



**ANÁLISE TECTONO-ESTRATIGRÁFICA DO MEMBRO MUCURI NO
CUBO SÍSMICO 3D FAZENDA CEDRO SUL, APTIANO DA BACIA DO
ESPÍRITO SANTO**

FERNANDO RUBBO TRAMONTINA

**ANÁLISE TECTONO-ESTRATIGRÁFICA DO MEMBRO MUCURI NO
CUBO SÍSMICO 3D FAZENDA CEDRO SUL, APTIANO DA BACIA DO
ESPÍRITO SANTO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Kuchle

Porto Alegre, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**Reitor:** Rui Vicente Oppermann**Vice-Reitor:** Jane Tutikian**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS****Diretor:** André Sampaio Mexias**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Tramontina, Fernando Rubbo

Análise Tectono-estratigráfica do Membro Mucuri no cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul, Aptiano da Bacia do Espírito Santo . / Fernando Rubbo Tramontina. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. [112 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Juliano Kuchle

1. Evolução tectono-estratigráfica 2. Sismoestratigrafia 3. Controle estrutural 4. Membro Mucuri I. Título.

CDU 55

Catalogação na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. T. Binotto

CRB 10/1743

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **ANÁLISE TECTONO-ESTRATIGRÁFICA DO MEMBRO MUCURI NO CUBO SÍSMICO 3D FAZENDA CEDRO SUL, APTIANO DA BACIA DO ESPÍRITO SANTO**, elaborado por FERNANDO RUBBO TRAMONTINA, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Dra. Ana Karina Scomazzon

Dr. Anderson José Maraschin

Dra. Renata dos Santos Alvarenga

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Olido Tramontina e Noeli Marta Rubbo Tramontina. Vocês constituem a minha base mais forte e são os maiores responsáveis por essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e mais importante, agradeço aos meus pais, Olido e Noeli, pelo apoio incondicional durante toda a graduação e por me mostrar a verdadeira importância da família na construção das pessoas. Ao meu irmão, Felipe, pelo companheirismo e pelos intensos debates, que também possuem importantíssimo papel na construção de muitos dos meus valores e opiniões.

Agradeço a BG/Shell pelo financiamento e suporte ao presente trabalho, no âmbito do Projeto Estudo geológico integrado da Formação Mucuri, Bacia do Espírito Santo (contrato UFRGS/FEENG/BG), sob as cláusulas de investimento em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação das Participações Especiais reguladas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Agradeço a cada professor da UFRGS, que de alguma forma, contribuiu para a evolução do meu conhecimento nas geociências ao longo destes cinco anos de curso. Em especial ao meu orientador, Professor Juliano Kuchle, por todos os ensinamentos, pela paciência, pela didática, pelas várias oportunidades (em especial à viagem para a Itália) e pela objetividade durante todo o período de bolsa e de realização deste trabalho. Ao Professor Heinrich Theodor Frank, por proporcionar o meu primeiro contato com o mundo da pesquisa acadêmica, e ao Professor Ruy Paulo Philipp, pela primeira oportunidade de bolsa de IC.

Agradeço a todos os meus colegas de graduação que me ajudaram de alguma forma. Em especial aos “geobrothers” (Manuella, Rafael, Luan, Erik, Camila, Natália, Joana e Luís), pela forte amizade consolidada desde as primeiras semanas do curso, exemplificada através de um excepcional companheirismo e apoio ao longo de toda a graduação. Às amigadas dos Excelentíssimos Senhores Kelyn, Bender, Henrique e Miguel, construídas mais tardiamente no curso, mas que também foram essenciais. Sem a amizade e o apoio de todos vocês, não sei se teria conseguido chegar até o final do curso.

A todo o pessoal da Estratigrafia, em especial à Patrícia e à Renata, por todos os ensinamentos, principalmente em relação ao Illustrator e ao Petrel, sem os quais não poderia ter feito esse trabalho. Aos demais colegas de sala, especialmente ao Luan, por toda ajuda e companheirismo, e à Tati, pelo auxílio no ArcGis. Ao Carlinhos e à Luciane pela solução de todos os problemas burocráticos, e ao Rodrigo por sempre manter o meu computador funcionando.

“Todos os homens têm, por natureza,
desejo de conhecer.”

Aristóteles - Τὰ μετὰ τὰ φυσικά

RESUMO

A compreensão da evolução tectono-estratigráfica dos estágios finais da fase rifte e iniciais da fase pós-rifte das bacias da margem continental brasileira é de grande importância, já que importantes reservatórios de hidrocarbonetos, no Brasil e no mundo, ocorrem nesse contexto geológico. O presente trabalho visa melhorar a compreensão do estágio pós-rifte da Bacia do Espírito Santo, representado pelo Membro Mucuri, pertencente à Formação Mariricu, de idade Aptiana, no cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul, focando na evolução tectônica do intervalo. O objetivo fundamental deste trabalho é obter um arcabouço tectono-estratigráfico para o intervalo de estudo com ênfase na avaliação da intensidade e da duração da atividade tectônica, bem como a sua relação com a sedimentação do Membro Mucuri. Para isso, realizou-se a interpretação da base e do topo do intervalo e a caracterização das principais falhas contidas no volume sísmico. Posteriormente, escolheram-se 3 linhas *dip* e 2 linhas *strike*, representativas do intervalo, afim de realizar a interpretação de cada linha sísmica separadamente. A interpretação individual constituiu-se em aplicar os métodos da sismoestratigrafia clássica, identificando as terminações das reflexões sísmicas e fazendo a análise de sismofácies. Assim, obteve-se: 4 superfícies estratigráficas, que definiram 5 unidades sismoestratigráficas (US1, US2, US3, US4 e US5); 3 sismofácies (SF1, SF2 e SF3); 5 cartas cronoestratigráficas. A partir destes dados, fez-se a delimitação das unidades ao longo de todo volume sísmico, com o intuito de obtê-las tridimensionalmente, o que permitiu a obtenção dos mapas de isópacas de cada uma das unidades. Os mapas de isópacas serviram de base para a construção dos mapas estruturais de cada unidade sismoestratigráfica. Os mapas estruturais das unidades mostram a localização e as taxas de controle estrutural de cada uma das falhas mapeadas, e sua relação com o mapa de isópacas. Os resultados demonstraram que a atividade tectônica, representada por falhas normais, esteve presente e foi importante em grande parte da deposição do Membro Mucuri. Ela foi muito intensa no início da deposição do intervalo (na US1), ainda como remanescente da fase rifte da bacia, o que gerou uma sedimentação diretamente vinculada às principais falhas identificadas, em estruturas do tipo meio-gráben. A atividade tectônica persistiu durante a deposição da US2 e US3, porém com intensidade moderada, diminuindo também a sua relação com a sedimentação. No final da deposição, na US4 e na US5, a atividade das falhas diminuiu muito, a ponto de se tornar praticamente nula durante a deposição da US5, não apresentando relação com a sedimentação do Membro Mucuri.

Palavras-Chave: Evolução tectono-estratigráfica. Sismoestratigrafia. Controle estrutural. Membro Mucuri. Aptiano.

ABSTRACT

The understanding of tectono-stratigraphic evolution of the final stages of rift phase and the initial stages of post-rift phase of the Brazilian continental margin basins is significant, as important hydrocarbon reservoirs, in Brazil and in the world, occurs in this geological context. This work aims to improve the understanding of the post-rift stage of Espírito Santo basin, represented by Mucuri Member, from Mariricu Formation, Aptian Age, in the Fazenda Cedro Sul 3D seismic cube, focusing in the tectonic evolution of the interval. The main objective of this work is to obtain a tectono-stratigraphic framework for the study interval with emphasis on the evaluation of the intensity and timing of tectonic activity, as well as its relationship with the sedimentation of Mucuri Member. It was driven by interpretation of the base and the top of the interval and the characterization of the main faults within the seismic volume. After this, it was chose 3 dip lines and 2 strike lines, representative of the interval, in order to do an individual seismic interpretation for each seismic line. The individual interpretation consisted in applying the methods of classical sismostratigraphy, identifying the seismic reflection terminations and sismofacies analyses. Thus, was obtained: 4 stratigraphic surfaces, which defined 5 sismostratigraphic units (US1, US2, US3, US4 and US5); 3 sismofacies (SF1, SF2 and SF3); 5 chronostratigraphic charts. With these data, it was made the bounding of the units along the entire seismic volume, producing a tridimensional mapping, which allowed the construction of isopach maps for each seismic unit, in seismic time. The isopach maps were the basis for the construction of the structural maps of each sismostratigraphic unit. The structural maps of the units show the localization and the structural control rate of each mapped faults and your relation with the isopach map. The results showed that the tectonic activity was present, represented by normal faults, and it was important in the most part of the deposition of Mucuri Member. The tectonic activity was very intense at the beginning of the deposition of the interval (in US1), still as remnant of the rift stage of the basin, which generated sedimentation directly linked to the main identified faults, in half-graben structures. The tectonic activity persisted during the deposition of US2 and US3, but with moderate intensity, decreasing its control on sedimentation. In the end of the interval, in US4 and US5, the activity of the faults greatly decreased, becoming inexistent during the deposition of US5, showing no relation with the sedimentation of Mucuri Member.

Key words: Tectonic-stratigraphic evolution. Sismostratigraphy. Structural control. Mucuri Member. Aptian.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Localização do cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul e a respectiva área interpretada. O cubo localiza-se no noroeste da Bacia do Espírito Santo, na porção terrestre da mesma. A figura mostra ainda a localização das 5 linhas sísmicas interpretadas (em vermelho) e dos 2 poços (em azul) com *checkshot* e dados de descrição de amostras de calha, utilizados conjuntamente com a interpretação do dado sísmico.2
- Figura 2:** Mapa de localização da Bacia do Espírito Santo, mostrando o limite norte com a Bacia de Mucuri, o limite oeste com o embasamento cristalino e o limite leste com o Complexo Vulcânico de Abrolhos (extraído de Carvalho, Biassusi & Maciel, 1989, modificado por De Ros *et al.*, 2010).5
- Figura 3:** Carta cronoestratigráfica da Bacia do Espírito Santo, mostrando a evolução temporal e espacial dos depósitos da bacia. O retângulo vermelho indica o intervalo correspondente ao Membro Mucuri (modificado de França *et al.*, 2007).7
- Figura 4:** Padrões de terminação dos refletores nos limites superior (truncamento erosivo, *toplap* e concordante) e inferior (*onlap*, *downlap* e concordante) de uma sequência sísmica / sequência deposicional (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977a).11
- Figura 5:** Tipos de configuração interna das reflexões sísmicas: configurações paralelas, configuração caótica, transparente, divergente, configurações progradantes, configuração *hummocky*, lenticular, segmentado e contorcido (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977b).13
- Figura 6:** Tipos de geometria externa das sismofácies: lençol, lençol ondulado, cunha, banco, lentes; tipos de preenchimento: de canais, de calhas, de bacias e de taludes; tipos de montiformas: generalizada e leque (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977b).14
- Figura 7:** Terminologia do modelo de Bosence (1998) para os estratos depositados em bacias rifte. O preenchimento sedimentar dessas bacias é classificado em estratos depositados durante as fases pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte, separados entre si por discordâncias (modificado de Bosence, 1998).15
- Figura 8:** Modelo de meio-gráben mostrando sua compartimentação e geometria em cunha. A região do meio-grabén que sofre soerguimento é denominada de *footwall*, e a região que sofre subsidência é denominada de *hangingwall*. O ponto que regula a ocorrência de *footwall* ou *hangingwall* é denominado de *tilt point* (extraído de Kuchle, 2004).16
- Figura 9:** Modelo de meio-gráben com terminações laterais em zonas de transferência, com o depocentro principal na porção central da estrutura e com inversão de sentido da falha de borda, gerando uma alternância na direção de assimetria dos meio-grábens conectados (modificado de Rosendahl *et al.*, 1986)...17
- Figura 10:** Modelo de evolução de grandes falhas de borda, a partir da conexão de pequenas falhas isoladas e paralelas pré-existentes. A: criação das pequenas falhas, cada uma com seu deslocamento vertical específico; B: interação e conexão;

C: fim do processo de conexão e formação da falha de borda. Notar que a relação comprimento x deslocamento vertical é a mesma, tanto para as pequenas falhas, quanto para a grande falha de borda (extraído de Gawthorpe & Leeder, 2000).18

Figura 11: Modelo de evolução da bacia e da conexão de pequenas falhas em uma grande falha de borda principal. (a): conexão das falhas conjuntamente com a evolução da bacia, durante um longo período de tempo; (b): conexão rápida das falhas, anterior ao pleno desenvolvimento da bacia associada (extraído de Morley, 2002).20

Figura 12: Modelo de conexão entre duas falhas: a) propagação lateral da falha, sem interações; b) início da interação, ainda fraca; c) interação moderada – desaceleração da propagação lateral e início do acúmulo de deslocamento vertical nos limites laterais das duas falhas; d) interação forte – propagação lateral pequena e deslocamento vertical nos limites laterais altos; e) conexão efetiva – a propagação lateral cessa, aparecem pequenas estruturas de ligação e o deslocamento vertical acumula na região de conexão; f) fim do processo de conexão – consolidação em única falha (extraído de Gupta & Scholz, 2000).20

Figura 13: Cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul. A imagem 1 mostra uma linha *dip* (*inline*) e uma linha *strike* (*xline*) (a linha *dip* possui orientação W-E, enquanto que a linha *strike* possui orientação N-S. A flecha verde indica o Norte). A imagem 2 mostra a localização do poço FIC-0001-ES e a linha sísmica que o contém. A imagem 3 mostra a localização do poço na respectiva linha em detalhe, exibindo os tipos litológicos provenientes dos dados de descrição de amostras de calha e a correspondência com os refletores.23

Figura 14: Seção esquemática da base da bacia do Espírito Santo. A base do Membro Mucuri é constituída ora pelo embasamento cristalino, ora pelo topo da Formação Cricaré, enquanto que o topo é representado homoganeamente pela base da camada de sal (Membro Itaúnas).28

Figura 15: Fragmentos de dois perfis de descrição de testemunho descritos pelo Projeto Mucuri, mostrando a associação de fácies de *canais fluvias* (à esquerda) e a associação de fácies *shoreface inferior / superior dominado por ondas* (à direita).32

Figura 16: Linha sísmica *dip* 70 não interpretada.35

Figura 17: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica *dip* 70.35

Figura 18: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica *dip* 70.36

Figura 19: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica *dip* 70. Detalhe para a localização do poço 1FIC-0001-ES, utilizado na correlação.36

Figura 20: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica *dip* 70, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.37

Figura 21: Linha sísmica *dip* 110 não interpretada.40

Figura 22: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica <i>dip</i> 110.....	40
Figura 23: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica <i>dip</i> 110.	41
Figura 24: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica <i>dip</i> 110.	41
Figura 25: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica <i>dip</i> 110, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.	42
Figura 26: Linha sísmica <i>dip</i> 190 não interpretada.....	45
Figura 27: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica <i>dip</i> 190.....	45
Figura 28: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica <i>dip</i> 190.	46
Figura 29: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica <i>dip</i> 190.	46
Figura 30: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica <i>dip</i> 190, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.	47
Figura 31: Linha sísmica <i>strike</i> 380 não interpretada.	50
Figura 32: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica <i>strike</i> 380.	50
Figura 33: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica <i>strike</i> 380.....	51
Figura 34: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica <i>strike</i> 380.	51
Figura 35: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica <i>strike</i> 380, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.	52
Figura 36: Linha sísmica <i>strike</i> 500 não interpretada.	54
Figura 37: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica <i>strike</i> 500.	54
Figura 38: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica <i>strike</i> 500.....	55
Figura 39: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica <i>strike</i> 500.	55
Figura 40: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica <i>strike</i> 500, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.	56

- Figura 41:** Visualização da interpretação sísmica tridimensional do volume sísmico. A imagem 1 mostra o mapeamento da base e do topo do Membro Mucuri em todas as linhas selecionadas e a configuração tridimensional de todas as falhas interpretadas. A imagem 2 mostra todas as superfícies identificadas, depois da interpolação em todas as linhas. Em ambas as imagens, é possível ver a localização dos dois poços (1ATV-0002-ES e 1FIC-0001-ES), utilizados conjuntamente com a interpretação sísmica. A flecha verde indica o Norte.58
- Figura 42:** Mapa da superfície de base do Membro Mucuri no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).....59
- Figura 43:** Mapa da superfície de topo do Membro Mucuri no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).....60
- Figura 44:** Mapa de isópacas do intervalo sísmico analisado, mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras, bem como a extensão lateral total do intervalo.....62
- Figura 45:** Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 1 (US1), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.64
- Figura 46:** Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).65
- Figura 47:** Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.67
- Figura 48:** Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).68
- Figura 49:** Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.70
- Figura 50:** Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).71
- Figura 51:** Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.73
- Figura 52:** Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).74
- Figura 53:** Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.76

- Figura 54:** Metodologia utilizada para obter a taxa de controle estrutural em cada uma das falhas, de cada unidade sismoestratigráfica, e o padrão de escrita definido para a expressão dos dados.78
- Figura 55:** Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 1 (US1), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.81
- Figura 56:** Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.83
- Figura 57:** Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.85
- Figura 58:** Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.87
- Figura 59:** Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.89

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1:** Parâmetros das reflexões sísmicas utilizados na identificação de sismofácies e suas respectivas interpretações geológicas (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977b).12
- Quadro 2:** Arcabouço estratigráfico do intervalo analisado, constando os limites de base e de topo e a compartimentação interna interpretada, incluindo superfícies e unidades identificadas.28
- Quadro 3:** Sismofácies interpretadas, mostrando os parâmetros sísmicos definidores de cada uma das sismofácies, exemplos, litologias interpretadas a partir da correlação com os poços e as respectivas interpretações dos sistemas deposicionais.30
- Quadro 4:** Evolução simplificada da atividade tectônica durante a deposição do Membro Mucuri e os respectivos padrões estruturais de sedimentação.90

LISTA DE SIGLAS

ms – milissegundos

US1 – Unidade Sismoestratigráfica 1

US2 – Unidade Sismoestratigráfica 2

US3 – Unidade Sismoestratigráfica 3

US4 – Unidade Sismoestratigráfica 4

US5 – Unidade Sismoestratigráfica 5

SF1 – Sismofácies 1

SF2 – Sismofácies 2

SF3 – Sismofácies 3

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Localização	1
1.2 Problemática científica	2
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Objetivos	4
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1 Bacia do Espírito Santo e Membro Mucuri.....	5
2.2 Sismoestratigrafia	9
2.3 Modelo de evolução tectono-estratigráfica de bacias rifte – Bosence (1998)	14
2.4 O meio-gráben: unidade deposicional fundamental de bacias rifte	15
2.5 Nascimento e evolução de falhas normais.....	17
3. METODOLOGIA	21
3.1 Pesquisa e revisão bibliográfica.....	21
3.2 Carregamento dos dados e interpretação preliminar	21
3.3 Sismoestratigrafia: interpretação das terminações dos refletores.....	24
3.4 Sismoestratigrafia: interpretação de sismofácies	24
3.5 Elaboração de diagramas cronoestratigráficos	25
3.6 Elaboração de mapas de isópacas e mapas estruturais	25
3.7 Modelo estrutural integrado.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Interpretação sismoestratigráfica	27
4.1.1 Arcabouço estratigráfico	27
4.1.2 Sismofácies.....	29
4.1.3 Linha sísmica <i>DIP 70</i>	33
4.1.4 Linha sísmica <i>DIP 110</i>	38
4.1.5 Linha sísmica <i>DIP 190</i>	43
4.1.6 Linha sísmica <i>STRIKE 380</i>	48

4.1.7	Linha sísmica <i>STRIKE</i> 500	53
4.2	Mapeamento sísmico	57
4.2.1	Superfície topo do embasamento / topo da Formação Cricaré.....	59
4.2.2	Superfície base do sal.....	60
4.2.3	Mapa de Isópacas do intervalo	61
4.2.4	Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 1	63
4.2.5	Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 2	65
4.2.6	Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 2	66
4.2.7	Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 3	68
4.2.8	Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 3	69
4.2.9	Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 4	71
4.2.10	Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 4.....	72
4.2.11	Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 5.....	74
4.2.12	Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 5.....	75
4.3	Mapeamento estrutural	77
4.3.1	Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 1	79
4.3.2	Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 2	82
4.3.3	Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 3	84
4.3.4	Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 4	86
4.3.5	Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 5	88
4.4	Modelo estrutural integrado.....	90
5.	CONCLUSÕES	91
6.	REFERÊNCIAS	93

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da evolução tectono-sedimentar de bacias sedimentares do tipo rifte e pós-rifte é de extrema importância para a indústria petrolífera, pois grandes reservas de hidrocarbonetos, no Brasil e no mundo, estão inseridas ou associadas com esse contexto geológico. As bacias rifte brasileiras constituem os primeiros depocentros formados nos estágios iniciais da fragmentação do supercontinente Gondwana e seus depósitos estão preservados nas porções basais das bacias sedimentares da margem continental brasileira. O estágio pós-rifte, por sua vez, representa a transição entre a fase de domínio de subsidência mecânica e a de subsidência termal, representando os últimos depósitos antecessores à plena ruptura continental e construção de costa oceânica. A Bacia do Espírito Santo apresenta evolução temporal semelhante a outras bacias da margem continental brasileira, passando por um estágio inicial de sedimentação em bacias rifte, seguido de um estágio drifte, evoluindo para bacias do tipo margem passiva. A porção basal da bacia é representada pelo Grupo Nativo, constituído pelas Formações Cricaré (porção inferior) e Mariricu (porção superior). A Formação Mariricu é constituída pelos Membros Mucuri e Itaúnas. O Membro Mucuri, que é o alvo do projeto, consiste de depósitos clásticos grossos (arenitos e conglomerados) intercalados por folhelhos e delgados níveis evaporíticos (Vieira, 1998) de idade Neo-aptiana, representando depósitos continentais associados com as primeiras incursões marinhas no continente.

1.1 Localização

O local de estudo compreende a área e o intervalo do Membro Mucuri compreendido pelo cubo sísmico Fazenda Cedro Sul, onde estão inseridos os dados sísmicos 3D utilizados nesse trabalho. A área ocupada pelo cubo localiza-se no noroeste da Bacia do Espírito Santo, na porção terrestre da mesma (Figura 1). No mapa de localização, é possível identificar também as 5 linhas sísmicas selecionadas para a interpretação individual, bem como a localidade dos 2 poços

com *checkshot* e dados de descrição de amostras de calha, utilizados conjuntamente com a interpretação do dado sísmico.

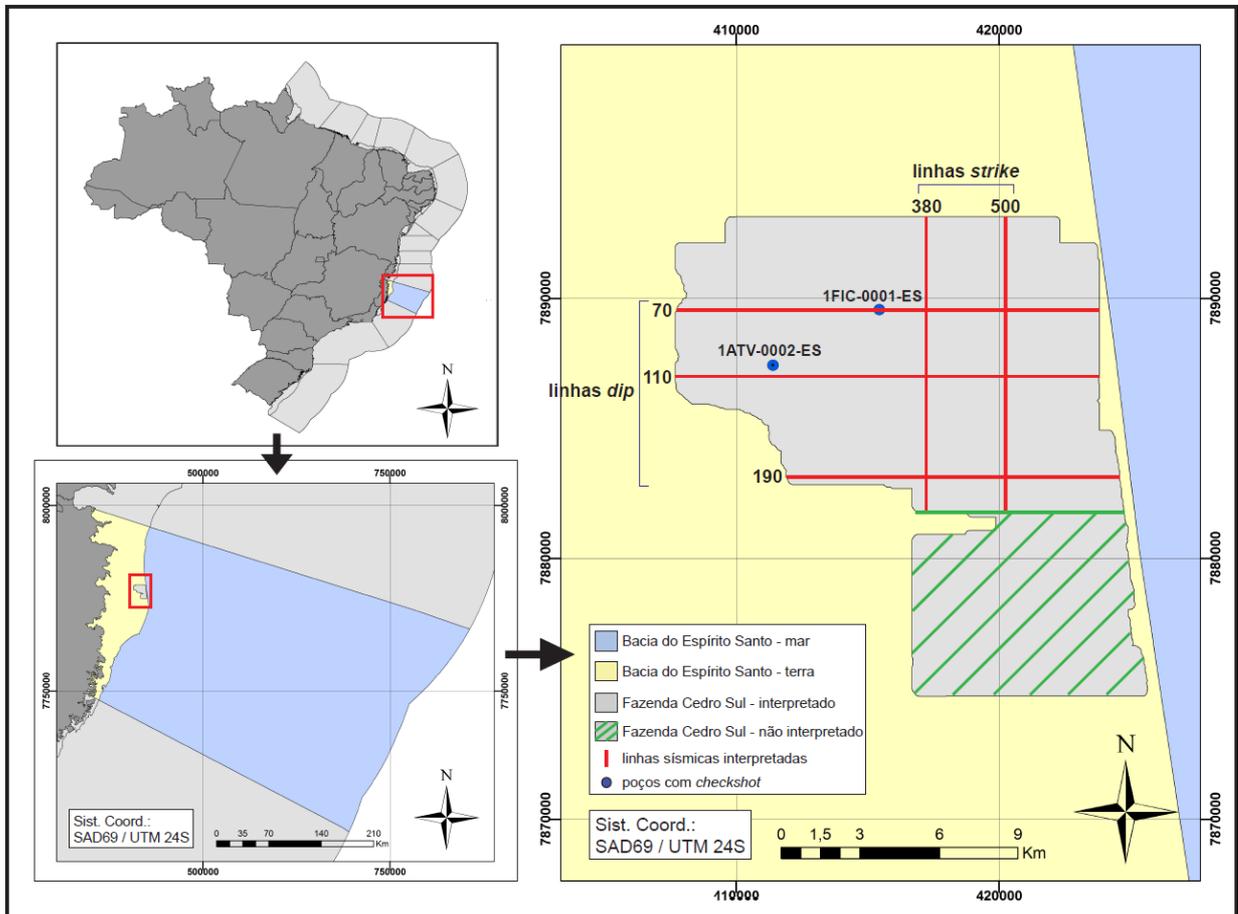


Figura 1: Localização do cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul e a respectiva área interpretada. O cubo localiza-se no noroeste da Bacia do Espírito Santo, na porção terrestre da mesma. A figura mostra ainda a localização das 5 linhas sísmicas interpretadas (em vermelho) e dos 2 poços (em azul) com *checkshot* e dados de descrição de amostras de calha, utilizados conjuntamente com a interpretação do dado sísmico.

1.2 Problemática científica

Alguns aspectos relacionados à evolução geológica do estágio de transição entre a fase rifte e pós-rifte das bacias da margem continental brasileira necessitam de maiores estudos e novas abordagens. Um desses aspectos é a tectônica, que ainda necessita muita atenção, principalmente em relação à extensão do período de atuação e a intensidade do controle que exerce sobre a sedimentação após o fim da fase de predomínio de subsidência mecânica das bacias rifte (fase pós-rifte). Para buscar uma solução para esse tema, o presente trabalho levanta as seguintes

questões: qual é o padrão de desenvolvimento tectono-estratigráfico do Membro Mucuri? Este padrão ainda apresenta forte influência tectônica, remanescente da fase rifte, ou a tectônica não constitui um fator significativo na sedimentação deste intervalo? A tentativa de definir um padrão tectônico acaba trazendo outras questões importantes, como qual é o padrão de evolução temporal da tectônica envolvida e qual é a distribuição da mesma ao longo da área de estudo, que engloba o Membro Mucuri?

O desenvolvimento tectono-estratigráfico de uma bacia rifte pode apresentar dois padrões gerais, conforme o estágio de evolução da bacia. Segundo Bosence (1998), os estratos depositados em uma bacia rifte pertencem à fase sin-rifte ou pós-rifte. Os estratos sin-rifte são caracterizados por sedimentos cuja deposição é controlada por subsidência mecânica (controlado pelo rejeito de falhas normais), enquanto que a deposição dos estratos do pós-rifte é controlada essencialmente por subsidência termal. A tectônica, porém, pode ter variações ao longo do tempo de preenchimento (por exemplo, podem ocorrer reativações de determinadas falhas em estágios de quiescência tectônica), e ter variações ao longo da área geográfica do depocentro (Morley, 2002; Bosence, 1998; Rosendahl *et al.*, 1986). Assim, com a metodologia proposta neste projeto, será possível obter um arcabouço tectono-estratigráfico e uma clara avaliação do componente tectônico (sua duração e relação com a sedimentação do intervalo) envolvido na deposição do Membro Mucuri, no intervalo compreendido pelo cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul.

1.3 Justificativa

A adição de novas ferramentas que possibilitam um detalhamento cada vez maior da evolução tectono-estratigráfica de bacias rifte e pós-rifte é de grande importância, visto que a busca por hidrocarbonetos na margem leste brasileira, atualmente, está se desenvolvendo em profundidades cada vez maiores, em depósitos intrinsecamente associados a essas duas fases de deposição das bacias de margem continental brasileira. Assim, a introdução de novas abordagens e estudos sobre esses respectivos estágios, torna-se essencial para a continuidade da pesquisa por hidrocarbonetos em nosso país.

O intervalo analisado neste projeto temático é muito importante, pois os depósitos do Membro Mucuri são espacialmente adjacentes aos do intervalo do Pré-Sal, que constituem a principal reserva de hidrocarbonetos do Brasil, e uma das mais importantes do mundo. A compreensão do padrão de evolução tectono-estratigráfico do Membro Mucuri pode trazer importantes contribuições para o entendimento da evolução estratigráfica e tectônica do Aptiano na Bacia do Espírito Santo e em outras bacias da margem continental brasileira, como Campos e Santos, onde se encontram os principais depósitos do Pré-Sal.

1.4 Objetivos

O objetivo fundamental deste trabalho é obter um arcabouço tectono-estratigráfico para o intervalo de estudo com ênfase na avaliação da intensidade e da duração da atividade tectônica, bem como a sua relação com a sedimentação do Membro Mucuri, no intervalo compreendido pelo respectivo volume sísmico. Os objetivos específicos do trabalho são:

- 1) Mapeamento da base, do topo e das falhas contidas no intervalo do Membro Mucuri;
- 2) Interpretação das superfícies estratigráficas, das unidades sismoestratigráficas e das sismofácies;
- 3) Elaboração de diagramas cronoestratigráficos;
- 4) Confecção de mapas de isópacas para cada unidade sismoestratigráfica;
- 5) Confecção de mapas estruturais para cada unidade sismoestratigráfica;
- 6) Integração de todos os dados e elaboração de um modelo estrutural integrado de evolução tectono-estratigráfica da área de estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Bacia do Espírito Santo e Membro Mucuri

A Bacia do Espírito Santo (Figura 2) está situada no Estado do Espírito Santo, sendo delimitada a sul com a Bacia de Campos, através do Alto de Vitória, e a norte com a Bacia de Mucuri, possuindo uma área explorável de aproximadamente 41.500 Km², sendo 3.000 Km² referentes à bacia terrestre (França, Del Rey, Tagliari, Brandão & Fontanelli, 2007). A existência do Banco de Abrolhos, a leste, condiciona um alargamento da plataforma continental, que atinge a máxima largura de 240 km na porção centro-norte da bacia (França *et al.*, 2007).

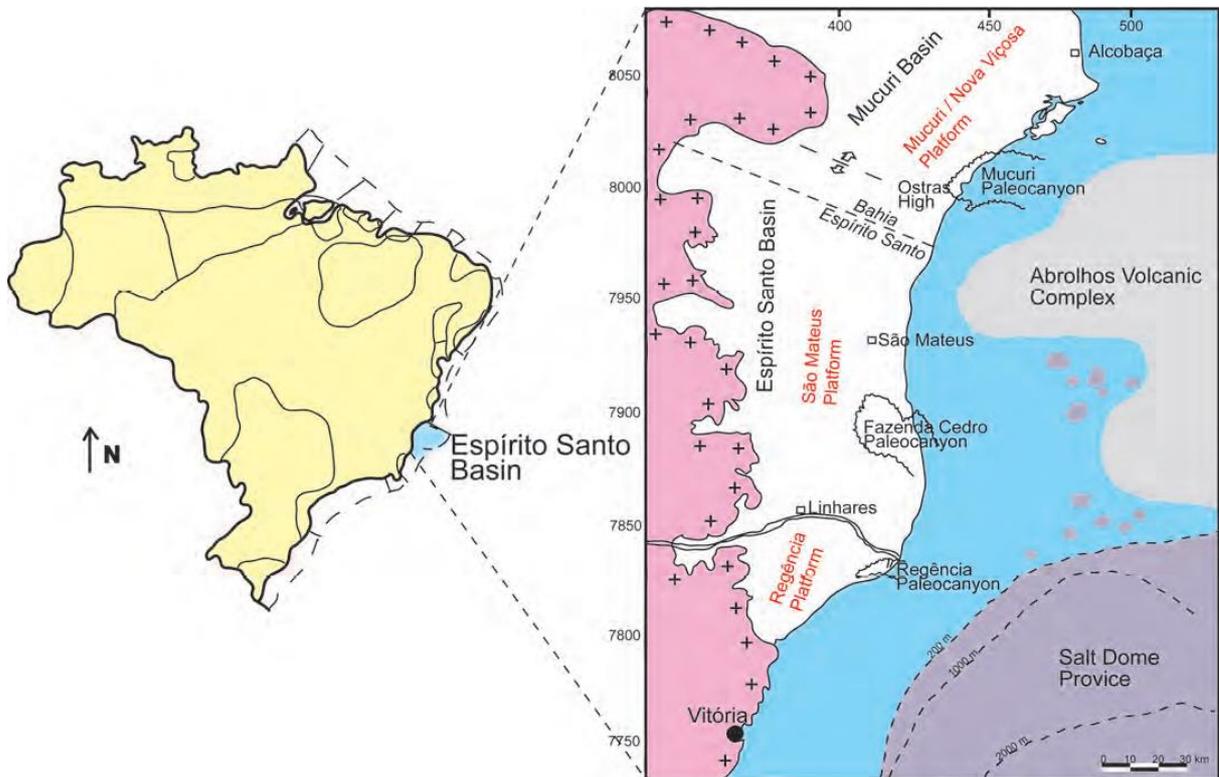
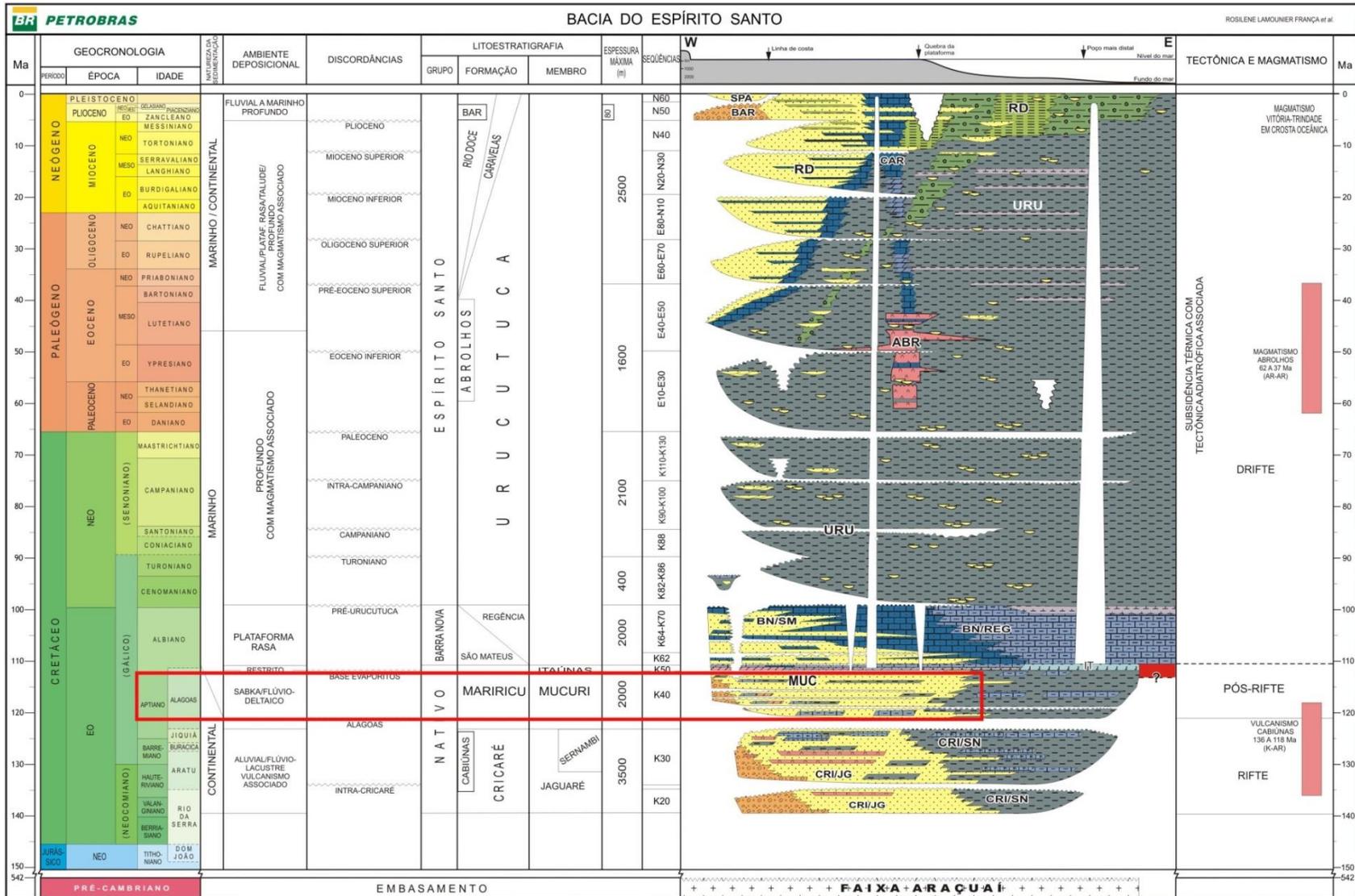


Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Espírito Santo, mostrando o limite norte com a Bacia de Mucuri, o limite oeste com o embasamento cristalino e o limite leste com o Complexo Vulcânico de Abrolhos (extraído de Carvalho, Biassusi & Maciel, 1989, modificado por De Ros *et al.*, 2010).

É uma das bacias que constituem a extensa margem continental brasileira, apresentando evolução temporal semelhante aos outros depocentros, passando por um estágio inicial de sedimentação em bacias rifte, seguido de um estágio drifte,

evoluindo para bacias do tipo margem passiva. O pacote sedimentar inclui sedimentos depositados desde o Neocomiano (Berriasiano) até o recente, com as unidades sendo geradas em diversos ambientes deposicionais que se sucederam durante as fases rifte, transicional e marinha (Vieira, 1998).

A primeira carta cronoestratigráfica da Bacia do Espírito Santo foi formalizada por Asmus, Gomes e Pereira (1971). A última versão da carta, depois de sucessivas alterações, é apresentada por Vieira *et al.* (1994). A carta cronoestratigráfica apresentada neste trabalho (Figura 3) é a proposta por França *et al.* (2007), seguindo os mesmos princípios litoestratigráficos estabelecidos por Vieira *et al.* (1994).



A porção basal da bacia é constituída pelo Grupo Nativo, compreendendo as Formações Cricaré e Mariricu, depositadas entre o Berriasiano e o Eoalbio. De acordo com Vieira, Costa e Alves (1992), a Formação Cricaré corresponde aos depósitos mais antigos da bacia, assentando diretamente sobre o embasamento cristalino, enquanto que a Formação Mariricu é constituída por depósitos mais novos, que assentam discordantemente sobre os sedimentos da Formação Cricaré ou sobre o embasamento, nas áreas de plataformas rasas.

A Formação Mariricu compreende o Membro Mucuri (porção inferior), objeto deste estudo, e o Membro Itaúnas (porção superior). O Membro Mucuri consiste de clásticos grossos (arenitos e conglomerados) intercalados por folhelhos e delgados níveis evaporíticos (Vieira, 1998). O Membro Itaúnas é formado por espessas camadas de evaporitos, predominando anidritas e carbonatos na parte oeste da bacia, e halita na porção leste. (Vieira, 1998).

O Membro Mucuri, segundo Vieira (1998), é constituído predominantemente por rochas siliciclásticas grossas, com delgadas intercalações de clásticos finos e rochas evaporíticas (anidritas e calcários). O autor identificou 15 litofácies, baseadas nas diferenças de composição, granulometria e estruturas sedimentares. O autor identificou também, três associações de fácies para os depósitos do Membro Mucuri: associação de fácies de leques aluviais; associação de fácies de ilha de barreira/estuário; associação de fácies de ilha de barreira/laguna/supramaré.

Vieira (1998) identificou no Membro Mucuri, três tectono-sequências (MUC-3, MUC-2 e MUC-1), separadas por discordâncias erosivas, que podem ser estendidas até a porção rasa da bacia: *sequência MUC-3* – apresenta forte controle tectônico, ainda da fase rifte. Representam as fácies médias a distais de leques aluviais e das fácies mais proximais do sistema fluvial entrelaçado. É caracterizada por ortoconglomerados na base, gradando para arenitos arcoseanos grossos, passando a arenitos finos e siltitos, culminando com um nível de anidrita e/ou carbonato brechado. O limite com a sequência intermediária se faz através de uma discordância angular; *sequência MUC-2* – representa um afogamento progressivo dos leques e do sistema fluvial da seção inferior, sendo composta por arenitos basais, silticos e arenitos finos a muito finos. O limite superior é definido por uma camada de anidrita ou carbonato, que define uma discordância angular em alguns pontos da bacia; *sequência MUC-1* – representada por um sistema de lagunas com

planícies lamosas que evoluiu para o ambiente evaporítico do tipo *sabkha*. Localmente ocorrem arenitos finos a grossos, representando depósitos de praias e planícies arenosas do sistema lagunar. O contato superior com o Membro Itaúnas é discordante.

Segundo Vieira (1998), a distribuição dos sedimentos do Membro Mucuri segue o seguinte padrão: nas áreas proximais, na porção oeste, predominam conglomerados e arenitos grossos a conglomeráticos mal selecionados. Afastando-se das áreas proximais, há uma gradativa diminuição da granulometria, e aumento de intercalações de clásticos de granulometria mais fina. Intercalados aos depósitos siliciclásticos grossos ocorrem depósitos estuarinos e lagunares, sobrepostos por rochas evaporíticas e correlatas, indicando afogamentos do sistema, intercalados com breves períodos de extremo ressecamento devido à aridez climática e deficiência no aporte de água e sedimentos.

2.2 Sismoestratigrafia

A sismoestratigrafia é o estudo da estratigrafia e das fácies deposicionais interpretadas a partir do dado sísmico, permitindo o reconhecimento e correlação, através das reflexões sísmicas e de suas configurações, de sequências deposicionais, interpretação do ambiente deposicional e estimativa de litofácies (Mitchum Jr, Vail & Sangree 1977b). Assim, constitui uma das mais importantes ferramentas utilizadas na indústria petrolífera, auxiliando na identificação e no mapeamento de reservatórios, em diferentes contextos geológicos.

Este método de interpretação de dados sísmicos foi desenvolvido por Mitchum, Vail e outros autores, e seus conceitos, bem como as definições originais aqui apresentadas, foram publicados no Memoir 26 da AAPG – *Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration* (Payton, 1977).

Mitchum Jr *et al.* (1977b) definiu o conceito de sequência sísmica como uma sequência deposicional identificada em uma sessão sísmica, formada por uma sucessão de reflexões relativamente concordantes, interpretados como estratos geneticamente relacionados, sendo limitada no topo e na base por superfícies de descontinuidade marcadas por terminações de refletores, sendo interpretadas como discordâncias ou como suas conformidades correlatas. Uma sequência deposicional

é uma unidade estratigráfica composta por uma sucessão de estratos geneticamente relacionados e relativamente concordantes, delimitada no topo e na base por discordâncias e suas conformidades correlatas (Mitchum Jr, Vail & Thompson 1977a).

Na moderna estratigrafia de sequências, entretanto, as superfícies estratigráficas identificadas pelas terminações dos refletores, delimitam unidades sísmicas, as quais podem compreender sequências deposicionais, tratos de sistemas (Brown & Fisher, 1977) ou subdivisões internas aos tratos de sistemas.

Toda a metodologia desenvolvida por esses autores baseia-se no significado cronoestratigráfico das reflexões sísmicas (Vail, Todd & Sangree, 1977), visto que o principal parâmetro controlador das reflexões em subsuperfície é a impedância acústica. A impedância acústica é definida como o produto da velocidade de propagação das ondas sísmicas em determinado intervalo rochoso pela sua densidade. Assim, as principais interfaces causadoras das reflexões das ondas sísmicas serão descontinuidades físicas marcantes, sendo representadas, no substrato, por superfícies estratais e discordâncias (Vail *et al.*, 1977). Essas superfícies possuem significado cronoestratigráfico, seguindo linhas de tempo síncronas. Esta propriedade é, portanto, a que permite o desenvolvimento de uma abordagem genética para os estratos nas sessões sísmicas.

As terminações dos refletores sísmicos são o principal critério para a identificação de limites de sequências sísmicas (Mitchum Jr *et al.*, 1977b) e, portanto, de unidades sísmicas. Podem ser classificadas em terminações de topo, base e concordante. (Figura 4).

Segundo Mitchum Jr *et al.* (1977a), as terminações de topo (Figura 4) são representadas pelo truncamento erosivo e pelo *toplap*. O truncamento erosivo é a terminação lateral de um estrato como resultado da sua remoção do seu limite deposicional original, podendo ser erosional ou estrutural. Segundo os autores, o truncamento erosivo é o critério mais confiável para delimitar limites de sequências deposicionais. O *toplap* é a terminação das reflexões contra uma superfície superior, como resultado da não deposição ou apenas de uma erosão menor (Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

As terminações de base (Figura 4) são representadas pelo *onlap* e *downlap* (Mitchum Jr *et al.*, 1977a). O *onlap* é uma relação na qual as reflexões sísmicas são

interpretadas como estratos horizontais terminando progressivamente contra uma superfície inicialmente inclinada, ou como estratos inclinados terminando progressivamente para cima, contra uma superfície de maior inclinação (Mitchum Jr *et al.*, 1977b). O *downlap* é a relação na qual as reflexões sísmicas são interpretadas como estratos inicialmente inclinados terminando para baixo, contra uma superfície inicialmente inclinada ou horizontal (Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

A terminação concordante é quando os refletores das unidades ou sequências sísmicas ocorrem paralelos com a superfície que as delimitam, podendo ocorrer no topo ou na base de uma unidade ou sequência sísmica.

Além desses padrões, ocorrem as relações em *offlap*, a convergência interna e o truncamento aparente (Mitchum Jr *et al.*, 1977b). O *offlap* é um padrão não sistemático de terminação dos refletores em *onlap* e *toplap* em mergulho acima, e em *downlap* em mergulho abaixo, dentro de uma unidade ou sequência sísmica. É comumente utilizado para determinar o padrão de reflexão progradante dentro de bacias. A convergência interna é um adelgaçamento dos estratos dentro de uma unidade sísmica, como resultado dos limites de resolução do dado sísmico. O truncamento aparente é quando as reflexões de uma unidade sísmica terminam abaixo de uma superfície pouco inclinada, interpretada como uma seção condensada. Segundo Mitchum Jr *et al.* (1977b), esses três tipos de padrão de terminação não representam limites de sequências ou unidades sísmicas.

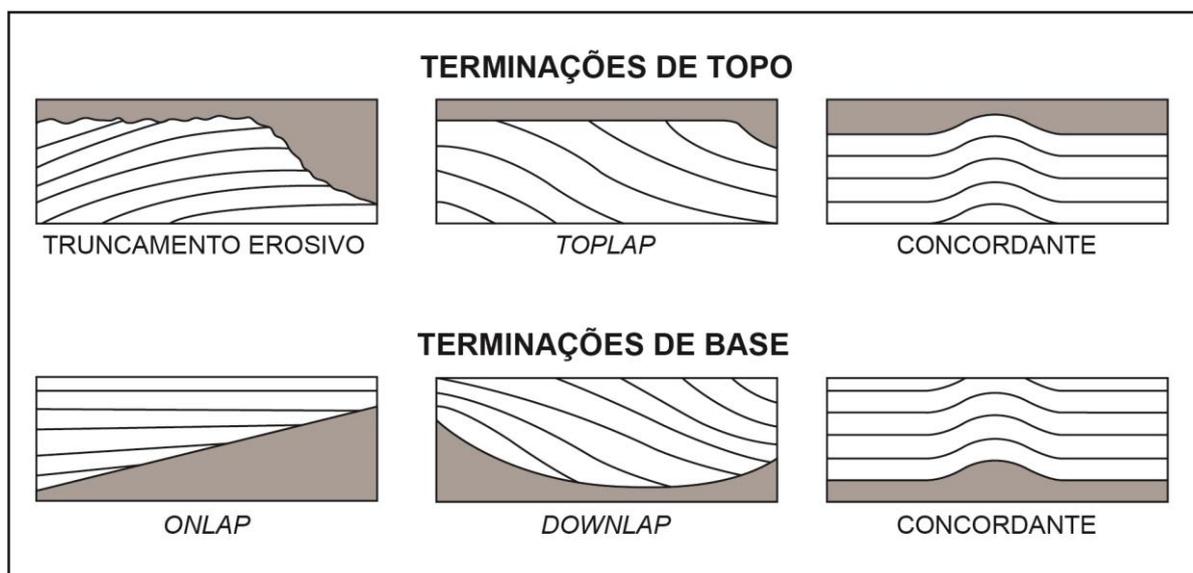


Figura 4: Padrões de terminação dos refletores nos limites superior (truncamento erosivo, *toplap* e concordante) e inferior (*onlap*, *downlap* e concordante) de uma sequência sísmica / sequência deposicional (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977a).

A análise de fácies sísmica é a descrição e a interpretação geológica dos parâmetros da reflexão sísmica, incluindo configuração dos refletores, continuidade, amplitude, frequência, velocidade intervalar e geometria (Mitchum Jr *et al.*, 1977b) (Quadro 1). As sismofácies são unidades sísmicas mapeáveis tridimensionais, compostas por grupos de refletores cujos parâmetros diferem dos grupos adjacentes, permitindo inferências sobre ambiente deposicional, processos deposicionais e estimativas de litologias (Mitchum Jr *et al.*, 1977b). Ainda conforme os autores, a geometria das sismofácies é definida a partir da forma externa e da configuração interna dos refletores.

Parâmetros das Sismofácies	Interpretação Geológica
Configuração dos refletores	- Padrões de acamadamento - Processos deposicionais - Erosão e paleotopografia - Contato de fluidos
Continuidade dos refletores	- Continuidade dos estratos - Processos deposicionais
Amplitude dos refletores	- Contraste velocidade/densidade - Espaçamento dos estratos - Conteúdo de fluidos
Frequência dos refletores	- Espessura dos estratos - Conteúdo de fluidos
Velocidade intervalar	- Estimativa de litologias - Estimativa de porosidade - Conteúdo de fluidos
Forma externa e associação areal das sismofácies	- Ambiente deposicional - Fonte de sedimentos - Sítio geológico

Quadro 1: Parâmetros das reflexões sísmicas utilizados na identificação de sismofácies e suas respectivas interpretações geológicas (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

Segundo Mitchum Jr *et al.* (1977b), as reflexões podem ter as seguintes configurações internas (Figura 5): *paralela e subparalela* – sugere taxas de deposição uniformes sobre uma plataforma subsidente ou sobre uma bacia estável; *divergente* – pode indicar uma variação em área, na taxa de deposição, ou inclinação progressiva do substrato; *Configurações progradantes* – interpretadas

como estratos em que a deposição significativa é dada por sobreposição lateral ou progradante. Podem ocorrer os padrões *sigmoide*, *oblíquo tangencial*, *oblíquo paralelo*, *complexo sigmoidal oblíquo*, *shingled* e *hummocky*. Formam-se através do desenvolvimento lateral progressivo de superfícies deposicionais levemente inclinadas, chamadas de clinofórmis; *Reflexões caóticas* – são reflexões descontínuas e discordantes, sugerindo um arranjo desordenado das superfícies de reflexão. São interpretadas como estratos depositados em um ambiente de energia alta e variável; *Configuração transparente* – intervalos com ausência de reflexão que podem indicar pacotes sedimentares intensamente redobrados ou com mergulhos muito abruptos; *Termos modificadores* – termo utilizado para quando ocorrem pequenas variações nos padrões básicos de configuração dos refletores.

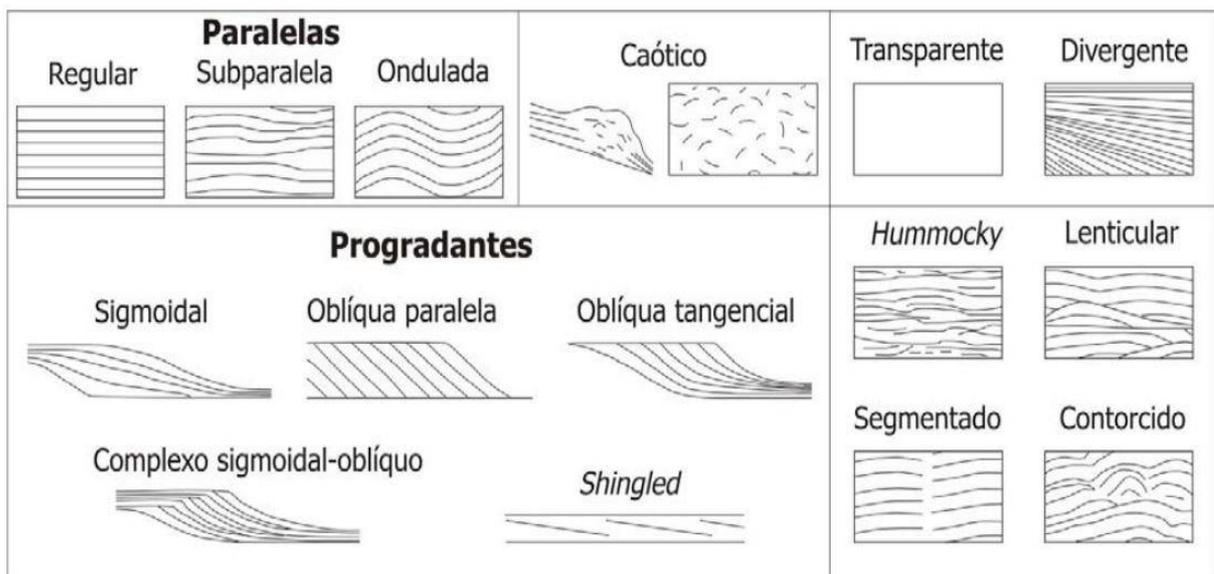


Figura 5: Tipos de configuração interna das reflexões sísmicas: configurações paralelas, configuração caótica, transparente, divergente, configurações progradantes, configuração *hummocky*, lenticular, segmentado e contorcido (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

As geometrias das sismofácies, conforme Mitchum Jr *et al.* (1977b), podem ser classificadas em (Figura 6): lençóis, lençóis drapeados, cunhas, bancos, lentes, *mounds* e preenchimentos. Lençóis, cunhas e bancos são as formas externas mais comuns de sismofácies plataformais, tendo como configurações internas mais comuns, paralela, divergente e progradante. Lençóis drapeados são normalmente constituídos por reflexões paralelas, interpretados como estratos drapeados sobre uma topografia subjacente, sugerindo deposição uniforme, de baixa energia, em

ambiente marinho profundo. Lentes podem ocorrer em muitas associações de fácies sísmicas, sendo mais comuns como formas externas de clinofórmias prográdantes. *Mounds* e preenchimentos podem ter diversas origens, podendo formar proeminências, ou depressões de preenchimento sobre as superfícies deposicionais (Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

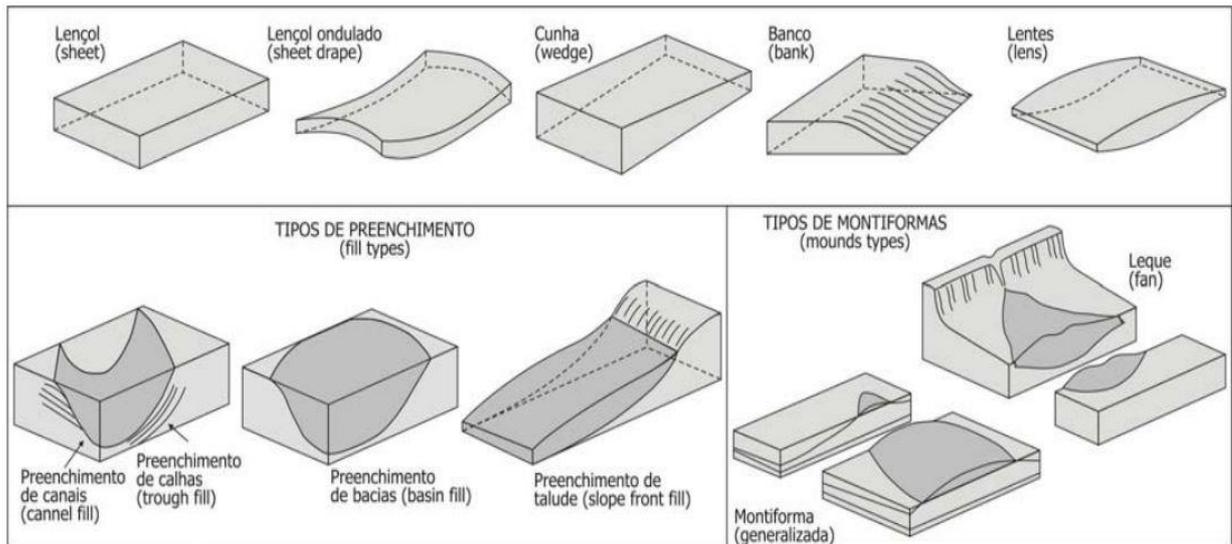


Figura 6: Tipos de geometria externa das sismofácies: lençol, lençol ondulado, cunha, banco, lentes; tipos de preenchimento: de canais, de calhas, de bacias e de taludes; tipos de montiformas: generalizada e leque (modificado de Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

2.3 Modelo de evolução tectono-estratigráfica de bacias rifte – Bosence (1998)

O preenchimento sedimentar de bacias rifte é classificado, segundo Bosence (1998), em estratos depositados durante as fases pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte, separados entre si por discordâncias (Figura 7). Os estratos classificados como pré-rifte correspondem a todos os sedimentos depositados antes do início do pleno processo extensional de rifteamento. Os estratos sin-rifte são separados dos estratos pré-rifte através da discordância sin-rifte (gerada durante o início do processo extensional da crosta), e correspondem aos sedimentos depositados durante condições de subsidência mecânica, onde a criação de espaço é controlada pelo desenvolvimento de falhas normais. Esses estratos são identificados, por sua configuração divergente (característica mais marcante), pela mudança de fácies adjacente às falhas de borda, estruturas deformacionais em sedimentos e por poucos efeitos de arraste próximos às grandes falhas (Prosser, 1993). Os depósitos

do estágio pós-rifte são separados dos estratos do sin-rifte através da discordância pós-rifte, e correspondem aos sedimentos depositados durante condições de domínio de subsidência termal, ocasionada pelo resfriamento e subsequente aumento da densidade da litosfera e da astenosfera, ocorrendo em uma área maior do que a área afetada inicialmente pela subsidência mecânica. A fase pós-rifte é comumente marcada por sessões estratigráficas espessas com configuração em *onlap* e *offlap*, mas que também podem apresentar configuração mais acidentada se houver remanescentes da topografia dos meio-grábens que não foram totalmente preenchidos durante a fase sin-rifte de preenchimento.

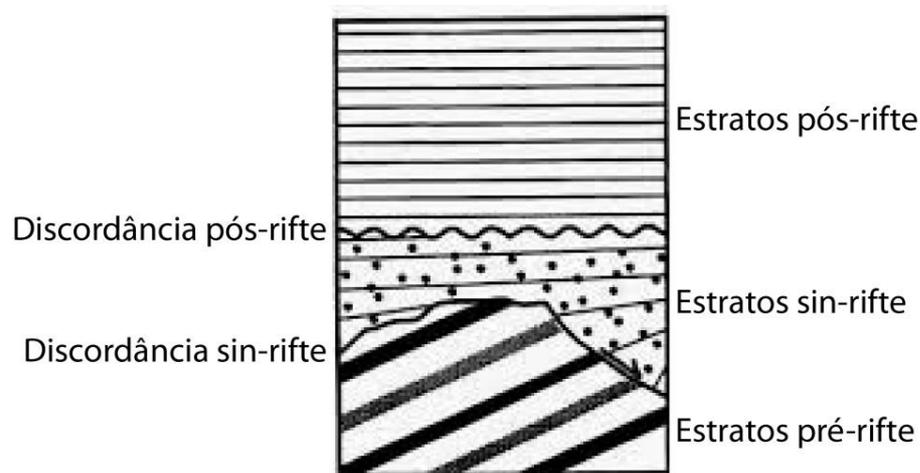


Figura 7: Terminologia do modelo de Bosence (1998) para os estratos depositados em bacias rifte. O preenchimento sedimentar dessas bacias é classificado em estratos depositados durante as fases pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte, separados entre si por discordâncias (modificado de Bosence, 1998).

2.4 O meio-gráben: unidade deposicional fundamental de bacias rifte

O meio-gráben é a unidade estrutural fundamental dos sistemas de riftes (Rosendahl *et al.*, 1986). O meio-gráben é constituído por uma única falha de borda principal (diferentemente da geometria *full-graben*, que é constituída por duas falhas de borda, com subsidência aproximadamente igual nos dois limites) e por uma margem flexural, o que configura uma geometria em cunha (Figura 8). A região do meio-gráben que sofre soerguimento é denominada de *footwall*, e a região que sofre subsidência é denominada de *hangingwall* (Figura 8). A falha de borda apresenta uma geometria arqueada em planta e a sua subsidência máxima é concentrada na porção central da estrutura (Figura 9), onde ocorre o depocentro principal, e diminui

em direção aos seus limites laterais (Rosendahl *et al.*,1986). Dessa forma, o espaço de acomodação criado é inteiramente controlado pelo desenvolvimento de uma única falha de borda.

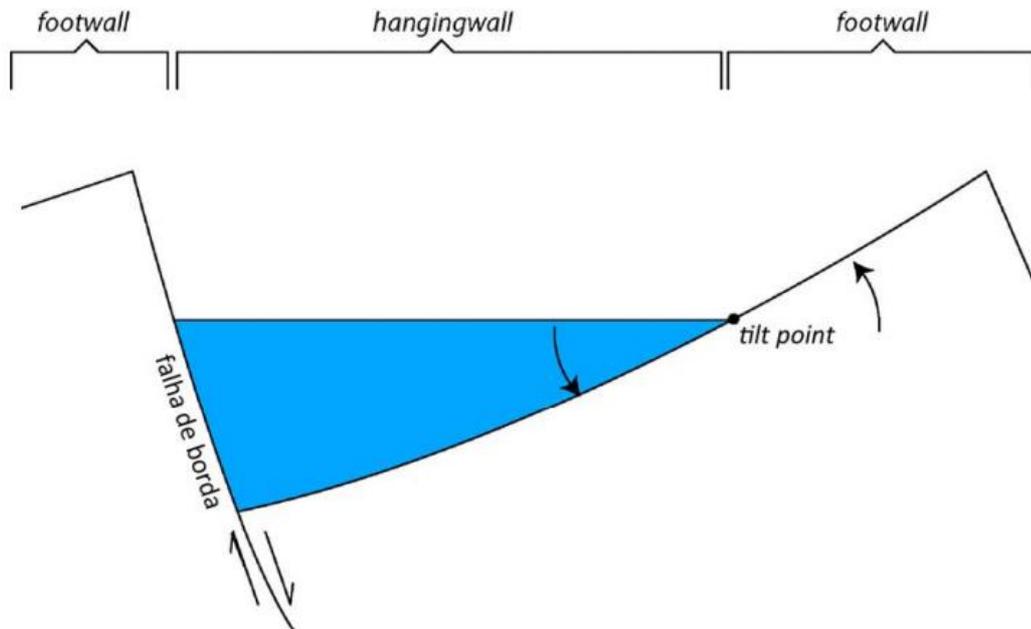


Figura 8: Modelo de meio-gráben mostrando sua compartimentação e geometria em cunha. A região do meio-grabén que sofre soerguimento é denominada de *footwall*, e a região que sofre subsidência é denominada de *hangingwall*. O ponto que regula a ocorrência de *footwall* ou *hangingwall* é denominado de *tilt point* (extraído de Kuchle, 2004).

A conexão lateral dessas unidades deposicionais fundamentais, que irão constituir um sistema rifte, também foi estudada por Rosendahl *et al.* (1986), no lago Tanganyika, região centro-leste da África. Segundo o autor, os limites laterais da unidade fundamental coincidem com altos estruturais, onde ocorre cisalhamento com rotação de blocos, que permitem a transferência da deformação para as demais unidades deposicionais conectadas, além de constituírem o limite deposicional entre dois meio-grábens conectados. A conexão de uma sequência de meio-grábens, gera uma alternância no sentido de mergulho das falhas de borda (Figura 9), configurando uma intercalação na direção de assimetria dos meio-grábens conectados.

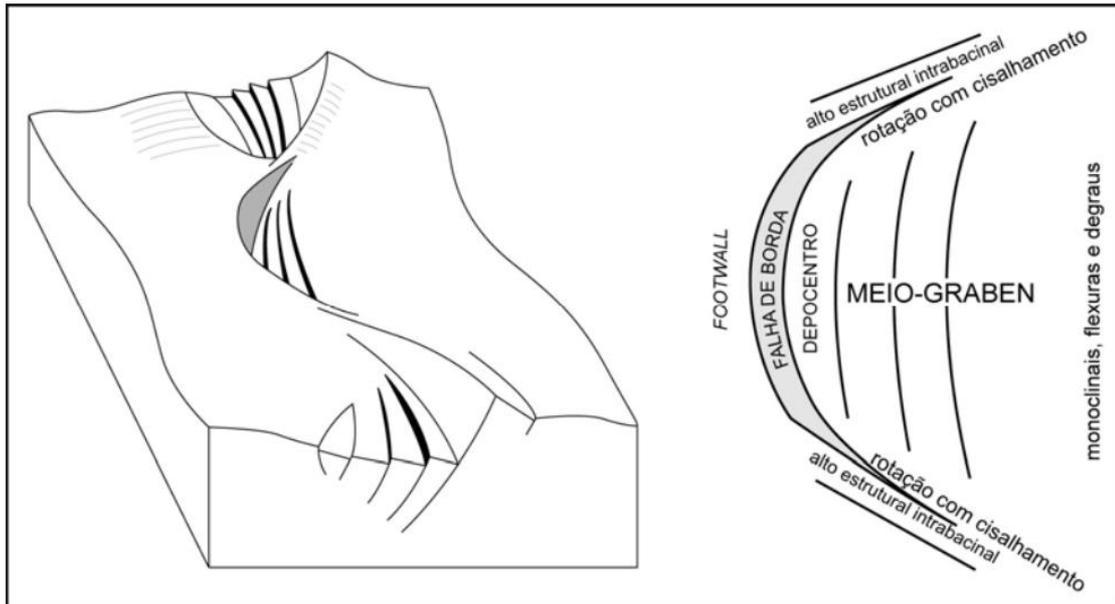


Figura 9: Modelo de meio-gráben com terminações laterais em zonas de transferência, com o depocentro principal na porção central da estrutura e com inversão de sentido da falha de borda, gerando uma alternância na direção de assimetria dos meio-grábens conectados (modificado de Rosendahl *et al.*, 1986).

2.5 Nascimento e evolução de falhas normais

O conhecimento acerca da criação e evolução de falhas normais foi amplamente estudado por diversos autores, principalmente em bacias rifte (Wernicke, 1985; Rosendahl *et al.*, 1986; Prosser, 1993; Morley, 1995; Morley 2002; Gupta & Scholz, 2000; Gawthorpe & Leeder, 2000; Mansfield & Cartwright, 2001; Walsh, Nicol & Childs, 2002; entre outros). A seguir, são destacadas algumas questões abordadas em alguns desses modelos, as quais possuem implicância direta para a execução do trabalho.

Gawthorpe e Leeder (2000) propõem que as grandes falhas de borda, controladoras do desenvolvimento dos meio-grabéns em bacias rifte, são originadas a partir de pequenas falhas paralelas e não conectadas, tendo cada uma, o seu próprio deslocamento vertical. Ao longo da evolução do rifte, essas pequenas e isoladas falhas se interligam, gerando falhas maiores e conectando os seus deslocamentos, o que gera deslocamentos ainda maiores, até a ligação completa das falhas (Figura 10). Assim, forma-se uma grande falha de borda, onde o deslocamento vertical máximo concentra-se na sua porção central, com a mesma geometria das falhas isoladas iniciais.

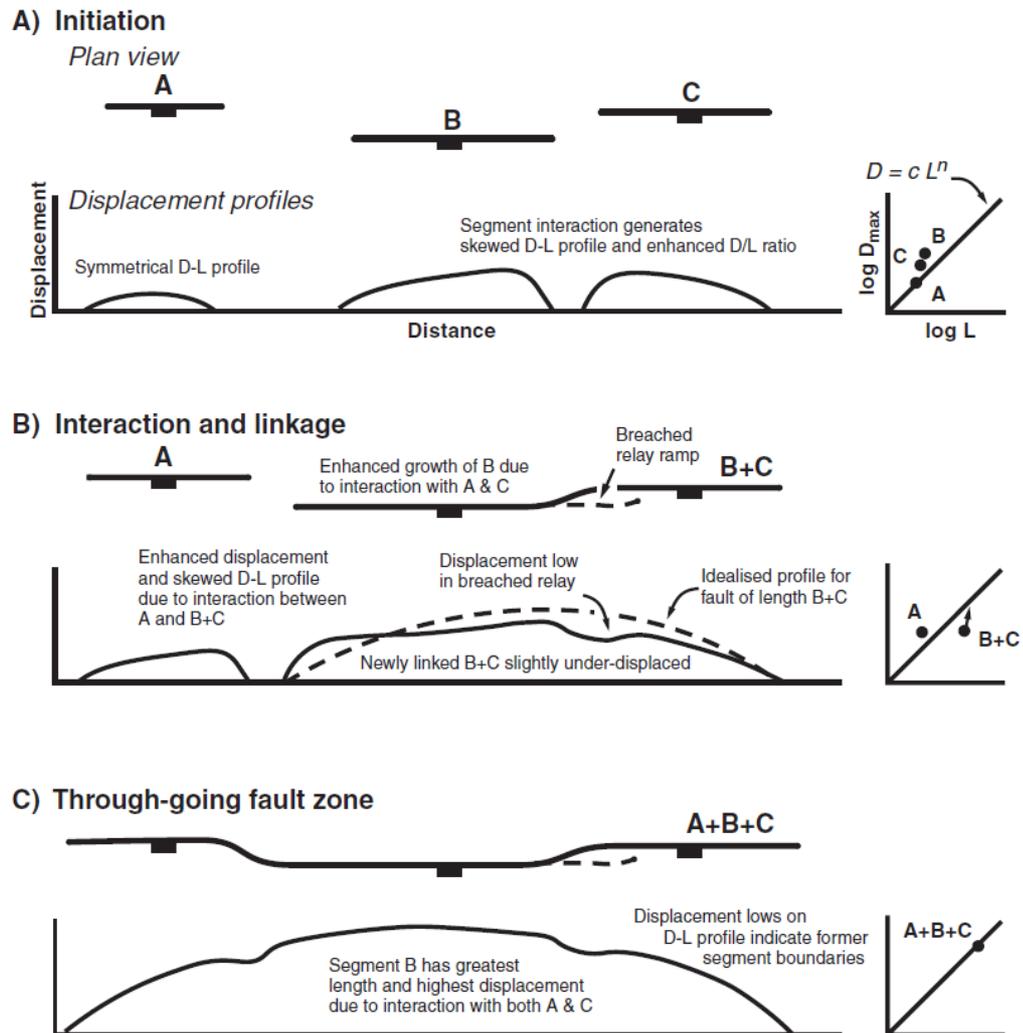


Figura 10: Modelo de evolução de grandes falhas de borda, a partir da conexão de pequenas falhas isoladas e paralelas pré-existentes. A: criação das pequenas falhas, cada uma com seu deslocamento vertical específico; B: interação e conexão; C: fim do processo de conexão e formação da falha de borda. Notar que a relação comprimento x deslocamento vertical é a mesma, tanto para as pequenas falhas, quanto para a grande falha de borda (extraído de Gawthorpe & Leeder, 2000).

O modelo proposto por Morley (2002), embasado em exemplos de bacias do Sistema de Riftes do Leste Africano, é muito similar ao modelo de Gawthorpe e Leeder (2000), defendendo também que as grandes falhas de borda são originadas a partir da junção de falhas menores. O autor, no entanto, apresenta uma discussão sobre como o processo de evolução e conexão pode ocorrer em relação ao desenvolvimento e consolidação da estrutura de meio-gráben das bacias rifte. A evolução e a junção das falhas podem ocorrer durante um longo espaço de tempo (milhões de anos) proporcionalmente à evolução axial e da margem flexural do depocentro (Schlische & Anders, 1996) (Figura 11), ou pode ocorrer em um curto

intervalo de tempo (milhares a dezenas de milhares de anos), anterior ao pleno desenvolvimento do depocentro principal, implicando em uma extensão axial maior do que na margem flexural (Morley, 1999) (Figura 11). Esta última condição é similar ao modelo apresentado por Walsh *et al.* (2002), onde os comprimentos das falhas com interação de campos tensionais, são rapidamente estabelecidos no início do desenvolvimento, e que depois de conectadas, acumulam apenas deslocamento vertical, cessando a propagação lateral. Ainda segundo este autor, o término da rápida expansão lateral termina quando os limites laterais das falhas começam a interagir entre si, iniciando o processo de conexão, o que gera predomínio e concentração de deslocamento vertical nos limites das falhas. Esta condição na qual o processo de conexão de falhas menores em uma falha maior ocorre essencialmente através dos limites das mesmas, é abordada com detalhe por Gupta e Scholz (2000).

Segundo Gupta e Scholz (2000), conforme uma das terminações laterais de uma falha cresce para a região onde o seu campo tensional decresce, o deslocamento vertical próximo do limite lateral aumenta, e a propagação lateral da falha diminui, até se extinguir, aumentando apenas o seu deslocamento vertical. Assim, para duas falhas inicialmente isoladas (Figura 12), sem nenhum tipo de interação, cada uma delas irá crescer lateralmente e acumular deslocamento vertical separadamente, ao longo dos seus comprimentos. Com o aumento da interação, os deslocamentos verticais tendem a se concentrar nos limites laterais que interagem, e o crescimento lateral de ambas as falhas tende a diminuir (Figura 12). Com a consolidação do processo de conexão, o deslocamento vertical máximo tende a migrar e se concentrar próximo à porção central do plano da falha, semelhante ao estágio final do modelo de Gawthorpe e Leeder (2000). Assim, todos esses modelos apresentados e discutidos concordam que, após o fim do processo de conexão e formação de uma única falha de borda, o deslocamento vertical máximo tende a se concentrar na porção central da grande falha.

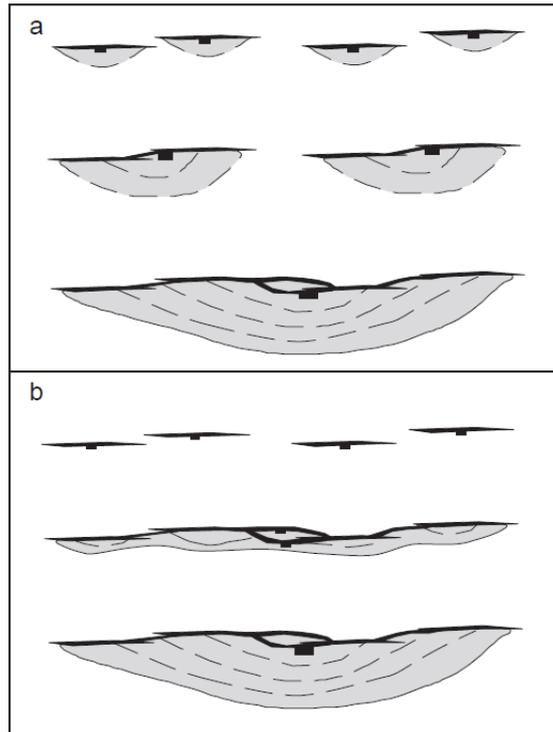


Figura 11: Modelo de evolução da bacia e da conexão de pequenas falhas em uma grande falha de borda principal. (a): conexão das falhas conjuntamente com a evolução da bacia, durante um longo período de tempo; (b): conexão rápida das falhas, anterior ao pleno desenvolvimento da bacia associada (extraído de Morley, 2002).

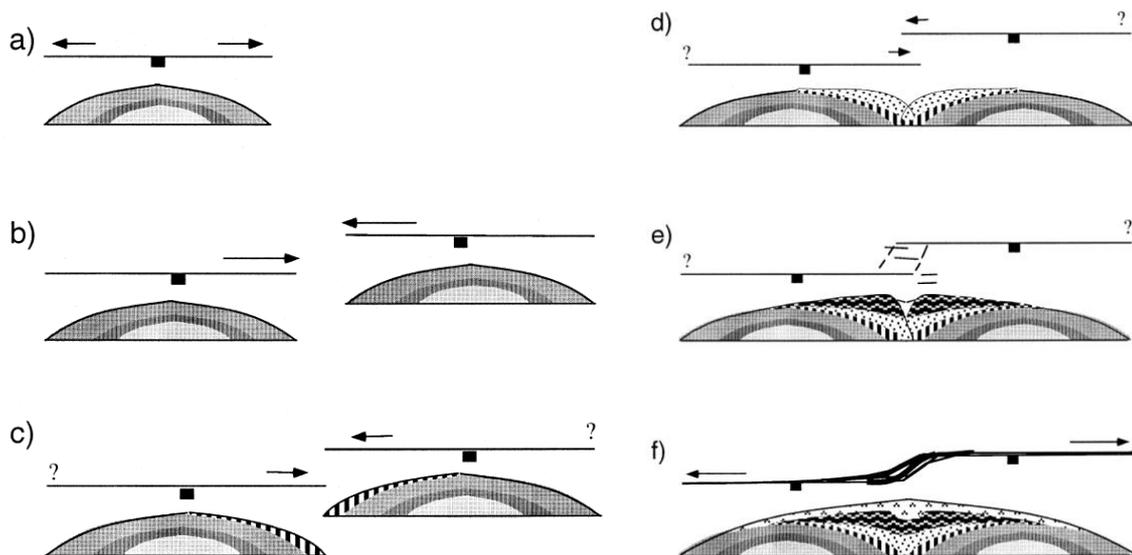


Figura 12: Modelo de conexão entre duas falhas: a) propagação lateral da falha, sem interações; b) início da interação, ainda fraca; c) interação moderada – desaceleração da propagação lateral e início do acúmulo de deslocamento vertical nos limites laterais das duas falhas; d) interação forte – propagação lateral pequena e deslocamento vertical nos limites laterais altos; e) conexão efetiva – a propagação lateral cessa, aparecem pequenas estruturas de ligação e o deslocamento vertical acumula na região de conexão; f) fim do processo de conexão – consolidação em única falha (extraído de Gupta & Scholz, 2000).

3. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste projeto temático consiste na interpretação de dados sísmicos 3D, a qual somente é possível através do uso de softwares específicos de interpretação sísmica. Assim, este projeto foi elaborado, na maior parte do tempo, em laboratórios específicos de interpretação sísmica, oferecidos pelo Projeto Mucuri.

3.1 Pesquisa e revisão bibliográfica

Etapa muito importante ao longo de todo o Projeto, principalmente no início, na qual se realiza uma ampla e extensa pesquisa de publicações clássicas e atuais, buscando reunir e sintetizar conhecimentos importantes sobre, por exemplo, a metodologia aplicada para a interpretação de linhas sísmicas, informações sobre a Bacia do Espírito Santo e sobre o específico intervalo de estudo.

3.2 Carregamento dos dados e interpretação preliminar

Os dados sísmicos utilizados no projeto são provenientes de levantamentos sísmicos 3D. Após o complexo e amplo processo de tratamento, o dado sísmico 3D é apresentado na forma de cubos sísmicos, constituídos por um determinado número de linhas *inline* e *xline* (o software denomina de *inline* as seções *dip*, e de *xline* as seções *strike*) cobrindo uma área e um volume específicos dentro da bacia.

O carregamento dos dados sísmicos 3D foi feito no Petrel 2009 (Schlumberger), software específico para trabalho com dados sísmicos e de poços. Após o carregamento, fez-se uma análise para a escolha do cubo sísmico 3D que seria utilizado para a execução do trabalho. A seleção foi feita com base na qualidade das linhas sísmicas constituintes dos cubos e com a abrangência das mesmas. Atendendo a esses critérios, o cubo sísmico escolhido foi o da Fazenda Cedro Sul (Figura 13).

Depois da escolha do volume sísmico, executou-se a delimitação do topo e da base do intervalo analisado, no caso, o Membro Mucuri. A interpretação iniciou-se a

partir dos dois poços de exploração (1ATV-0002-ES; 1FIC-0001-ES), localizados dentro do cubo sísmico (Figura 1; Figura 13). Esses poços apresentam dados litológicos (provenientes da descrição de amostras de calha) e dados de *checkshot*. O *checkshot* faz a correspondência entre a “profundidade” das linhas sísmicas, medidas em tempo sísmico (tempo gasto para a onda sísmica refletir e ser captada por um sensor terrestre), com a profundidade em metros dos poços. Assim, com o cruzamento desses dados, definiram-se os refletores que representam a base e o topo do intervalo (demarcados nos poços), e iniciou-se a delimitação do intervalo a partir das duas *inlines* e das duas *xlines* que interceptam os dois poços. Depois, o mapeamento da base e do topo foi estendido para o restante do cubo, respeitando o espaçamento definido entre as linhas sísmicas (10 para as *inlines* e 20 para as *xlines*) e seguindo o padrão de interpretação de 2 *inlines* para 1 *xline*. Conjuntamente com o mapeamento da base e do topo, fez-se também a interpretação e demarcação das falhas existentes no intervalo, com o intuito de visualizar a configuração tridimensional das mesmas.

A definição do espaçamento entre as linhas sísmicas foi definida com base na relação entre uma abrangência satisfatória do cubo sísmico e um tempo hábil para uma interpretação de qualidade. De modo a atender a essas exigências, a interpretação da base e do topo do Membro Mucuri, bem como a das falhas foi realizada em 22 linhas *dip* e em 28 linhas *strike*.

Nas etapas seguintes foram utilizados os métodos da interpretação sismoestratigráfica clássica (Mitchum Jr *et al.*, 1977b). Para essas etapas, foram escolhidas 5 linhas sísmicas representativas do intervalo, sendo 3 linhas *dip* (*inlines* 70, 110 e 190) e 2 *strike* (*xlines* 380 e 500), sendo estas duas últimas escolhidas justamente para correlacioná-las com as linhas *dip*. Estas linhas foram analisadas e interpretadas separadamente, utilizando o software Adobe Illustrator, sendo que para cada linha sísmica, realizou-se: interpretação da terminação dos refletores; identificação de superfícies estratigráficas; delimitação das unidades sísmicas; análise de sismofácies; elaboração da carta cronoestratigráfica.

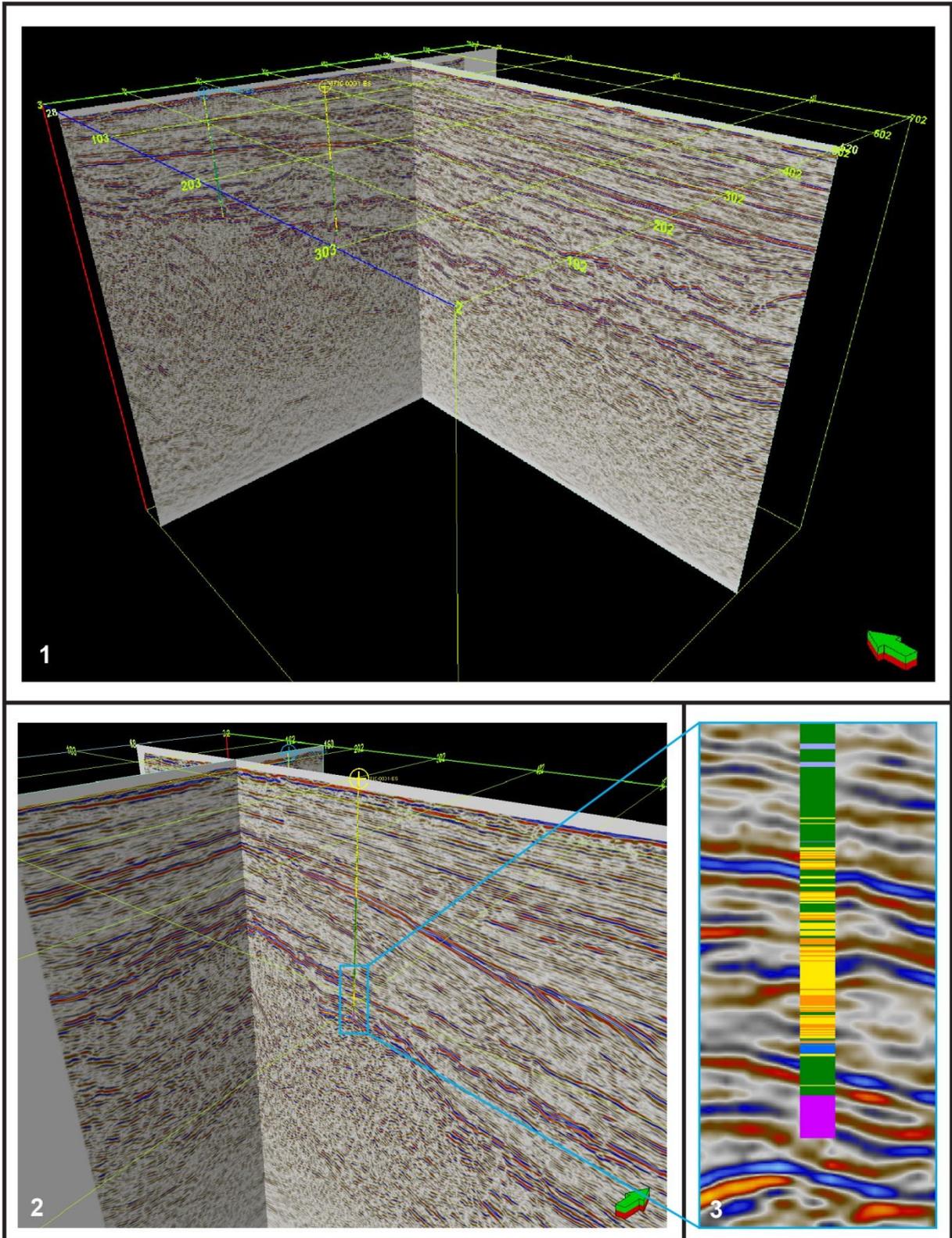


Figura 13: Cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul. A imagem 1 mostra uma linha *dip* (*inline*) e uma linha *strike* (*xline*) (a linha *dip* possui orientação W-E, enquanto que a linha *strike* possui orientação N-S. A flecha verde indica o Norte). A imagem 2 mostra a localização do poço FIC-0001-ES e a linha sísmica que o contém. A imagem 3 mostra a localização do poço na respectiva linha em detalhe, exibindo os tipos litológicos provenientes dos dados de descrição de amostras de calha e a correspondência com os refletores.

3.3 Sismoestratigrafia: interpretação das terminações dos refletores

As reflexões sísmicas são o registro do tempo de percurso (ida e volta) de ondas sísmicas artificiais, refletidas em interfaces físicas das rochas em decorrência do contraste de impedância acústica existente. A impedância acústica é definida como o produto da velocidade de propagação das ondas sísmicas em um determinado meio pela sua densidade.

Essa etapa constituiu-se em analisar as terminações das reflexões sísmicas, identificando os tipos de terminações: *onlap*; *downlap*; *toplap*; truncamento erosivo; concordante (Mitchum Jr. *et al.*, 1977a) (Figura 4), com o intuito de identificar determinadas superfícies que tenham significado estratigráfico importante. Com a identificação das superfícies, delimitaram-se as unidades sísmicas. As superfícies e as unidades sísmicas definem o arcabouço estratigráfico, o qual pode compreender sequências deposicionais, tratos de sistemas, ou subdivisões internas aos tratos de sistemas.

3.4 Sismoestratigrafia: interpretação de sismofácies

As sismofácies são unidades sísmicas mapeáveis tridimensionais, compostas por grupos de refletores cujos parâmetros diferem dos grupos adjacentes, permitindo inferências sobre ambiente deposicional, processos deposicionais e estimativas de litologias (Mitchum Jr *et al.*, 1977b).

A análise de sismofácies constituiu-se em determinar a distribuição e espessura das mesmas de acordo com o arcabouço estratigráfico previamente definido, através da observação de outros parâmetros dos refletores sísmicos, sendo eles: configuração; continuidade; amplitude; frequência; velocidade intervalar; geometria (Mitchum Jr *et al.*, 1977b) (Quadro 1). A interpretação destes parâmetros permite definir texturas sísmicas, que definirão então, as sismofácies. Com a definição das sismofácies e de suas respectivas distribuições nas linhas sísmicas, fez-se uma correlação entre estes dados com as informações litológicas provenientes da descrição de amostras de calha dos poços com *checkshot* inseridos no volume sísmico, o que possibilitou interpretações sobre litologias e sistemas deposicionais, representados pelas sismofácies identificadas.

3.5 Elaboração de diagramas cronoestratigráficos

A partir da obtenção do arcabouço estratigráfico, das texturas sísmicas relacionadas a sistemas deposicionais e da interpretação das falhas, foi feita a elaboração dos diagramas cronoestratigráficos (Wheeler, 1958) para cada uma das cinco linhas sísmicas interpretadas individualmente. Para a elaboração, foi utilizado o software Adobe Illustrator.

As cartas cronoestratigráficas permitem visualizar a evolução espacial e temporal das unidades sísmicas interpretadas, das sismofácies e do componente tectônico envolvido. Assim, é possível interpretar, por exemplo, eventos regressivos e de inundação, bem como visualizar em quais unidades determinadas falhas estiveram ativas ou não.

3.6 Elaboração de mapas de isópacas e mapas estruturais

A partir da obtenção dos dados do arcabouço estratigráfico proveniente da interpretação das unidades sísmicas e das superfícies estratigráficas, mapeou-se as 5 unidades ao longo de todo o cubo sísmico Fazenda Cedro Sul. Assim, obtiveram-se as configurações tridimensionais das 4 superfícies internas do intervalo, delimitadoras das unidades sismoestratigráficas. Com as superfícies de base e de topo de cada unidade, foi possível elaborar os mapas de isópacas, e posteriormente, os mapas estruturais de cada uma das unidades sísmicas.

Os mapas de isópacas (apresentados no capítulo 4.2) permitem a visualização das espessuras da respectiva unidade em milissegundos (ms), já que a profundidade na sísmica é em tempo. As isópacas possibilitam identificar onde o intervalo é mais e menos espesso, permitindo localizar onde a sedimentação foi mais e menos intensa, realizando inferências sobre a criação, desaparecimento e geometria dos depocentros. Esses mapas foram obtidos através da interpolação tridimensional das superfícies de base e de topo de cada uma das unidades sismoestratigráficas interpretadas. Todos os mapas de isópacas aqui apresentados encontram-se em tempo sísmico (tempo duplo de trânsito – milissegundos), pois o volume sísmico trabalhado não possui conversão tempo x profundidade, uma situação usual dentro do trabalho sismoestratigráfico.

O mapa estrutural permite visualizar a localização e a extensão dos principais falhamentos presentes em cada unidade, bem como determinar a quantidade de espaço de acomodação diferencial criado em cada segmento de falha, em cada unidade sísmica. A determinação da quantidade de espaço criado foi obtida através da taxa de controle estrutural. A taxa de controle estrutural é adquirida através da razão entre a espessura em milissegundos do bloco baixo pela do bloco alto. A espessura de cada um dos blocos é dada pela diferença entre a base e o topo dos mesmos. Como todas as falhas mapeadas são normais, o bloco baixo (ou teto) sempre tem espessura maior ou igual do que a do bloco alto (ou muro), o que justifica a divisão do primeiro pelo segundo, já que a criação de espaço de acomodação está registrada na espessura do bloco baixo. Esta metodologia será retomada e melhor detalhada na seção 4.3 do capítulo de Resultados e Discussões.

Assim, os mapas estruturais apresentam, em cada segmento de falha, em cada uma das unidades, a espessura do bloco alto, a taxa de controle estrutural e a espessura do bloco baixo. Estes mapas, portanto, permitem visualizar a configuração espacial das principais falhas, sua evolução lateral, identificar quando as mesmas estiveram ativas e estimar a quantidade de espaço de acomodação criado por elas durante a deposição de cada uma das unidades sismoestratigráficas interpretadas, permitindo assim a conexão estrutural e deposicional.

3.7 Modelo estrutural integrado

A última etapa da metodologia constituiu-se em juntar os dados do arcabouço estratigráfico provido pela análise dos refletores, dos padrões de empilhamento e de preenchimento obtidos através da análise de sismofácies e do arcabouço estrutural provido pela análise das falhas, para obter um modelo integrado de evolução tectono-estratigráfico do intervalo compreendido pelo Membro Mucuri, no volume ocupado pelo cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Interpretação sismoestratigráfica

4.1.1 Arcabouço estratigráfico

A superfície basal do Membro Mucuri no intervalo analisado (Quadro 2) é representada, ora pelo topo do embasamento cristalino, ora pelo topo da Formação Cricaré (Figura 14), que constitui os depósitos da fase rifte da Bacia do Espírito Santo. A superfície de topo do intervalo (Quadro 2) é constituída pela base do Membro Itaúnas (Figura 14), que é a camada de evaporitos diretamente sobreposta ao Membro Mucuri.

A interpretação das reflexões sísmicas e de suas respectivas terminações identificou quatro superfícies estratigráficas (depois denominadas de: superfície base US2, superfície base US3, superfície base US4 e superfície base US5) (Quadro 2), presentes em todas as cinco linhas interpretadas individualmente. Devido à predominância das terminações em *onlaps* e *downlaps* aos truncamentos erosivos, as superfícies supostamente marcam diferenças abruptas de sedimentação, indicando mudanças no sistema deposicional. Períodos erosivos também podem estar associados, porém devem constituir pequenos eventos de ocorrência localizada, sem grandes influências na totalidade do intervalo analisado.

A definição dessas quatro superfícies permitiu a divisão do Membro Mucuri em cinco unidades sismoestratigráficas: Unidade Sismoestratigráfica 1 (US1); Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2); Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3); Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4); Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5), definindo assim, o arcabouço estratigráfico (Quadro 2). As cinco unidades identificadas ocorrem ao longo de todo o intervalo sísmico mapeado, tendo as suas distribuições em área controladas pelo componente tectônico distensivo, representado pelas falhas normais identificadas.

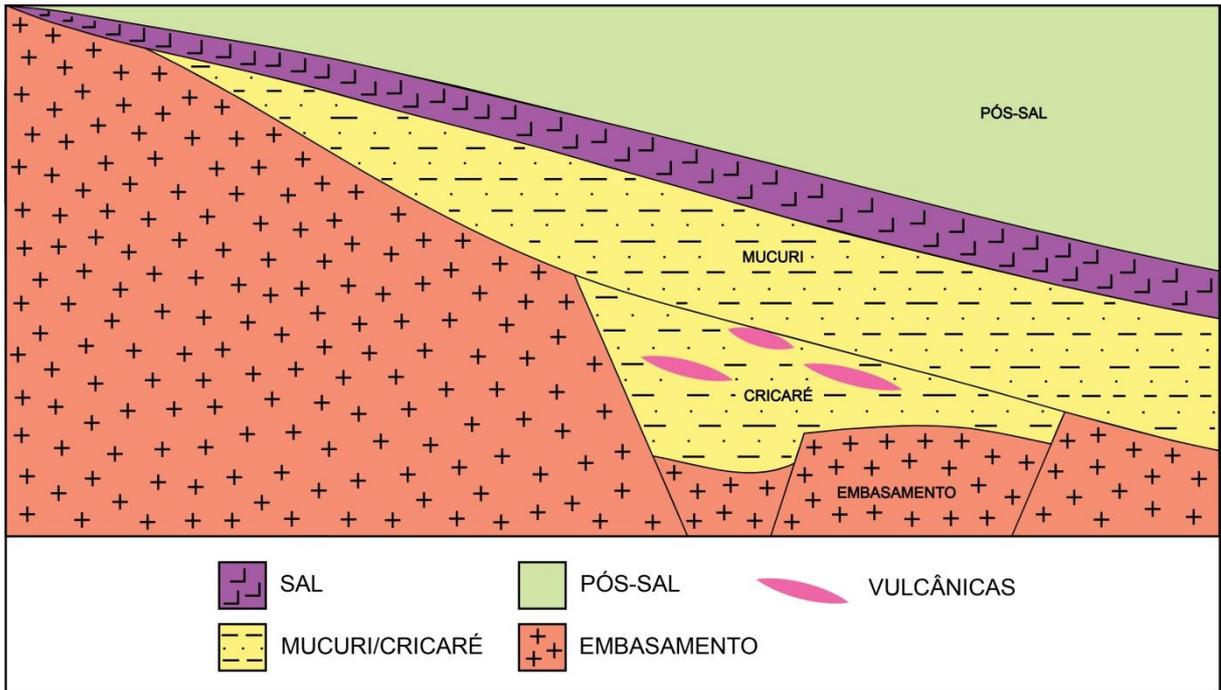


Figura 14: Seção esquemática da base da bacia do Espírito Santo. A base do Membro Mucuri é constituída ora pelo embasamento cristalino, ora pelo topo da Formação Cricaré, enquanto que o topo é representado homogeneamente pela base da camada de sal (Membro Itaúnas).

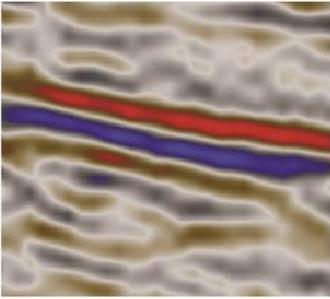
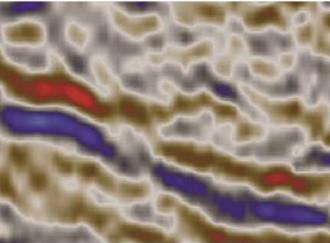
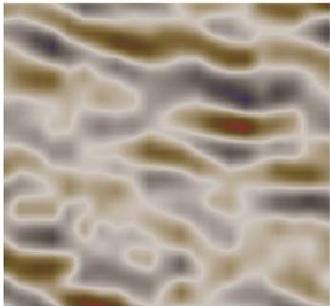
ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO	
Pós-Sal	
┌ ┌ ┌ ┌ ┌ Membro Itaúnas ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ <i>sup. base do sal</i>	
Membro Mucuri	Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5) <i>sup. base US5</i>
	Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4) <i>sup. base US4</i>
	Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3) <i>sup. base US3</i>
	Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2) <i>sup. base US2</i>
	Unidade Sismoestratigráfica 1 (US1) <i>sup. topo do embasamento / topo da Fm. Cricaré</i>
+ + + Embasamento + + +	. . . Formação Cricaré . . .

Quadro 2: Arcabouço estratigráfico do intervalo analisado, constando os limites de base e de topo e a compartimentação interna interpretada, incluindo superfícies e unidades identificadas.

4.1.2 Sismofácies

As sismofácies foram definidas baseando-se em determinados parâmetros dos refletores, que têm significado expressivo nas linhas sísmicas analisadas. Os parâmetros definidores foram a amplitude, a frequência, a continuidade e a geometria, que definiram três distintas sismofácies (Quadro 3): sismofácies 1 (cor azul; SF1); sismofácies 2 (cor verde; SF2); sismofácies 3 (cor amarela; SF3).

A SF1 apresenta refletores contínuos, com alta amplitude, frequência média e geometria tabular (lençol) (Quadro 3). A SF2 apresenta refletores descontínuos a semi-contínuos, com média amplitude, frequência média a alta e geometria também tabular (lençol). A SF3 é marcada por refletores descontínuos, com baixa amplitude, frequência variável e geometria indefinida. Ela ainda envolve as demais sismofácies e a configuração interna dos refletores é comumente caótica.

Sismofácies	Descrição	Exemplo	Litologias em poço	Interpretação sistema deposicional
1 (Azul)	<ul style="list-style-type: none"> - alta amplitude; - frequência média; - refletores contínuos; - geometria tabular - lençol (sheet); - gradação lateral com a sismofácies 2. 		Não perfurado.	<p>Sem determinação definitiva.</p> <p>Possíveis interpretações:</p> <ul style="list-style-type: none"> - evaporitos <i>sin-deposicionais</i> ou <i>pós-deposicionais</i> (diagenéticos?); - carbonatos do pré-sal (porção proximal do pré-sal?); - alteração diagenética local com expressão sísmica.
2 (Verde)	<ul style="list-style-type: none"> - média amplitude; - frequência média a alta; - refletores descontínuos a semi-contínuos; - geometria tabular - lençol (sheet); - gradação lateral com a sismofácies 1. 		Predominância de arenitos e folhelhos com pequenas intercalações de conglomerados.	<p>Costeiro, composto por deltas e praias dominadas por ondas.</p> <ul style="list-style-type: none"> - marinho ou lacustre?
3 (Amarela)	<ul style="list-style-type: none"> - baixa amplitude; - frequência variável; - refletores descontínuos; - geometria indefinida; - envolve as demais sismofácies. 		Predominância de conglomerados e arenitos com pequenas intercalações de folhelhos.	<p>Aluvial, composto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - leque aluvial; - fluvial (canais e planícies).

Quadro 3: Sismofácies interpretadas, mostrando os parâmetros sísmicos definidores de cada uma das sismofácies, exemplos, litologias interpretadas a partir da correlação com os poços e as respectivas interpretações dos sistemas deposicionais.

Na totalidade do intervalo abrangido, há um absoluto predomínio da SF3 em relação às demais sismofácies. A SF2 é a segunda em abundância, sendo seguida pela SF1, a qual possui ocorrência muito restrita e localizada, em abundância muito inferior a SF2 e a SF3. Os critérios sísmicos definidos para a separação da SF1 e SF2 podem, às vezes, não serem tão claros quanto a sua distinção, gerando certa dificuldade de separação entre essas duas sismofácies. Uma característica importante e marcante da SF1 e SF2, é que as duas ocorrem, comumente, de forma associada, na forma de gradação lateral da SF1 para a SF2 e vice e versa.

Com os parâmetros sismoestratigráficos definidos, fez-se a identificação das diferentes sismofácies nas cinco linhas interpretadas. Depois, utilizando-se os dados litológicos provenientes da descrição de amostra de calha dos dois poços com *checkshot*, que ocorrem na área ocupada pelo volume sísmico (Figura 1), realizou-se a correlação entre os poços e as sismofácies interpretadas. O poço 1ATV-0002-ES atingiu uma porção muito proximal do Membro Mucuri, onde o mesmo tem a espessura de uma única reflexão sísmica, impossibilitando uma boa correlação. O poço 1FIC-0001-ES, por outro lado, atingiu a SF2 e SF3 (Figura 19), possibilitando uma boa correlação para ambas. A SF1 não foi perfurada por nenhum dos dois poços em nenhuma das cinco linhas interpretadas.

De acordo com a correlação, a SF2 é constituída por um predomínio de arenitos e folhelhos, com finas intercalações de conglomerados (Quadro 3). O sistema deposicional interpretado é o Costeiro, constituído por deltas e praias dominadas por ondas. Parte desta interpretação é corroborada com os dados da descrição de testemunhos de sondagem do Membro Mucuri em 10 poços, não abordados no presente trabalho, mas que integram o Projeto Mucuri. A descrição dos testemunhos identificou a associação de fácies *shoreface inferior/superior dominado por ondas* (Figura 15), constituída por sucessões retrogradacionais ou progradacionais, compostas por pelitos laminados, heterolitos (*linsen, wavy e flaser*) com laminação ondulada truncada e arenitos finos a médios com *waveripples* e estratificação cruzada *swaley*. A totalidade desses dados, porém, não é ainda suficiente para determinar se esses depósitos podem ser classificados como marinhos ou lacustres. Maiores indícios serão obtidos no decorrer do Projeto, através de evidências petrográficas e geoquímicas.

De acordo com a correlação, a SF3 é constituída por um predomínio de conglomerados e arenitos com pequenas intercalações de folhelhos (Quadro 3). O sistema deposicional interpretado é o Aluvial, composto por leques aluviais e fluviais (canais e planícies). Essa interpretação é também comprovada, em parte, pela descrição dos testemunhos de sondagem do Projeto. A descrição dos testemunhos identificou as associações de fácies *canais fluviais* (Figura 15), compostos por ciclos granodecrescentes ascendentes de conglomerados clasto-suportados, maciços com laminações plano-paralelas ou cruzadas e arenitos médios a muito grossos com laminação horizontal, estratificação cruzada de baixo ângulo, estratificação cruzada, ou maciços.

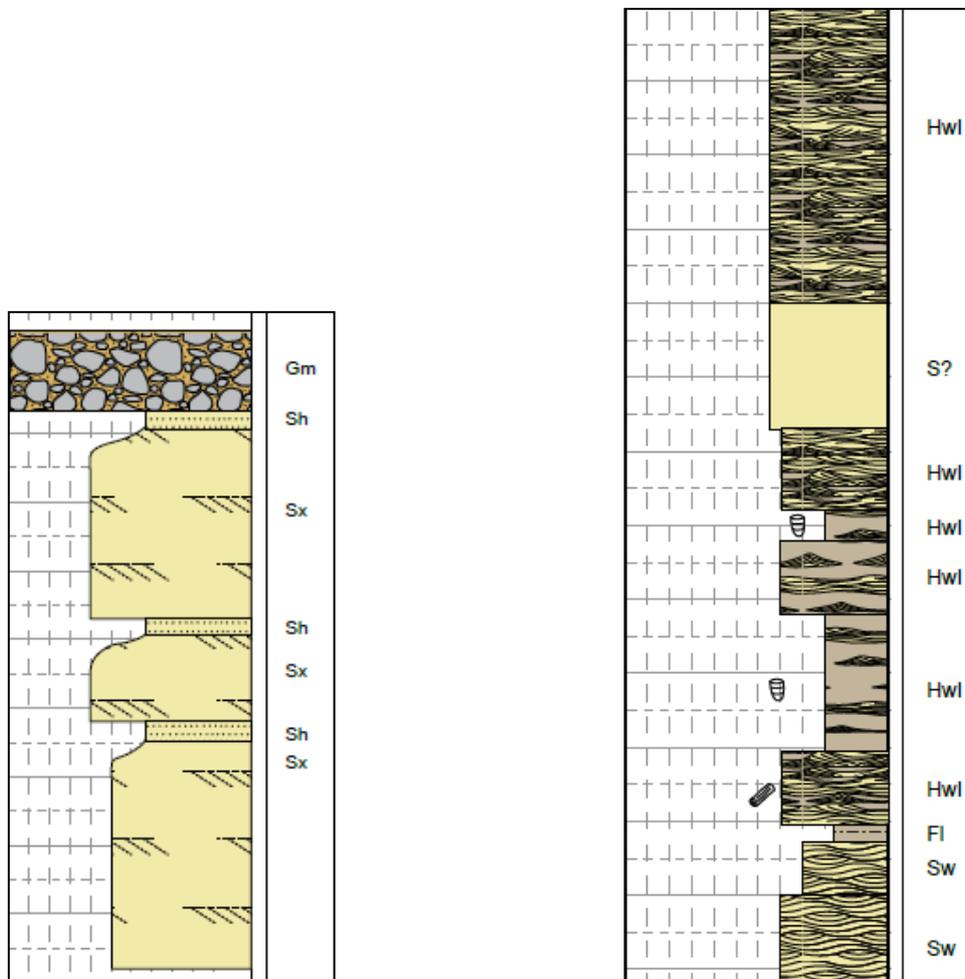


Figura 15: Fragmentos de dois perfis de descrição de testemunho descritos pelo Projeto Mucuri, mostrando a associação de fácies de *canais fluviais* (à esquerda) e a associação de fácies *shoreface inferior / superior dominado por ondas* (à direita).

Como não foi possível correlacionar a SF1 com dados litológicos, a sua definição permanece em debate, até que novos dados sejam adquiridos. Contudo, algumas hipóteses podem ser apresentadas e discutidas. Como a SF1 possui ocorrência muito restrita e uma geometria tabular bem definida (Figura 24; Figura 29, por exemplo), ela pode representar lentes delgadas de evaporitos sin-deposicionais, depositadas em condições de clima árido com intensa evaporação em corpos d'água isolados (Vieira, 1998) ou pós-deposicionais, vinculadas a processos diagenéticos posteriores à sedimentação. Ainda devido aos fatores de ocorrência muito localizada e geometria tabular, a SF1 pode caracterizar relictos das rochas carbonáticas constituintes da camada do Pré-Sal, já que os depósitos do Membro Mucuri são a porção mais proximal do Pré-Sal ou, em outras palavras, a “borda do Pré-Sal”.

A pontual dificuldade de distinção entre a SF1 e a SF2 somada com a ocorrência conjunta entre ambas, pode ainda sugerir que as duas sismofácies constituam uma única fácies sísmica, representando o mesmo sistema costeiro interpretado para a SF2. A diferença nos padrões sismoestratigráficos definidores de cada uma, poderia ser resultado, por exemplo, de variações laterais nos processos diagenéticos em um mesmo grupo litológico.

4.1.3 Linha sísmica *DIP 70*

Esta linha localiza-se mais a norte da área de estudo, com orientação W-E (Figura 1; Figura 16). A interpretação das terminações das reflexões sísmicas (Figura 17) identificou um predomínio de *downlaps* e *onlaps*, sendo um domínio de *downlaps* mais a leste da seção e uma abundância de *onlaps* mais a oeste. De modo geral, os refletores possuem um grau de continuidade maior da porção central para a porção oeste da linha, em relação às reflexões da parte central para o segmento leste da linha.

A US1 é limitada a oeste pela US5, possui pouca espessura nas porções proximal e distal (Figura 18) e apresenta um espessamento significativo na parte central da unidade, controlado pelo desenvolvimento da falha azul fraco. A US2 é a de menor extensão, sendo limitada a oeste pela falha azul fraco, porém é a que tem maior espessamento, o qual aumenta progressivamente para a porção leste. A US3 apresenta a maior espessura a leste da falha azul fraco e as menores próximo dos

limites proximal e distal, de modo análogo ao que acontece na US1. A US4 possui um leve aumento da espessura à leste das duas falhas, e assim como a US1, é limitada na parte proximal pela US5. A US5 é a unidade com maior extensão lateral, ocorre ao longo de toda a linha e apresenta um gradativo espessamento em direção ao limite oeste, onde é a unidade dominante.

A SF3 é a sismofácies dominante (Figura 19), sendo muito abundante na US2 e US3. A SF1 tem ocorrência restrita, ocorrendo exclusivamente nas porções proximais da US1, US3 e US4, sendo expressiva apenas na US1. A SF2 é a segunda mais abundante e é dominante na US1 e US5, possuindo também uma expressão significativa no limite leste da US4 e ocorrências muito localizadas na US2 e US3.

Com a integração do arcabouço estratigráfico e das sismofácies no diagrama cronoestratigráfico (Figura 20), observam-se três eventos de inundação, representados pela ocorrência conjunta de SF1 e SF2, intercalados com dois períodos regressivos, representados pela presença da SF3. O primeiro evento de inundação é síncrono com a deposição da US1, estendendo-se praticamente ao longo de toda a unidade. O segundo evento de inundação é muito escasso, sendo representado pela presença de pequenas ocorrências da SF2 na US2, a leste das duas falhas. Separando estes dois primeiros eventos, ocorre o primeiro período regressivo, ocorrendo unicamente na US2, a leste das duas falhas. O terceiro evento de inundação inicia-se no extremo leste da US4 e culmina com a deposição da US5, onde a SF2 é amplamente dominante, marcando o mais expressivo evento de inundação do intervalo. Intercalado com os dois últimos eventos de inundação, ocorre o segundo período regressivo, representado pela deposição da US2 e US3, onde há um amplo domínio da sedimentação aluvial representada pela SF3, e uma escassa deposição de SF1 e SF2.

De forma geral, há um espessamento do intervalo para leste, controlado principalmente pelas duas falhas normais de orientação aproximadamente N-S, as quais possuem os seus picos de atividade durante a deposição da US1 e US3. As unidades mais basais ocorrem nas porções mais distais da linha, enquanto que a unidade mais recente tem um domínio absoluto na porção proximal.

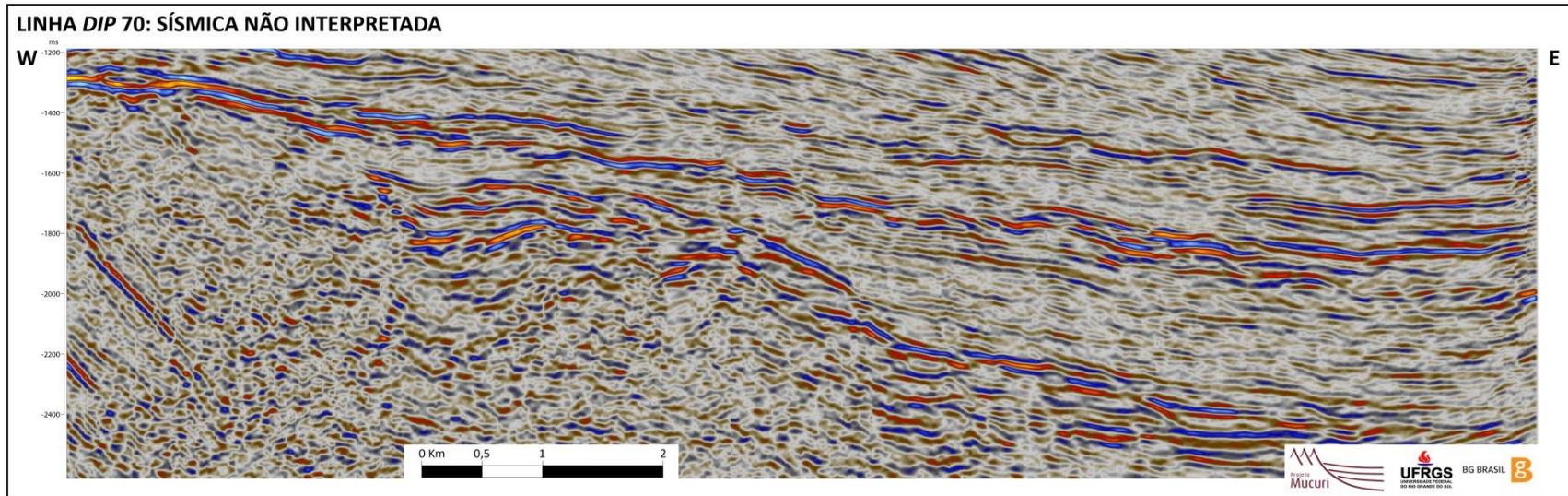


Figura 16: Linha sísmica *dip* 70 não interpretada.

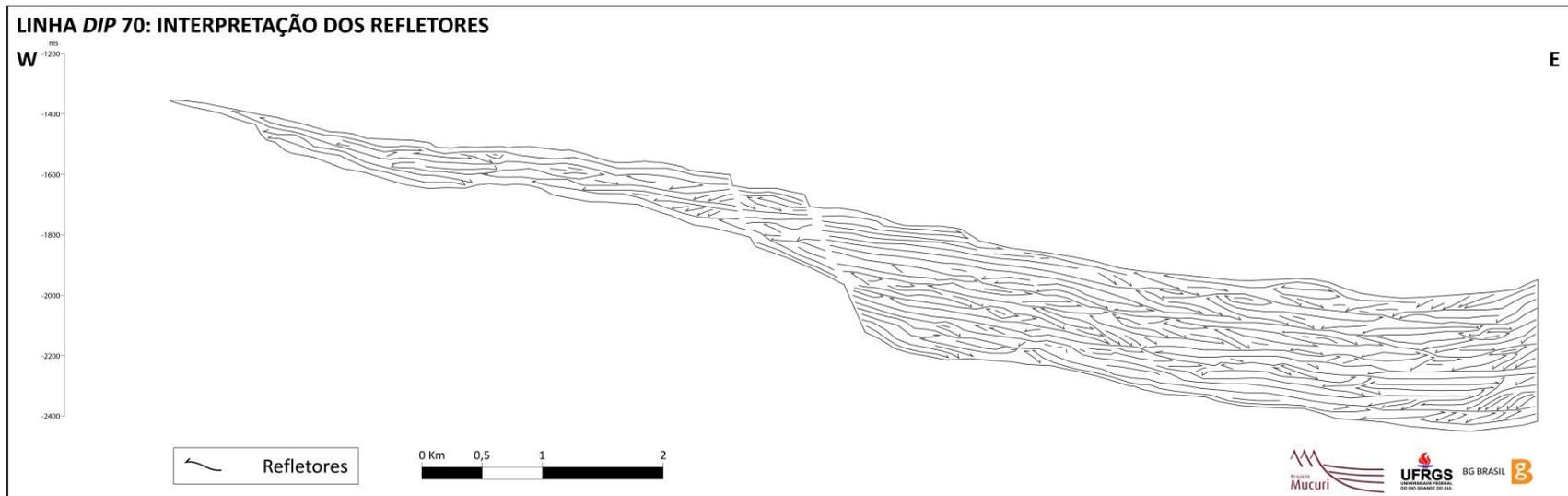


Figura 17: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica *dip* 70.

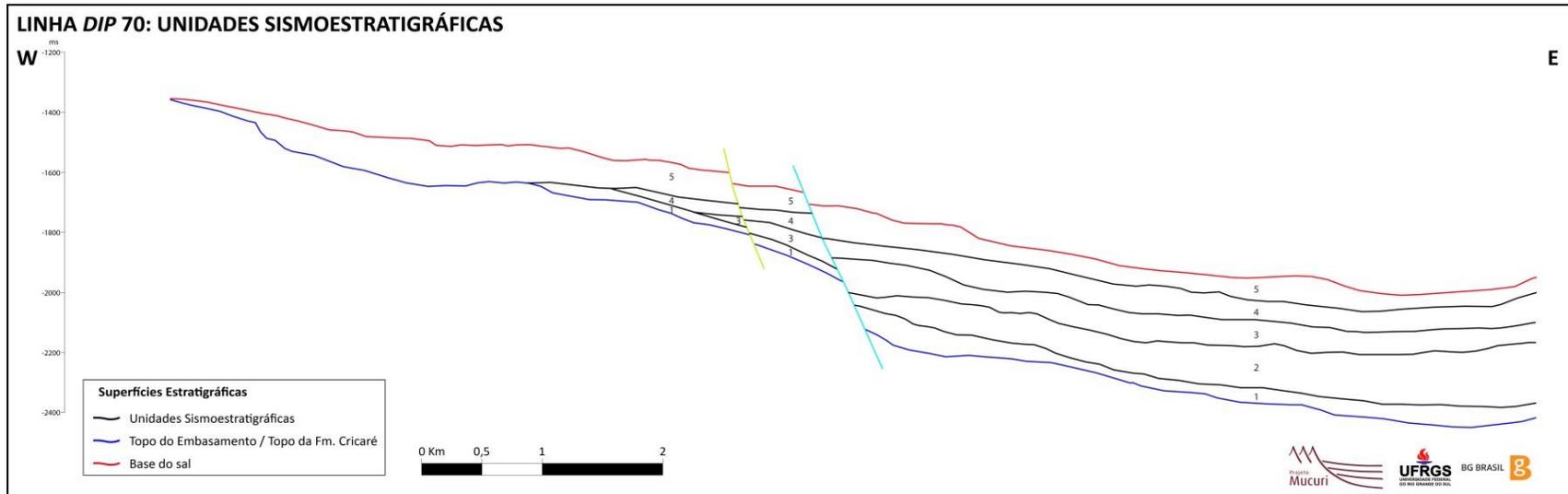


Figura 18: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica *dip 70*.

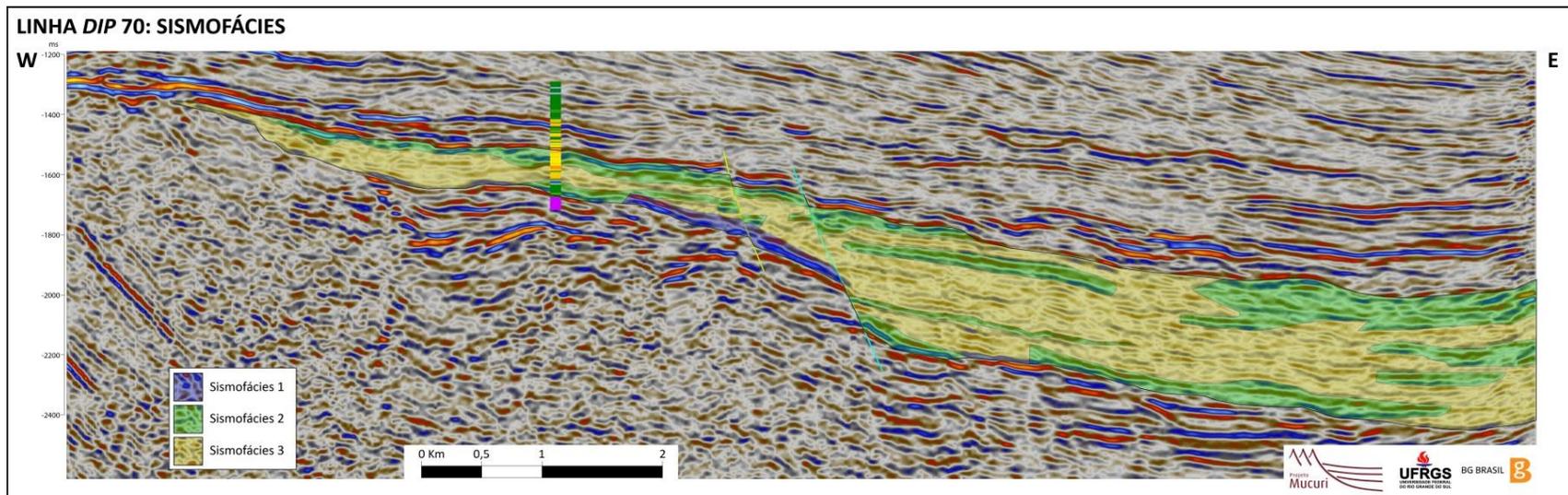


Figura 19: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica *dip 70*. Detalhe para a localização do poço 1FIC-0001-ES, utilizado na correlação.

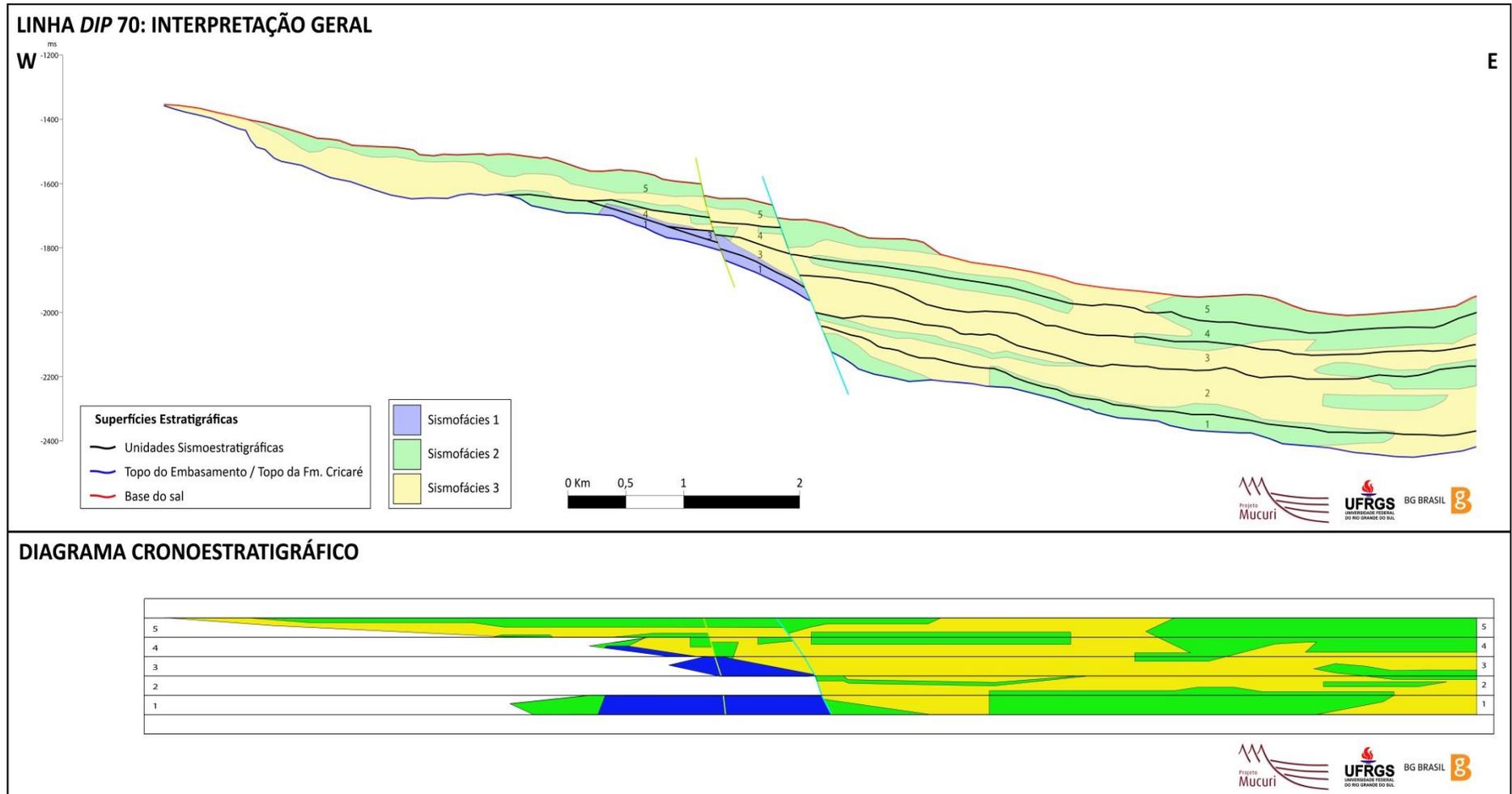


Figura 20: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica *dip 70*, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.

4.1.4 Linha sísmica *DIP 110*

Esta linha localiza-se na parte central da área ocupada pelo volume sísmico e possui orientação W-E (Figura 1; Figura 21). A interpretação dos refletores (Figura 22) identificou uma predominância de *downlaps* e truncamentos erosivos na porção leste e uma abundância de *onlaps* da parte central para o limite oeste. De modo geral, a maioria dos refletores possui boa continuidade lateral, salvo apenas as porções central e extremo leste, onde as reflexões são menos contínuas.

A US1 limita-se a oeste com o embasamento/Formação Cricaré e possui aproximadamente a mesma extensão lateral que a US3 e a US4 (Figura 23). A US1 é pouca espessa nas porções dos extremos leste e oeste e apresenta um significativo aumento da espessura na porção central da unidade, controlada principalmente pela atividade sin-deposicional das falhas roxa, verde e azul. A US2 é a que tem a menor extensão lateral, limita-se a oeste com a falha verde e é a unidade com maior espessura, que aumenta gradativamente para a porção mais distal. A US3 e a US4 possuem características semelhantes, com pouca espessura no extremo oeste e um aumento gradual da mesma para leste, também controlado pelo desenvolvimento das falhas, porém de forma mais atenuada do que na US1. A US5 é a de maior extensão lateral, distribuindo-se ao longo de toda a linha e tem sua espessura aumentando progressivamente em direção ao limite proximal da linha.

A SF3 é a sismofácies dominante (Figura 24), estando presente em todas as unidades, sendo a principal constituinte de US1, US3 e US4. A SF1 e a SF2 ocorrem associadas e também estão presentes em todas as unidades, concentrando-se na porção mais distal da linha, a leste da falha azul. A SF1 e a SF2 têm ainda um amplo domínio na US2 e na US5, e também ocorrências localizadas nas US1, US3 e US4.

Com a integração do arcabouço estratigráfico e das sismofácies no diagrama cronoestratigráfico (Figura 25), observam-se três eventos de inundação, representados pela ocorrência conjunta de SF1 e SF2. O primeiro inicia-se na porção mais distal da US1, atingindo o seu pico no início da deposição da US2, limitando-se com a zona de falha mais a leste, sendo, portanto, pouco expressivo. O segundo evento ocorre no final da sedimentação da US2, sendo também pouco significativo. O terceiro se inicia no extremo leste da US3, evoluindo

progressivamente pela US4, culminando na deposição da US5, onde a SF2 é amplamente dominante, marcando o mais expressivo evento transgressivo do intervalo. Nas US2, US3 e US4 há um amplo domínio da sedimentação aluvial representada pela SF3, e uma escassa deposição de SF1 e SF2, representando dois períodos de regressão. O primeiro deles, na US2, é pouco relevante e separa os dois primeiros eventos de inundação. O segundo, que ocorre na US3 e US4, é o mais expressivo, e separa o segundo do terceiro evento de inundação.

Da mesma forma que ocorre na linha 70, o Membro Mucuri apresenta um progressivo espessamento para leste, controlado principalmente pelo desenvolvimento das duas zonas de falhas, especialmente durante a deposição da US1. A porção proximal do intervalo apresenta um amplo domínio da unidade mais recente, enquanto que unidades mais antigas concentram-se nas porções mais distais.

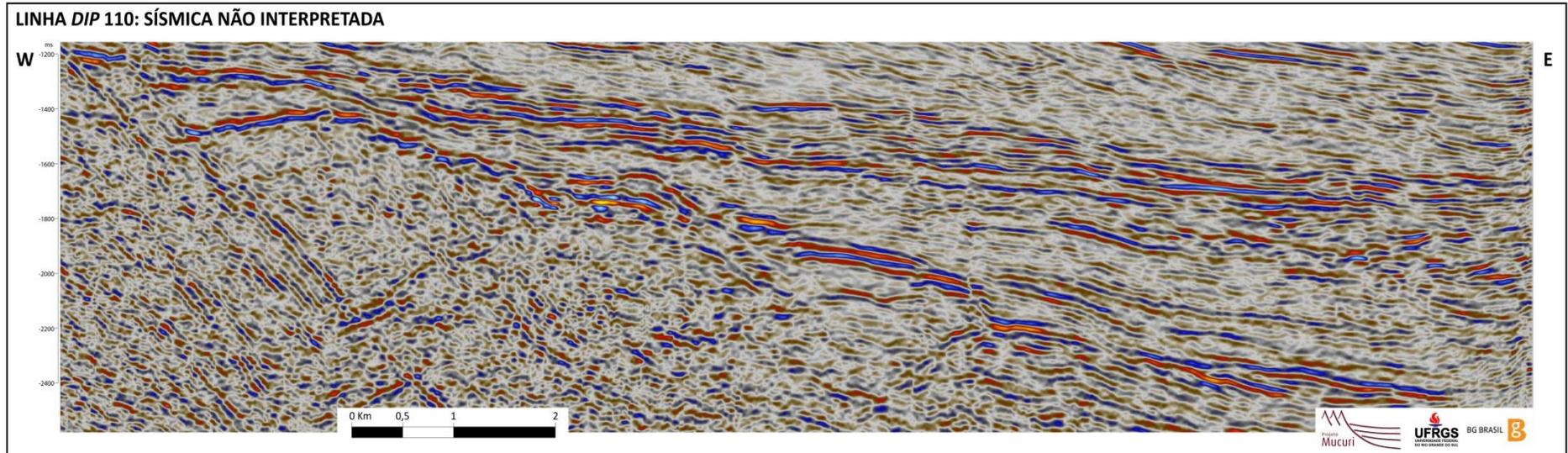


Figura 21: Linha sísmica *dip* 110 não interpretada.

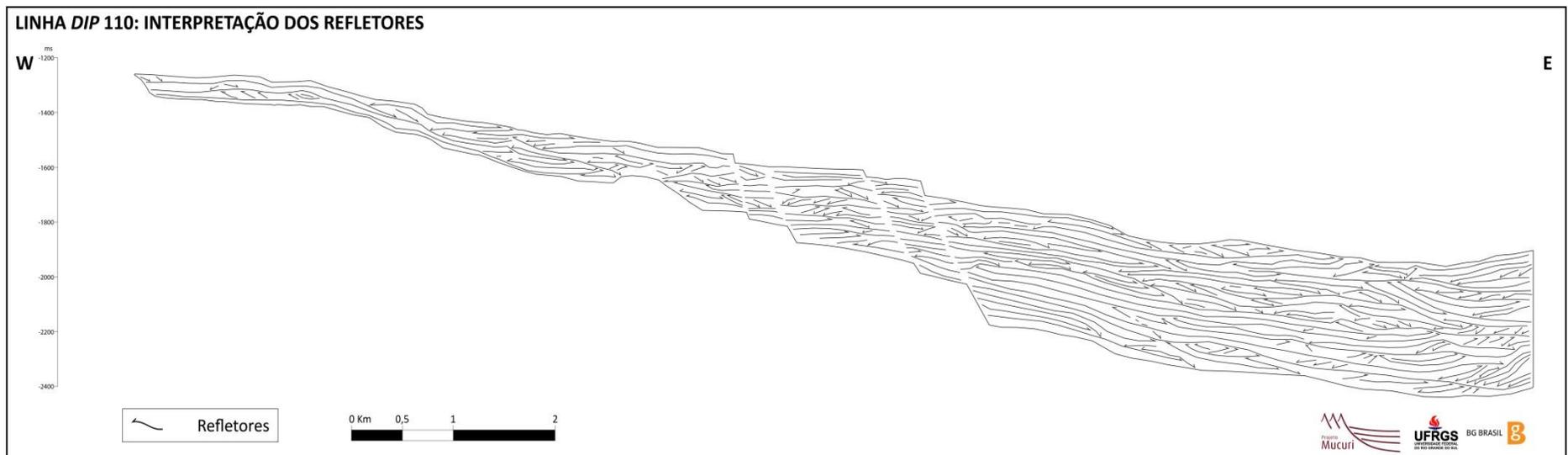


Figura 22: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica *dip* 110.

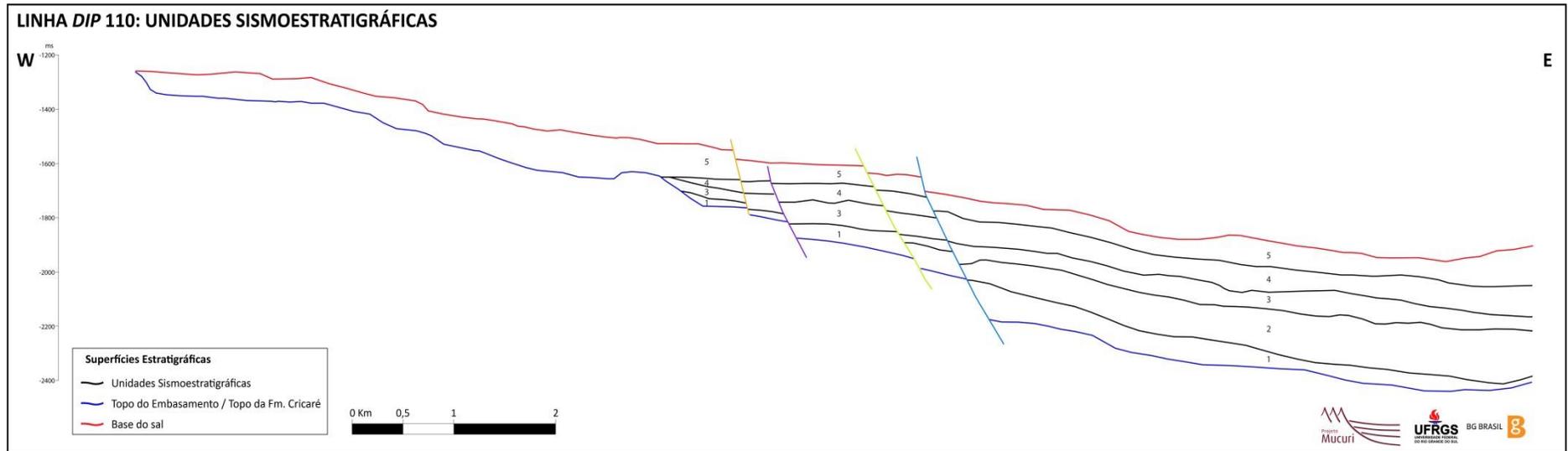


Figura 23: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica *dip* 110.

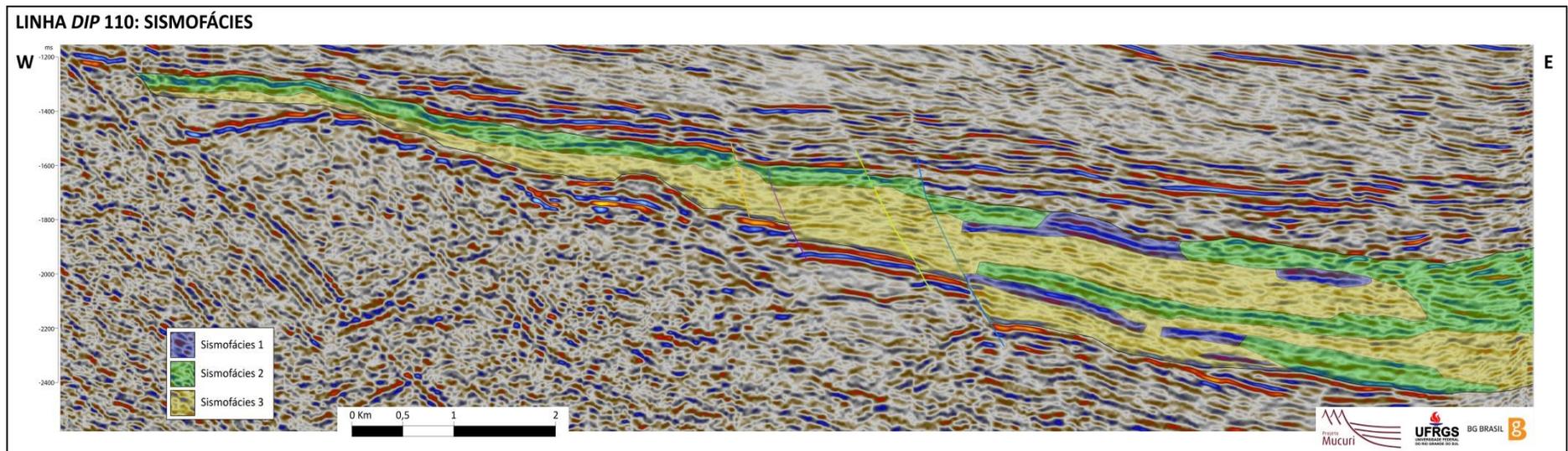


Figura 24: Interpretação das sismo fácies para a linha sísmica *dip* 110.

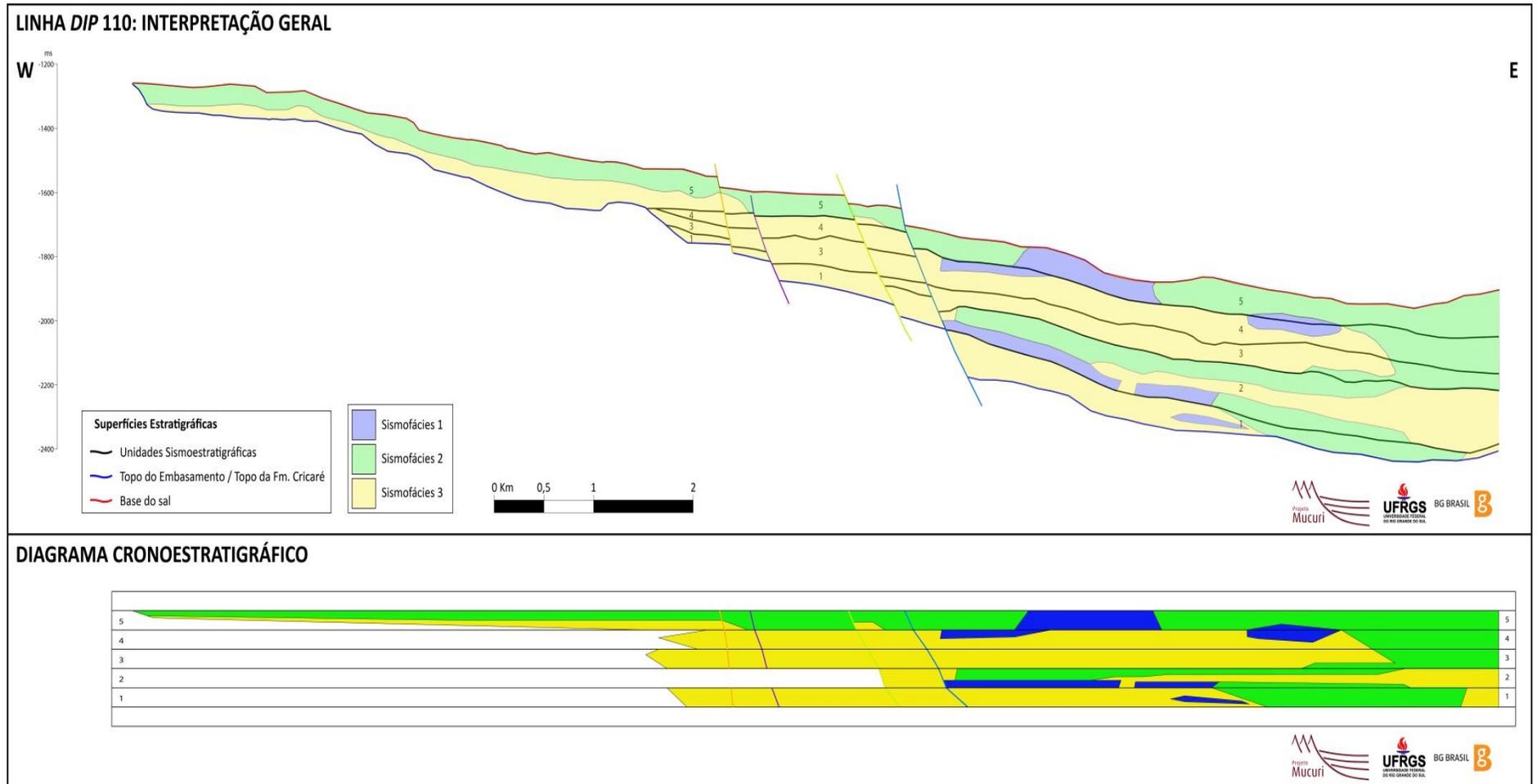


Figura 25: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica *dip* 110, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.

4.1.5 Linha sísmica *DIP 190*

Esta linha localiza-se no sul da área de estudo, com orientação W-E (Figura 1; Figura 26). A interpretação das terminações das reflexões sísmicas (Figura 27) identificou um predomínio de *onlaps*, e em menor quantidade, truncamentos erosivos e *downlaps*. De modo geral, os refletores possuem um grau de continuidade maior da porção central para a porção oeste e menor continuidade da parte central para a parte leste da linha.

A US1 limita-se a oeste com falha laranja (Figura 28), sendo pouco espessa nas porções mais proximais e mais distais da linha, apresentando, porém, um aumento expressivo da espessura na porção central do intervalo, controlado principalmente pelo desenvolvimento da falha azul fraco. A US2 estende-se a oeste até a falha verde, onde sua porção mais proximal apresenta-se erodida e possui um progressivo aumento da espessura para leste. A US3 limita-se a oeste com a falha laranja e apresenta um espessamento significativo apenas no segmento mais distal da unidade. A US4 também se limita na porção proximal com a falha laranja e apresenta um aumento progressivo da espessura para leste. A US5 estende-se ao longo de toda a linha, com um aumento gradativo da espessura para o segmento proximal do intervalo, com influência tectônica incipiente.

A SF3 é a sismofácies dominante (Figura 29), seguida da SF2 e da SF1. A SF3 ocorre em todas as unidades, tendo um absoluto domínio na US3 e US4. A SF1 e a SF2 aparecem conjuntas, também ocorrem em todas as unidades, com importantes concentrações na US1 e US2, e um predomínio absoluto ao longo de toda a US5. Ocorrências pontuais de SF1 e SF2 são identificadas na porção proximal da US3 e US4 e no limite leste da US4.

Com a integração do arcabouço estratigráfico e das sismofácies no diagrama cronoestratigráfico (Figura 30), é possível observar três grandes domínios de SF1 e SF2, que representam eventos de inundação, intercalados com dois períodos regressivos, representados pela SF3. O primeiro evento de inundação aparece nas porções proximal e central da US1, sendo pouco significativo. O segundo inicia-se no extremo leste da US1, prolonga-se para oeste durante a US2 e termina nas porções proximais da US3. O terceiro, e mais expressivo, também se inicia a leste, nos estágios finais de deposição da US4 e prolonga-se para a US5, estendendo-se

até a porção mais proximal da unidade. O primeiro período regressivo é pouco expressivo, inicia-se no final da deposição na porção central da US1, termina nos depósitos iniciais da US2, também no segmento central da unidade e separa os dois primeiros eventos de inundação. O segundo evento regressivo possui grande expressão, ocorre durante a deposição da US3 e US4 e separa o segundo do terceiro evento de inundação.

De forma geral, há um espessamento do intervalo para leste, dessa vez controlado principalmente pelo desenvolvimento das duas falha mais proximais, representando um deslocamento da deformação para porções mais proximais, ao contrário do que ocorre nas *inlines* 70 e 110. Novamente ocorre um domínio de depósitos antigos nas porções distais e sedimentos mais recentes no segmento proximal do intervalo.

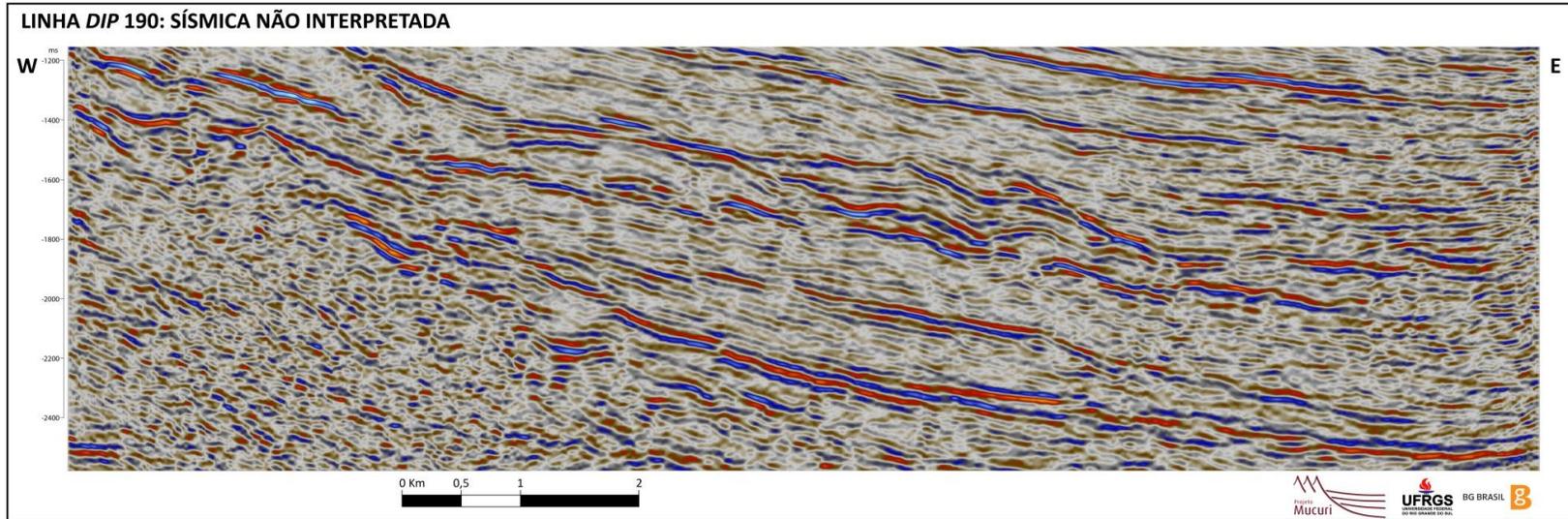


Figura 26: Linha sísmica *dip* 190 não interpretada.

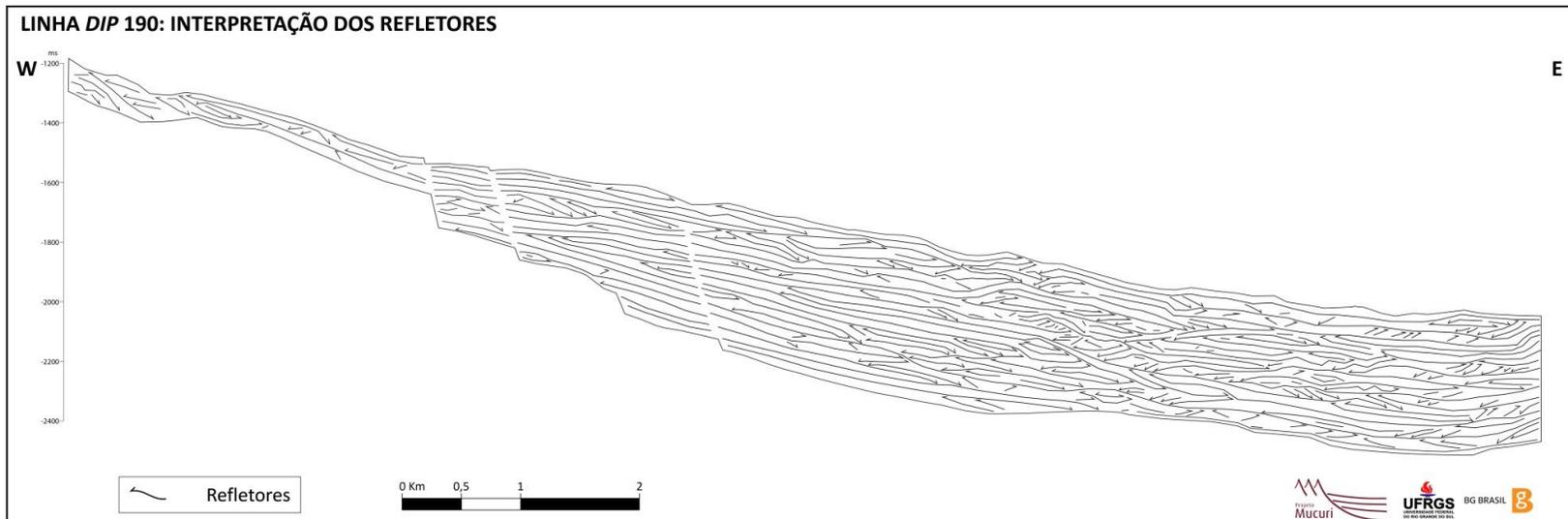


Figura 27: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica *dip* 190.

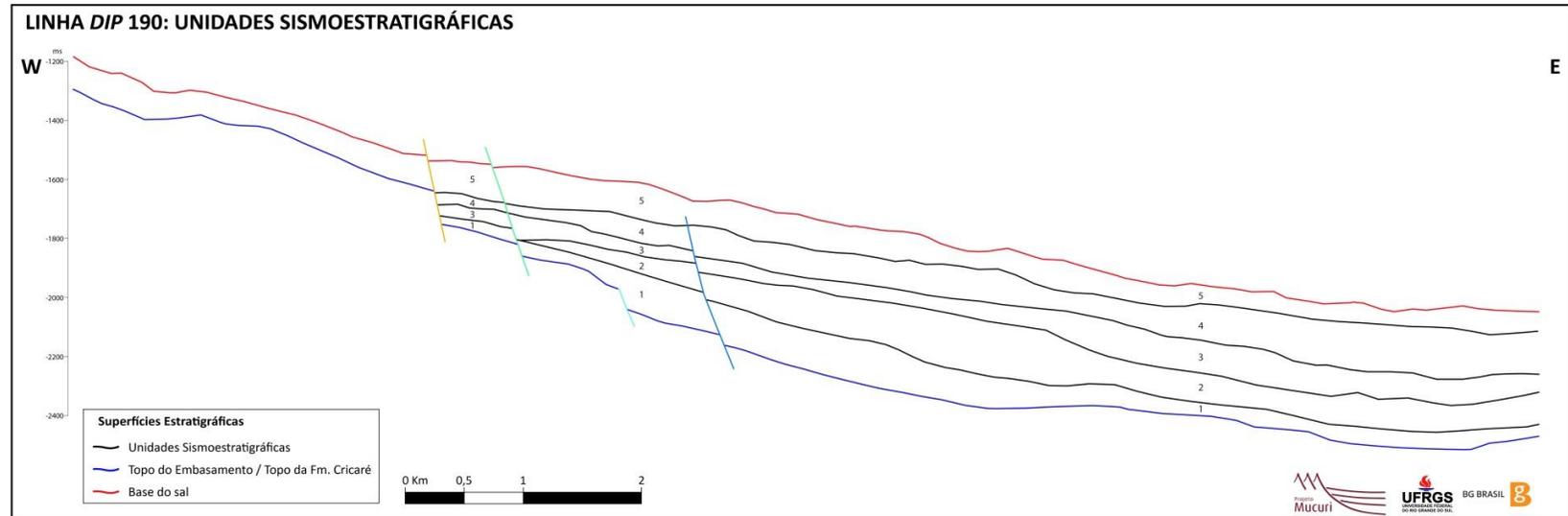


Figura 28: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica *dip* 190.

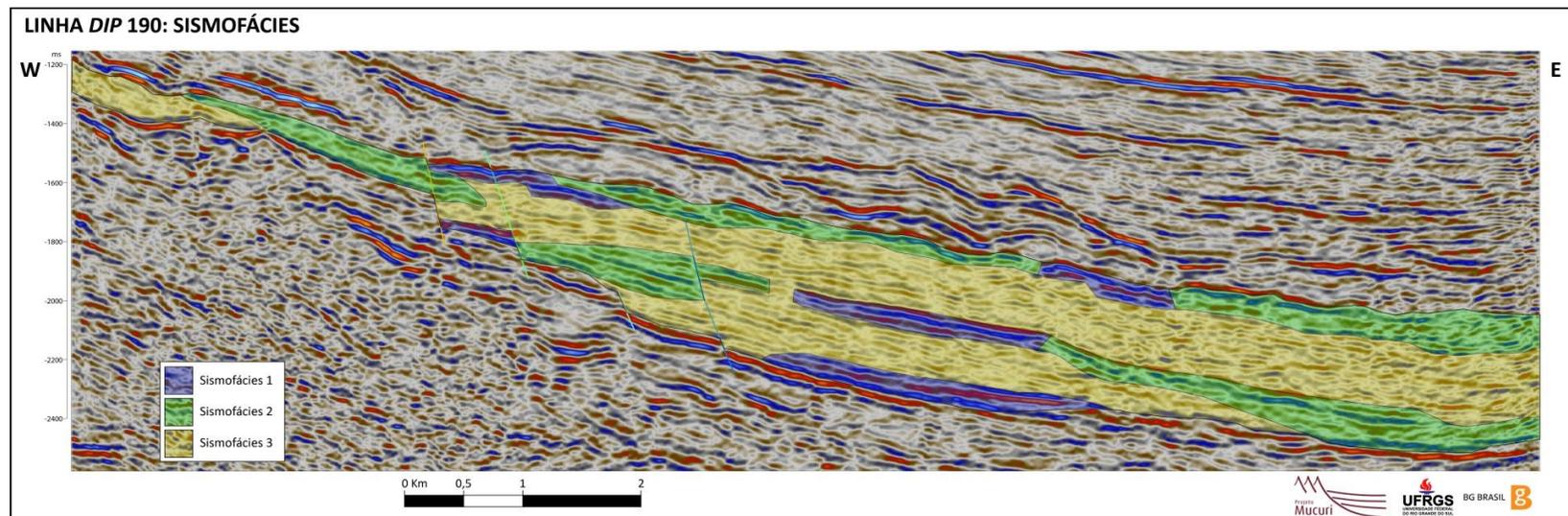


Figura 29: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica *dip* 190.

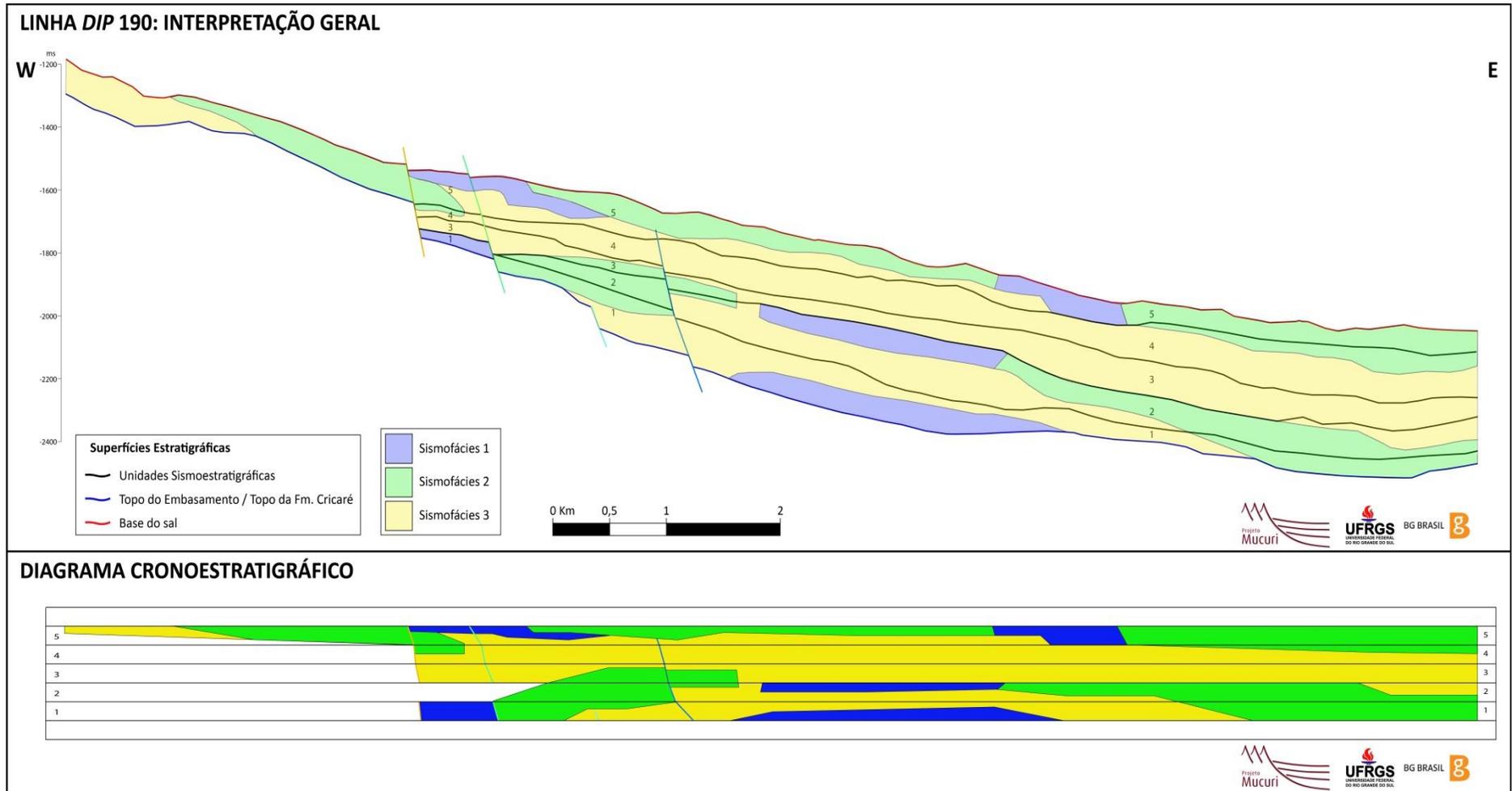


Figura 30: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica *dip* 190, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.

4.1.6 Linha sísmica **STRIKE 380**

Esta linha localiza-se próximo ao centro da área de estudo, com orientação N-S (Figura 1; Figura 31), atravessando algumas das falhas interpretadas no intervalo. A interpretação das terminações das reflexões sísmicas (Figura 32) identificou um predomínio de *onlaps* em relação a truncamentos erosivos e *downlaps*. De modo geral, a maioria dos refletores possui boa continuidade lateral ao longo de toda a linha.

A US1 estende-se ao longo de todo o intervalo e apresenta significativos aumentos na espessura apenas nas porções adjacentes às falhas (Figura 33). A US2 estende-se do segmento sul até o centro da seção, limita-se contra a US1 e reaparece com um curto segmento no extremo norte. Nos dois casos, a espessura aumenta gradativamente em direção aos extremos norte e sul. A US3 ocorre ao longo de todo o intervalo, sem apresentar grandes variações na espessura. A US4 também não possui significativas variações na espessura, porém limita-se contra a US3 no extremo norte da seção. A US5 é a unidade mais expressiva, distribuindo-se ao longo de toda a linha, contendo as maiores espessuras, que se concentram nos extremos norte e sul.

A SF3 é a sismofácies dominante (Figura 34), seguida da SF2 e da SF1. A SF3 ocorre em todas as unidades, com um absoluto domínio na US3, US4 e na porção sul da US1. A SF1 e a SF2 aparecem associadas e também ocorrem em todas as unidades, com importantes concentrações na porção norte da US1, no segmento sul da US2, na parte sul da US3 e um predomínio absoluto na US5. Ocorrências pontuais de SF1 e SF2 são identificadas ao longo da US4 e no extremo norte da US3.

Com a integração do arcabouço estratigráfico e das sismofácies no diagrama cronoestratigráfico (Figura 35), é possível visualizar três grandes concentrações de SF1 e SF2, que representam eventos de inundação. O primeiro deles concentra-se na parte norte da US1. O segundo ocorre na porção sul, iniciando na US1 (“canalizado” na falha azul), aumenta lateralmente na US2 e na US3 e termina no extremo sul da US4. O terceiro é o mais expressivo, iniciando-se no segmento norte da US3 e US4 e terminando na US5, onde ocupa toda a extensão lateral da US5. Intercalado a esses eventos de inundação, ocorrem dois eventos regressivos

representados pela SF3. O primeiro deles compreende parte da US2 e parte da US3 e separa o primeiro do segundo evento de inundação. O segundo ocorre na US3 e US4, separando o segundo do terceiro evento de inundação.

Como essa linha é uma seção *strike* que atravessa as principais falhas do intervalo, ela não mostra uma variação significativa no espessamento do Membro Mucuri.

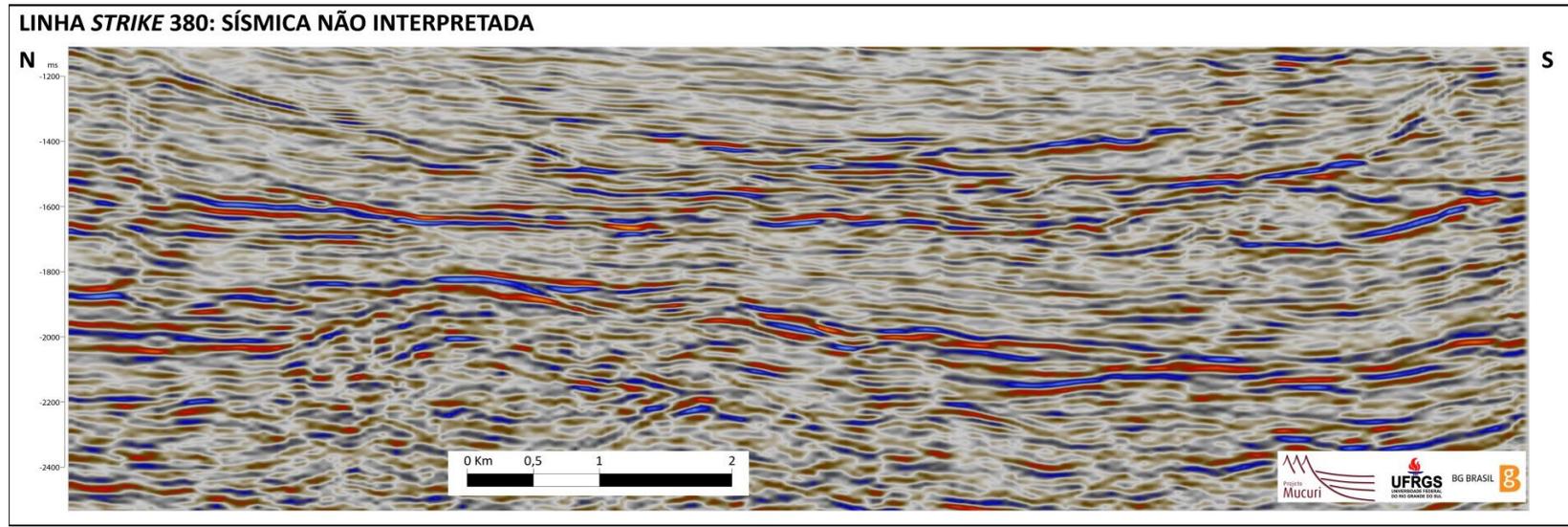


Figura 31: Linha sísmica *strike* 380 não interpretada.



Figura 32: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica *strike* 380.

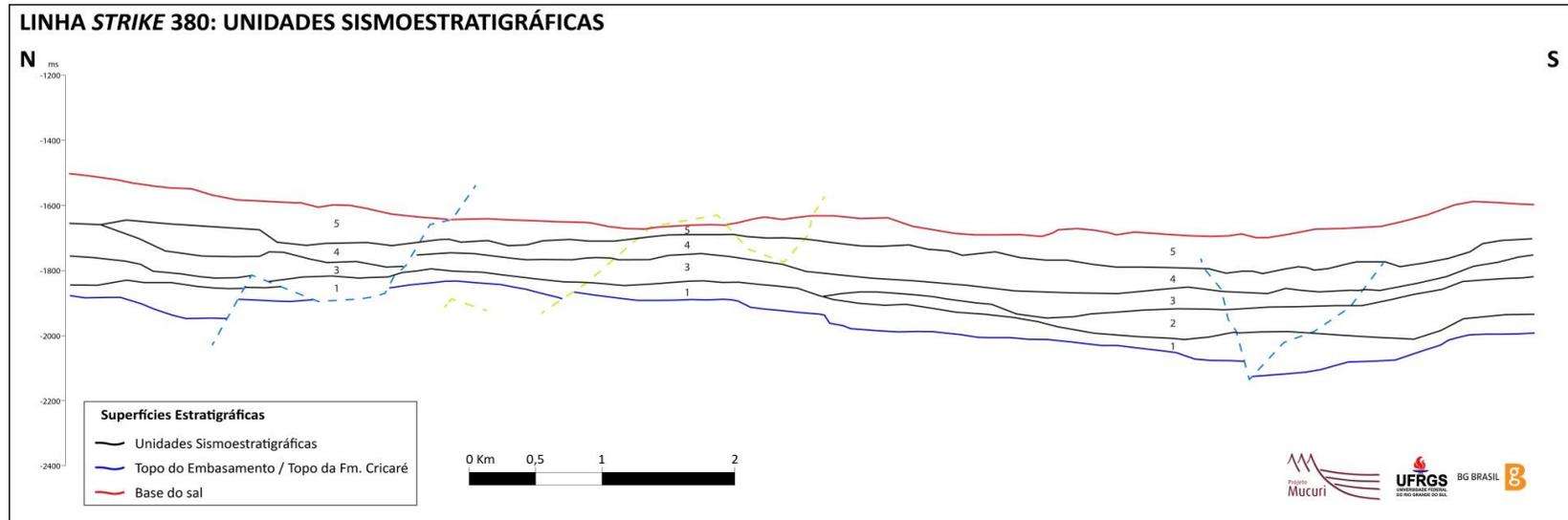


Figura 33: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica *strike* 380.

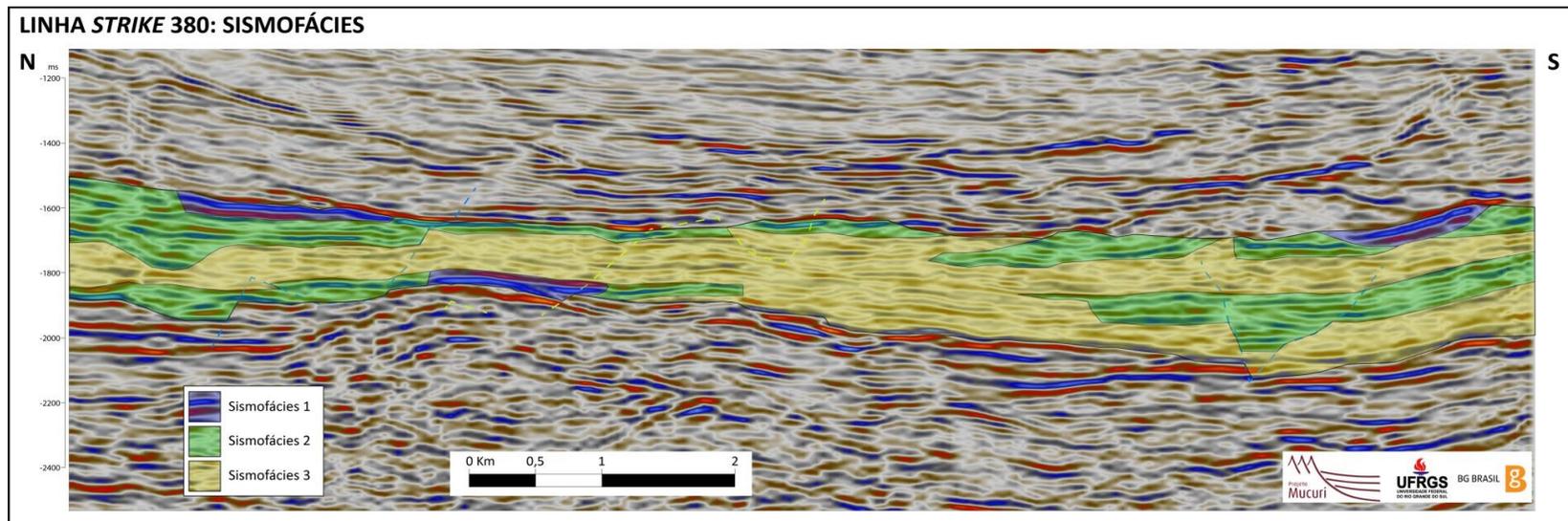


Figura 34: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica *strike* 380.

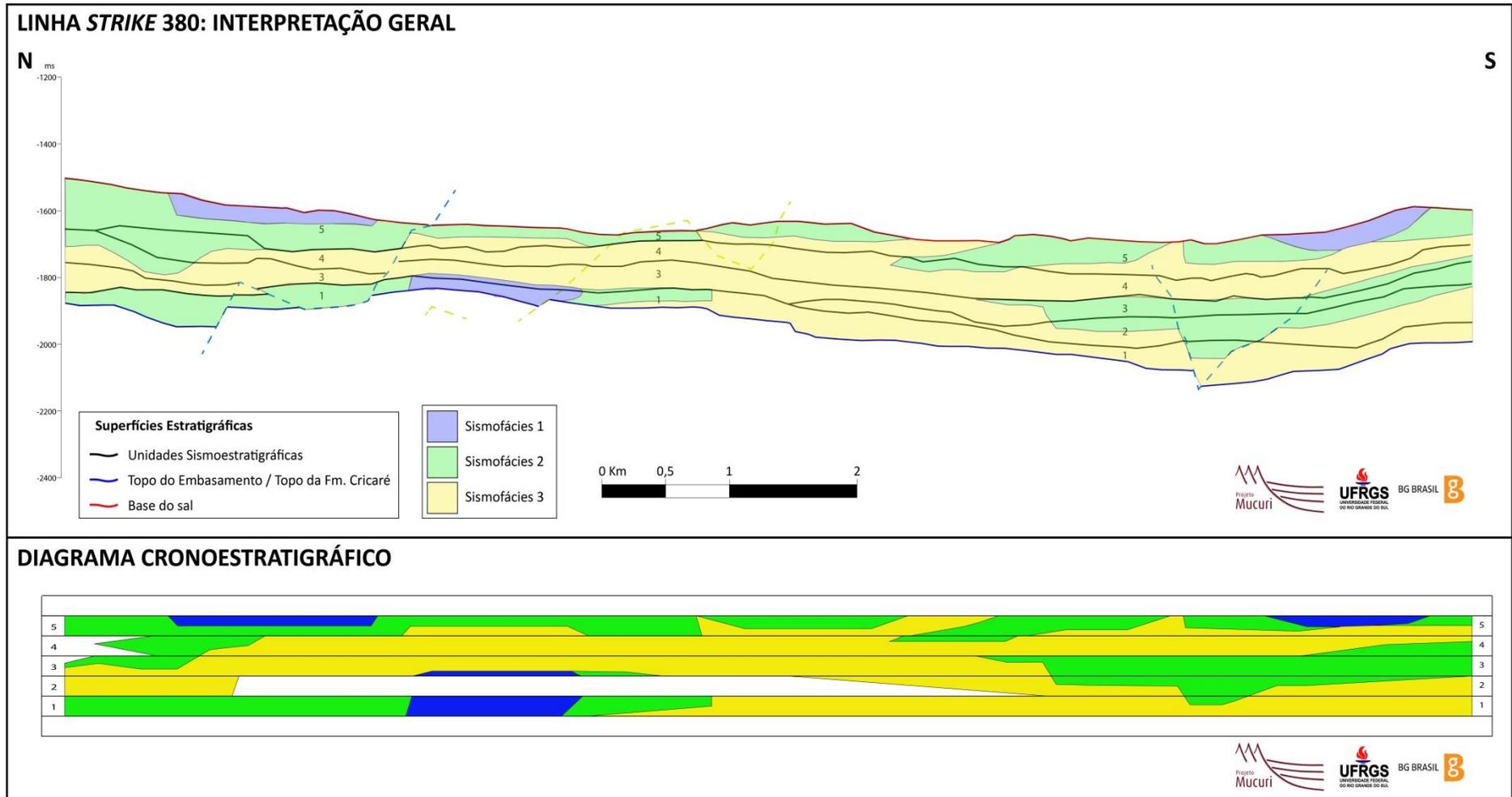


Figura 35: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica *strike* 380, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies, das falhas identificadas e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.

4.1.7 Linha sísmica **STRIKE 500**

Esta linha localiza-se mais a leste da área de estudo, com orientação N-S (Figura 1; Figura 36). A interpretação das terminações das reflexões sísmicas (Figura 37) identificou um predomínio de *onlaps* em relação a *downlaps* e *toplaps*. De modo geral, os refletores possuem boa continuidade ao longo de toda a seção.

Todas as unidades possuem a mesma extensão lateral, distribuindo-se ao longo de toda a linha (Figura 38). A US1 possui as menores espessuras nos limites norte e sul, e um aumento da mesma na porção central da linha. A US2 é a unidade mais espessa, com um progressivo aumento da mesma de norte para sul. A US3 não possui variações significativas na espessura, salvo no extremo sul, onde ela afina e termina contra a US2. A US4 também não tem variações significativas na espessura, apresentando apenas um único espessamento significativo no extremo norte. A US5 possui um leve aumento da espessura em direção ao sul da linha.

A SF3 é a sismofácies com predomínio absoluto (Figura 39), com ocorrência mais significativa em toda a porção norte da seção. Ela tem amplo domínio também na US3 e US4. A SF2 é a segunda em abundância, dominando a porção central da US1, partes da US2 e o segmento central da US5. A SF1 ocorre conjuntamente com a SF2, mas também aparece de forma isolada, o que ocorre apenas no segmento sul da seção, principalmente na US1, US2 e US5.

Com a integração do arcabouço estratigráfico e das sismofácies no diagrama cronoestratigráfico (Figura 40), é possível observar três ocorrências de SF1 e SF2, que representam eventos de inundação. A primeira inicia na porção central da US1 e termina no início da deposição da US2, também na porção central. A segunda, menos expressiva, ocupa o final da US2 e também se restringe ao segmento central. O terceiro e mais expressivo ocorre em todo o intervalo de tempo compreendido pela US5, espalhando-se para a parte sul do intervalo. Intercalado a esses eventos de inundação, ocorrem dois eventos regressivos representados pela SF3. O primeiro deles aparece no meio da US2, separando os dois primeiros eventos de inundação e o segundo ocorre na US3 e US4, separando o segundo do terceiro evento.

Essa linha localiza-se a leste das falhas identificadas, onde a tectônica não tem uma grande influência, se comparada com as zonas onde ocorrem os grandes falhamentos. Assim, todas as unidades estendem-se ao longo de toda a linha.

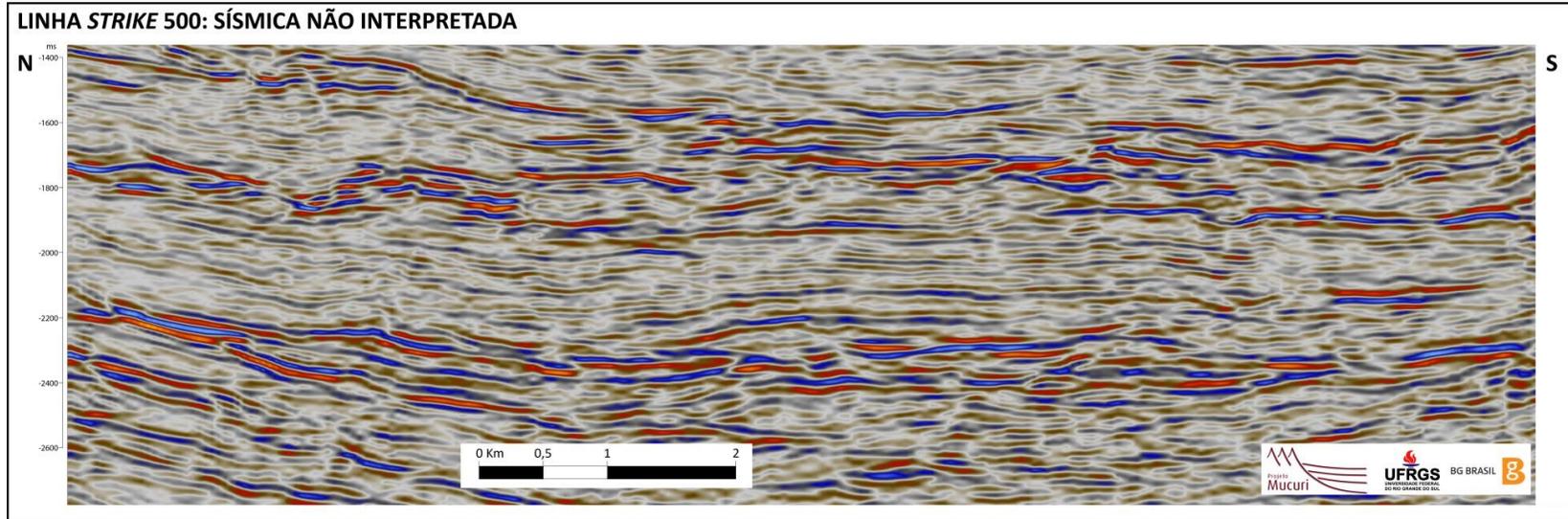


Figura 36: Linha sísmica *strike* 500 não interpretada.

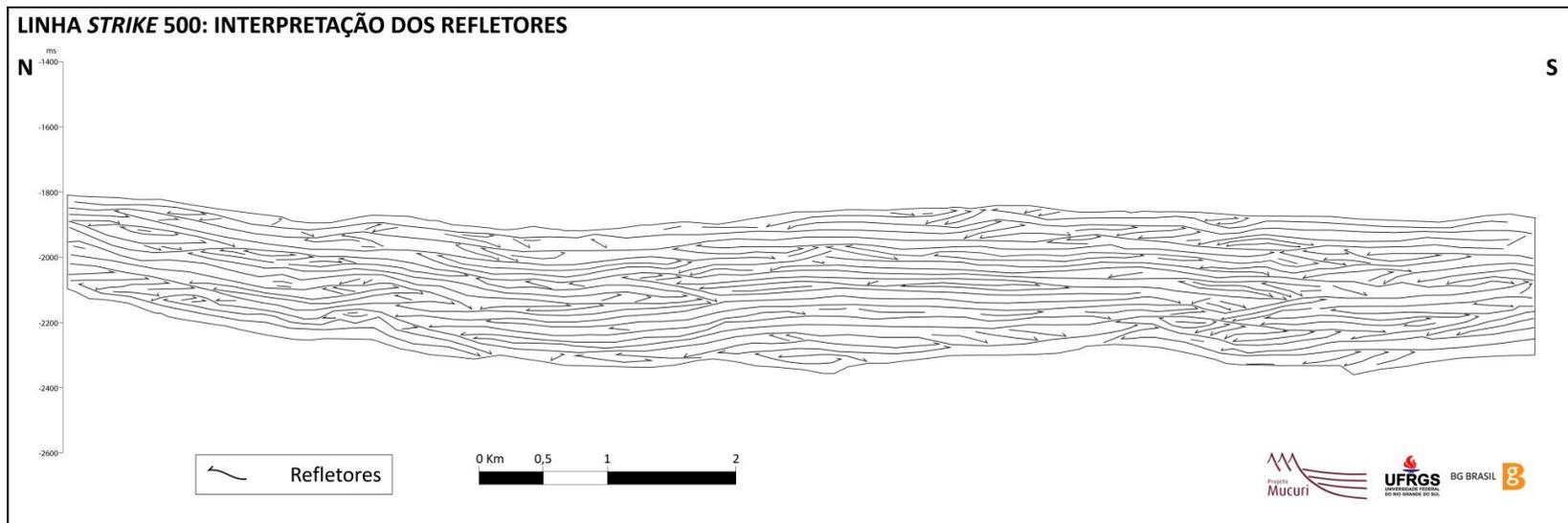


Figura 37: Interpretação dos refletores sísmicos e suas respectivas terminações na linha sísmica *strike* 500.

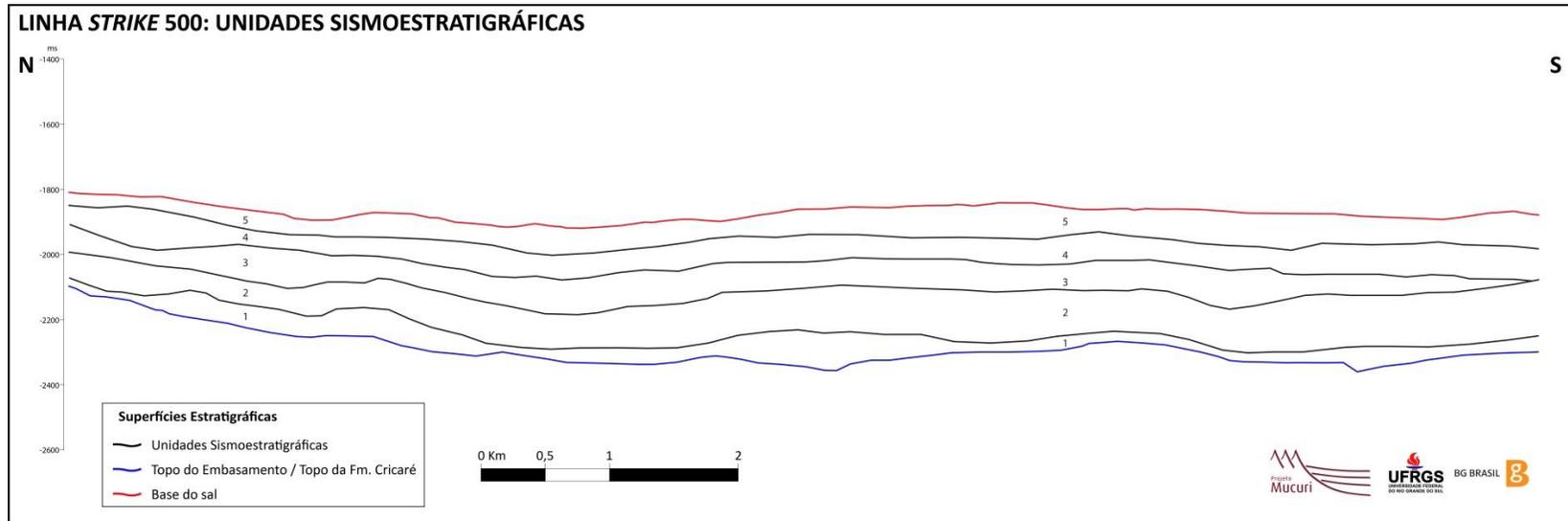


Figura 38: Superfícies e unidades sismoestratigráficas mapeadas para a linha sísmica *strike* 500.

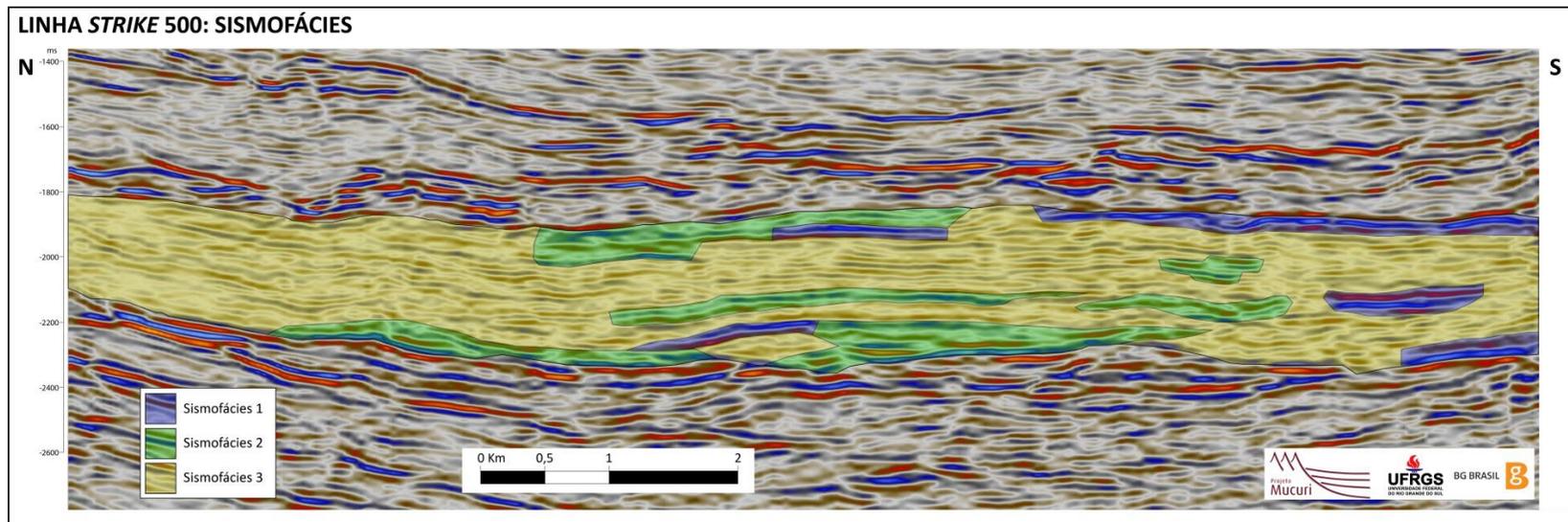


Figura 39: Interpretação das sismofácies para a linha sísmica *strike* 500.

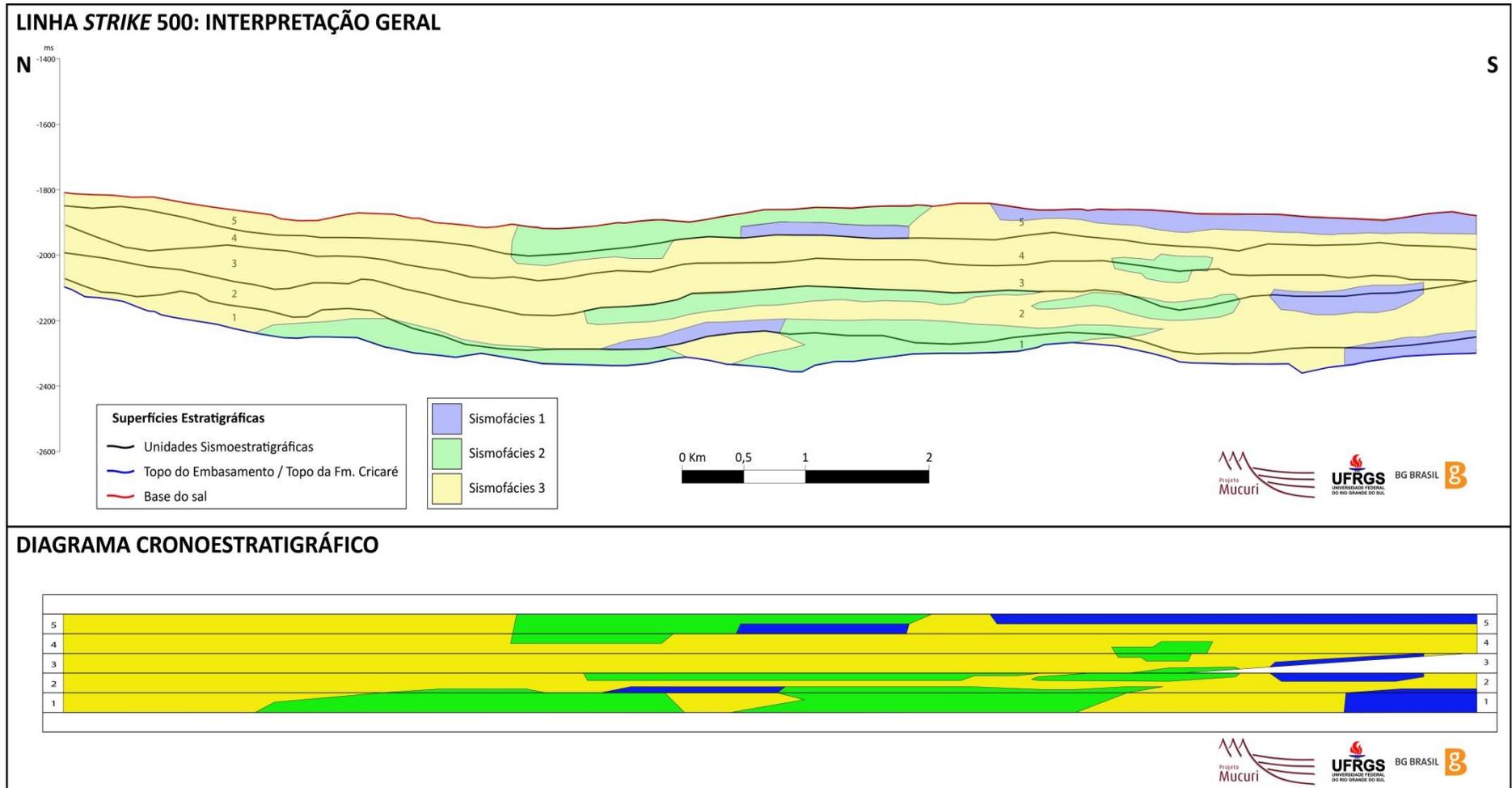


Figura 40: Diagrama cronoestratigráfico da linha sísmica *strike* 500, mostrando a evolução espacial e temporal das sismofácies e das unidades sismoestratigráficas interpretadas.

4.2 Mapeamento sísmico

O mapeamento sísmico tridimensional (Figura 41) do cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul foi realizado em 22 linhas *dip* e em 28 linhas *strike*, conforme os critérios definidos de espaçamento entre as linhas, já apresentados no capítulo da metodologia. Em cada uma dessas linhas, foram mapeados:

- Superfície de base e de topo do Membro Mucuri;
- Traçado das principais falhas;
- Superfícies limítrofes das unidades sismoestratigráficas (Quadro 2).

Posteriormente, foi feita a interpolação de cada conjunto de dados, obtendo a configuração tridimensional das falhas e de todas as superfícies identificadas (Figura 41). Estes dados permitiram a produção dos mapas de isópacas, que serviram de base para a construção dos mapas estruturais das unidades sísmicas, os quais serão apresentados e discutidos na sessão 4.3 deste capítulo.

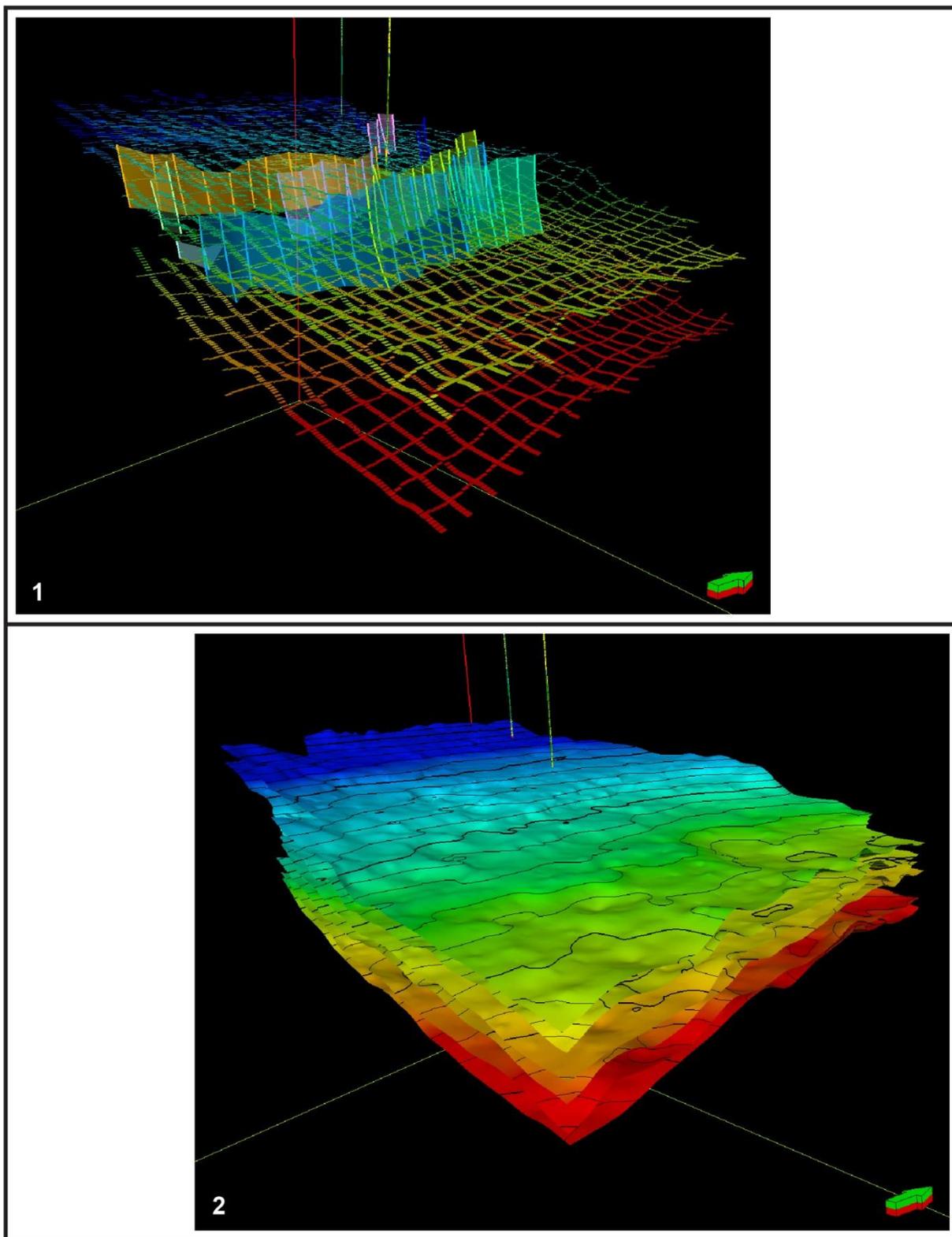


Figura 41: Visualização da interpretação sísmica tridimensional do volume sísmico. A imagem 1 mostra o mapeamento da base e do topo do Membro Mucuri em todas as linhas selecionadas e a configuração tridimensional de todas as falhas interpretadas. A imagem 2 mostra todas as superfícies identificadas, depois da interpolação em todas as linhas. Em ambas as imagens, é possível ver a localização dos dois poços (1ATV-0002-ES e 1FIC-0001-ES), utilizados conjuntamente com a interpretação sísmica. A flecha verde indica o Norte.

4.2.1 Superfície topo do embasamento / topo da Formação Cricaré

É a superfície basal do Membro Mucuri no intervalo analisado e também a base da US1 (Figura 42). Possui a porção mais rasa ao longo do extremo oeste, e a maior profundidade ao longo do extremo leste. O aumento da profundidade é expressivo apenas para leste, o qual ocorre de forma atenuada nas porções proximal e distal, e abrupta no segmento central, como é mostrado pela proximidade das isolinhas, as quais coincidem com a localização das mais expressivas falhas de orientação N-S identificadas. Na direção N-S, as variações de profundidade são muito tênues, sendo inexpressivas.

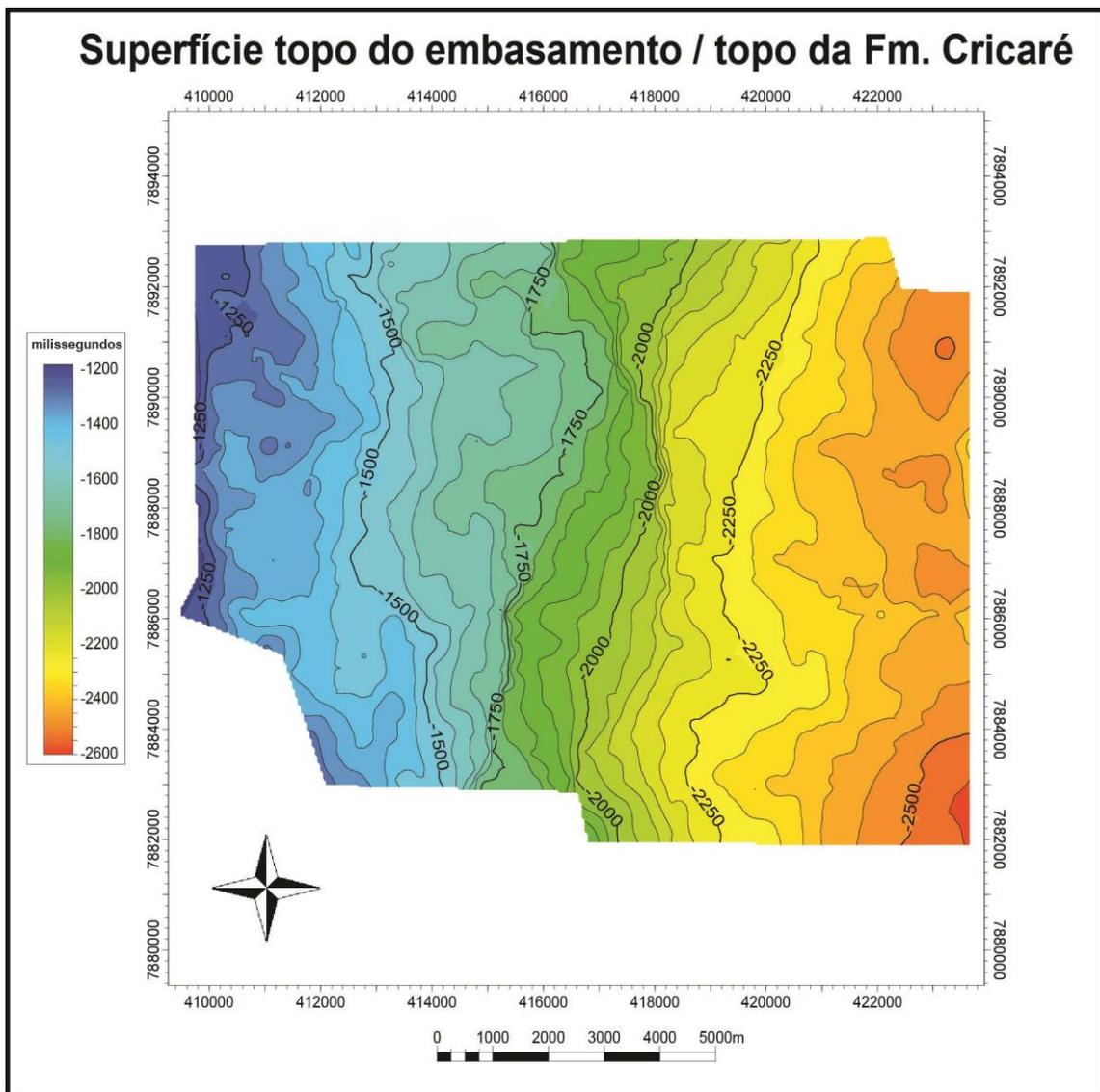


Figura 42: Mapa da superfície de base do Membro Mucuri no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).

4.2.2 Superfície base do sal

É a superfície de topo do Membro Mucuri no intervalo analisado e também a superfície de topo da US5 (Figura 43). Assim como a superfície basal, possui a porção mais rasa ao longo do extremo oeste, e a maior profundidade ao longo do extremo leste. O aumento da profundidade é expressivo apenas para leste, porém de forma mais gradual em relação ao que ocorre na superfície basal. Além disso, a variação na profundidade máxima é menor, com 500 milissegundos a menos do que a superfície anterior (Figura 42). Na direção N-S, as variações de profundidade também não são significativas.

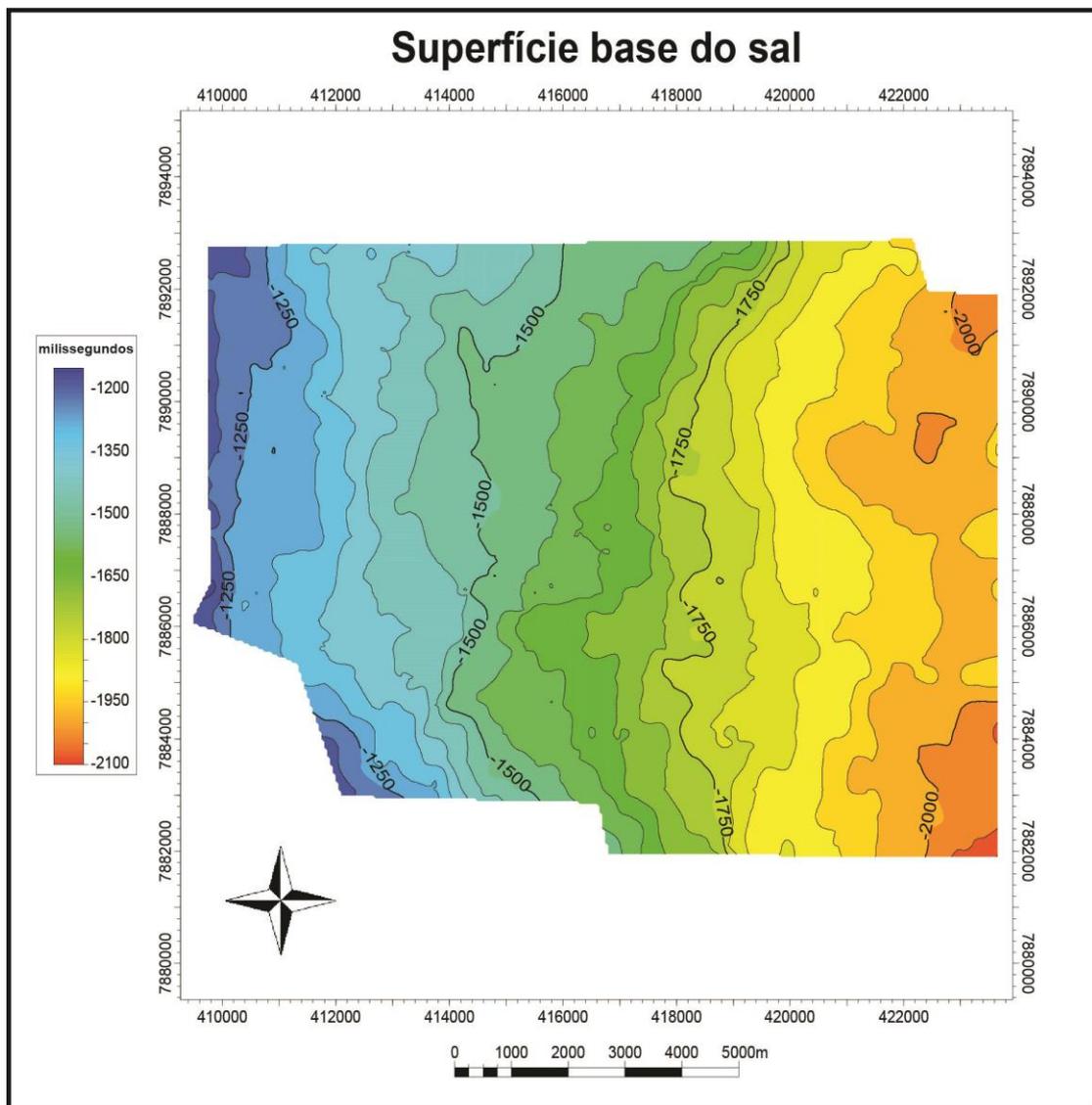


Figura 43: Mapa da superfície de topo do Membro Mucuri no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).

4.2.3 Mapa de Isópacas do intervalo

O intervalo interpretado apresenta espessuras variando entre 0 e 540 milissegundos (Figura 44). A distribuição das isópacas permite dividi-lo em três porções principais: centro-oeste, central, e centro-leste. As maiores espessuras (maior do que 360 ms) distribuem-se unicamente na porção centro-leste, com os valores máximos (maior do que 450 ms) concentrados em dois locais alongados aproximadamente E-W, sendo um no sul e o outro no centro da porção. O segmento centro-oeste concentra as menores espessuras (menor do que 150 ms), com os valores mínimos (menor do que 60 ms) dispostos nas partes noroeste e sudeste. A porção central é marcada pela proximidade das isolinhas, mostrando a transição abrupta que ocorre entre as porções centro-oeste e centro-leste. A porção central coincide com a localização das mais expressivas falhas mapeadas no intervalo, o que explica essa transição abrupta, já que são elas as principais criadoras de espaço de acomodação durante a deposição do Membro Mucuri no intervalo analisado.

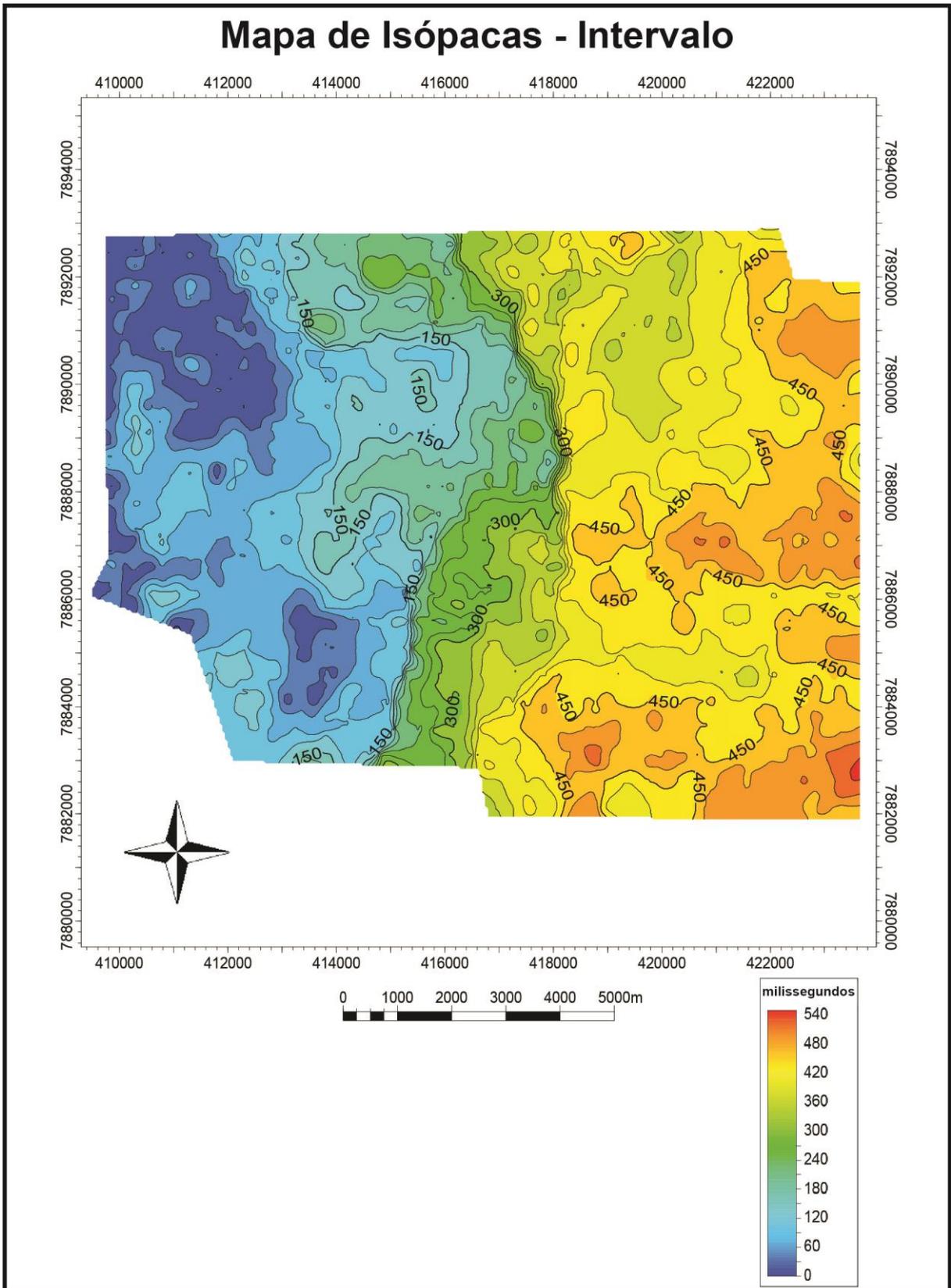


Figura 44: Mapa de isópacas do intervalo sísmico analisado, mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras, bem como a extensão lateral total do intervalo.

4.2.4 Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 1

A US1 apresenta espessuras variando entre 0 e 150 milissegundos (Figura 45). As menores espessuras (menor do que 50 ms) distribuem-se ao longo de todo o intervalo, enquanto que as maiores (maior do que 100 ms) aparecem de forma isolada, em cinco concentrações. Duas delas localizam-se nos extremos nordeste e sudeste, não tendo qualquer relação com as falhas interpretadas (Figura 55). As outras três localizam-se ao longo do segmento central e limitam-se a oeste diretamente com uma falha de orientação aproximadamente N-S (Figura 55), enquanto que os limites axial e leste gradam lateralmente para espessuras menores, sem a presença de falhas. Essa configuração constitui, portanto, depocentros isolados, limitados em uma de suas extremidades por uma grande falha, a qual deve ser a principal controladora da criação de espaço de acomodação dessas pequenas unidades de sedimentação.

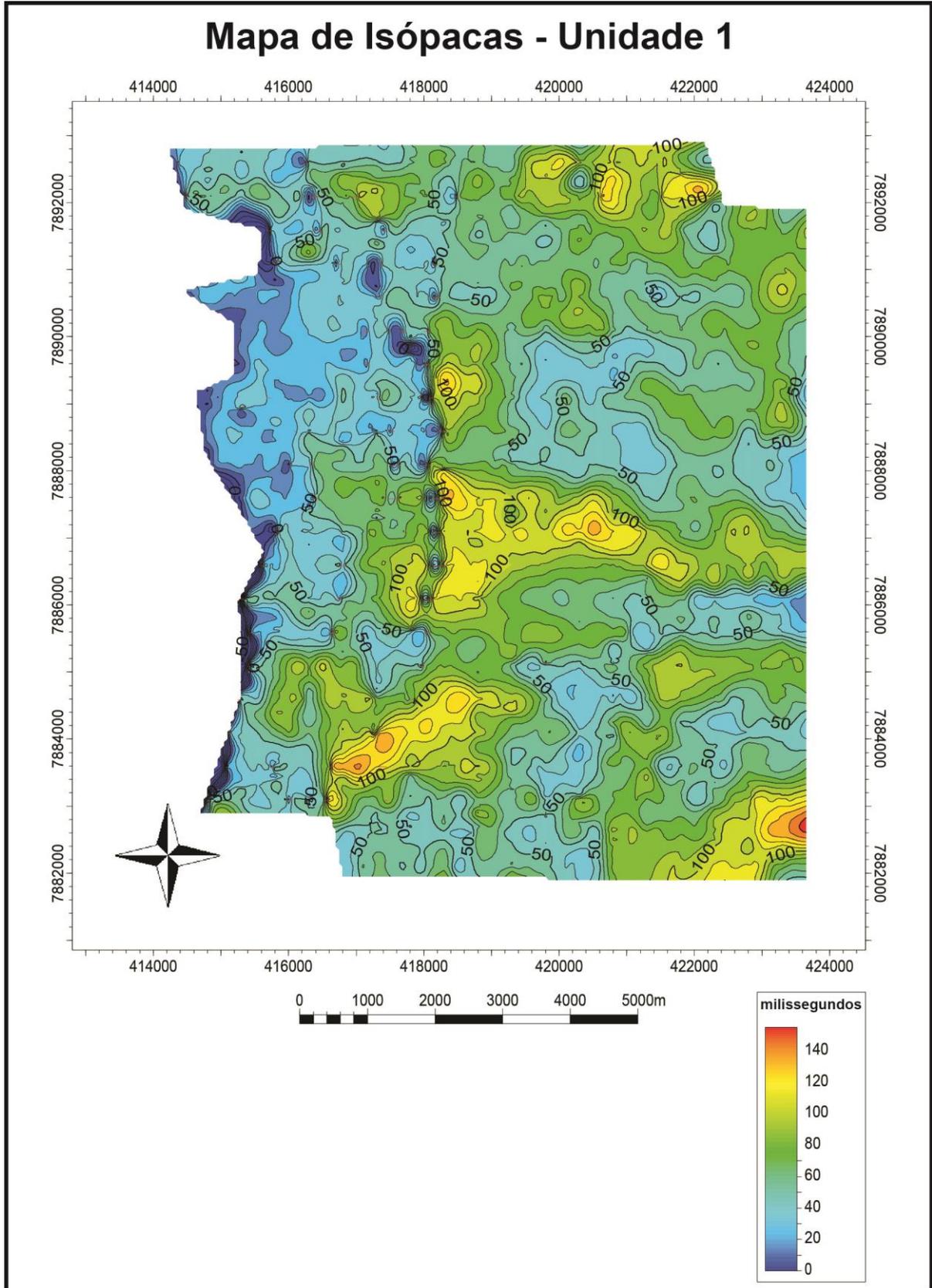


Figura 45: Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 1 (US1), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.

4.2.5 Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 2

É a superfície basal da US2 e também o topo da US1 (Figura 46). Semelhante às superfícies de base e de topo do intervalo, possui as menores profundidades ao longo do extremo oeste, e as maiores ao longo do extremo leste. A profundidade aumenta para leste ao longo de toda a superfície, sendo mais intenso próximo à porção central, onde ocorre um adelgaçamento das isolinhas, que coincidem com a localização dos principais falhamentos mapeados de orientação N-S. Na direção norte-sul, as variações na profundidade são muito pequenas, sem expressão significativa.

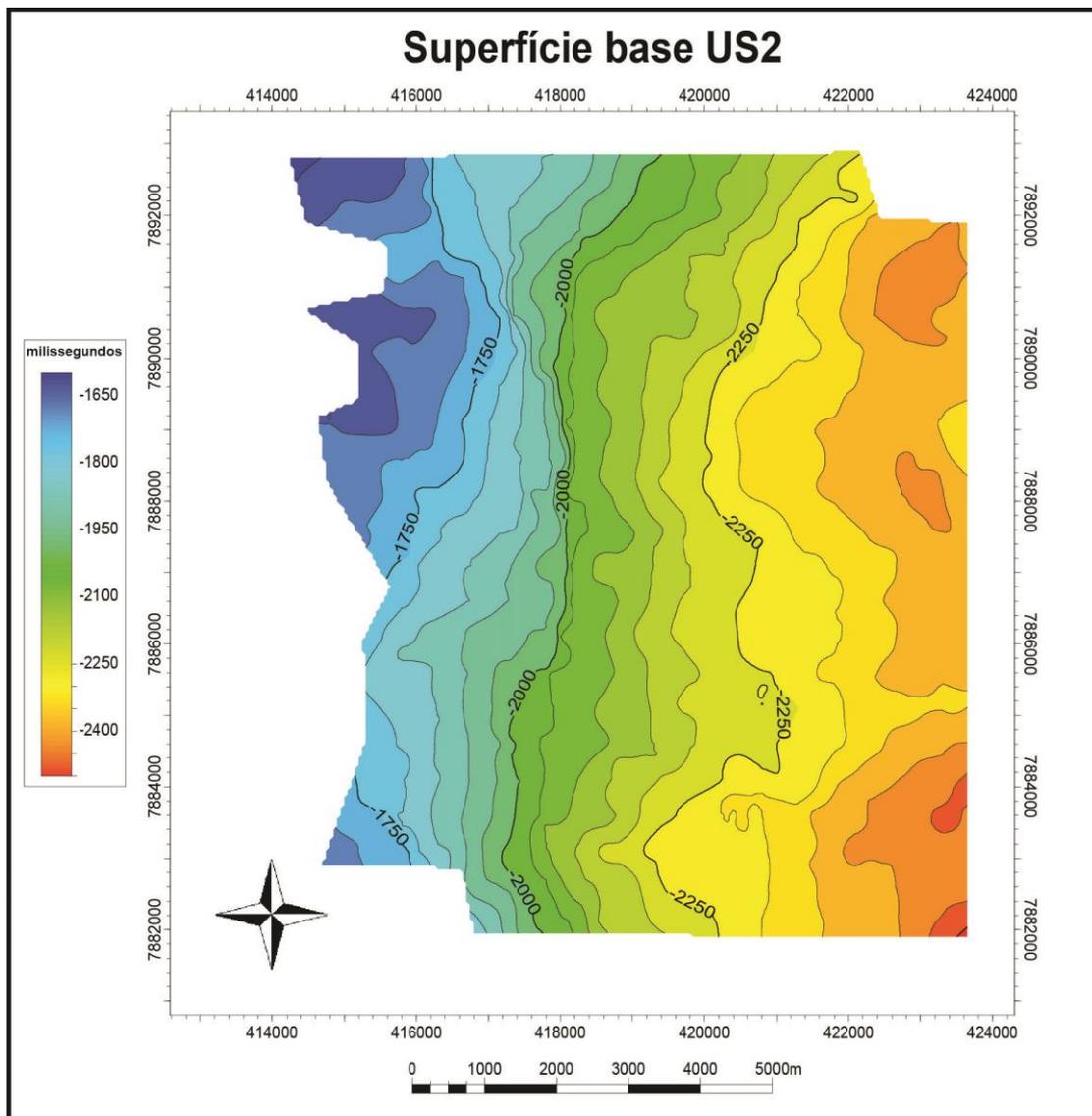


Figura 46: Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).

4.2.6 Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 2

A US2 apresenta espessuras variando entre 0 e 240 milissegundos (Figura 47). As menores espessuras (menor do que 50 ms) distribuíam-se ao longo de todo o limite oeste da unidade, enquanto que as maiores (maior do que 150 ms) concentram-se em duas localidades. A primeira delas constituiu um depocentro circular isolado de pequena área, localizado no extremo sul da unidade, sem relação com as falhas que ocorrem na unidade. A segunda constitui uma ampla área que ocupa grande parte da porção central e leste do intervalo, que se limita a oeste, em parte, por uma falha de orientação N-S, evidenciada pelo adelgaçamento das isópacas (Figura 56).

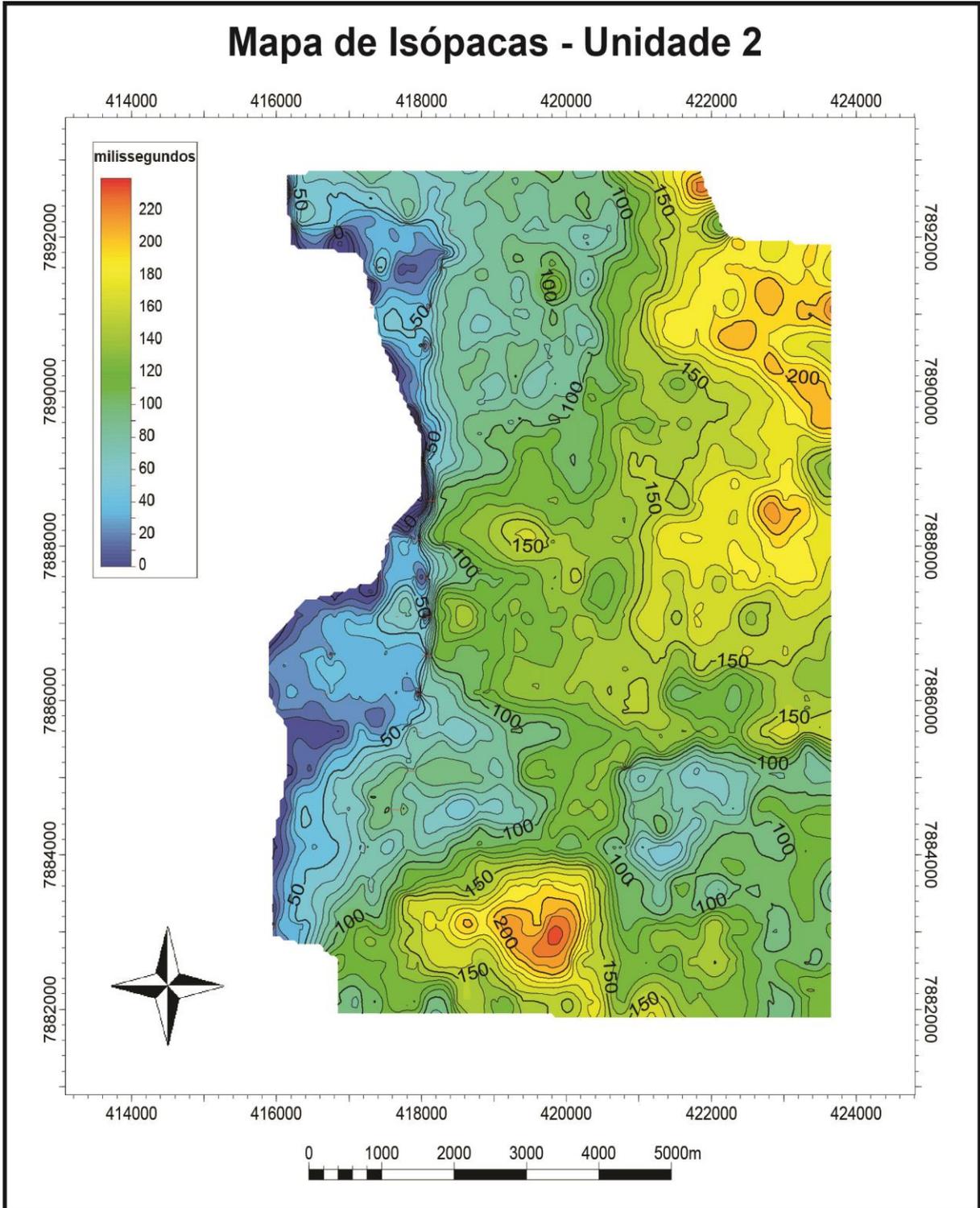


Figura 47: Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.

4.2.7 Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 3

É a superfície basal da US3 e também o topo da US2 e possui a menor extensão lateral (Figura 48), com aproximadamente metade da área ocupada pelas superfícies de base e de topo. De forma geral, possui um aumento da profundidade de oeste para leste ao longo de toda a superfície. Esse aumento é mais expressivo no sul, o que provoca a concentração das maiores profundidades no extremo sudeste. As menores profundidades ocorrem no extremo noroeste, onde o aumento da mesma para leste é mais atenuado.

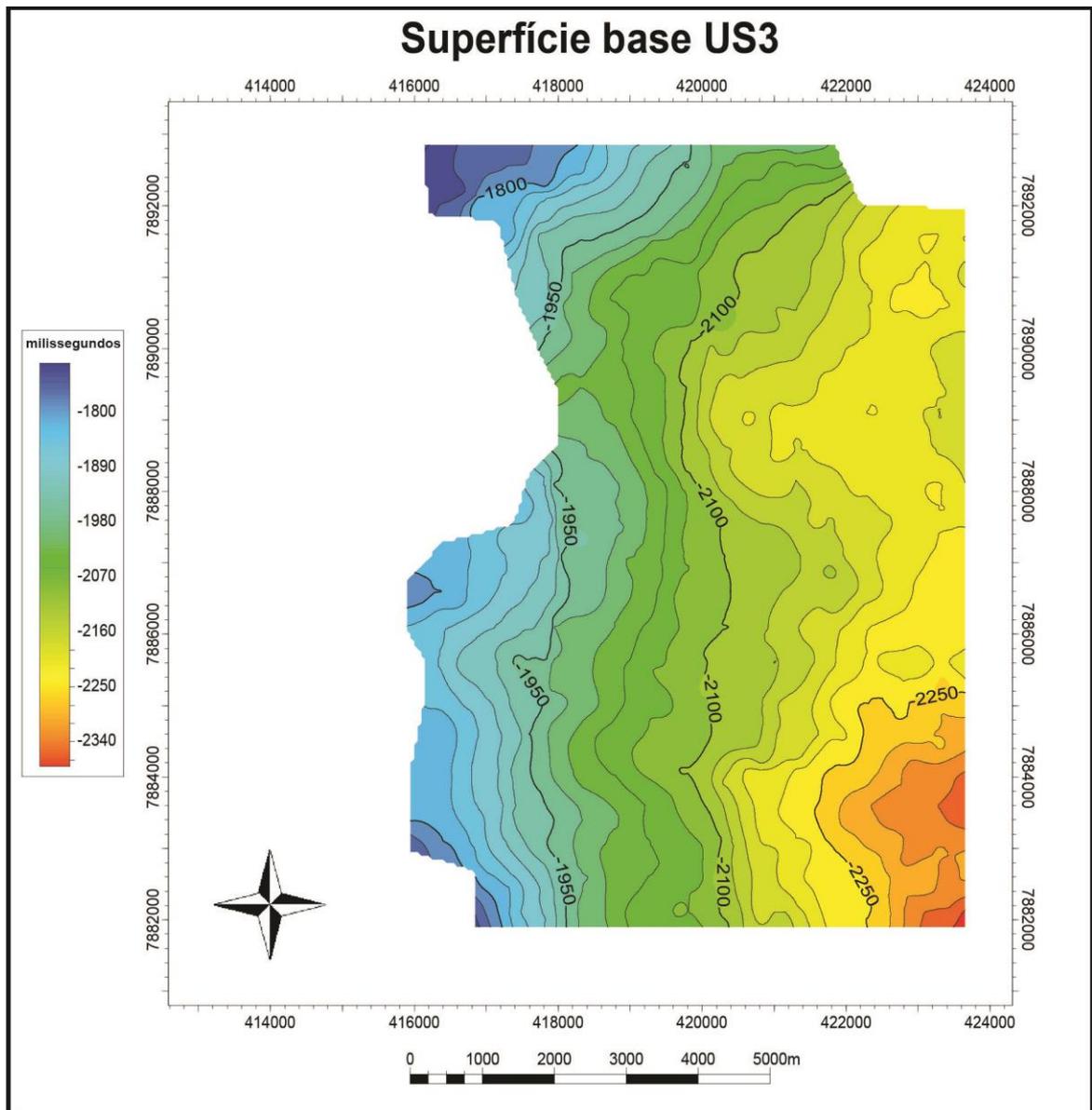


Figura 48: Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).

4.2.8 Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 3

A US3 possui espessuras variando entre 0 e 150 milissegundos (Figura 49) e possui um significativo aumento da extensão lateral no extremo noroeste em relação a US2. A distribuição das isópacas permite a identificação de uma grande área de concentração das maiores espessuras (maior do que 80 ms), que forma um “corredor” alongado aproximadamente segundo NW-SE. Essa concentração ocupa a maior parte da unidade e é circundada nos limites leste, oeste e sul pelos segmentos de menor espessura (menor do que 50 ms), sendo que toda a porção oeste é limitada por uma grande falha de orientação N-S (Figura 57). As espessuras absolutas (maior do que 140 ms) localizam-se apenas em duas pequenas áreas, no noroeste da unidade, limitadas em uma de suas extremidades por falhas (Figura 57).

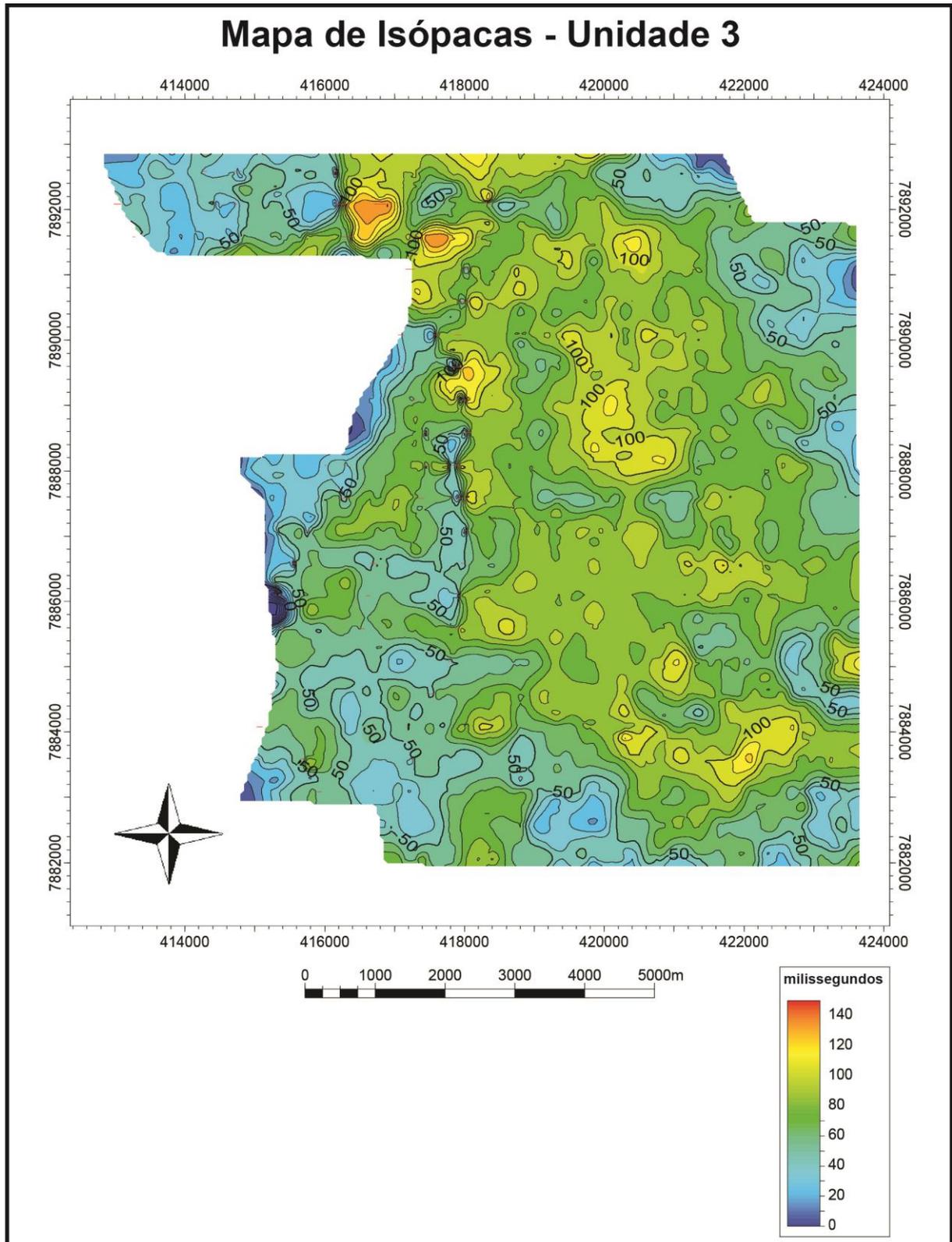


Figura 49: Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.

4.2.9 Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 4

É a superfície basal da US4 e também o topo da US3 (Figura 50). Assim como a superfície base US3, possui um aumento da profundidade de oeste para leste ao longo de toda a superfície, porém, apresenta maior extensão lateral. O aumento da profundidade também é mais expressivo na porção sul, o que causa a concentração das maiores profundidades no extremo sudeste. As menores profundidades, por outro lado, ocorrem ao longo de toda a extremidade oeste da unidade.

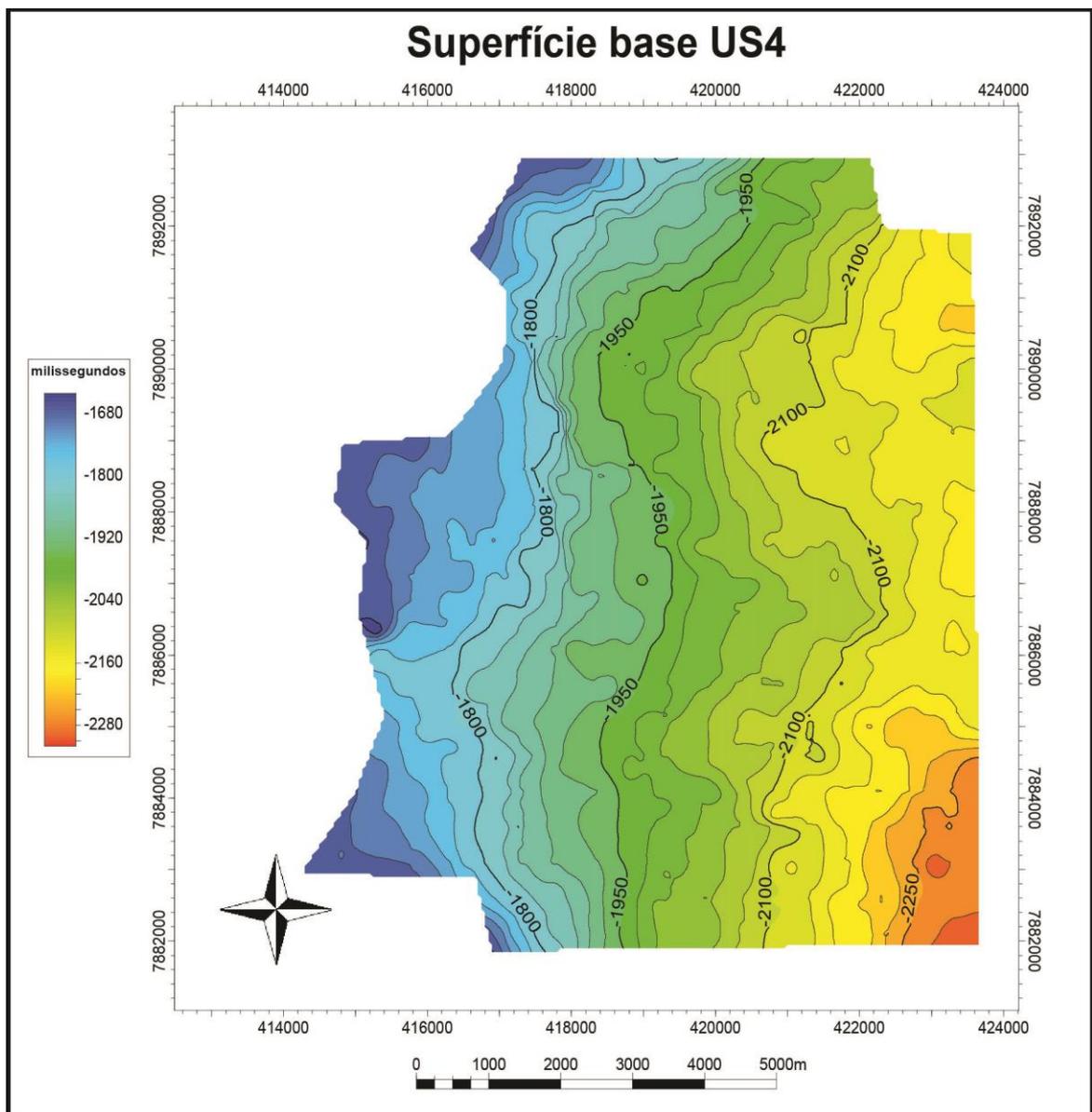


Figura 50: Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).

4.2.10 Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 4

A US4 tem espessuras variando entre 0 e 200 milissegundos, é a segunda maior unidade em área e é a que apresenta maior homogeneidade na distribuição das isópacas (Figura 51). As menores espessuras (menor do que 50 ms) concentram-se ao longo de toda a porção oeste da unidade. Espessuras intermediárias (entre 50 e 120 ms) ocupam a maior parte da unidade, com as espessuras maiores do que 100 ms concentradas em pequenas aglomerações, principalmente no norte e no sul. As maiores espessuras (maior do que 120 ms) ocorrem apenas em uma concentração no extremo sudeste, onde aparece a espessura máxima de 200 ms, não apresentando qualquer relação com as falhas mapeadas na US4 (Figura 58).

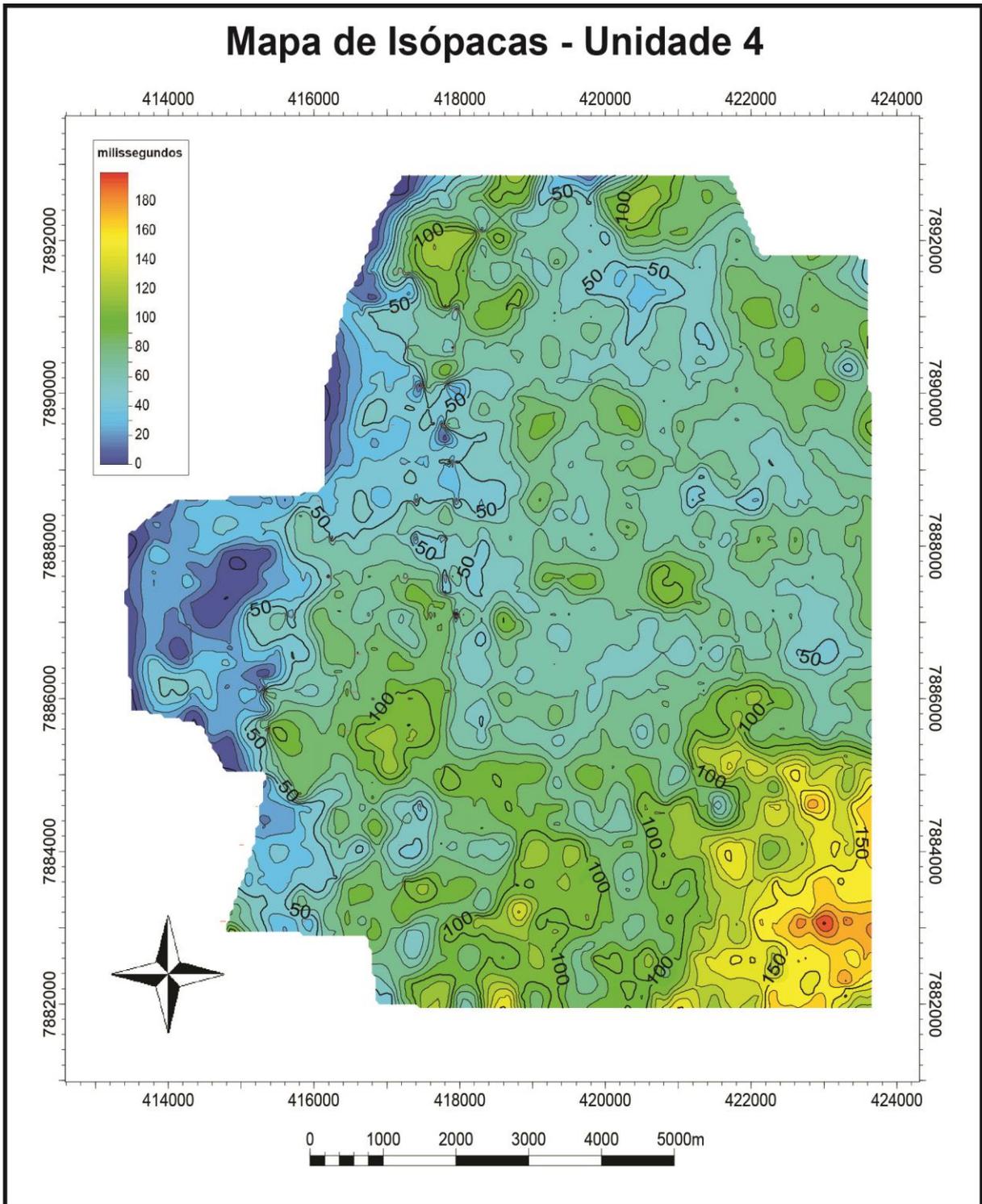


Figura 51: Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.

4.2.11 Superfície base Unidade Sismoestratigráfica 5

É a superfície basal da US5 e também o topo da US4 (Figura 52). Assim como as superfícies de base e de topo, possui as porções mais rasas ao longo de todo o limite oeste e as maiores profundidades ao longo de todo o limite leste. O aumento da profundidade é expressivo apenas para leste, o qual ocorre de forma gradual ao longo de toda a superfície. Na direção norte-sul, as variações na profundidade são muito sutis, não tendo expressão significativa.

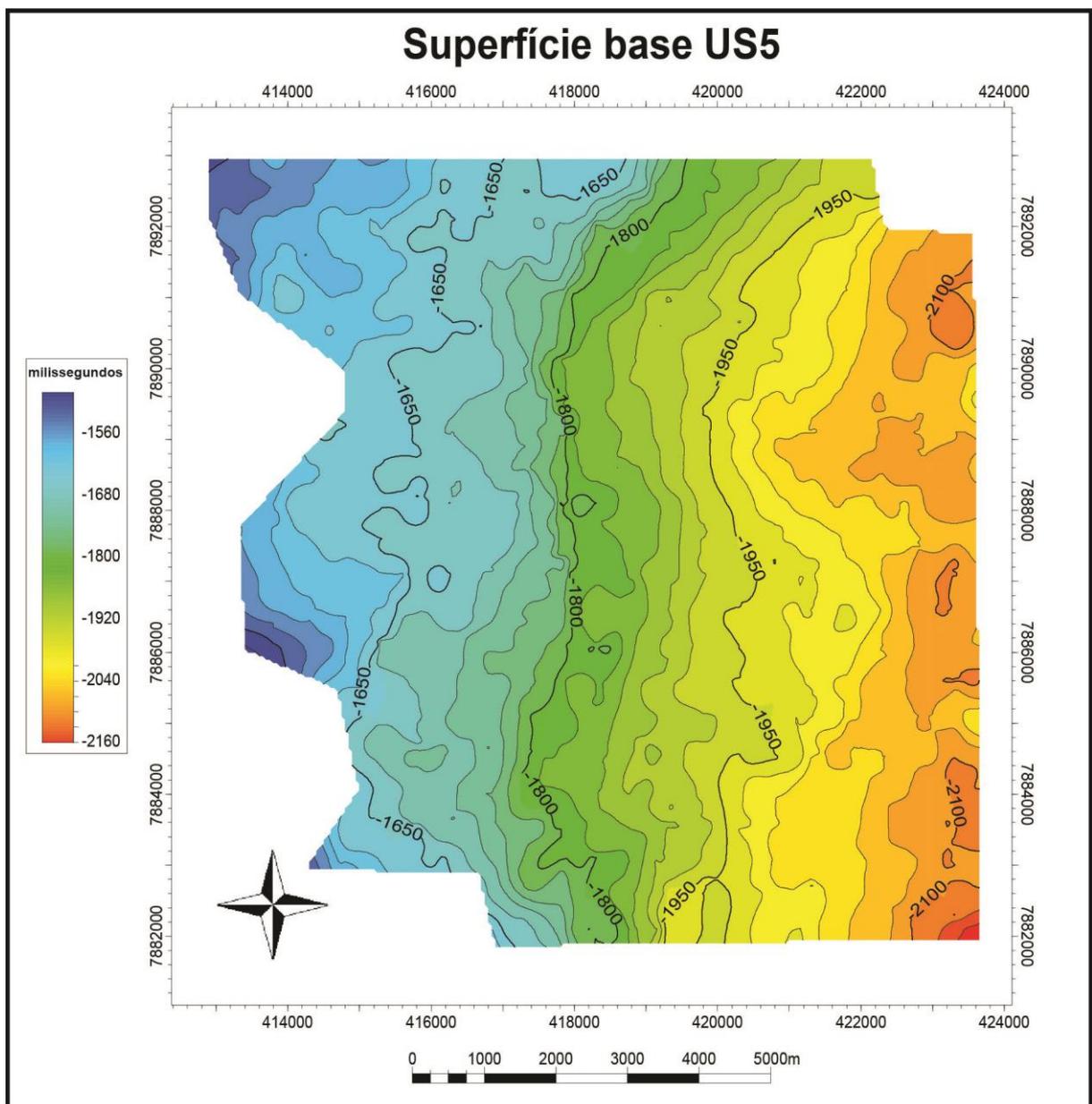


Figura 52: Mapa da superfície base da Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5) no intervalo sísmico analisado, mostrando as profundidades em tempo sísmico (milissegundos).

4.2.12 Mapa de Isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 5

A US5 é a unidade com maior extensão lateral e apresenta as espessuras variando entre 0 e 200 milissegundos (Figura 53). As menores espessuras (menor do que 50 ms) ocorrem em diversas porções da unidade, com principal concentração ao longo de uma área alongada segundo NW-SE, no segmento noroeste. As maiores espessuras (maior do que 100 ms) também se distribuem ao longo de toda a unidade, com três principais concentrações. A primeira e de maior extensão, ocorre na porção centro-norte, onde são encontrados os máximos valores das espessuras (maior do que 180 ms). A segunda e a terceira ocupam áreas muito menores do que a primeira e localizam-se no extremo leste e em parte do sul, respectivamente. Em todas estas concentrações, não há relação direta com as falhas mapeadas na US5 (Figura 59).

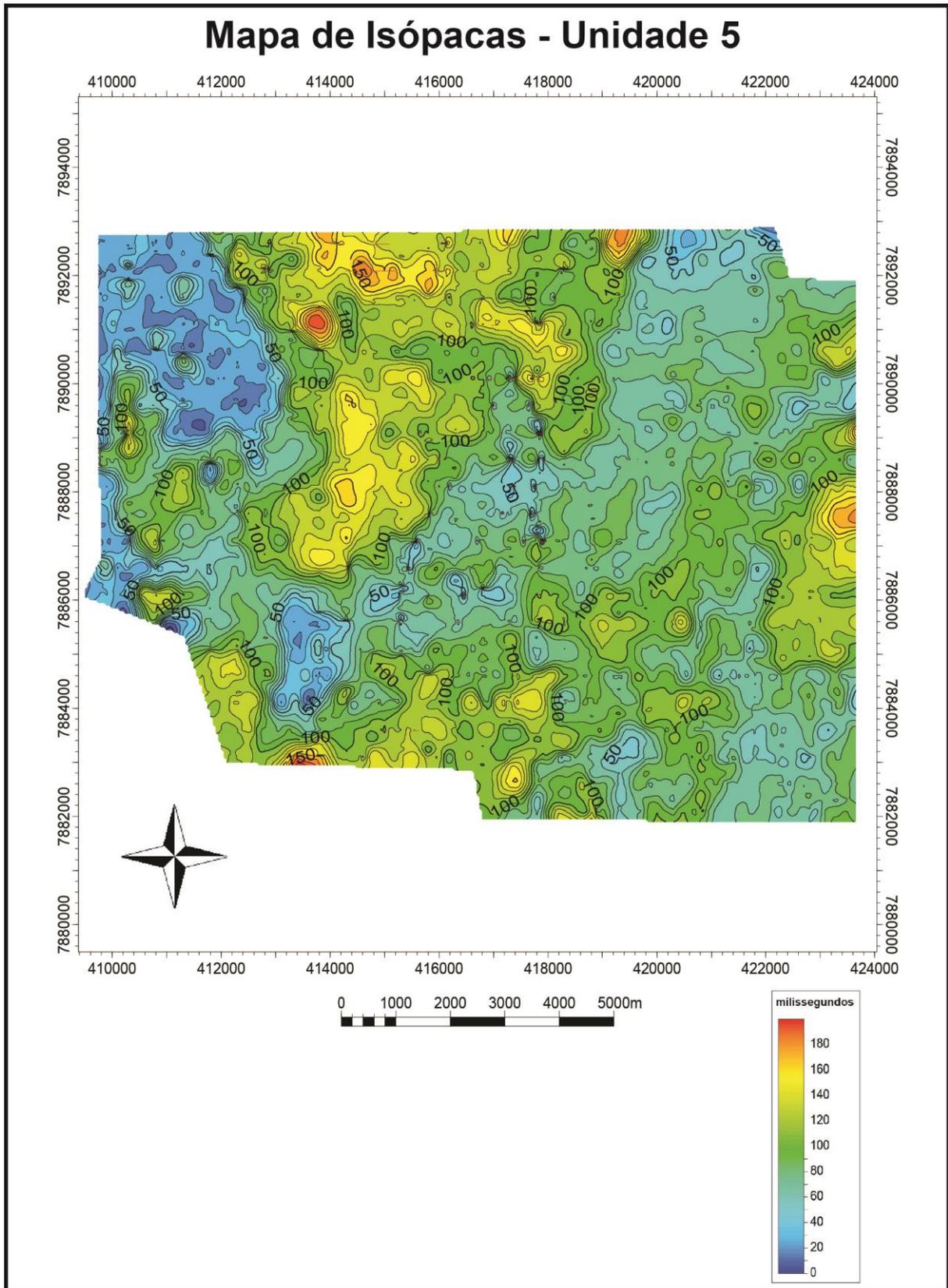


Figura 53: Mapa de isópacas da Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5), mostrando onde ocorrem as máximas e as mínimas espessuras (milissegundos), bem como a extensão lateral da unidade.

4.3 Mapeamento estrutural

As bacias sedimentares podem ter forte controle estrutural, manifestado pela ocorrência de estruturas deformacionais rúpteis, as falhas. Elas podem exercer grande influência na sedimentação sendo, em alguns casos, as principais agentes controladoras da criação do espaço de acomodação. Essa característica é marcante em bacias do tipo rifte, onde toda a evolução de preenchimento dos meio-grábens é controlada pela atividade de grandes falhas normais. O controle estrutural por falhas, no entanto, pode perdurar e exercer grande influência também na fase pós-rifte. A presença de um controle tectônico no Membro Mucuri (classificado como pós-rifte; Figura 3), já é conhecida (Vieira *et al.*, 1994; Vieira, 1998), porém carece de análises mais detalhadas. Assim, avaliar a atividade tectônica do Membro Mucuri, representada pelas falhas identificadas no intervalo, é essencial para uma compreensão mais clara da evolução tectono-estratigráfica dos estágios finais da fase ríftica e transicionais do pós-rifte da Bacia do Espírito Santo.

Com o intuito de avaliar a intensidade do componente tectônico, desenvolveu-se uma metodologia específica (Figura 54) com o objetivo de quantificar o controle estrutural envolvido durante a deposição de cada uma das unidades sismoestratigráficas identificadas, utilizando-se unicamente do dado sísmico 3D. Para cada falha interpretada, em cada unidade e em cada linha sísmica selecionada, foi determinada a taxa de controle estrutural sin-deposicional (Figura 54), que representa a quantidade de espaço de acomodação criado pelas respectivas falhas durante a deposição de cada unidade. Para uma mesma unidade que seja cortada por uma falha normal, e que tenha o bloco baixo com espessura maior do que a do bloco alto interpreta-se que houve criação de espaço de acomodação diferencial, concomitantemente com a deposição da respectiva unidade. Esta criação de espaço de acomodação diferencial é relacionada com a atividade tectônica, e movimentação sin-deposicional da falha. Se os dois blocos da falha apresentam a mesma espessura, indica que a falha não esteve ativa durante o período da unidade, sendo pós-deposicional, e não causando nenhum tipo de controle estrutural individual naquela unidade. Conhecendo as espessuras dos dois blocos, é calculada a razão entre a espessura do bloco baixo (onde está registrada a criação de espaço) pela espessura do bloco alto para obter a quantidade de espaçamento criado pela falha,

denominada de **taxa de controle estrutural**. Desta forma, um valor de taxa de controle estrutural igual a 1 indica que não há diferença de espessura entre os blocos, e por consequência, não há controle tectônico local na falha durante a unidade em questão. Já um valor 2 representa um forte controle estrutural, onde a falha controla subsidências diferenciais de até 2x de um bloco em relação ao outro. Assim, valores próximos de 1 representam baixa atividade tectônica no intervalo, enquanto que valores próximos ou superiores a 2 (podendo chegar a até 3), indicam um forte controle estrutural (mas não exclusivo) na unidade analisada.

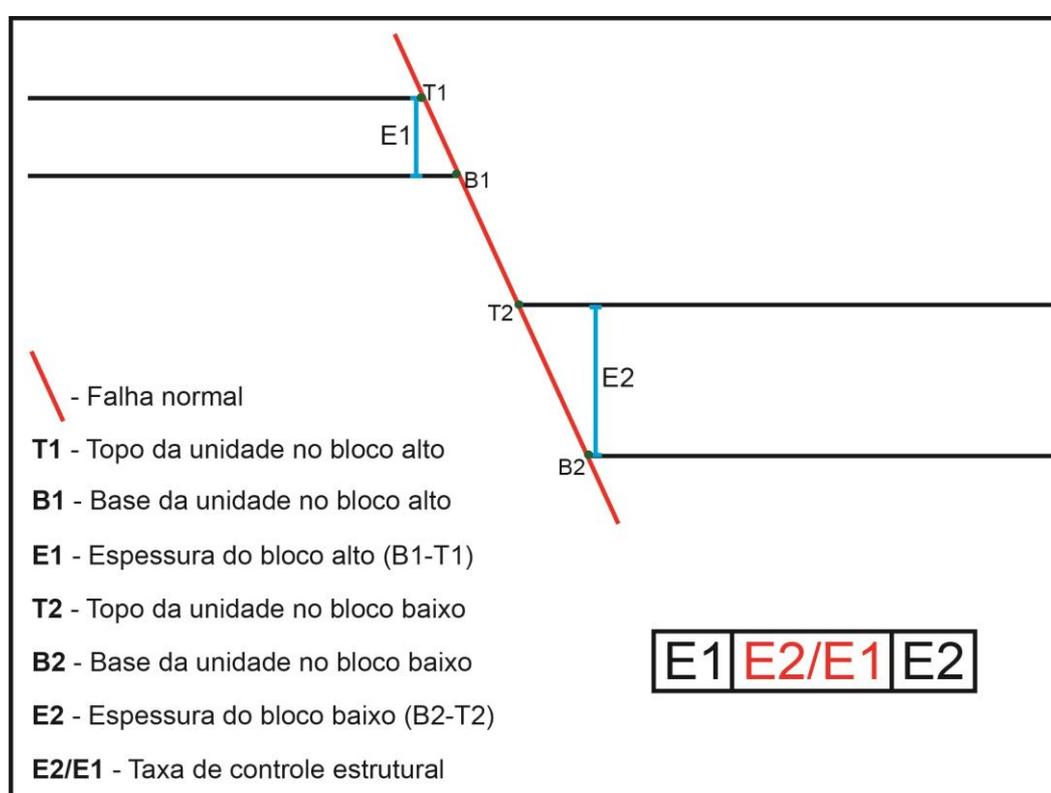


Figura 54: Metodologia utilizada para obter a taxa de controle estrutural em cada uma das falhas, de cada unidade sismoestratigráfica, e o padrão de escrita definido para a expressão dos dados.

Para a aplicação desse método, o traçado do plano de cada uma das falhas foi segmentado por unidade sismoestratigráfica, possibilitando assim a análise específica em cada unidade sísmica. Depois, mediram-se as espessuras (em milissegundos) dos blocos baixo e alto, que é dada pela diferença entre a base e o topo dos mesmos, e obteve-se a razão da primeira pela segunda. Este procedimento foi repetido para cada falha em todas as unidades sísmicas, em um intervalo de 20 linhas *dip*, totalizando 10 linhas sísmicas medidas. Quando o limite da unidade

coincidia com o de alguma falha, foi medida apenas a espessura do bloco baixo, admitiu-se zero para a espessura do bloco alto e a taxa de controle estrutural foi expressa com um “x”, expondo a incerteza da existência da mesma. A partir dos mapas de isópacas, os segmentos das falhas de cada unidade foram desenhados em planta, o que configurou os mapas estruturais, que exibem suas configurações espaciais. Por fim, os valores das espessuras dos blocos baixo e alto e os da taxa de controle estrutural foram incorporados aos mapas, segundo um padrão de escrita definido (Figura 54), dispostos conforme a localização das linhas sísmicas analisadas. Esses mapas, portanto, permitem visualizar a configuração espacial das principais falhas, sua evolução lateral, identificar quando as mesmas estiveram ativas e estimar a taxa de espaço de acomodação criado por elas durante a deposição de cada uma das unidades sismoestratigráficas, permitindo assim a conexão estrutural e deposicional. Dessa forma, serão apresentados os resultados por unidade sismoestratigráfica.

4.3.1 Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 1

As falhas são abundantes e ocupam grande parte da metade oeste da unidade (Figura 55). A conectividade de grande parte das mesmas permite agrupá-las em duas principais zonas de falhas, sendo uma mais a leste e outra mais a oeste. A zona de falha a leste é a mais expressiva em comprimento, sendo formada pela junção de três grandes falhamentos. A outra possui menor extensão, sendo formada pela junção de duas falhas. Essa configuração em duas zonas de falhas principais repete-se em todas as cinco unidades, com orientação variando entre NW-SE, N-S e NE-SW. Além disso, essas falhas principais estendem-se para além da porção basal do Membro Mucuri, sendo, portanto, remanescentes da fase rifte da bacia. O restante das falhas constituem pequenas ocorrências isoladas, com a mesma orientação das principais zonas.

De forma geral, todas as falhas estiveram ativas durante a deposição da US1. As mais altas taxas de controle estrutural encontradas variam entre 2 e 3 (Figura 55), revelando que o espaço de acomodação foi duplicado, e em alguns segmentos, triplicado pela atividade das falhas. Esses altos valores ocorrem com significativa abundância apenas nessa unidade. Valores entre 1,3 e 2 também são frequentes,

indicando um controle estrutural significativo, porém menor do que os mostrados pelos mais altos valores. Taxas menores do que 1,2, que indicam ausência ou um incipiente controle estrutural, também estão presentes, entretanto possuem pouca expressão na US1, se comparados com as outras unidades. A distribuição das taxas ao longo das falhas segue um padrão dominante, no qual os valores mais baixos ocorrem nas extremidades das falhas e aumentam em direção ao centro das mesmas (Gawthorpe & Leeder, 2000; Morley, 2002) (Figura 10; Figura 11). Em algumas falhas o oposto é observado, ocorrendo um aumento do rejeito nas extremidades das mesmas, quando próximas do limite com outros falhamentos, mostrando uma possível interação entre campos tensionais (Gupta & Scholz, 2000; Walsh *et al.*, 2002) (Figura 12).

Existe uma forte relação entre os segmentos de falha com grande atividade tectônica, com a criação de depocentros, como é mostrado pelo mapa estrutural e de isópacas. Três dos principais depocentros identificados são limitados a oeste pela falha mais distal, em parte do segmento onde ocorrem as mais altas taxas de controle estrutural, demonstrando que essas unidades deposicionais foram criadas em grande parte pela atividade tectônica desta falha. Essa configuração, já descrita no mapa de isópacas da US1 (Figura 45), assemelha-se muito a meio-grábens (Figura 8; Figura 9), onde a geração de espaço de acomodação é principalmente controlada pela atividade tectônica de uma grande falha de borda.

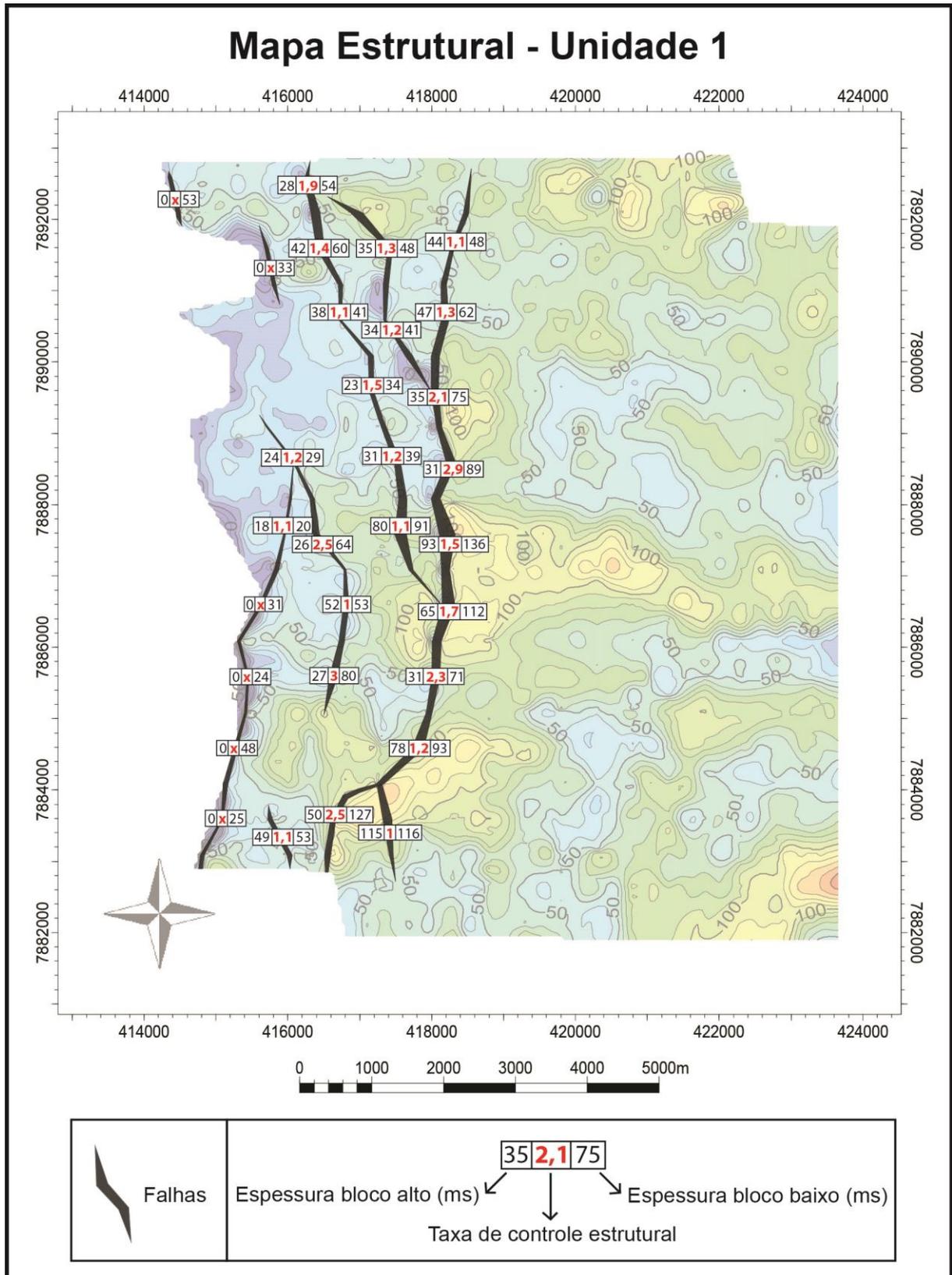


Figura 55: Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 1 (US1), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.

4.3.2 Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 2

A US2 possui a menor quantidade de falhas, estando todas localizadas próximas ao limite oeste da unidade (Figura 56). Apenas um dos falhamentos é expressivo em extensão lateral, estendendo-se ao longo de todo o intervalo, com orientação aproximadamente N-S, que pertence à zona de falha mais a leste, já identificada na US1. O restante é representado pela ocorrência isolada de pequenas falhas.

De forma geral, a atividade das falhas é moderada e está concentrada na falha mais distal do intervalo, com valores das taxas de controle estrutural próximas de 1,5 na porção central e uma ausência do mesmo na extremidade sul (Figura 56). Os valores das taxas também diminuem para o norte da falha, porém ocorre um único valor anômalo de 2,5, na extremidade norte. Esses valores demonstram uma diminuição no controle tectônico em relação a US1, onde o mesmo está concentrado na porção central da unidade, com um único valor alto extremamente localizado, sem importância significativa.

Não existe uma clara relação entre as mais altas taxas de controle estrutural e os dois depocentros identificados no mapa de isópacas (Figura 47). O depocentro do extremo sul não possui nenhuma vinculação com as falhas, já que nessa porção a atividade das mesmas é inexistente. O outro depocentro, mais expressivo em tamanho, limita-se, em parte, apenas a oeste com a principal falha da unidade, coincidindo com a localização das mais altas taxas de controle estrutural da mesma.

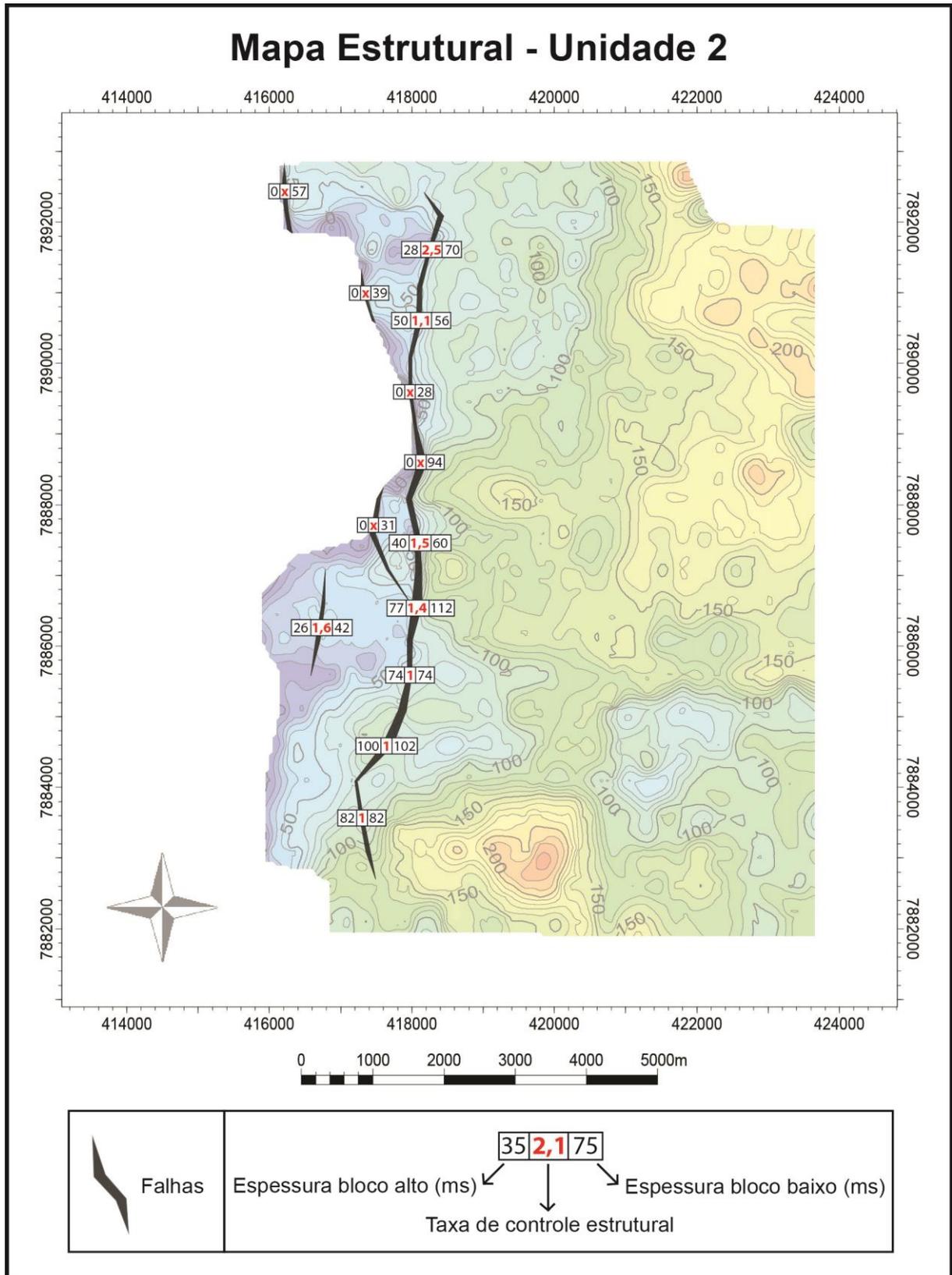


Figura 56: Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 2 (US2), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.

4.3.3 Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 3

As falhas voltam a ser abundantes na US3, ocupando boa parte da porção oeste da unidade (Figura 57). A conectividade das mesmas permite a observação, novamente, das duas zonas de falhas principais já descritas na US1, às quais concentram a maior parte do controle estrutural envolvido na deposição da US3. Além disso, ocorrem outros três pequenos falhamentos na porção noroeste da unidade, sem grandes expressões.

Assim como na US1, a maioria das falhas esteve ativa durante a sedimentação da US3, porém com intensidade menor. As mais altas taxas de controle estrutural encontradas variam entre 1,5 e 1,8 (Figura 57), ocorrem apenas em alguns segmentos das duas zonas de falhas e representam aproximadamente a metade do espaço de acomodação criado pelas mais altas taxas encontradas na US1. Valores entre 1,2 e 1,5 são frequentes e representam um baixo controle estrutural. Taxas menores do que 1,2, que indicam um baixíssimo ou ausente controle estrutural, apresentam um leve aumento em proporção, em relação a US1 e US2. A distribuição das taxas ao longo das falhas segue unicamente um padrão, no qual os valores mais baixos concentram-se nas extremidades das falhas e aumentam progressivamente em direção ao centro da mesma, onde ocorrem os mais altos valores de rejeito (Gawthorpe & leeder, 2000; Morley, 2002) (Figura 10; Figura 11).

Existe uma certa relação entre a localização das falhas e as maiores espessuras do mapa de isópacas da US3. O principal depocentro mapeado é limitado a oeste, em grande parte de sua extensão, pela falha mais distal do intervalo. Os dois depocentros menores, localizados no noroeste da unidade, também são limitados em uma de suas extremidades por falhas. No entanto, não há uma segura relação entre a maior atividade tectônica e as maiores espessuras do mapa de isópacas (Figura 49).

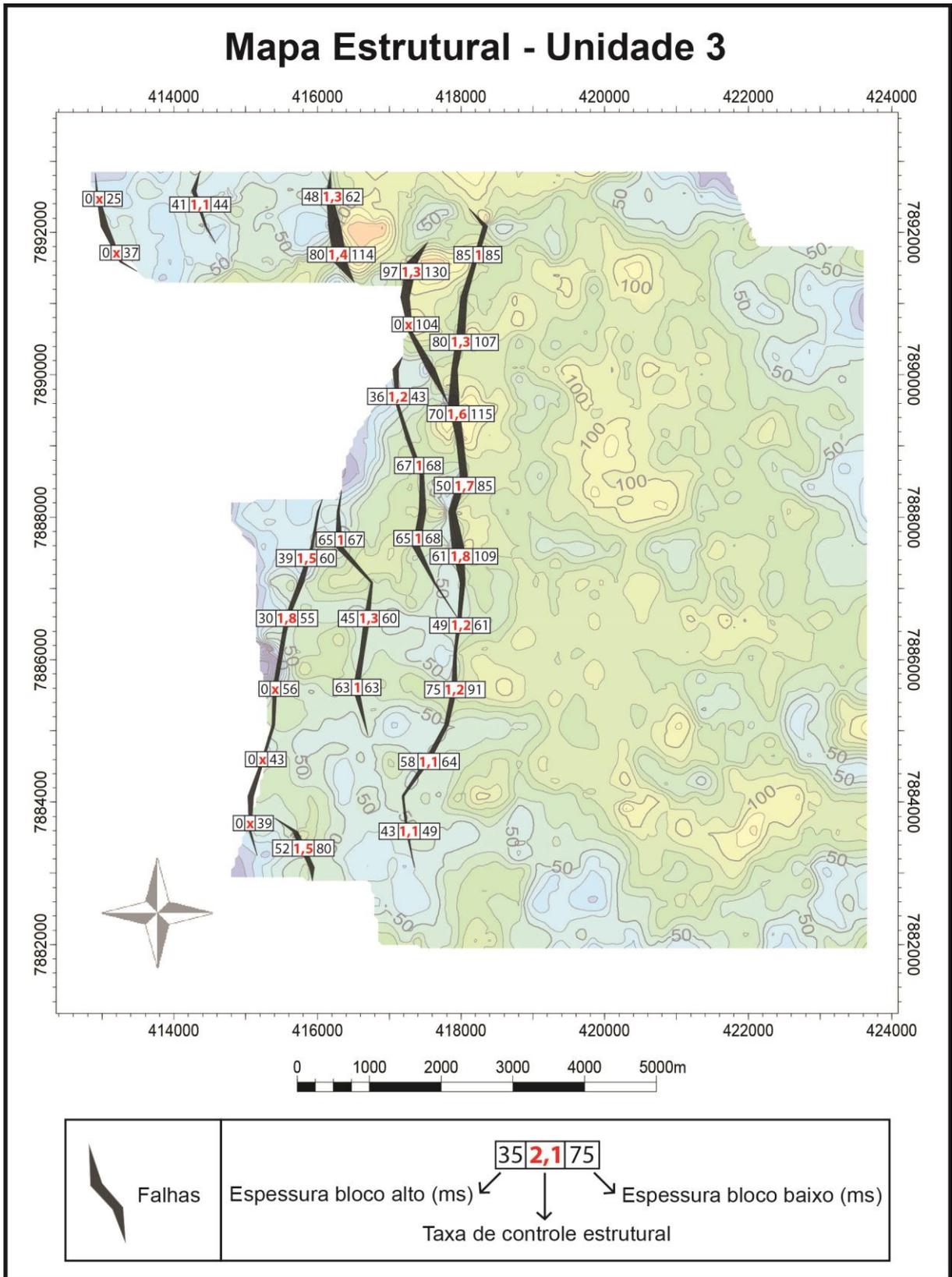


Figura 57: Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 3 (US3), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.

4.3.4 Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 4

As falhas ocorrem na porção oeste da unidade e todas estão associadas com as duas zonas de falhas, tendo apenas um único pequeno falhamento isolado na porção sudoeste (Figura 58). A falha mais extensa localiza-se na zona de falha mais a leste, e todas possuem orientação aproximadamente N-S.

De forma geral, há uma grande diminuição da atividade tectônica em relação a US3. As mais altas taxas de controle estrutural encontradas variam entre 1,3 e 1,5 e ocorrem de forma muito isolada em determinadas porções das duas zonas de falha (Figura 58). O restante dos valores, 1 e 1,1, representam total ausência de controle estrutural e são as taxas dominantes da US4. A distribuição das taxas ao longo das falhas não apresenta nenhum padrão definido, com os maiores valores ocorrendo de forma aleatória ao longo do traçado das mesmas.

Como o controle tectônico é pouco influente, não há nenhuma relação entre a localização das falhas e das mais altas taxas de controle estrutural sin-deposicionais com as maiores espessuras identificados no mapa de isópacas da US4 (Figura 51).

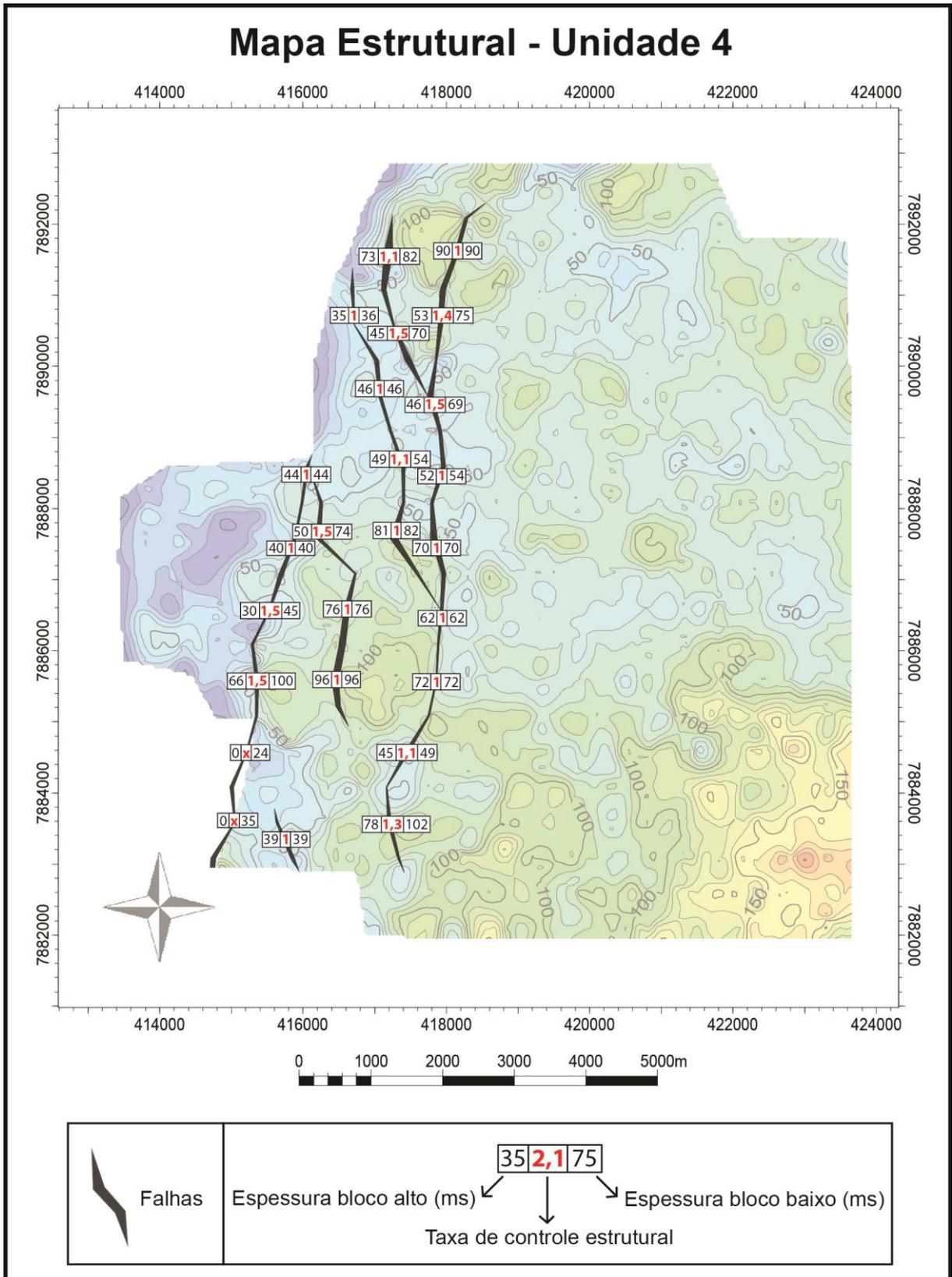


Figura 58: Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 4 (US4), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.

4.3.5 Mapa Estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 5

As falhas ocupam a porção central da unidade (Figura 59) e estão distribuídas principalmente ao longo das duas zonas de falhas dominantes de orientação N-S, comuns às outras unidades. Os demais falhamentos são de pequena extensão e ocorrem de forma conjunta na porção noroeste da unidade.

De forma geral, a atividade tectônica por parte das falhas não ocorre, ou é muito incipiente. A mais alta taxa de controle estrutural identificada é de 2,4, porém este valor é restrito a apenas uma única pequena falha, localizada na porção noroeste, sendo esta que concentra a única deformação significativa presente na deposição da US5. O restante dos valores são predominantemente 1 e 1,1, mostrando uma ausência quase que absoluta de controle estrutural (Figura 59). A zona de falha mais do oeste é completamente inativa, sendo todos os valores iguais a 1. Na zona de falha mais a leste, ocorre uma atividade tectônica muito incipiente apenas na metade norte, onde aparecem, pontualmente, os valores de 1,2.

Como o controle tectônico é praticamente ausente, não há relação entre a localização das falhas e das mais altas taxas de controle estrutural com os principais depocentros identificados no mapa de isópacas da US5. A única exceção é em relação à falha que concentra a mais alta taxa de controle estrutural identificada, onde ela limita uma pequena parte do grande depocentro da porção centro-norte da unidade (Figura 53).

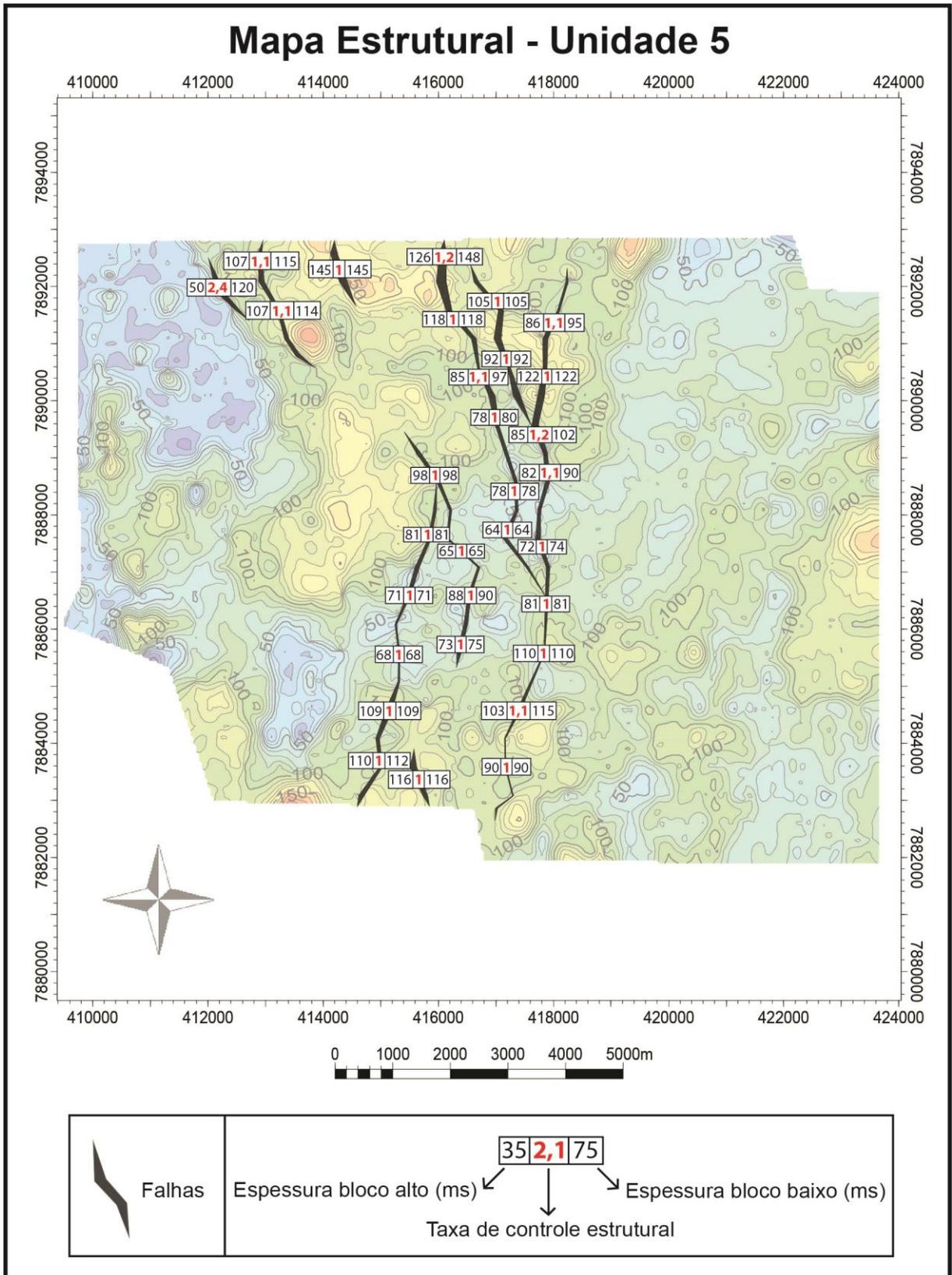


Figura 59: Mapa estrutural da Unidade Sismoestratigráfica 5 (US5), exibindo a localização, configuração e taxas de controle estrutural das falhas mapeadas. As taxas foram medidas em 10 linhas *dip* e expressas segundo nomenclatura relacionada no mapa: espessura do bloco alto; taxa de controle estrutural; espessura do bloco baixo.

4.4 Modelo estrutural integrado

De modo geral, pode-se constatar que a atividade tectônica esteve presente e foi muito importante em grande parte da deposição do Membro Mucuri, no cubo sísmico Fazenda Cedro Sul. O controle tectônico foi muito intenso no início da deposição do intervalo (na US1), ainda como remanescente da fase rifte da bacia, o que acabou ocasionando uma sedimentação diretamente vinculada às principais falhas identificadas, em estruturas do tipo meio-gráben (Quadro 4). A atividade tectônica persistiu durante a deposição da US2 e US3, porém com intensidade moderada, inferior a US1, diminuindo também a sua relação com a sedimentação. As atividades das falhas começaram a ter grande diminuição no final da deposição do intervalo, a partir da sedimentação da US4 e reduziram cada vez mais, a ponto de se tornarem praticamente nulas durante a deposição da US5. Mesmo assim, ocorreram reativações isoladas de algumas falhas, marcando a presença do controle tectônico, mesmo que muito baixo e raro. Assim, a sedimentação final do Membro Mucuri não apresentou nenhuma relação com o baixo controle tectônico envolvido. Desta forma, pode-se afirmar que o controle estrutural do Membro Mucuri transiciona de um padrão mecânico rúptil distensivo na base, para um padrão termal regional no topo. Este comportamento indica que o Membro Mucuri apresenta-se como uma fase transicional, ou de reajuste final da fase rifte, não compreendendo assim uma fase de margem passiva plena.

Unidade	Atividade tectônica	Padrão estrutural
US5	muito baixa	rampa homoclinal
US4	baixa	rampa homoclinal
US3	moderada	rampa homoclinal
US2	moderada	rampa homoclinal
US1	alta	meio-gráben

Quadro 4: Evolução simplificada da atividade tectônica durante a deposição do Membro Mucuri e os respectivos padrões estruturais de sedimentação.

5. CONCLUSÕES

- 1) O Membro Mucuri, no intervalo sísmico analisado, é limitado na base por uma alternância entre porções do embasamento cristalino e calhas da fase rifte precedente (Formação Cricaré). O topo é constituído pela base da camada de sal (Membro Itaúnas), correlata aos evaporitos das bacias de Santos e Campos;
- 2) O intervalo é dividido em 5 unidades sismoestratigráficas (US1, US2, US3, US4 e US5), separadas internamente por 4 superfícies (base US2, base US3, base US4 e base US5), as quais representam mudanças nos sistemas deposicionais;
- 3) O intervalo é preenchido por 3 sismofácies distintas: Sismofácies 1(SF1); Sismofácies 2 (SF2); Sismofácies 3 (SF3). A SF2 representa sistemas deposicionais costeiros dominados por ondas; A SF3 representa leques aluviais e fluviais (canais e planícies); A SF1 pode representar evaporitos sin ou pós-deposicionais, níveis proximais dos carbonatos do Pré-Sal, ou ainda impressões diagenéticas localizadas e visíveis em escala sísmica. Porém, nenhuma dessas hipóteses pode ser confirmada devido à ausência de correlação dos poços com o dado sísmico até o presente momento;
- 4) A SF3 predomina em todo o intervalo, envolvendo as demais sismofácies. A SF1 e a SF2 comumente ocorrem associadas, na forma de gradação lateral de uma para a outra. A ocorrência conjunta e a dificuldade pontual de distinção entre a SF1 e a SF2 pode sugerir uma única fácies sísmica, representativa dos depósitos costeiros dominados por ondas. A pontual dificuldade de separação pode ser ocasionada por variações diagenéticas de um mesmo grupo litológico;
- 5) O Membro Mucuri possui um significativo espessamento para leste, controlado em grande parte pela atividade tectônica de duas zonas de falhas de orientação aproximadamente N-S, que se estendem ao longo de toda a porção central do intervalo, e que são remanescentes da fase rifte da bacia (Formação Cricaré). A porção proximal do intervalo é dominada pelos depósitos mais novos (US5), enquanto que unidades mais antigas dominam na porção distal, na forma de um amplo e regional *onlap* costeiro, indicando um padrão de contínua criação de espaço de acomodação durante a deposição do intervalo;

6) Baseando-se nas interpretações de sismofácies e sistemas deposicionais (item), é possível identificar três eventos de inundação, representados pela ocorrência conjunta de SF1 e SF2, que caracterizam os sistemas costeiros dominados por ondas, intercalados por dois períodos regressivos, representados pelo predomínio da SF3, que configuram os sistemas aluviais. Os dois primeiros eventos de inundação não são expressivos, ocorrem essencialmente no início da deposição da US1 e no final da deposição da US2 e não têm uma extensão homogênea ao longo dessas unidades. Intercalado entre estes dois eventos, sobretudo na US2, ocorre o primeiro período regressivo, separando estes dois primeiros eventos, sendo também pouco relevante. O terceiro evento de inundação é o mais expressivo, inicia-se principalmente na porção leste da US4 e estende-se praticamente ao longo de toda a US5. Separando o segundo do terceiro evento de inundação, ocorre o segundo período regressivo, também de grande expressão, ocorrendo fundamentalmente ao longo da US3 e início de deposição da US4;

7) De modo geral, pode-se constatar que a atividade tectônica esteve presente e foi muito importante em grande parte da deposição do Membro Mucuri, no cubo sísmico 3D Fazenda Cedro Sul;

8) O controle tectônico foi intenso durante a deposição da US1, o que ocasionou a geração de depocentros diretamente vinculados às principais falhas, em configurações de meio-grábens. Assim, a deposição da US1 ocorreu em condições de alta atividade tectônica, ainda vinculada à fase rifte da bacia, ou em uma fase transicional inicial, com reativação tectônica de falhas da fase sin-rifte anterior;

9) A atividade tectônica persistiu durante a deposição da US2 e US3, porém com intensidade moderada, inferior a US1, diminuindo também a sua relação com a sedimentação. Os depocentros mostram certa relação com a atividade das falhas, porém não constituem uma sedimentação em porções isoladas, como ocorre na US1;

10) A atividade tectônica diminuiu muito a partir da deposição da US4, se tornando praticamente nula durante a deposição da US5. Mesmo assim, ocorreram reativações isoladas de algumas falhas, marcando a presença do controle tectônico, mesmo que muito baixo e raro. Os depocentros identificados não possuem nenhuma relação com as falhas mapeadas, o que comprova a quase total ausência de atividade tectônica.

6. REFERÊNCIAS

- Asmus, H. E., Gomes, J. B. & Pereira, A. C. B. (1971). Integração geológica regional da Bacia do Espírito Santo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 25., 1971, São Paulo. *Anais do Congresso...* São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, v.3, pp. 235-252.
- Bosence, D.W.J. (1998). Stratigraphic and sedimentological models of rift basins. *In: Purser, B.H., Bosence, D.W.J. (Eds.). Sedimentation and Tectonics of Rift Basins – The Red Sea-Gulf of Aden*. London: Chapman & Hall.
- Brown Jr, L. F. & Fisher, W. L. (1977). Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull-apart basins. *In: Payton, C. E. (Ed.). Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: AAPG Memoir 26.
- Carvalho, R. S., Biassusi, A. S. & Maciel, A. A. (1989). Bacia do Espírito Santo: o "estado da arte" da exploração. *In: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA*, 1., 1989, Rio de Janeiro. *Resumos expandidos...* Rio de Janeiro, Petrobras, pp. 127-134.
- De Ros, L. F., Goldberg, K., Dani, N., Armelenti, G., Carvalho, A. S. G. & Zambonato, E. E. (2010). Diagenetic processes in clastic pre-salt reservoirs, onshore Espírito Santo Basin, eastern Brazil. *In: AAPG ANNUAL CONVENTION EXHIBITION*, 2010, New Orleans. *Abstracts Volume...* New Orleans, pp. 56-56.
- França, R. L., Del Rey, A. C., Tagliari, C. V., Brandão, J. R., & Fontanelli, P. R. (2007). Bacia do Espírito Santo. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15 (2): 501-509.
- Gawthorpe, R. L. & Leeder, M. R. (2000). Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12: 195-218.
- Gupta, A. & Scholz, C. H. (2000). A model of normal fault interaction based on observations and theory. *Journal of Structural Geology*, 22: 865-879.
- Kuchle, J. (2004). *Análise estratigráfica da seção rift da Bacia de Camamu-Almada, Bahia*. Porto Alegre, 157 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Mansfield, C. & Cartwright, J. (2001). Fault growth by linkage: observations and implications from analogue models. *Journal of Structural Geology*, 23: 745-763.
- Mitchum Jr, R. M., Vail, P. R. & Thompson, S. (1977a). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis. *In: Payton, C. E. (Ed.). Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: AAPG Memoir 26.
- Mitchum Jr, R. M., Vail, P. R. & Sangree, J. B. (1977b). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences. *In: Payton, C. E. (Ed.). Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: AAPG Memoir 26.

Morley, C.K. (1995). Developments in the structural geology of rifts over the last decade and their impact on hydrocarbon exploration. *In: Lambiase, J. J. (Ed.). Hydrocarbon habitat in rift basins*. Geological Society Special Publications.

Morley, C.K. (1999). Patterns of displacement along large normal faults: implications for basin evolution and fault propagation, based on examples from East Africa. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83: 613-634.

Morley, C. K. (2002). Evolution of large normal faults: Evidence from seismic reflection data. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86: 961-978.

Payton, C. E. (1977). *Seismic Stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: AAPG Memoir 26.

Prosser, S. (1993). Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. *In: Williams, G. D. & Dobb, A. (Eds.). Tectonics and Seismic Sequence Stratigraphy*. Geological Society Special Publication No. 71.

Rosendahl, B. R., Reynolds, D. J., Lorber, P. M., Burgess, C. F., McGill, J., Scott, D., Lambiase, J. J., & Derksen, S. J. (1986). Structural expressions of rifting: lessons from lake Tanganyika, África. *In: Frostick, L. E., Renaut, R. W., Reid, I., Tiercelin, J. J. (Eds.). Sedimentation in the African Rifts*. Oxford: Geological Society.

Schlische, R. W. & Anders, M. H. (1996). Stratigraphic effects and tectonic implications of the growth of normal faults and extensional basins. *In: Beraton, K. K. (Ed.). Reconstructing the history of Basin and Range extension using sedimentology and stratigraphy*. Geological Society of America Special Paper 303.

Vail, P. R., Todd, R. G. & Sangree, J. B. (1977). Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 5. Chronostratigraphic Significance of Seismic Reflections. *In: Payton, C. E. (Ed.). Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: AAPG Memoir 26.

Vieira, R. A. B., Costa, L. A. R. & Alves, R. G. (1992). Bacias do Espírito Santo e Mucuri: Estudo geológico e análise exploratória das porções onshore e nearshore. *Petrobras/Dexas (Relatório interno)*. São Mateus-ES.

Vieira, R. A. B., Mendes, M. P., Vieira, P.E., Costa, L. A. R., Tagliari, C. V., Bacelar, L. A. P. & Feijo, F.J. (1994). Bacias do Espírito Santo e Mucuri. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 8(1): 191-202.

Vieira, R. A. B. (1998). *Análise estratigráfica e evolução paleogeográfica da seção Neoptiana na porção sul da Plataforma de São Mateus, Bacia do Espírito Santo, Brasil*. Porto Alegre, 158 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Walsh, J.J., Nicol, A. & Childs, C. (2002). An alternative model for the growth of faults. *Journal of Structural Geology*, 24: 1669-1675.

Wernicke, B. (1985). Uniform sense, normal simple shear of the continental lithosphere. *Canadian journal of Earth Sciences*, 22: 108-125.

Wheeler, H. E. (1958). Time Stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 42: 1047-1063.