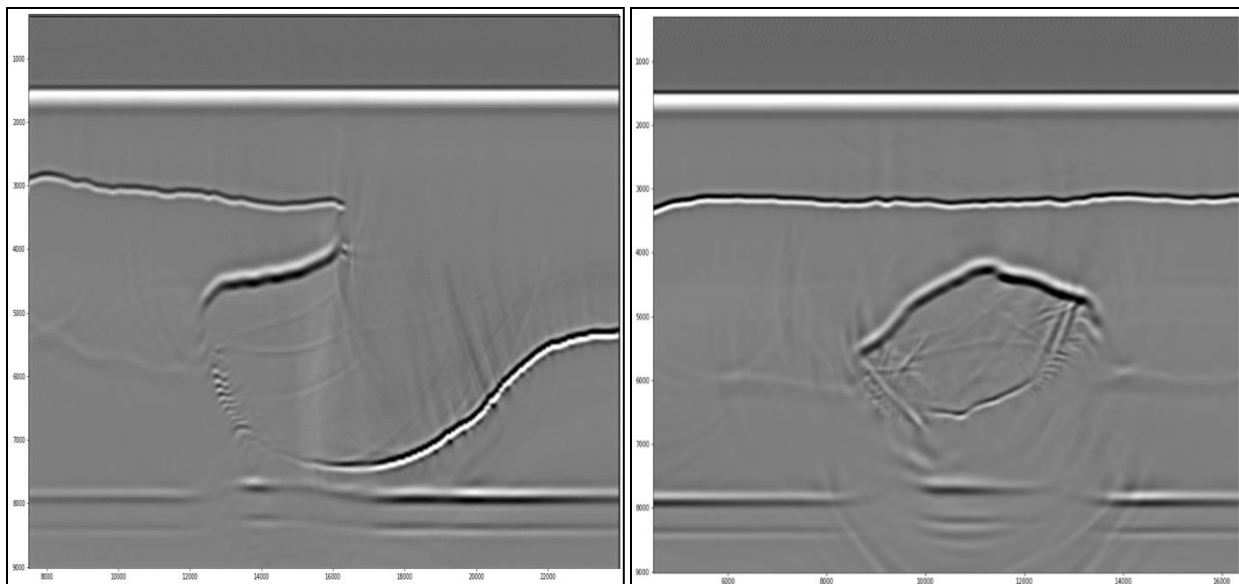


Figura 74: RTM migrado com o modelo simples com interpretação do topo do sal errada. A diminuição da energia do topo do sal e o puxão para cima da base e dos eventos subjacentes são indícios de algum desacerto na construção da velocidade. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

5.3 Modelo com rocha capeadora

Num outro contexto geológico, foi modelado um dado sintético com uma rocha capeadora de anidrita de alta velocidade, com espessura de 200 m, logo acima do topo do sal. A Figura 75 mostra o modelo de referência com rocha capeadora sobreposto sobre imagem migrada por RTM utilizando este modelo e a Figura 76 mostra a mesma migração. Observando tais Figuras, e tendo em vista que a espessura da anidrita coincide com o comprimento da onda dentro da nossa resolução sísmica, podemos ver que a imagem migrada com o modelo de anidrita (Figura 76) se assemelha em muito ao dado sem esta (Figura 65), diferenciando apenas num evento de maior amplitude (reflexão mais ‘brilhante’) no topo do corpo de sal. Isto elucida uma armadilha comum enfrentada por intérpretes de estruturas de imagens sísmicas de subsuperfícies trabalhando com dados provenientes de bacias evaporíticas.

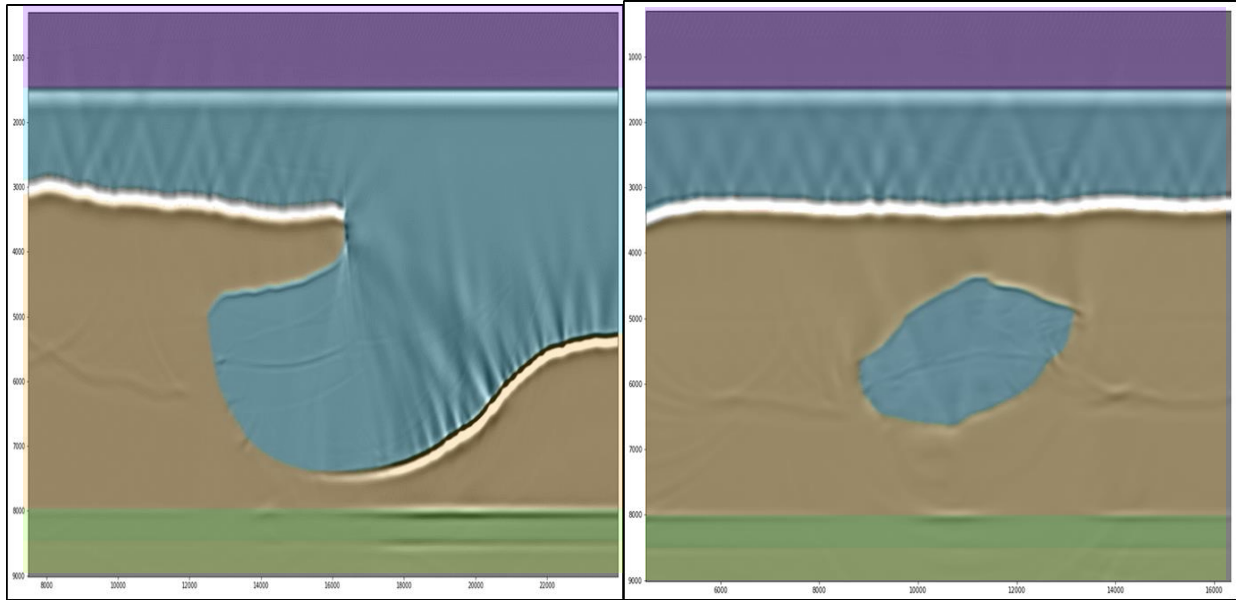


Figura 75: RTM migrado com o modelo simples de rocha capeadora acima do topo do sal e com sobreposição deste. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

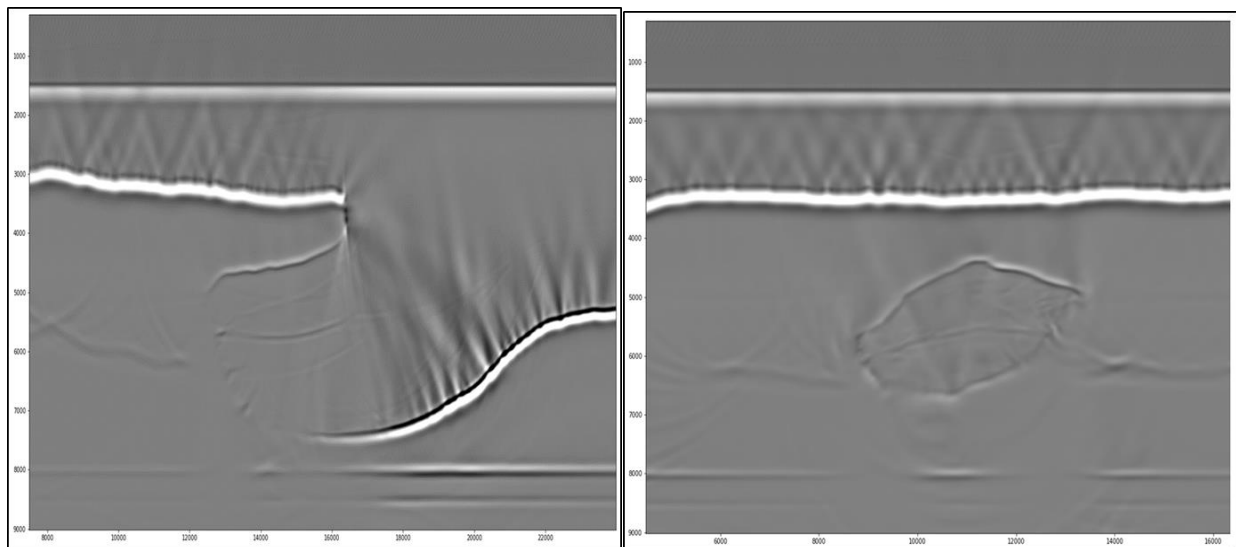


Figura 76: RTM migrado com o modelo simples de rocha capeadora acima do topo do sal. Como a espessura da anidrita coincide com o comprimento de onda da sísmica, podemos ver que a imagem com o modelo de anidrita se assemelha em muito ao dado sem esta (Figura 63), diferenciando apenas na reflexão mais 'brilhante' no topo do corpo de sal. Esta é uma armadilha comum dados provenientes de bacias evaporíticas. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Os testes realizados com os dados gerados a partir do modelo de referência foram: topo do sal interpretado desprezando a existência da rocha capeadora de anidrita, conforme modelo ilustrado na Figura 77, e interpretação do topo do sal abaixo da reflexão da anidrita, conforme modelo ilustrado na Figura 80.

No primeiro caso, embora a velocidade do sal seja menor do que a da anidrita, ainda assim é rápida o suficiente para solucionar razoavelmente o modelo de sal, apesar de percebermos uma leve diminuição da energia da base do sal abaixo da anidrita erroneamente interpretada (Figura 78 e Figura 79). Esta é uma estratégia algumas vezes usada pela indústria para processamentos rápidos quando se desconfia da presença de anidrita logo acima do topo do sal nos domos e/ou mini-bacias, mas não há ferramentas (como dados de poços, testes de atributos ou técnicas de inversão) ou tempo suficiente para embasar esta teoria e incluir a velocidade de carbonatos e/ou anidrita no modelo. Desta forma, tais eventos são deliberadamente inseridos no sal durante a construção do modelo de velocidade.

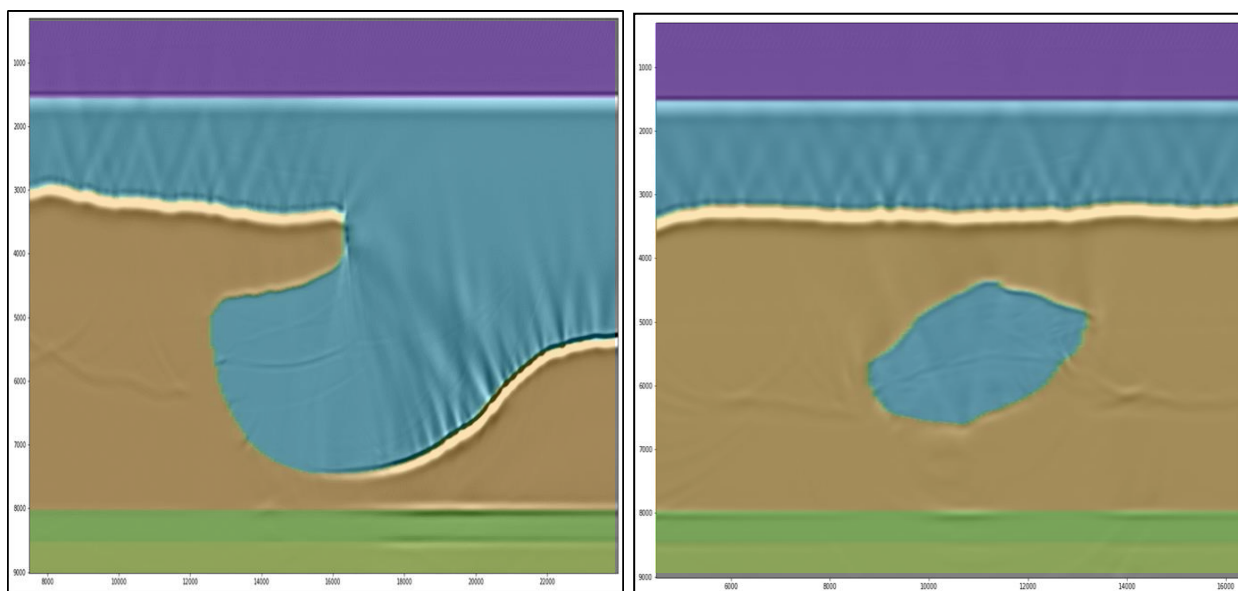


Figura 77: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) sobreposto do modelo simples com interpretação do topo do sal englobando a anidrita. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

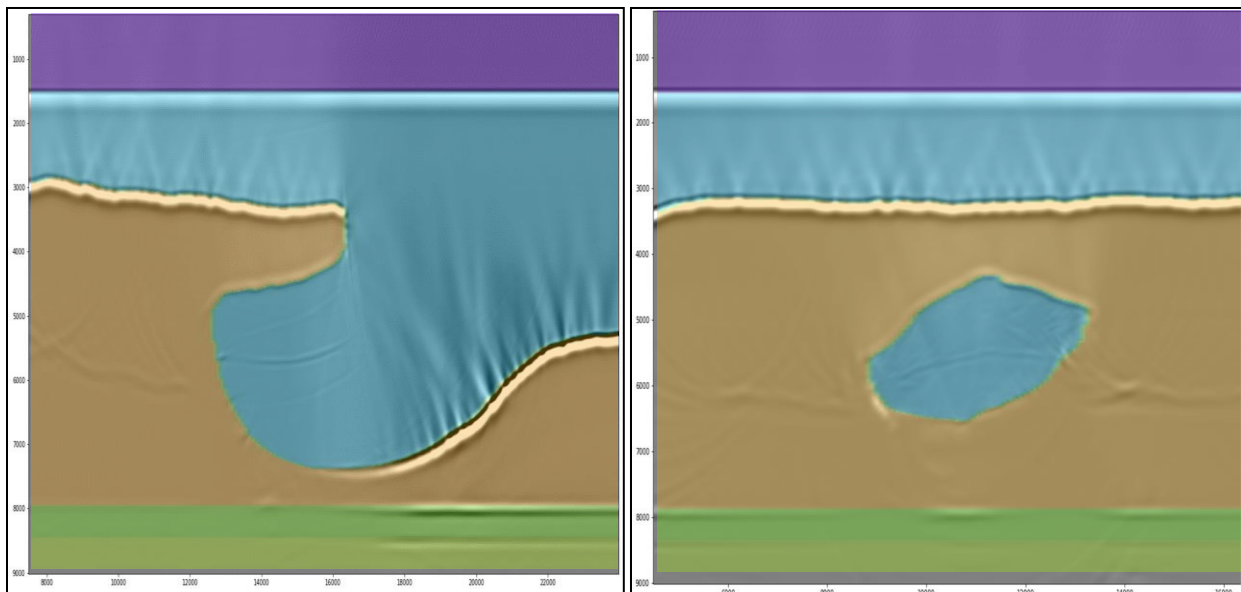


Figura 78: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal englobando a anidrita e sobreposto por este. Esta interpretação soluciona razoavelmente o modelo de sal, embora percebamos uma leve diminuição da energia da base do sal abaixo da anidrita erroneamente interpretada. Esta é uma estratégia algumas vezes usadas pela indústria para processamentos rápidos. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

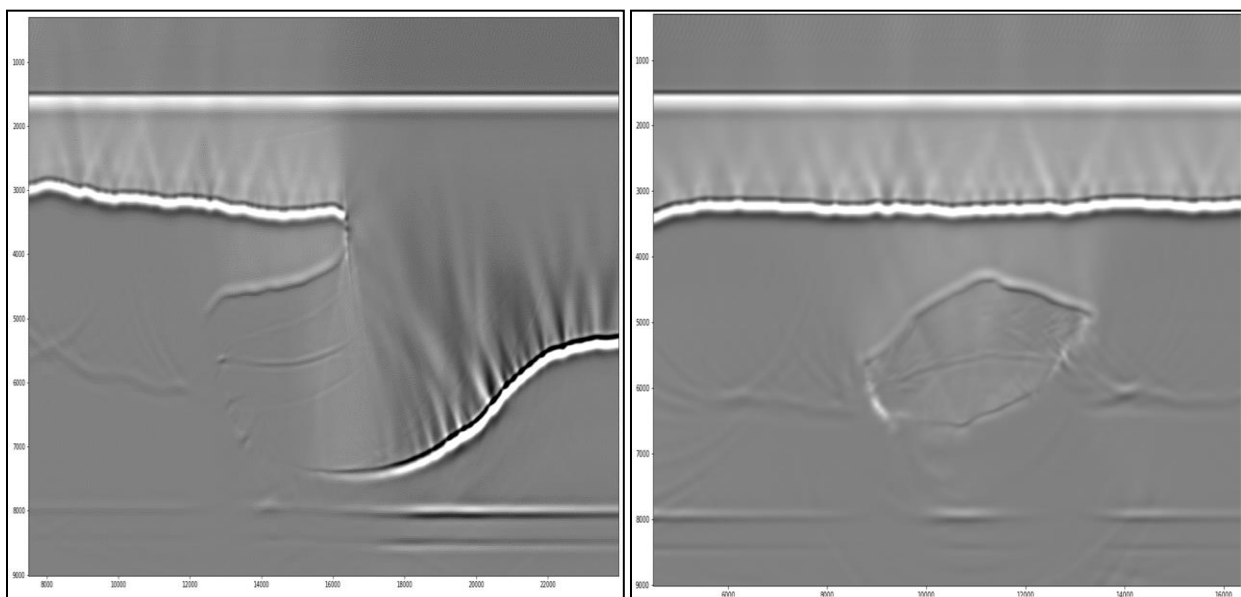


Figura 79: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal englobando a anidrita. Esta interpretação soluciona razoavelmente o modelo de sal, embora percebamos uma leve diminuição da energia da base do sal abaixo da anidrita erroneamente interpretada. Esta é uma estratégia algumas vezes usadas pela indústria para processamentos rápidos. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Já no segundo caso, com interpretação abaixo da anidrita, ou seja, no do topo do sal com velocidade da halita, vemos uma piora mais evidente da base e do próprio topo do sal ao atribuímos uma velocidade muito mais baixa à rocha capeadora acima do sal (Figura 81e Figura 82). Neste caso vemos um puxão pra cima (*pull-up*) da base e uma piora do topo do sal. Isso apresenta um indício de erro na velocidade que deveria guiar a construção do modelo a uma nova interpretação do sal.

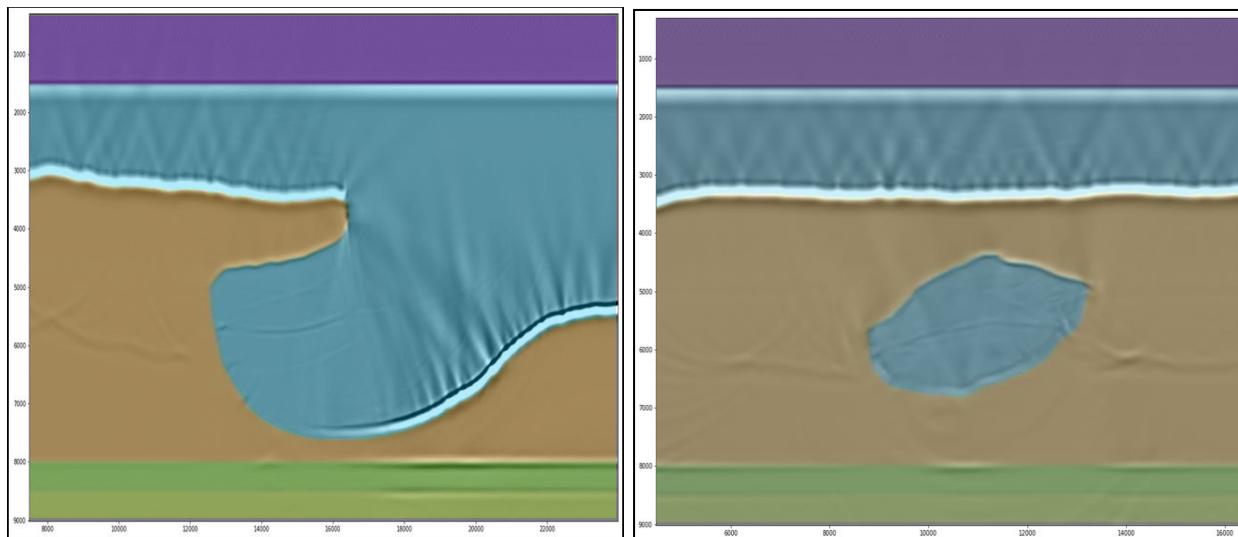


Figura 80: RTM (migrado com o modelo de velocidade correto) sobreposto do modelo simples com interpretação do topo do sal abaixo da anidrita. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

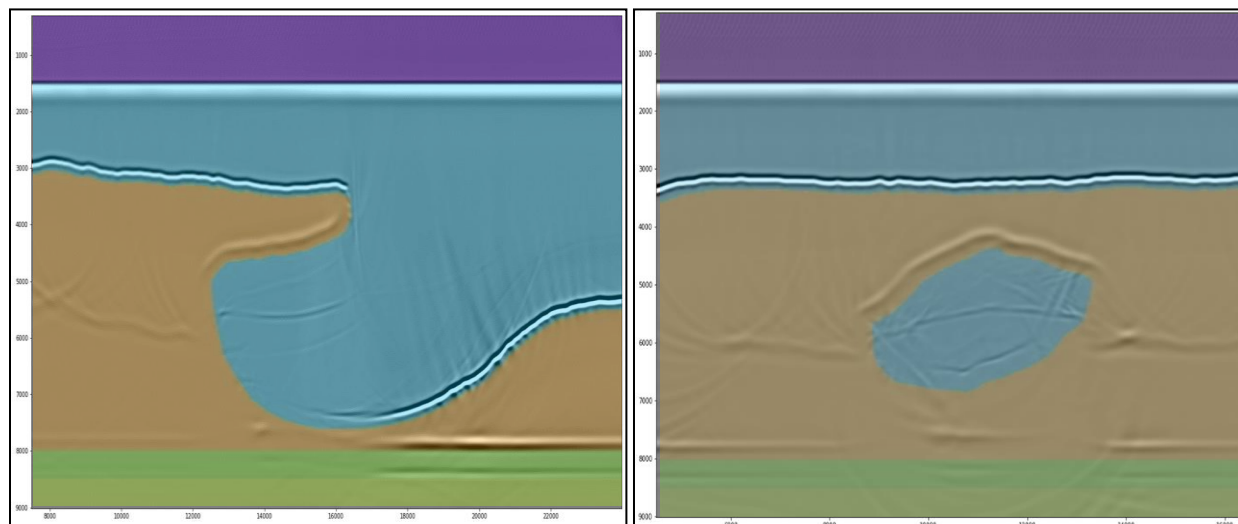


Figura 81: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal abaixo da anidrita e sobreposto por este. Neste caso vemos um um puxão pra cima (*pull-up*) da base e uma piora do topo do sal ao atribuímos uma velocidade muito baixa à rocha capeadora acima do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

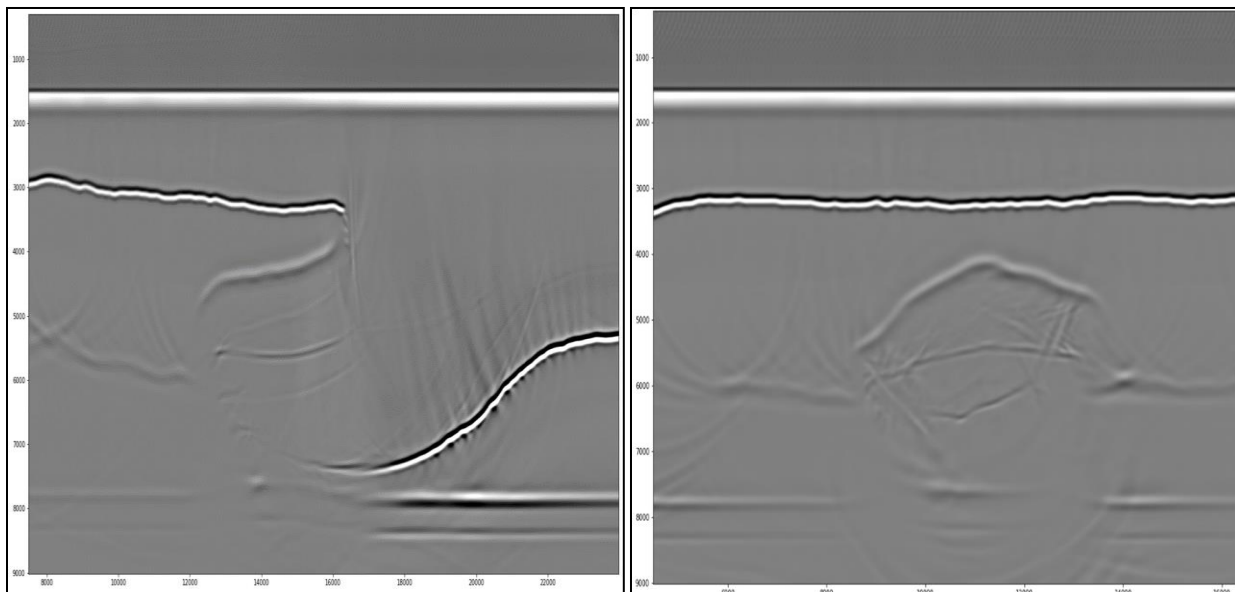


Figura 82: RTM migrado com o modelo simples de interpretação do topo do sal abaixo da anidrita. Neste caso vemos um puxão pra cima (*pull-up*) da base e uma piora do topo do sal ao atribuirmos uma velocidade muito baixa à rocha capeadora acima do sal. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou sinteticamente efeitos que podem ocorrer no imageamento sísmico, devido às incertezas na construção de modelos de velocidades de subsuperfícies complexas, profundas e com altos contrastes de velocidades. Além de utilizar a abordagem convencional de atualização de cima para baixo, ressaltou-se a recente tendência de incluir a este fluxo, interpretação geológica das estruturas por especialistas com conhecimento das bacias.

O experimento utilizou três casos: o primeiro ilustrou de forma geral o funcionamento da metodologia de construção de cima para baixo com integração de interpretação, o segundo o impacto na migração resultante quando há erros de valores de velocidades no modelo, impactando o posicionamento verdadeiro do refletor, e o terceiro ilustrou uma incerteza/armadilha clássica, em que uma rocha de anidrita capeando o topo sal gera ambiguidade na interpretação estrutural, devido ao evento migrado possuir profundidade que coincide com o comprimento de onda do topo do sal. Para este trabalho também houve elaboração dos modelos com cenários geológicos de interesse, como *overhang* e pacote de sedimentos encapsulados no sal e dados sintéticos, além de geração dos dados através do método de diferenças finitas.

A fim de uma compreensão ampla sobre esta metodologia de atualização de modelos de velocidades, foi realizado um levantamento de estudo sobre a geologia das bacias de margem atlântica divergente, ressaltando cenários incluindo rochas evaporíticas de formato complexos, que representam desafios significativos para o imageamento. Além disso, também foram abordados conhecimentos sobre o ferramental

de processamento sísmico, como técnicas de migrações e inversões amplamente utilizadas na indústria.

Em suma, devido às várias suposições limitantes dos esquemas de migração disponíveis, é importante associar a complexidade do algoritmo ao nível de complexidade do problema geológico. Precisamos estar cientes de que diferentes algoritmos de migração são baseados em várias simplificações matemáticas da equação da onda acústica e fazem suposições diferentes sobre o comportamento da subsuperfície. Essas suposições limitantes podem ter consequências não desejáveis se estivermos usando um determinado algoritmo como parte do ciclo de atualização do modelo em um projeto de criação de imagens. Precisamos combinar o desempenho do algoritmo que selecionamos com a complexidade do modelo de subsuperfície que esperamos construir.

Desenvolvimentos recentes na aquisição, no processamento e em técnicas de inversão estão ajudando a produzir imagens cada vez melhores, incluindo aquelas de corpos salinos. No entanto, esses avanços na tecnologia ainda podem cair nas armadilhas descritas aqui. Seria prudente que os intérpretes considerassem essas questões quando decidissem o grau de credibilidade de uma dada imagem, para ajudar a fazer suas avaliações prospectivas.

Além disso, como pode ser visto em Marpeau e Belz (2019), com a esperança de diminuir o esforço de interpretação em cada projeto, novas abordagens atuais que vêm crescendo, são: permitir que os algoritmos de inversão de velocidade desenvolvidos recentemente corrijam as imprecisões de interpretação do sal ao inserir a velocidade do sal adequada, ao invés de uma velocidade constante, sempre que necessário; e desenvolvimentos futuros que incluem algoritmos de aprendizado de máquina e que podem ajudar os intérpretes experientes a se concentrarem em áreas mais subjetivas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAYSAL, E., KOSLOFF, D., and SHERWOOD, J.W.C. **Reverse time migration**. Geophysics, no 48, p.1514–1524. 1983.

BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI R. M. e GONÇALVES J. H. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. CPRM, Brasília, 2003.

BULCÃO, A. **Modelagem e migração reversa no tempo empregando operadores elásticos e acústicos**. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

CLAERBOUT J. **Imaging the Earth's interior**. Oxford: Blackwell; 1985.

DIAS, B. P., BULCÃO, A. e FILHO, D. M. S. **Full Waveform Inversion: Introdução e Aplicações**. VII Semana de Inverno de Geofísica; IMECC/UNICAMP. 2016.

DIX, e.H. **Seismic velocities from surface measurements**. Geophysics, no 20; p. 68-86. 1955.

GEORGEA, M., OLAKUNLE, O. K., EMI, J. S., ABRAHAMSON P..**Seismic interpretation and characterization of anhydrite caprocks in the Tromsø Basin, SW Barents Sea**. Marine Geology 390, p 36-50. 2017.

GRAY, S. H., ETGEN, J., DELLINGER, J. and WHITMORE, D. **Seismic migration problems and solutions**. Geophysics, Volume 66, no. 5; p. 1340-1649. Sep 2001.

HELBIG, K. **Foundations of anisotropy for exploration seismics**. Elsevier Science Publisher, 1994.

HU, W., CHEN, J., LIU, J., ABUBAKAR, A. **Retrieving Low Wavenumber Information in FWI: An Overview of the Cycle-Skipping Phenomenon and Solutions**. IEEE Signal Processing Magazine, Volume: 35, March 2018.

JONES I. F. and DAVISON, I.. **Seismic imaging in and around salt bodies**. ION GX. 2014

JONES, I. F.. **An Introduction to: Velocity Model Building**. EAGE Publications bv. 3990 HOUTEN, The Netherlands. 2010.

KARSOU, A. A. **Aceleração dos Algoritmos de Modelagem Acústica e Elástica e da Inversão do Campo de Onda Completo (FWI) em GPU utilizando OpenACC**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Fluminense, 2020.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. **Geofísica de Exploração**, [s. 1], Oficina de Textos. 2009.

KUKLA, P. A., STROZYK, F., MOHRIAK, W. U.. **South Atlantic salt basins – Witnesses of complex passive margin evolution**. Elsevier: Gondwana Research 53, p. 41–57. 2018.

LUMB, I. **Reverse Time Migration via Resilient Distributed Datasets: Towards In-Memory Coherence of Seismic-Reflection Wavefields using Apache Spark**. Montreal – HPCS, 2015.

MA, Y.. **Full waveform inversion with image-guided gradient**. Master of Science Thesis. Center for Wave Phenomena – Colorado School of Mines Golden, Colorado; May 12, 2010.

MACPHERSON, D.S.. **Migration In a Nutshell**. © SlidePlayer.com Inc. 2019.

MARGRAVE, G. F., INNANEN, K., and YEDLIN, M.. **A Perspective on Full-Waveform Inversion**. CREWES Research Report — Volume 24, 2012.

MARPEAU, F., BELZ, V.. **Status of salt interpretation for velocity model building in Brazilian basins**. 16^o Congresso Internacional da Sociedade Geofísica Brasileira, realizado no Rio de Janeiro, Brasil, de 19 a 22 de agosto de 2019.

MOHRIAK, Webster. SZATMARI, Peter. Anjos, Sylvia. **Sal: geologia e tectônica**. São Paulo: Beca Edições Ltda 2008.

NÄSHOLM S. P. and HOLM S., "On a Fractional Zener Elastic Wave Equation," **Fract. Calc. Appl. Anal.** Vol. 16, No 1; pp. 26-50. 2013

NOLET, G. **Seismic wave propagation and seismic tomography**. Seismology and Exploration Geophysics, vol 5. Springer, Dordrecht. D. Reidel Publishing Company 1987.

PANTIN, E. D.. **Understanding the reverse time migration backscattering: Noise or signal?** Master of Science Thesis – Geophysics. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines. January 31, 2014

REYNOLDS, D. D.. (1981). **Engineering Principles in Acoustics**, Allyn and Bacon Inc., Boston. Egham, Technology EAME, UK. Earthmoves Ltd., Camberley. Interpretation, Vol. 2, No. 4; p. SL1–SL20, 28 FIGS., 1 TABLE. November 2014.

SCALES, J. A.. **Theory of Seismic Imaging**. Colorado School of Mines. Samizdat Press, 1997.

SCHNEIDER, W. A. **Integral formulation for migration in two and three dimensions.** Geophysics, Volume 43, no. 1; p. 3-229. Feb 1978.

TARANTOLA, A. **Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation.** Geophysics, vol. 49, no. 8; p. 1259-1266. August 1984.

THOMSEN, L. **Weak elastic anisotropy.** Geophysics, 51, No. 10, 1954-1966. 1986.

VIGH, D., STARR W. E. and KAPOOR, J.. **Developing Earth models with full waveform inversion.** WesternGeco. The Leading Edge April 2009.

VIRIEUX, J. and OPERTO, S. **An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics.** Geophysics, vol. 74, no. 6; p. wcc127–wcc152, 15 figs., 1table.10.1190/1.3238367. November-December 2009.

WEHNER, D.. **A combined elastic waveform and gravity inversion for improved density model resolution.** Christian-Albrechts-Universität, DGG-Tagung Hannover. 2015.

YILMAZ, O. **Seismic Data Processing.** Society of Exploration Geophysicists - SEG, Tulsa, 1987.

ZHOU, H. *et al.* **Reverse time migration: A prospect of seismic imaging methodology.** Earth-Science Reviews, Volume 179, Pages 207-227. April 2018.

APÊNDICE A

A.1. CRIAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos de velocidade de referência foram criados a partir de um volume vazio criado no software geofísico Hampson Russell, da empresa CGG, com licença disponibilizada para os alunos do Grupo de Imageamento Sísmico e Inversão Sísmica (GISIS) da UFF. A princípio, esse volume fora inundado com velocidade constante de 1.500 m/s (Figura A 1) e depois, utilizando outro software geofísico de interpretação, o Petrel, da companhia Schlumberger, também com licenças disponibilizadas para o grupo de pesquisa GISIS, foram criados horizontes constantes como o fundo marinho, a base do sal e um refletor no pre-sál. De volta ao Hampson Russell, foram inseridas velocidades constantes a partir desses horizontes, como, por exemplo, 2.000 m/s abaixo do topo do mar, 4.000 m/s após a base do sal e uma deliberada inversão de velocidade de 3.800 m/s depois do refletor do pré-sal (Figura A 2).

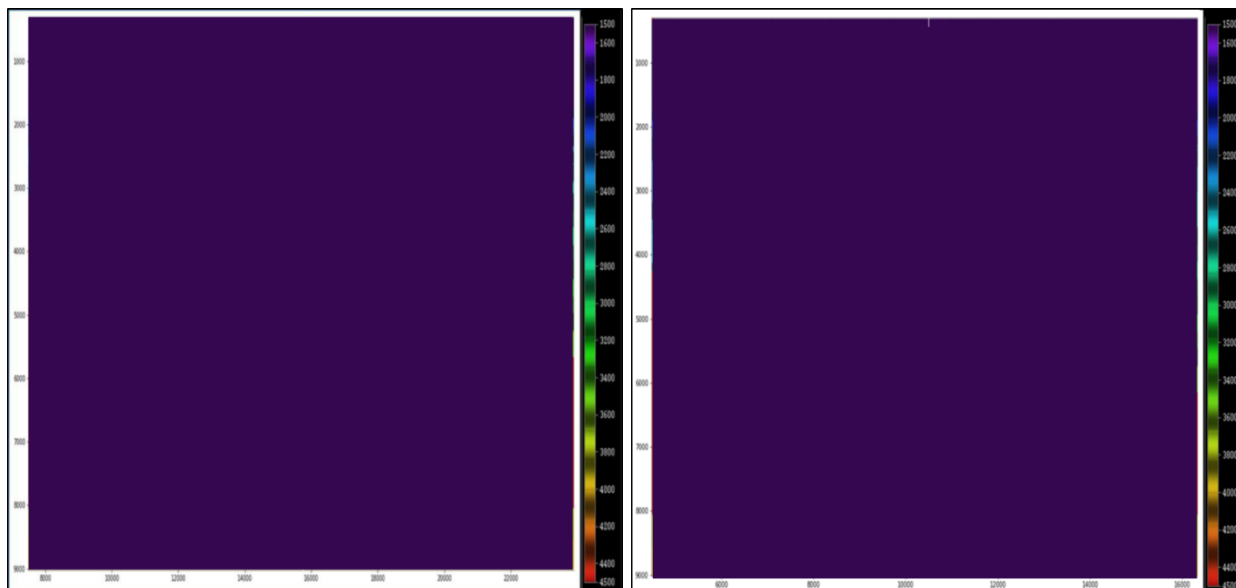


Figura A 1: Modelo de velocidade preenchido com uma velocidade constante de 1500 m/s. a) Vista do 'Overhang'; b) Vista Sedimento Encapsulado

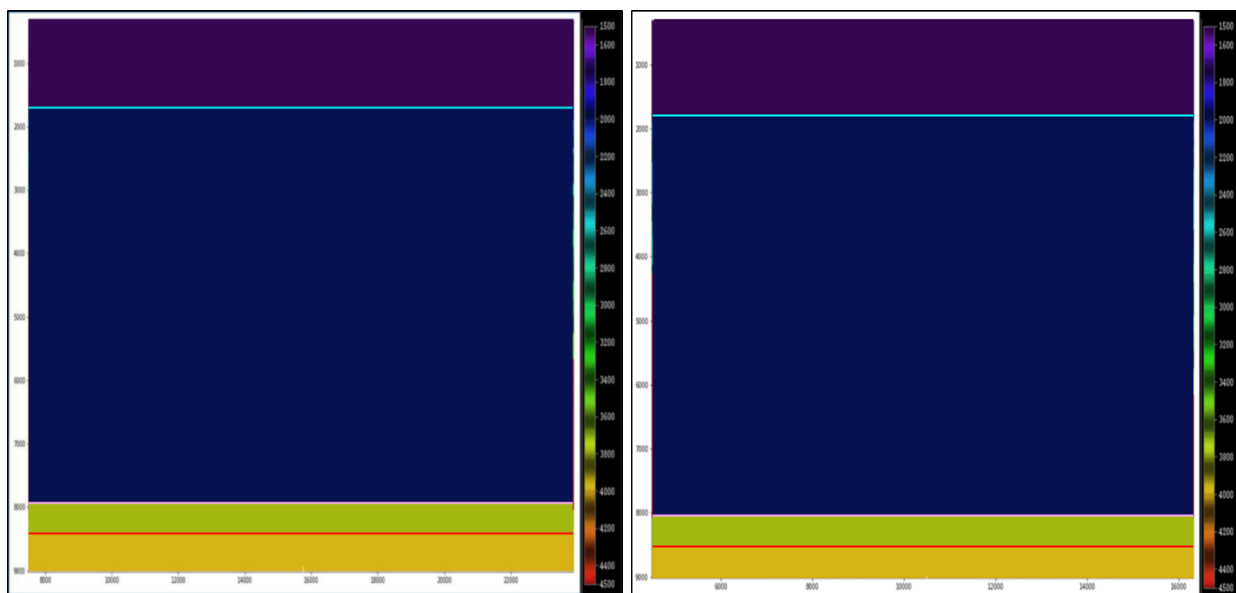


Figura A 2: Criação dos horizontes constantes como o fundo marinho, a base do sal e um refletor no pré-sal, e posterior inserção de velocidades constantes a partir desses horizontes, como, 2.000 m/s abaixo do topo do mar, 4.000 m/s após a base do sal e uma deliberada inversão de velocidade de 3.800 m/s depois do refletor do pré-sal. a) Vista do 'Overhang'; b) Vista Sedimento Encapsulado

Posteriormente, a forma do sal apresentando a crista do ‘*Overhang*’ e uma parede de sal com sedimento encapsulado na direção transecta é desenhada com horizontes de forma deliberada pelo próprio autor, representando essa geometria “genérica” da tectônica de sal das bacias brasileiras, na qual, fora inserida uma velocidade constante do sal de 4.500 m/s (Figura A 3).

Depois disso, horizontes subsequentes dentro da camada de sedimentos foram interpretados no Petrel (ou criados/desenhados) de forma deliberada/“intuitiva” seguindo uma sequência deposicional/estratigráfica lógica (Figura A 4), inclusive seguindo a tectônica do sal até alcançar seu topo. Novamente com o Hampson Russell, nesse pacote sedimentar, a velocidade varia de 2.000 m/s à 3550 m/s distribuídos dentre as 21 camadas sedimentares utilizando um gradiente de 75 m/s, até chegarmos ao modelo apresentado na Figura 16. A secção do *overhang* tem uma extensão de 26.600 m, a secção transecta uma dimensão de 20.800 m, e a profundidade máxima é de 9.000 m.

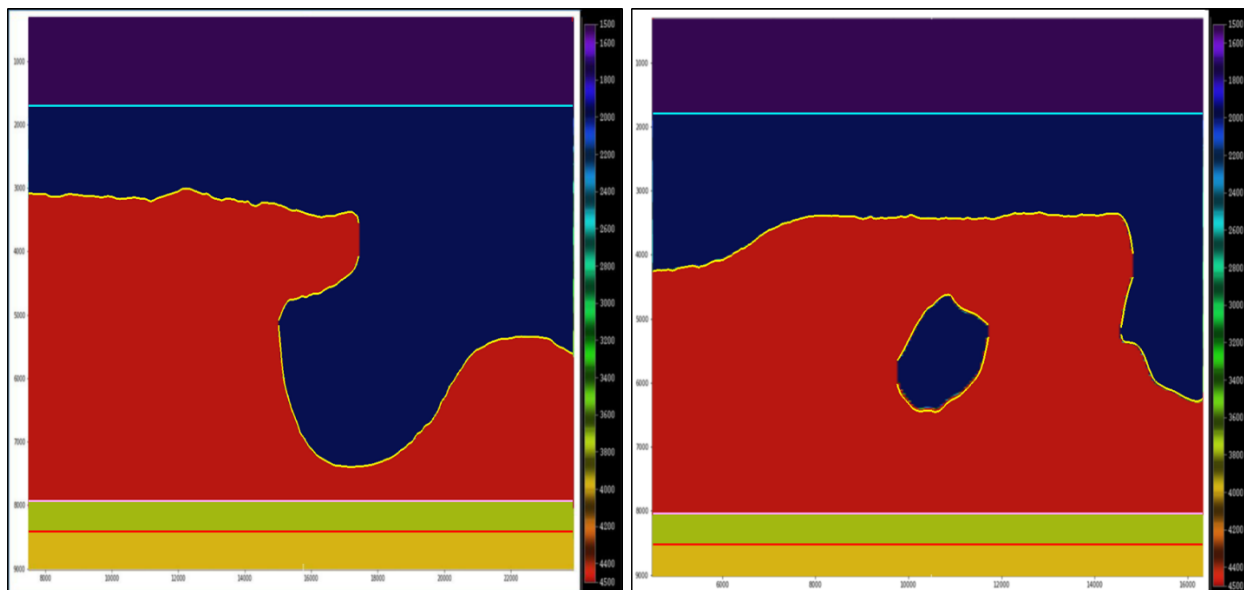


Figura A 3: Criação dos horizontes representando essa geometria “genérica” da tectônica de sal das bacias brasileiras e mostrando uma forma do sal apresentando uma crista (*overhang*) Vista da secção do *overhang* desenhada pelo próprio autor (horizontes amarelos), a qual é inserida uma velocidade constante de 4.500 m/s (em vermelho). a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

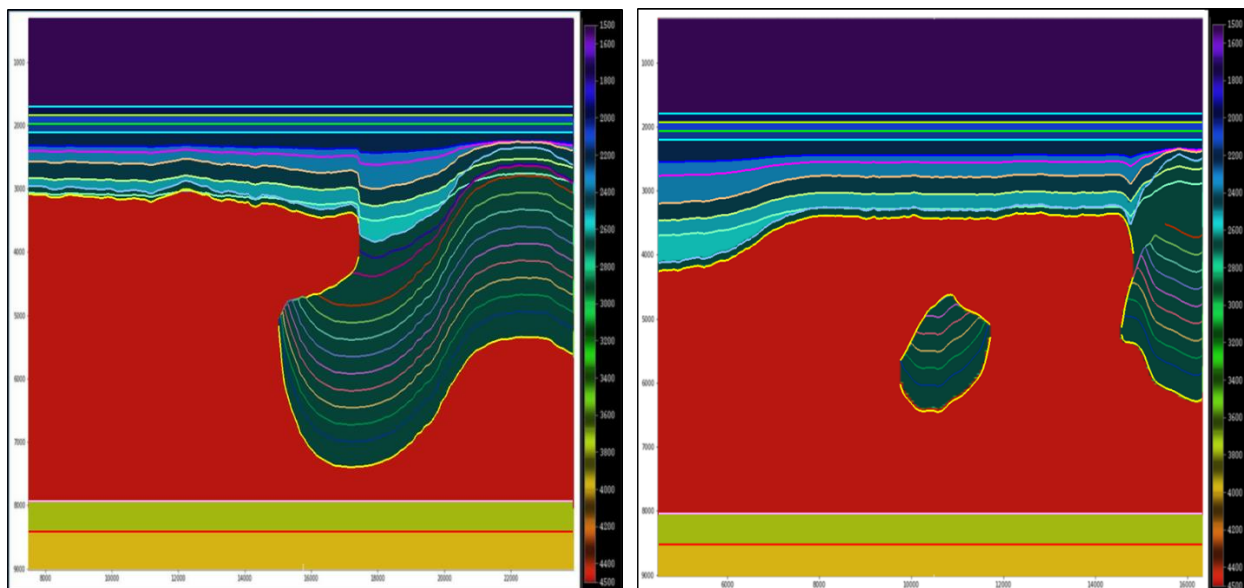


Figura A 4: Horizontes subsequentes criados seguindo uma sequência deposicional/estratigráfica lógica, e a velocidade variando de 2.000 a 3550 m/s distribuídos dentre camadas sedimentares com um gradiente de 75 m/s seguindo a tectônica do sal até alcançar seu topo. a) Vista do *Overhang*; b) Vista Sedimento Encapsulado

Este modelo estratificado serve de base para a modelagem do nosso dado sintético que representará nosso dado de referência “aquisitado” (Figura 25-28), o qual usaremos no contexto da construção do modelo de velocidade (VMB) pela abordagem de cima para baixo. Diferentes modelos de “inundação” (*‘floods’*), abordados nos resultados, foram construídos seguindo a sequência de etapas descritas na seção 5.1, os quais procuram reconstruir nosso modelo original (Figura 16) baseados na metodologia segundo a abordagem de cima pra baixo (*Top-down approach*). É importante ressaltar, como já dito na seção 3.3, que nenhum método de inversão foi efetivamente aplicado durante este trabalho, mas foram criados modelos de velocidade que simularam – suavizando-se e fazendo algumas modificações no modelo construído – os aspectos das perturbações gerados pelos métodos de inversão.

Os modelos a serem usados nos testes de erros de velocidade e interpretação, assim como o cenário da “armadilha” da rocha capeadora acima do sal seguiram a mesma lógica da técnica descrita aqui. Os horizontes constantes do fundo marinho, da base do sal, o refletor no pre-sál e a geometria do sal apresentando uma crista na visão do *overhang* e uma parede de sal com um sedimento encapsulado na secção transecta

são exatamente as mesmas (Figura 17-19). A diferença, como dito previamente, é que não são utilizados horizontes representando estratificação na camada de sedimentos do pós-sal, no intuito de facilitar a criação dos diferentes modelos com velocidades e interpretação erradas para os testes de imageamento.

Dois modelos em questão servem como entrada para a modelagem de seus respectivos dados sintéticos, os quais irão representar nossos dados de referência. O primeiro desses modelos possui uma lâmina d'água de 1.500 m/s, um sedimento com velocidade constante de 2.500 m/s, o corpo de sal com 4.500 m/s, e um pré-sal com velocidades de 3.800 m/s e 4.000 m/s (Figura 17). O segundo modelo se assemelha muito àquele, exceto por uma camada de 200m de espessura de anidrita com 6.500 m/s de velocidade logo acima do domo de sal (Figura 21).