



UFRJ
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de ciências da Matemática e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

Rodrigo Gentil Coelho de Azambuja

Modelos de reconstrução cinemática e paleogeográfica das bacias mesozóicas *onshore* do nordeste do Brasil

Rio de Janeiro

2023

Rodrigo Gentil Coelho de Azambuja

Modelos de reconstrução cinemática e paleogeográfica das bacias mesozóicas *onshore* do nordeste do Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Renata da Silva Schmitt

Coorientador(es): Msc. Evânia Alves da Silva; Dr. Alessandro Ferraz Palmeira

Rio de Janeiro

2023

Azambuja, Rodrigo Gentil Coelho de

Modelos de reconstrução cinemática e paleogeográfica das bacias mesozóicas *onshore* do nordeste do Brasil / Rodrigo Gentil Coelho de Azambuja – Rio de Janeiro: UFRJ/IGEO 2023.

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2023.

Orientador(a): Renata da Silva Schmitt.

1. Gondwana 2. Mesozoico 3. Reconstrução 4. Correlação estratigráfica

Rodrigo Gentil Coelho de Azambuja

Modelos de reconstrução cinemática e paleogeográfica das bacias mesozóicas *onshore* do nordeste do Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Aprovado em:

Por:

Orientadora: Dra. Renata da Silva Schmitt (UFRJ)

Dr. Ismar de Souza Carvalho (UFRJ)

Dra. Pâmela Cristina Richetti (UFRJ)

Rio de Janeiro

2023

Agradecimentos

Primeiramente, é preciso reconhecer e agradecer o suporte da Shell Brasil Petróleo Ltda e a importância estratégica do suporte da ANP (Agência Nacional de Petróleo), através do regulamento obrigatório P&D (cooperação técnica #20.219-2). Sem o auxílio e financiamento para a concretização do Projeto ALAGOAS, este trabalho não existiria. Além disso, agradeço imensamente ao Centro Digital Gondwana de Geoprocessamento (CDGG) pelo suporte na infraestrutura fundamental para a elaboração da pesquisa e a toda a equipe do laboratório por tantos anos de parceria e acolhimento.

Agradeço, também, aos meus orientadores e parceiros nesse trabalho. Sou grato à minha orientadora Dra. Renata Schmitt pela orientação acadêmica ao longo de minha graduação e, principalmente, durante a pesquisa. Agradeço à minha co-orientadora Evânia Alves pelo apoio nos conhecimentos teóricos e práticos relacionados a geoprocessamento e cartografia. Por fim, agradeço ao meu co-orientador, Dr. Alessandro Palmeira, pelo auxílio acadêmico, principalmente relacionado conhecimentos técnico-quantitativos e matemáticos necessários e utilizados na pesquisa.

Agradeço, finalmente, à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pelos anos de parceria e pela infraestrutura necessária para a elaboração desta pesquisa.

Dedicatória

Nesta dedicatória, gostaria de agradecer de forma mais intimista e pessoal às pessoas que fizeram parte dessa minha trajetória da graduação. Agradeço especialmente à minha orientadora e inspiração acadêmica Dra. Renata Schmitt por me trazer oportunidades incríveis e confiar em mim durante toda a minha graduação. Também agradeço à minha querida co-orientadora Evânia Alves por tudo que me ensinou, não apenas as técnicas, mas, principalmente, todos os lindos ensinamentos de vida. E claro, agradeço ao meu co-orientador Alessandro Palmeira pela colaboração na pesquisa e por ser um exemplo de profissional – e agora pai – a ser seguido.

Sou extremamente grato a todos os meus amigos, sobretudo aos que criei ao longo dos meus anos na geologia. A quem me apoiou e esteve ao meu lado tanto nos momentos fáceis quanto nos mais difíceis e conturbados. Rebecca, Letícia, Beatriz, Diana, Amanda, Mateus, Úrsula e tantos outros nomes que eu nunca esquecerei.

Impossível não citar o meu grupo de amigos do colégio, apelidado de “Connection”, por serem fundamentais na construção da minha vida social e especialmente ao grupo “Êta Nós” por serem os responsáveis por me manter vivo, ativo e sorridente e por me mostrarem que a vida é feita de altos e baixos e que é preciso reconhecer isso e acreditar que, no final, vai dar tudo certo. Aos queridos Alan Henrique, Ana Galvão, Matheus Fernandes e Nathalie Vodopivic, aqui deixo os meus sinceros agradecimentos.

Por fim, porém o mais importante, agradeço a cada membro da minha família. Aos meus pais Pedro Paulo e Cristiane, às minhas irmãs Caroline e Juliana, às minhas avós Maria Luiza e Vânia e ao Luke, o nosso mascote. É impossível manifestar em apenas um parágrafo o amor e a gratidão a tudo que fizeram por mim ao longo de minha vida. Porém, a conclusão dessa pesquisa é a maior forma de demonstrar que nada disso foi em vão. Agradeço por me educarem, por colaborarem na construção do meu caráter e por me protegerem. É para vocês que eu dedico não só esse trabalho, mas toda a minha carreira acadêmica. Muito, muito obrigado.

“The present is the key to the past.”

- Charles Lyell

Resumo

AZAMBUJA, Rodrigo G. C. **Modelos de reconstrução cinemática e paleogeográfica das bacias mesozóicas *onshore* do nordeste do Brasil.** Ano 2023, p. 93, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Durante o período Cretáceo, os processos geológicos e tectônicos relacionados à abertura do Oceano Atlântico foram responsáveis pela formação e reativação de estruturas pré-cambrianas na crosta continental, que geraram bacias sedimentares hoje parcialmente preservadas nas porções *onshore* do nordeste brasileiro. Essas bacias representam parte de um sistema de riftes cujo registro sedimentar remonta sistemas fluviolacustres que precederam uma invasão marinha iniciada no Aptiano, conforme avançavam os processos de rifte e posterior drifte ao longo do Cretáceo Superior. Entretanto, ainda não há um consenso sobre o sentido da invasão marinha nas bacias abortadas da província Borborema, se pela porção sul ou pela porção equatorial do Atlântico Sul. Este trabalho propõe uma abordagem metodológica para a reconstrução cinemática e paleogeográfica das formações sedimentares das bacias do Araripe, Rio do Peixe e Potiguar em cenários paleogeográficos do Cretáceo a partir das informações das colunas estratigráficas, em superfície e subsuperfície, gerando um modelo de reconstrução para a porção do NW do Gondwana (no nordeste brasileiro). Para tanto foram utilizados os dados da base GIS do CDGG/UFRJ (Centro Digital Gondwana de Geoprocessamento), e os dados de poço disponibilizados pela ANP (Agência Nacional de Petróleo) e compilados de projetos públicos, bem como mapas geológicos gerados do nordeste do Brasil. A metodologia adotada foi dividida em três partes: (1) compilação das cartas estratigráficas das bacias *onshore* brasileiras; (2) revisão cartográfica e extrapolação das formações atualmente encobertas; (3) reconstrução cinemática e geração dos mapas paleogeográficos. A primeira parte consistiu em um estudo bibliográfico das cartas estratigráficas das bacias sedimentares mesozóicas *onshore* do norte-nordeste do Brasil (Parnaíba, Alagoas, Araripe, Rio do Peixe, Potiguar, Marajó, São Luís, Recôncavo, Tucano Sul e Central e Tucano Norte e Jatobá). A partir desta compilação, foram escolhidas bacias-chave para a reconstrução cinemática. A segunda etapa envolveu a extrapolação das formações sedimentares de cada bacia selecionada, com os dados de superfície, a partir dos mapas geológicos e estruturais, em GIS, das bacias. Nas regiões em que as formações sedimentares estavam encobertas, foram usados dados de perfis compostos dos poços e seções geológicas para extrapolar a área mínima de sedimentação da formação. Para isso, foi utilizado o *software ArcGis*. A última etapa envolveu a modelagem de cenários a partir da reconstrução cinemática das placas tectônicas em tempo, com as respectivas unidades sedimentares cartografadas das bacias, através do *software GPlates*. Oito diferentes modelos cinemáticos foram produzidos: para 150 Ma, 140 Ma, 125 Ma, 120 Ma, 115 Ma, 110 Ma, 100 Ma e 95 Ma. Foram integrados os mapas das unidades litoestratigráficas com os modelos cinemáticos, gerando-se os mapas paleogeográficos. A integração de banco de dados GIS multi-informação com modelos de reconstruções cinemáticas e paleogeográficos permite contribuir com o entendimento da evolução tectônica que levou à quebra do Gondwana e consequente desenvolvimento da atual margem equatorial brasileira.

Palavras-chave: Modelos de reconstrução; rifteamento Atlântico; Cretáceo; Gondwana.

Abstract

AZAMBUJA, Rodrigo G. C. **Kinematic and paleogeographic reconstruction models of the onshore Mesozoic basins of northeastern Brazil.** Ano 2023, p. 93, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

During the Cretaceous, geological, and tectonic processes related to the opening of the Atlantic Ocean were responsible for the formation and reactivation of Precambrian structures in the continental crust, which generated sedimentary basins that are now partially preserved in the onshore portions of northeastern Brazil. These basins represent part of a rift system whose sedimentary record goes back to fluvio-lacustrine systems that preceded a marine incursion that started in the Aptian, as the rift and later drift processes advanced throughout the Upper Cretaceous. However, there is still no consensus on the direction of marine incursion in the aborted basins of the Borborema province, whether from the southern portion or the equatorial portion of the South Atlantic. This work proposes a methodological approach for the kinematic and paleogeographical reconstruction of the sedimentary formations of the Araripe, Rio do Peixe and Potiguar basins in Cretaceous paleogeographic scenarios from the information of the stratigraphic columns, in surface and subsurface, generating a reconstruction model for the portion of NW Gondwana (in northeastern Brazil). For this purpose, data from the GIS database of the CDGG/UFRJ (Centro Digital Gondwana de Geoprocessamento) and well data provided by the ANP (National Petroleum Agency) and compiled from public projects, as well as geological maps generated in northeastern Brazil were used. The methodology adopted was divided into three parts: (1) compilation of stratigraphic columns of the Brazilian onshore basins; (2) cartographic review and extrapolation of currently hidden formations; (3) kinematic reconstruction and generation of paleogeographic maps. The first part consisted of a bibliographical study of the stratigraphic maps of the onshore Mesozoic sedimentary basins of north-northeast Brazil (Parnaíba, Alagoas, Araripe, Rio do Peixe, Potiguar, Marajó, São Luís, Recôncavo, Tucano Sul and Central and Tucano Norte and Jatoba). From this compilation, key basins were chosen for the kinematic reconstruction. The second stage involved the extrapolation of the sedimentary formations of each selected basin, with the surface data, from the geological and structural maps, in GIS, of the basins. In regions where the sedimentary formations were covered up, data from composite well profiles and geological sections were used to extrapolate the formation's minimum sedimentation area. For this, the ArcGis software was used. The last stage involved the modeling of scenarios based on the kinematic reconstruction of the tectonic plates in time, with the respective sedimentary units mapped in the basins, using the GPlates software. Eight different kinematic models were produced: for 150 Ma, 140 Ma, 125 Ma, 120 Ma, 115 Ma, 110 Ma, 100 Ma and 95 Ma. The maps of the lithostratigraphic units were integrated with the kinematic models, generating paleogeographic maps. The integration of a multi-information GIS database with models of kinematic and paleogeographical reconstructions makes it possible to contribute to the understanding of the tectonic evolution that led to the breakup of Gondwana and consequent development of the current Brazilian equatorial margin.

Keywords: Reconstruction models; Atlantic rifting; Cretaceous; Gondwana.

Lista de Figuras

- Figura 1.** Reconstrução cinemática entre América do Sul e África para a idade de 115 Ma, Mostrando a quebra do noroeste do paleocontinente Gondwana. A seta (A) ilustra a hipótese do curso da água pela porção equatorial do Atlântico Sul. A seta (B) ilustra a hipótese de curso da água pela porção sul do Atlântico Sul | Fonte: Adaptado de Heine *et al.* (2013). _____ 16
- Figura 2.** Imagem de satélite referente à localização da área de estudo. O retângulo em vermelho representa a delimitação da área relativa ao mapa regional do Projeto ALAGOAS, que se estende por toda a porção terrestre até o limite da linha de costa atual. O retângulo amarelo representa a área específica adotada para o desenvolvimento das etapas da metodologia dessa pesquisa. | Fonte: Extraído de World Imagery Basemap *ArcGis*, ESRI (2022). _____ 19
- Figura 3.** Modelo de reconstrução cinemática utilizando placas rígidas e sem considerar as deformações intraplacas. | Fonte: Bullard *et al.* (1967). _____ 21
- Figura 4.** Proposta de subdivisão do continente sul-americano em oito blocos, visando considerar a deformação intraplaca. | Fonte: Richetti *et al.* (2016). _____ 22
- Figura 5.** Figura ilustrativa da atuação dos polos de Euler em uma esfera rígida. | Fonte: Alejandro Nava (1998). _____ 23
- Figura 6.** Ilustração do circuito de placas utilizado nessa pesquisa. Essa hierarquia é adotada pelo software GPlates para a movimentação relativa dos dados vetoriais a partir das informações dos polos de rotação de Euler, definidos pelo autor em questão. As setas contínuas indicam a correlação de uma placa à outra na qual está subordinada. O modelo esquemático se trata de uma reconstrução cinemática para a idade de 100 Ma. | Fonte: Heine *et al.* (2013). _____ 24
- Figura 7.** Fluxograma em que detalha as etapas realizadas na metodologia deste trabalho. _____ 25
- Figura 8.** Mapa Regional do Projeto ALAGOAS. Os círculos indicam as bacias sedimentares inteiramente englobadas no recorte do mapa e utilizadas para a revisão bibliográfica das suas respectivas colunas estratigráficas. As cores em tons de rosa indicam rochas pré-cambrianas. Cores em tons roxos indicam rochas do Triássico. Tons em azul indicam rochas do Jurássico. Tons em verde indicam rochas do Cretáceo. Tons em amarelo indicam rochas cenozoicas. | Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG). _____ 26
- Figura 9.** Imagem ilustrativa da etapa de extrapolação das formações para porções soterradas. A imagem (a) ilustra um mapa geológico hipotético em planta e em bloco diagrama, sendo possível identificar a disposição das formações em subsuperfície. Além disso, é apresentado um poço exploratório interpretado, identificando as formações soterradas. A imagem (b) mostra a extrapolação das formações em subsuperfície a partir da interpretação dos poços exploratórios. Onde há a presença da formação no poço, é possível estimar a extensão do afloramento para porções atualmente encobertas. _____ 28

Figura 10. Tabela comparativa da porção mesozoica das colunas estratigráficas das formações das bacias <i>onshore</i> do norte-nordeste brasileiro. Fonte: Adaptado de Góes & Feijó (1994); Ponte & Appi (1990); Rossetti <i>et al.</i> (2001); Milani <i>et al.</i> (2007); Vaz <i>et al.</i> (2007); Córdoba <i>et al.</i> (2008); Lourenço (2020).	32
Figura 11. Reconstrução do nordeste da placa Sul-Americana. A seta em azul indica a possível incursão marinha no continente, iniciada na Bacia do Potiguar, durante a abertura do Oceano Atlântico. Fonte: Godot Souza <i>et al.</i> (2022).	33
Figura 12. Compartimentação tectônica da Província Borborema. É possível localizar espacialmente no mapa as três bacias sedimentares contempladas pela pesquisa, sendo elas a Bacia do Araripe, Bacia Rio do Peixe e Bacia Potiguar. Fonte: Adaptado de Godot Souza <i>et al.</i> (2022).	34
Figura 13. Mapa geológico e estrutural da Bacia do Araripe. Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).	36
Figura 14. Mapa geológico e estrutural da Bacia Rio do Peixe. Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).	39
Figura 15. Mapa geológico e estrutural da Bacia Potiguar. Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).	41
Figura 16. (a) Mapa geológico da Bacia do Araripe com a localização de duas linhas sísmicas (linhas vermelhas) utilizadas como base para a interpretação das seções geológicas (linhas pretas). (b) Seção geológica NW-SE da Bacia do Araripe. (c) Seção geológica SW-NE da Bacia do Araripe. Fonte: Richetti <i>et al.</i> (2022).	48
Figura 17. Seção geológica da Bacia do Araripe. Fonte: Assine (2007).	49
Figura 18. Seções geológicas da Bacia Rio do Peixe interpretadas através de seções sísmicas. Fonte: Nunes da Silva (2009).	49
Figura 19. Seção geológica da Bacia Potiguar. Fonte: modificado de Bertani <i>et al.</i> (1990).	50
Figura 20. Mapa geológico da Formação Mauriti extrapolada, Bacia do Araripe.	52
Figura 21. Mapa geológico da Formação Brejo Santo extrapolada, Bacia do Araripe.	53
Figura 22. Mapa geológico da Formação Missão Velha extrapolada, Bacia do Araripe.	54
Figura 23. Mapa geológico da Formação Abaiara extrapolada, Bacia do Araripe.	55
Figura 24. Mapa geológico da Formação Rio da Batateira extrapolada, Bacia do Araripe.	56
Figura 25. Mapa geológico da Formação Santana extrapolada, Bacia do Araripe.	57
Figura 26. Mapa geológico das formações Araripina e Exu empilhadas extrapoladas, Bacia do Araripe.	58

Figura 27. Mapa geológico da Formação Antenor Navarro extrapolada, Bacia Rio do Peixe. _____	59
Figura 28. Mapa geológico da Formação Sousa extrapolada, Bacia Rio do Peixe. _____	60
Figura 29. Mapa geológico da Formação Rio Piranhas extrapolada, Bacia Rio do Peixe. _____	61
Figura 30. Mapa geológico da Formação Pendência extrapolada, Bacia Potiguar. _____	62
Figura 31. Mapa geológico da Formação Alagamar extrapolada, Bacia Potiguar. _____	63
Figura 32. Mapa geológico da Formação Açú extrapolada, Bacia Potiguar. _____	64
Figura 33. Mapa geológico da Formação Jandaíra extrapolada, Bacia Potiguar. _____	65
Figura 34. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 150 Ma. _____	67
Figura 35. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 140 Ma. _____	69
Figura 36. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 125 Ma. _____	71
Figura 37. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 120 Ma. _____	73
Figura 38. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 115 Ma. _____	75
Figura 39. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 110 Ma. _____	77
Figura 40. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 100 Ma. _____	79
Figura 41. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 95 Ma. _____	81
Figura 42. Mapa paleogeográfico do norte-nordeste do Brasil reconstruído para 115 Ma. Foco nas reconstruções das bacias do Parnaíba, Araripe, Rio do Peixe e Potiguar. _____	84

Lista de Tabelas

Tabela 1. Compilação dos dados de perfis compostos de poços exploratórios realizados nas bacias do Araripe, Rio do Peixe e Potiguar.....	47
---	----

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo geral	17
1.1.2. Objetivo específico	18
1.2. Localização da área de estudo	18
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE RECONSTRUÇÃO CINEMÁTICA	20
2.1. Polo de rotação de Euler	22
2.2. Desvio Polar Aparente (APW)	23
2.3. O Software GPlates e o modelo cinemático	23
3. METODOLOGIA	25
3.1. 1ª Etapa: Cartas Estratigráficas	25
3.2. 2ª Etapa: Cartografia e GIS	27
3.3. 3ª Etapa: Reconstrução Cinemática Paleogeográfica	29
4. AS BACIAS SEDIMENTARES <i>ONSHORE</i> DO NORDESTE DO BRASIL	30
4.1. A escolha das bacias sedimentares	31
4.2. O embasamento cristalino pré-cambriano: Província Borborema	34
4.3. Bacia do Araripe	35
4.3.1. Estratigrafia da Bacia do Araripe	36
4.4. Bacia Rio do Peixe	38
4.4.1. Estratigrafia da Bacia Rio do Peixe	39
4.5. Bacia Potiguar	40
4.5.1. Estratigrafia da Bacia Potiguar	41
5. DADOS UTILIZADOS	43
5.1. Poços exploratórios	43
5.2. Sísmica e seções geológicas	47

5.3.	Banco de dados GIS do CDGG	50
6.	MAPAS GEOLÓGICOS DAS FORMAÇÕES SEDIMENTARES EXTRAPOLADAS	51
6.1.	Bacia do Araripe	51
6.1.1.	Formação Mauriti	51
6.1.2.	Formação Brejo Santo	52
6.1.3.	Formação Missão Velha	53
6.1.4.	Formação Abaiara	54
6.1.5.	Formação Rio da Batateira	55
6.1.6.	Formação Santana	56
6.1.7.	Formação Araripina e Exu	57
6.2.	Bacia Rio do Peixe	58
6.2.1.	Formação Antenor Navarro	58
6.2.2.	Formação Sousa	59
6.2.3.	Formação Rio Piranhas	60
6.3.	Bacia Potiguar	61
6.3.1.	Formação Pendência	61
6.3.2.	Formação Alagamar	62
6.3.3.	Formação Açú	63
6.3.4.	Formação Jandaíra	64
7.	MODELOS DE RECONSTRUÇÃO CINEMÁTICA	65
7.1.	Reconstrução em 150 Ma	66
7.2.	Reconstrução em 140 Ma	68
7.3.	Reconstrução em 125 Ma	70
7.4.	Reconstrução em 120 Ma	72
7.5.	Reconstrução em 115 Ma	74
7.6.	Reconstrução em 110 Ma	76
7.7.	Reconstrução em 100 Ma	78

7.8.	Reconstrução em 95 Ma	80
8.	DISCUSSÕES	82
8.1.	Correlação com a Bacia do Parnaíba	83
9.	CONCLUSÃO	86
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

Os processos geológicos e tectônicos relacionados à abertura do Oceano Atlântico foram responsáveis pelo rifteamento e formação/reativação de estruturas, possibilitando a geração de espaços de acomodação para bacias sedimentares hoje parcialmente preservadas nas porções *onshore* e *offshore* do nordeste brasileiro e do noroeste africano. Dessa forma, essas bacias representam parte de um sistema de riftes desenvolvidos ao longo de falhas situadas no embasamento cristalino Neoproterozoico (Darros de Matos *et al.*, 2021).

As depressões formadas por esse regime tectônico possibilitaram o estabelecimento de um sistema lacustre fluvial nesta parte do paleocontinente Gondwana, que precederam a entrada do mar Atlântico conforme avançavam os processos de rifte e posterior drifte (Carvalho *et al.*, 2012). Entretanto, a ingressão das águas marinhas no continente ainda é motivo de discussões, havendo certas discordâncias sobre o caminho que o mar teria percorrido, devido às possibilidades de curso vindo pela porção sul (Assine, 2007; Assine *et al.*, 2014; Custódio *et al.*, 2017) ou pela porção equatorial do Atlântico Sul (Beurlen, 1966; Arai *et al.*, 1994; Arai, 2014; Goldberg *et al.*, 2019; Kroth *et al.*, 2021; Godot Souza *et al.*, 2022).

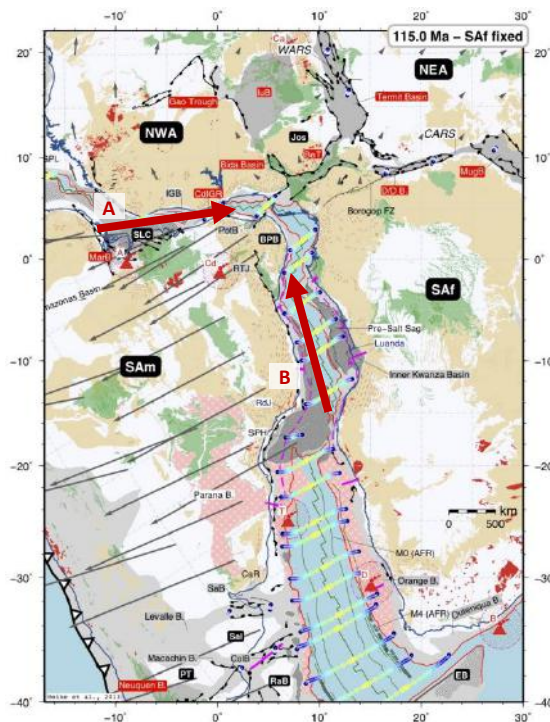


Figura 1. Reconstrução cinemática entre América do Sul e África para a idade de 115 Ma, Mostrando a quebra do noroeste do paleocontinente Gondwana. A seta (A) ilustra a hipótese do curso da água pela porção equatorial do Atlântico Sul. A seta (B) ilustra a hipótese de curso da água pela porção sul do Atlântico Sul | Fonte: Adaptado de Heine *et al.* (2013).

Diversos registros geológicos colaboram para as pesquisas relacionadas à entrada da água no continente. Entre esses registros, encontra-se a Formação Santana (Aptiano-Albiano) na Bacia do Araripe, localizada majoritariamente no interior do estado do Ceará. A formação possui os únicos registros marinhos na bacia, o que evidencia o curso do mar para o interior da porção continental, porém, traz a dúvida: qual teria sido o curso da água até chegar na região atualmente ocupada pela bacia sedimentar.

Este trabalho busca correlacionar as colunas estratigráficas de parte destas bacias intracontinentais mesozoicas no contexto do noroeste do Gondwana a partir da reconstrução cinemática em tempo geológico. Para atingir esse objetivo será elaborado um detalhamento e compilação da litoestratigráfica das bacias sedimentares mesozóicas *onshore* do nordeste brasileiro, através de revisão bibliográfica e cartográfica. A finalidade da proposição de um modelo de reconstrução cinemática desta região neste intervalo de tempo é contribuir com novas evidências e hipóteses acerca do caminho de entrada do mar no continente durante o rifteamento e ruptura do paleocontinente Gondwana.

Esta pesquisa faz parte do projeto de suporte Shell Brasil Petróleo Ltda. denominado “Correlação estratigráfica, evolução paleoambiental e paleogeográfica e perspectivas exploratórias do Andar Alagoas”, também intitulado de ‘Projeto ALAGOAS’ – e assim será referenciado neste presente trabalho.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a reconstrução cinemática das bacias sedimentares *onshore* do norte-nordeste do Brasil formadas devido ao rifteamento do paleocontinente Gondwana e consequente abertura do Atlântico Sul durante o Mesozoico através da compilação dos dados litoestratigráficos para a geração de mapas paleogeográficos em tempo. Esse trabalho tem como finalidade contribuir com as discussões acerca do caminho de entrada do mar durante a ruptura do Gondwana, diante de diversas hipóteses para esse curso, uma questão polêmica no meio científico. Além disso, a escassa quantidade de trabalhos relacionados a modelos de reconstrução paleogeográficos de bacias sedimentares abre uma

possibilidade de trazer novas discussões sobre o tema, além de colaborar com a devida importância sobre o assunto.

1.1.2. Objetivo específico

Os objetivos específicos são:

- (a) desenvolver a metodologia em bacias-chave, gerando mapas geológicos contendo as respectivas formações sedimentares empilhadas, através da extrapolação espacial da sedimentação.
- (b) gerar mapas paleogeográficos nos tempos de 150 Ma, 140 Ma, 125 Ma, 120 Ma, 115 Ma, 110 Ma, 100 Ma e 95 Ma, empilhando as formações de acordo com o início de suas sedimentações.

1.2. Localização da área de estudo

A área de estudo se encontra inteiramente em território brasileiro. A pesquisa se desenvolveu em duas porções (Figura 2). Iniciou-se uma compilação em escala regional e, em seguida, foi delimitada uma área para maior detalhe, selecionando-se algumas bacias para a aplicação da abordagem metodológica.

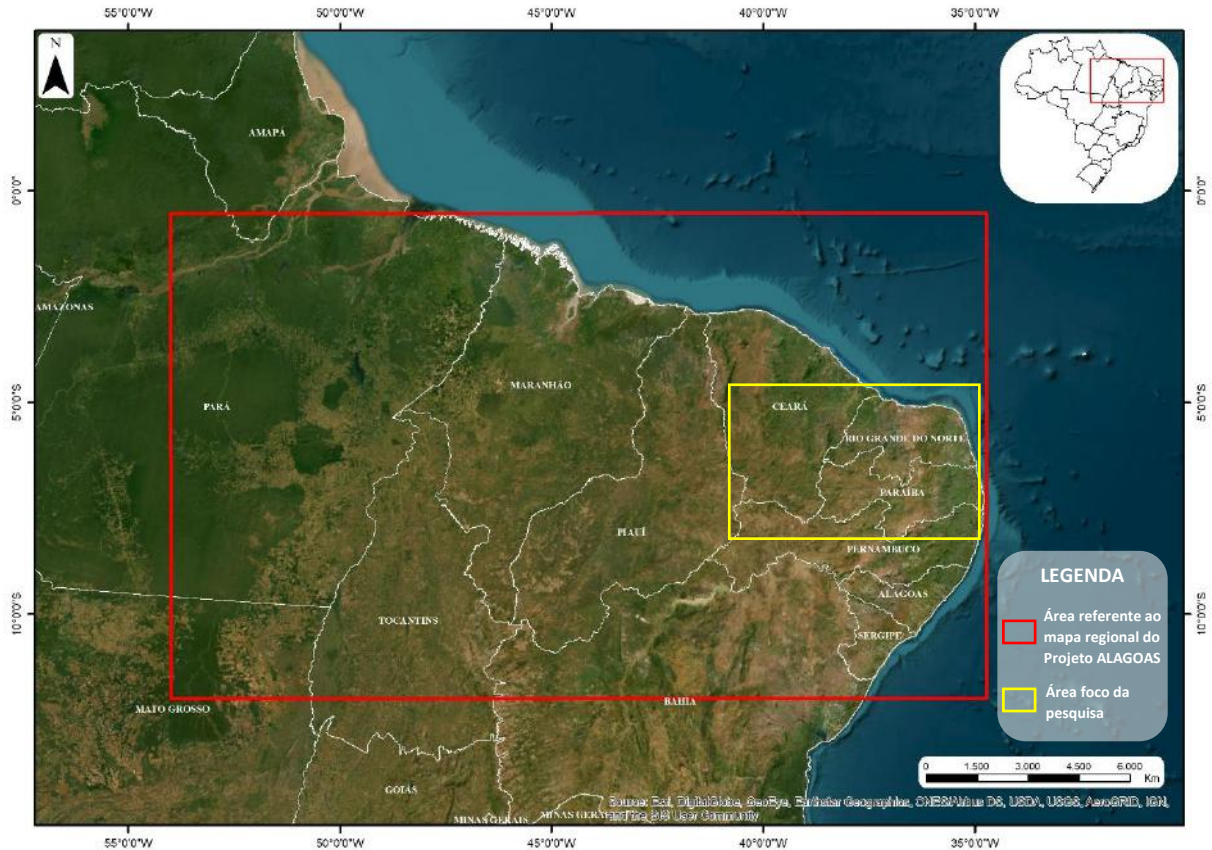


Figura 2. Imagem de satélite referente à localização da área de estudo. O retângulo em vermelho representa a delimitação da área relativa ao mapa regional do Projeto ALAGOAS, que se estende por toda a porção terrestre até o limite da linha de costa atual. O retângulo amarelo representa a área específica adotada para o desenvolvimento das etapas da metodologia dessa pesquisa. | Fonte: Extraído de World Imagery Basemap *ArcGIS*, ESRI (2022).

Primeiramente, o estudo se estabeleceu na delimitação da área referente ao mapa regional do Projeto ALAGOAS. O mapa se limita ao sul pela borda meridional da Bacia Tucano-Jatobá – parte norte do estado da Bahia – e ao oeste pelo limite oriental do estado do Mato Grosso. Estende-se por toda a porção *onshore*, tendo como limite a linha de costa atual. Em seguida, como será visto no decorrer do trabalho, a pesquisa focará mais detalhadamente na porção nordeste do Brasil, abrangendo os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e parte dos estados do Ceará e Pernambuco.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE RECONSTRUÇÃO CINEMÁTICA

O conceito da reconstrução cinemática de placas se baseia em recriar a configuração geográfica das placas continentais em um determinado tempo geológico. Compreender os encaixes entre os continentes é um desafio desde a proposta da Deriva Continental, trazida por Wegener (1924) e Du Toit (1937).

A reconstrução cinemática surgiu como uma forma de quantificar os modelos de encaixe dos continentes, que antes se apoiavam em reconstruções artísticas e sem uma fundamentação teórica-quantitativa e matemática que pudesse evidenciar como realmente se deu os processos de movimentação dos continentes.

Diversos modelos de reconstrução cinemática vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos para a porção do Atlântico Sul (e.g. Bullard *et al.*, 1965; Martin *et al.*, 1981; Nurnberg, 1991; Moulin *et al.*, 2010; Heine *et al.*, 2013; Reeves *et al.*, 2016; Richetti *et al.*, 2018; Muller *et al.*, 2019). Os primeiros modelos cinemáticos consideravam a hipótese da rigidez das placas, (Bullard *et al.*, 1965; Figura 3). Essa ideia inevitavelmente resulta em uma sobreposição de porções continentais, pois ignora as deformações intraplaca.

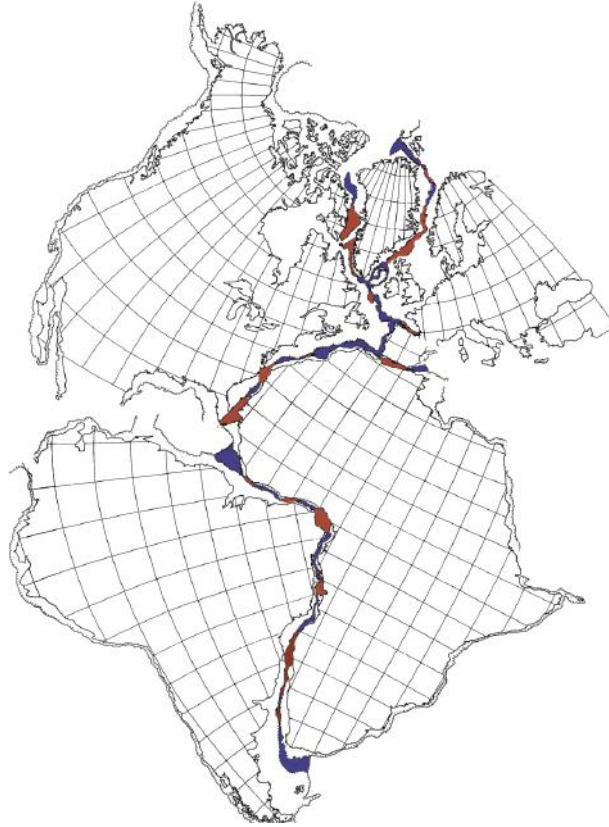


Figura 3. Modelo de reconstrução cinemática utilizando placas rígidas e sem considerar as deformações intraplacas. | Fonte: Bullard *et al.* (1967).

Modelos cinemáticos mais recentes trazem a ideia da deformação intraplaca, mas seguem com questionamentos sobre como extrair o efeito da deformação interna da litosfera. É necessária uma compreensão da geologia e evolução geológica das regiões, e a partir da análise dos dados geológicos e geofísicos (subsuperfície), é possível propor uma quebra (recorte) nos continentes para resolver esses ajustes internos da placa e conseguir chegar mais próximo de uma configuração mais fiel da placa pré eventos tectônicos, possibilitando um melhor encaixe entre os blocos (Figura 4). Atualmente, a deformação intraplaca tem sido um dos maiores desafios para a modelagem cinemática de placas.

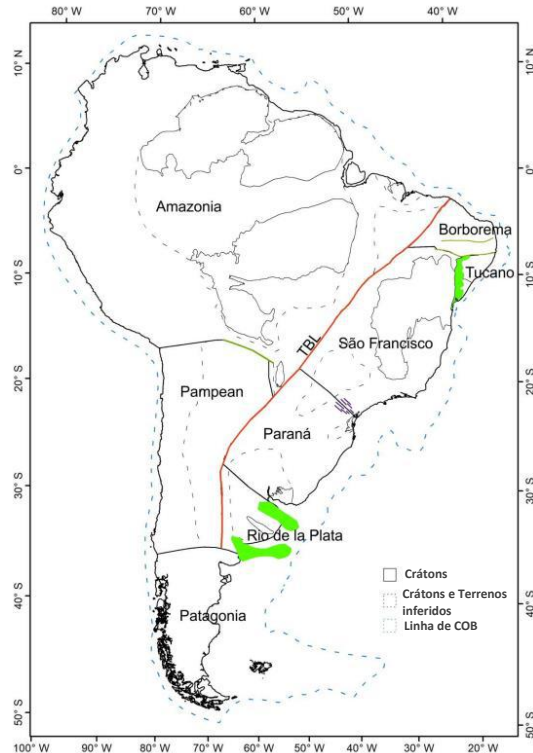


Figura 4. Proposta de subdivisão do continente sul-americano em oito blocos, visando considerar a deformação intraplaca. | Fonte: Richetti *et al.* (2016).

A quantificação desse processo é realizada hoje através de *softwares* que possibilitam uma modelagem cinemática matemática e quantitativa, de acordo com elementos essenciais na movimentação de placas, como os polos de rotação de Euler e o desvio polar aparente (APW).

2.1. Polo de rotação de Euler

O Polo de rotação de Euler (Figura 5) é um teorema que tenta explicar o impacto do movimento de placas nas diferentes regiões do planeta. A teoria diz que qualquer movimento na superfície de uma esfera pode ser descrito por meio de uma rotação em torno de um eixo (linha) que passa pelo centro dessa esfera. Dessa forma, quando um movimento de rotação – mesmo que pequeno – que ocorre no polo de uma esfera, é projetado para o centro da esfera, a movimentação é bem maior do que a que ocorre nos polos. Essa teoria ajuda a concluir que pequenos movimentos que ocorrem nos polos do planeta Terra significam maior deslocamento nas porções mais próximas da linha do Equador.

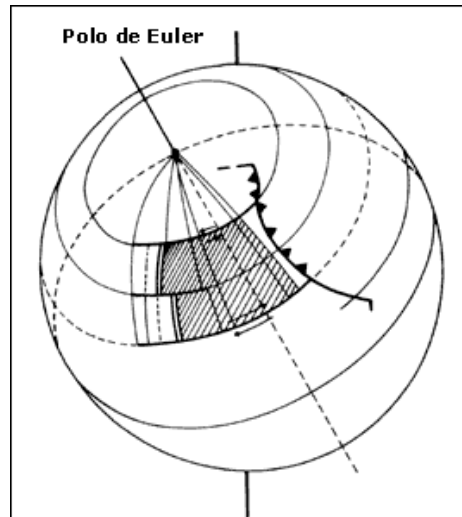


Figura 5. Figura ilustrativa da atuação dos polos de Euler em uma esfera rígida. | Fonte: Alejandro Nava (1998).

2.2. Desvio Polar Aparente (APW)

Apparent polar Wander, também chamado de desvio polar aparente, é o uso de informações de dados paleomagnéticos para determinar a posição paleogeográfica dos continentes (Van der Voo, 1987; Bonifacio, 2020). Consiste na movimentação de um polo fixado na coordenada atual em relação a um certo elemento tectônico – como placas continentais, crátons ou blocos. Dessa maneira, ao constatar um movimento relativo similar entre blocos ou continentes, por exemplo, é possível sugerir que essas porções possivelmente já estiveram juntas em um determinado momento, quando tiveram movimentos APW iguais (Van der Voo, 1987).

2.3. O Software GPlates e o modelo cinemático

Para esta pesquisa, optou-se pelo *software GPlates 2.2.0* (Muller *et al.*, 2018) para a realização das reconstruções cinemáticas. Neste *software*, os dados vetoriais (*shapes*) são carregados e, então, reconstruídos através das informações dos polos de rotação de Euler definidos. Após a reconstrução, os dados vetoriais são exportados e podem ser carregados em um *software* de mapeamento. Nesse trabalho, foi utilizado o *software ArcGis 10.7.0*.

No caso do *software GPlates*, a movimentação das *shapes* acontece de maneira relativa, ou seja, uma se movimenta em relação à outra, em uma espécie de árvore – nomeado de circuito de placas (Figura 6). Ao fixar uma placa no globo, as outras se moverão em relação à placa

fixada, definida pelo autor. Para fins dessa pesquisa, foram utilizados polos de rotação já calculados e pré-definidos por Heine *et al.* (2013).

Outro fator importante é a quebra de placas. Para colaborar com uma maior mobilidade para as placas rígidas e corrigir a deformação intraplaca, os autores aplicam uma quebra nas placas continentais. A Figura 6 representa a quebra de placas utilizada na pesquisa. Como é possível perceber, são dados números para a identificação de cada placa. Os autores optaram pela quebra da África em 12 placas. Já a porção sul-americana, os autores realizam a quebra em 11 placas. Entretanto, para fins desse trabalho, apenas as placas de números 2930, 223 e 201 serão consideradas pois são as placas da porção sul-americana que estão inseridas na delimitação da área dessa pesquisa.

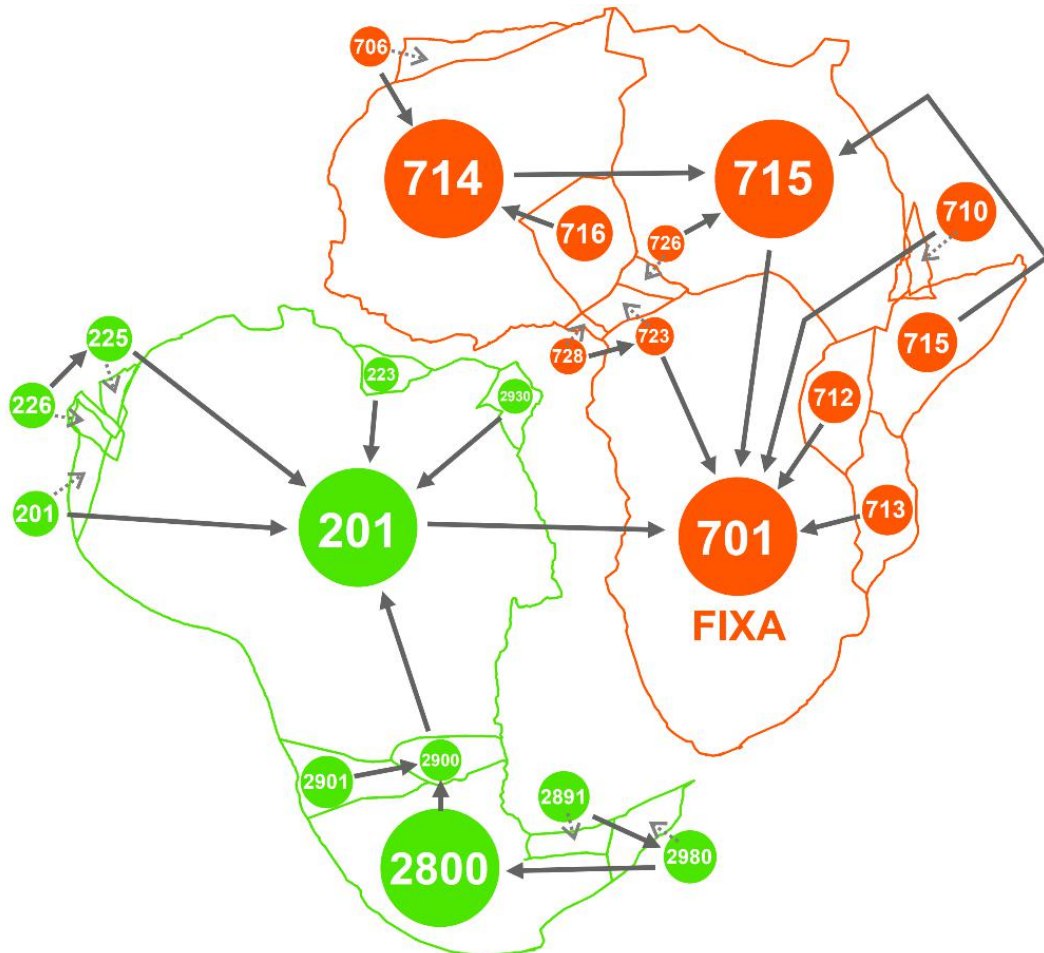


Figura 6. Ilustração do circuito de placas utilizado nessa pesquisa. Essa hierarquia é adotada pelo *software GPlates* para a movimentação relativa dos dados vetoriais a partir das informações dos polos de rotação de Euler, definidos pelo autor em questão. As setas contínuas indicam a correlação de uma placa à outra na qual está

subordinada. O modelo esquemático se trata de uma reconstrução cinemática para a idade de 100 Ma. | Fonte: Heine *et al.* (2013).

3. METODOLOGIA

Toda a pesquisa foi desenvolvida no Centro Digital Gondwana de Geoprocessamento (CDGG) no departamento de Geologia da UFRJ. Para a realização do trabalho, optou-se pela divisão da metodologia em três etapas principais, esquematizada na Figura 3 e detalhada em seguida.

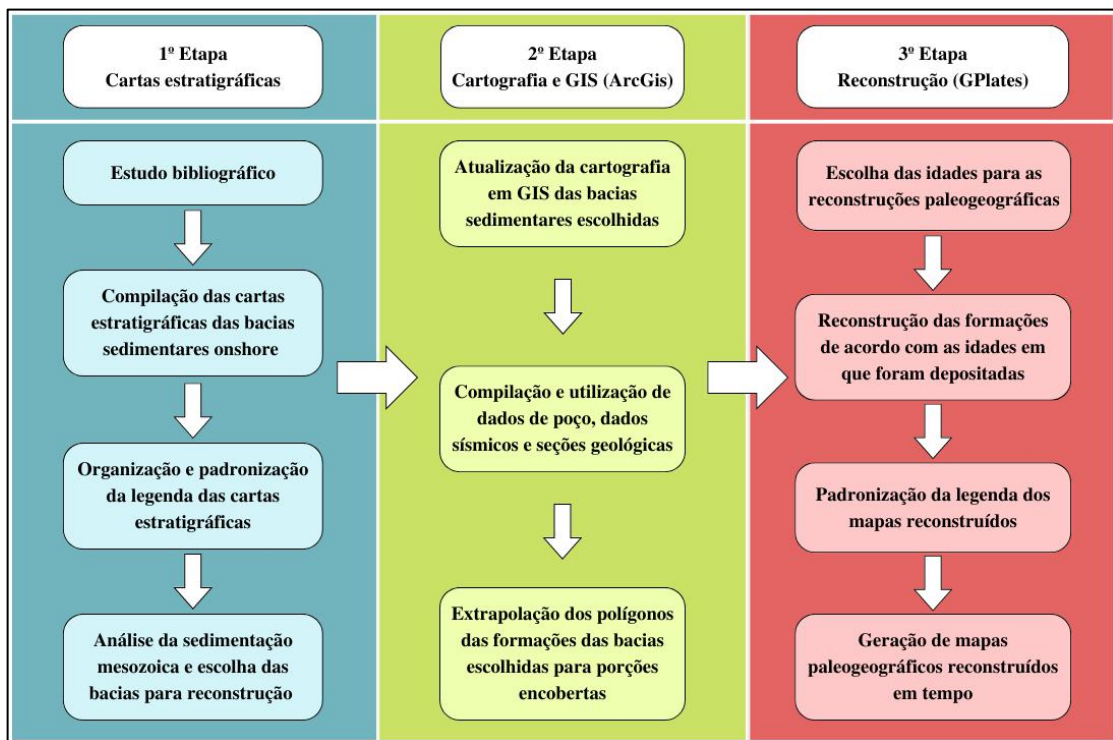


Figura 7. Fluxograma em que detalha as etapas realizadas na metodologia deste trabalho.

3.1. 1ª Etapa: Cartas Estratigráficas

O objetivo desta primeira etapa é a comparação das colunas estratigráficas das bacias *onshore* da área referente ao mapa regional do Projeto ALAGOAS (Figura 2). Essa comparação foi necessária para a seleção das bacias-chave que serão adotadas para a realização das etapas seguintes e validação da metodologia da pesquisa. Dessa forma, esse trabalho se iniciou com um estudo bibliográfico acerca da estratigrafia das bacias que estão inteiramente presentes no

mapa regional e/ou que fizessem sentido para as discussões sobre o percurso da ingressão marinha no continente (Figura 8). Em seguida, foi feita a compilação das cartas estratigráficas dessas bacias. Como o objetivo desse projeto se limita em estudar a porção *onshore*, a revisão foi focada apenas na fração terrestre das bacias, tendo como limite a linha de costa atual do território brasileiro.

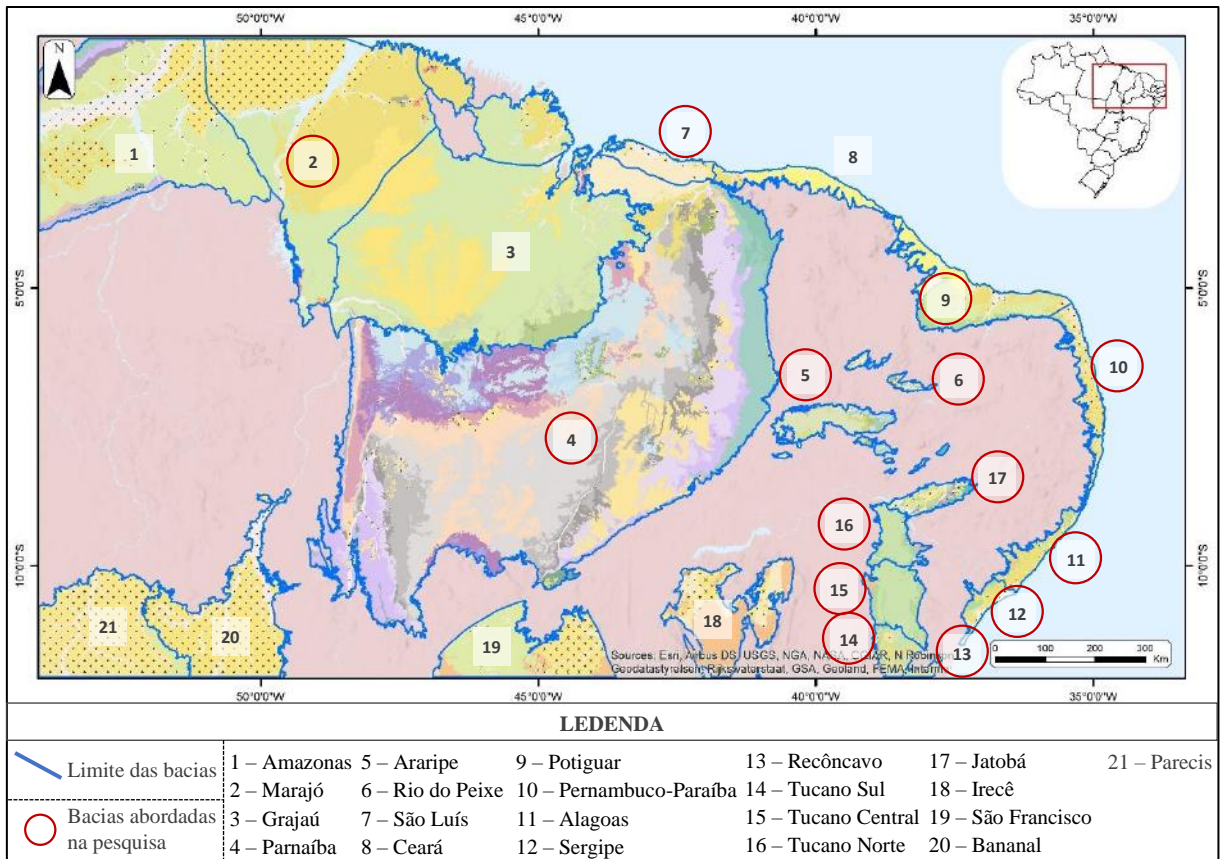


Figura 8. Mapa Regional do Projeto ALAGOAS. Os círculos indicam as bacias sedimentares inteiramente englobadas no recorte do mapa e utilizadas para a revisão bibliográfica das suas respectivas colunas estratigráficas. As cores em tons de rosa indicam rochas pré-cambrianas. Cores em tons roxos indicam rochas do Triássico. Tons em azul indicam rochas do Jurássico. Tons em verde indicam rochas do Cretáceo. Tons em amarelo indicam rochas cenozoicas. | Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).

Após a compilação, o próximo passo foi gerar um novo layout para cartas estratigráficas das bacias, padronizando a linha temporal e a legenda das litologias presentes nas formações. O recorte de idade escolhido foi a Era Mesozoica – período referente à quebra do paleocontinente Gondwana. Para a confecção das novas cartas estratigráficas foi utilizado o *software* CorelDraw 2019. Como o objetivo desta etapa é a comparação da estratigrafia entre

as bacias, outro fator a ser levado em consideração foi a organização das colunas. Assim, foi adotado o parâmetro espacial para a ordem das bacias, iniciando-se pelas bacias mais a oeste e percorrendo em sentido leste. Dessa maneira, a comparação da estratigrafia mostrou melhores resultados pois as bacias sedimentares próximas compartilham formações e episódios de sedimentação de mesma origem e idade.

Com a confecção do quadro comparativo das colunas estratigráficas, foi feita uma análise das formações das bacias sedimentares e a escolha das bacias-chave para a validação da metodologia dessa pesquisa. Para isso, foram utilizadas as informações presentes nas cartas, em conjunto com as duas principais hipóteses da entrada do mar no continente – pelo sul do Atlântico Sul ou pela porção equatorial do Atlântico Sul. Foi feito um estudo bibliográfico com o intuito de entender melhor ambas as hipóteses. Após a pesquisa, foi adotado um cenário-teste e, em seguida, foram escolhidas as bacias sedimentares que melhor se relacionam com a hipótese escolhida. Como será visto no decorrer do trabalho, as bacias escolhidas foram as bacias do Araripe, Rio do Peixe e Potiguar. As bacias escolhidas serão utilizadas para a validação da metodologia, ou seja, serão reconstruídas cinematicamente.

3.2. 2ª Etapa: Cartografia e GIS

A segunda etapa consiste em revisar a cartografia das bacias escolhidas, em GIS (*Geographic Information System*), e extrapolar as formações para as porções atualmente encobertas, com o intuito de se ter uma visão espacial mais realista da área total que cada formação ocupou durante o período de sua sedimentação (Figura 9). Para isso, foi utilizado o banco de dados GIS do Projeto ALAGOAS, desenvolvido e compilado pelo laboratório CDGG. Com os dados em GIS, foi feita uma pesquisa bibliográfica da geologia e da estrutural dessas bacias com a intenção de atualizar o máximo possível o banco de dados. Os dados foram manipulados através do *software ArcGis 10.7.0*.

Após a atualização da geologia das bacias, foi feita uma compilação de dados de poço, sísmica e seções geológicas das bacias estudadas. Essa compilação é essencial para se ter informações de subsuperfície. Esses dados colaboram para o mapeamento das formações em porções atualmente encobertas. Os dados de poços compilados são, em sua grande maioria, de perfis compostos disponibilizados pelo banco de dados público da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Também foram utilizados dados de poços adquiridos pelo Projeto ALAGOAS,

além de dados de poços públicos disponibilizados por outros projetos de pesquisa. As informações dos poços utilizados nesse trabalho foram organizadas em uma planilha (Tabela 1), apresentada na sessão de resultados. As seções geológicas foram compiladas de bibliografias e de seções realizadas pela própria equipe do Projeto ALAGOAS, através de interpretações sísmicas.

Conhecendo a localização do poço interpretando o perfil composto, é possível estimar a presença ou não das formações em subsuperfície. As seções geológicas funcionam de maneira similar, ou seja, conhecendo a localização das seções, é possível estimar a presença das formações. Com as informações da localização dos poços e o georreferenciamento tanto das seções compiladas da bibliografia quanto das linhas sísmicas utilizadas para a produção das seções geológicas realizadas pelo projeto, traçou-se um mapeamento aproximado de onde cada formação se encontra, hoje, abaixo da superfície.

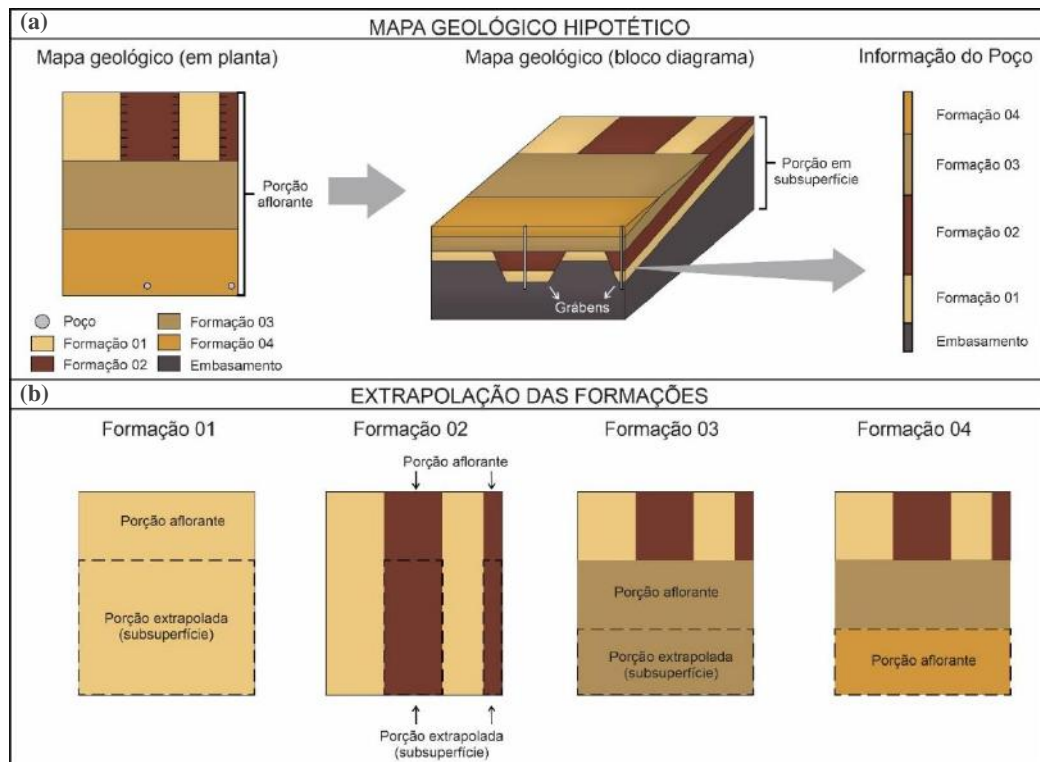


Figura 9. Imagem ilustrativa da etapa de extrapolação das formações para porções soterradas. A imagem (a) ilustra um mapa geológico hipotético em planta e em bloco diagrama, sendo possível identificar a disposição das formações em subsuperfície. Além disso, é apresentado um poço exploratório interpretado, identificando as formações soterradas. A imagem (b) mostra a extrapolação das formações em subsuperfície a partir da interpretação dos poços exploratórios. Onde há a presença da formação no poço, é possível estimar a extensão do afloramento para porções atualmente encobertas.

Para o mapeamento em GIS, foram utilizados os dados vetoriais (*shapes*) do mapa regional do Projeto ALAGOAS e selecionados os polígonos que representam as formações aflorantes. Esses polígonos foram, então, extrapolados até a delimitação definida pelos dados compilados de poço e seções. Dessa forma, obtiveram-se mapas detalhados das bacias selecionadas com as informações aproximadas sobre a real área de sedimentação de cada unidade litoestratigráfica.

3.3. 3ª Etapa: Reconstrução Cinemática Paleogeográfica

A última etapa consiste em gerar os mapas paleogeográficos reconstruídos em tempo. Para isso, as *shapes* de cada formação extrapolada, geradas no *software ArcGis*, foram carregadas no *software GPlates 2.2.0*. Com esse programa foi possível importar um dado vetorial espacialmente através do georreferenciamento e mover a *shape* para a posição em que se encontrava em determinado tempo geológico.

A placa fixada nesse trabalho foi a placa de número 701, referente ao continente africano (Figura 6). A partir desse referencial, as placas 2930, 223 e 201 foram definidas para se movimentarem em relação à placa 701. Com isso, as *shapes* que carregam as formações extrapoladas das bacias foram localizadas nas respectivas placas a que pertencem e, dessa forma, elas se movem de acordo com o modelo cinemático de placas.

Para definir em quais idades as *shapes* seriam reconstruídas, ou seja, em quais idades os mapas paleogeográficos seriam representados, foi feito um novo estudo bibliográfico sobre os ambientes sedimentares que geraram as formações das bacias e os episódios de sedimentação relacionados à entrada do mar Atlântico no continente. Com essa pesquisa, chegou-se às idades de 150 Ma, 140 Ma, 125 Ma, 120 Ma, 115 Ma, 110 Ma e 100 Ma e 95 Ma, com os melhores intervalos para gerar os mapas e analisar o avanço da área de sedimentação.

Com as idades definidas, os vetores de cada formação foram carregados no *software GPlates*, posicionados de acordo com a idade escolhida para a reconstrução e exportados como novas *shapes* – agora rotacionadas. Além das formações, a linha de costa dos continentes da América do Sul e África também foram reconstruídas, a fim de recriar a quebra continental. Dessa forma, as novas *shapes* rotacionadas foram novamente carregadas no *software ArcGis* para serem gerados os mapas reconstruídos.

Como um dos últimos passos, foi necessária uma padronização da legenda dos mapas a serem gerados. Optou-se por utilizar o mesmo padrão de cores do mapa regional do Projeto ALAGOAS, definido pela equipe de geoprocessamento do projeto. Por fim, ao determinar a legenda, gerou-se os mapas reconstruídos para as idades pré-definidas, finalizando a metodologia e produzindo os resultados necessários para as conclusões da pesquisa.

4. AS BACIAS SEDIMENTARES *ONSHORE* DO NORDESTE DO BRASIL

As bacias sedimentares *onshore* do norte-nordeste brasileiro possuem cada qual sua evolução tectono-sedimentar. Entretanto, suas colunas estratigráficas compartilham os eventos sedimentares, climáticos e tectônicos ocorridos durante a Era Mesozoica para a porção NW do Gondwana (Figura 10). Nesta era, o Gondwana passa por sua última etapa evolutiva, onde iniciam seus processos de ruptura que deu origem à abertura do Oceano Atlântico (Assine, 1994, 2007).

O processo de estiramento durante a quebra do paleocontinente gerou falhas normais, fraturas e, conseqüentemente, depressões topográficas que serviram como canais para a entrada do mar no continente. Entretanto, há discussões sobre o percurso prioritário que o mar se estabeleceu durante a ingressão (Figura 11). Alguns autores (Assine, 2007; Assine *et al.*, 2014; Custódio *et al.*, 2017) defendem a tese de que o mar teria vindo pelo S-SW, através do sistema de rifte do Recôncavo-Tucano-Jatobá. Essa hipótese se sustenta pela forma que evoluiu o Atlântico Sul, desenvolvendo-se majoritariamente de sul para norte. Entretanto, outros autores defendem a entrada do mar pelo norte. Fósseis na Bacia do Araripe indicam uma conexão com a fauna e flora de Tethys (mar que existiu no Meso-cenozóico entre o Gondwana e a Eurásia). Esses indícios levam a propor a hipótese de que a Bacia do Araripe esteve, de alguma forma, ligada à região de Tethys, no norte do Gondwana, durante o desenvolvimento da bacia (Maisey, 2000; Brito e Yabumoto, 2011; Arai, 2014, 2016; Lindoso e Carvalho, 2021). Para isso, algum ramo do sistema de riftes responsável pela abertura do Atlântico deve ter servido de conexão entre o mar Tethys e o norte do Gondwana. Porém, ainda há dúvidas, caso de fato tenha ocorrido essa ligação, se teria ocorrido através da Bacia do Parnaíba (Beurlen, 1966; Arai *et al.*, 1994; Arai, 2014) ou pela Bacia Potiguar (Lima, 1978; Viana, 1998; Goldberg *et al.*, 2019; Godot Souza *et al.*, 2022).

Nesse sentido, é importante compreender os paleoambientes de sedimentação que formaram as bacias sedimentares, que se relacionam com ambas as hipóteses, para se ter uma compreensão de suas evoluções e, com isso, entender com maior clareza a entrada do mar no continente. Para isso, é necessária uma comparação das formações mesozóicas formadas nessas bacias.

4.1. A escolha das bacias sedimentares

A análise espacial comparativa das formações do Mesozoico nas bacias sedimentares *onshore* brasileiras é essencial para entender a evolução paleogeográfica dos ambientes de sedimentação e, com isso, determinar possíveis percursos que a água transitou durante a entrada do mar no interior do continente no decorrer da formação do Oceano Atlântico. Dessa maneira, gerou-se uma tabela comparativa com as colunas estratigráficas das bacias *onshore* brasileiras que estão presentes no recorte do mapa regional do Projeto ALAGOAS e que possuem registro de sedimentação durante o Mesozoico (Figura 10). As bacias sedimentares selecionadas são (Figura 8): Marajó, São Luis, Parnaíba, Araripe, Rio do Peixe, Potiguar, Pernambuco-Paraíba, Sergipe, Alagoas, Recôncavo, Tucano Sul e Central e Tucano Norte e Jatobá.

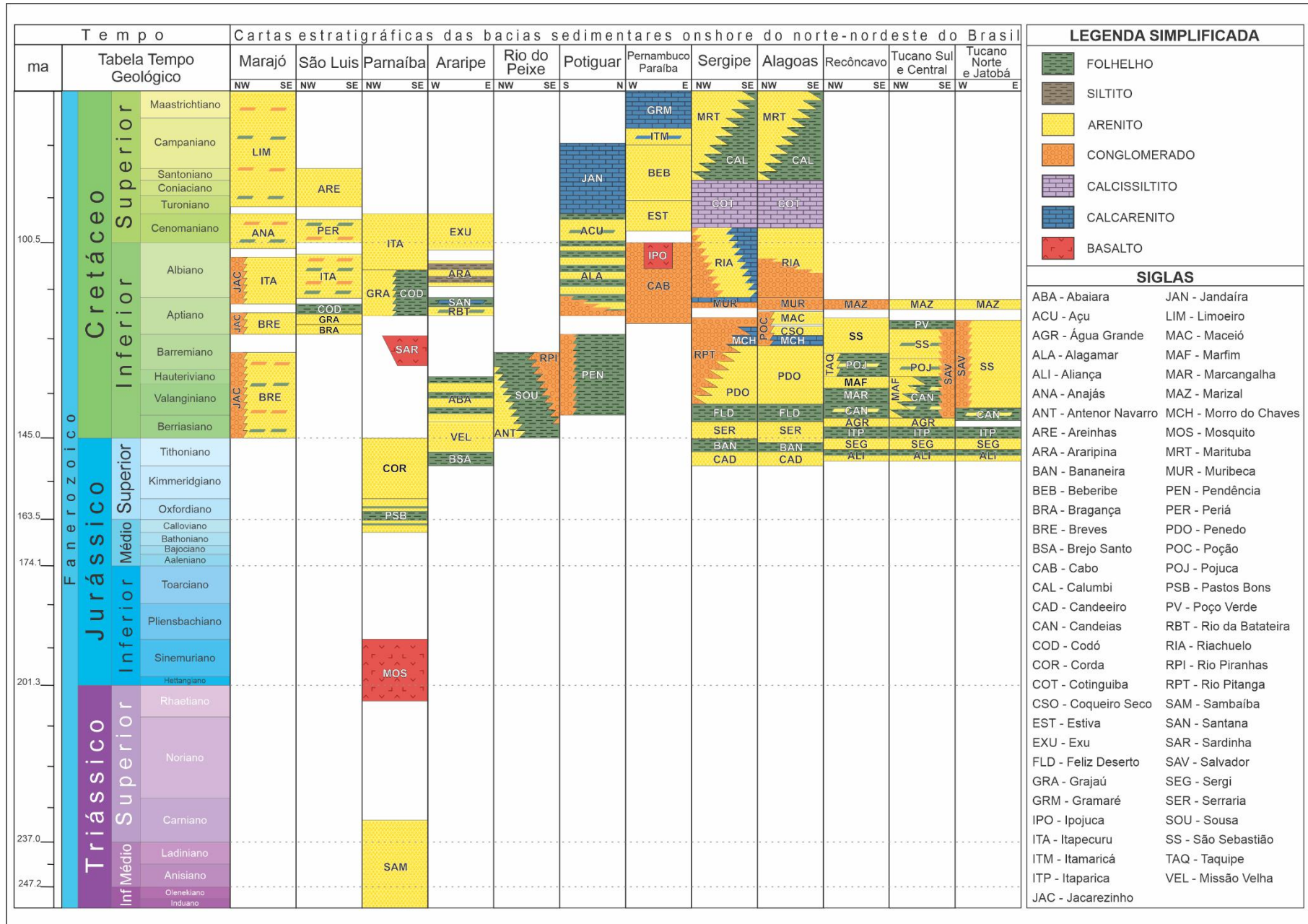


Figura 10. Tabela comparativa da porção mesozoica das colunas estratigráficas das formações das bacias onshore do norte-nordeste brasileiro. | Fonte: Adaptado de Góes & Feijó (1994); Ponte & Appi (1990); Rossetti et al. (2001); Milani et al. (2007); Vaz et al. (2007); Córdoba et al. (2008); Lourenço (2020).

Diante das discussões sobre por onde o mar teria entrado durante a fase rifte do paleocontinente Gondwana, foi necessária a escolha de uma das hipóteses para a validação da metodologia deste trabalho. Optou-se como cenário-teste, a hipótese da entrada do mar através da porção equatorial do Atlântico Sul, iniciado pela Bacia do Potiguar. Recentes publicações apresentadas pela equipe do Projeto ALAGOAS (Kroth *et al.*, 2021; Godot Souza *et al.*, 2022) trazem evidências que colaboram para o caminho da água em de sentido norte para sul. Nesta pesquisa, foi utilizado majoritariamente a hipótese apresentada por Godot Souza *et al.* (2022) (Figura 11) para basear a escolha das bacias-chave utilizadas para validar a metodologia.

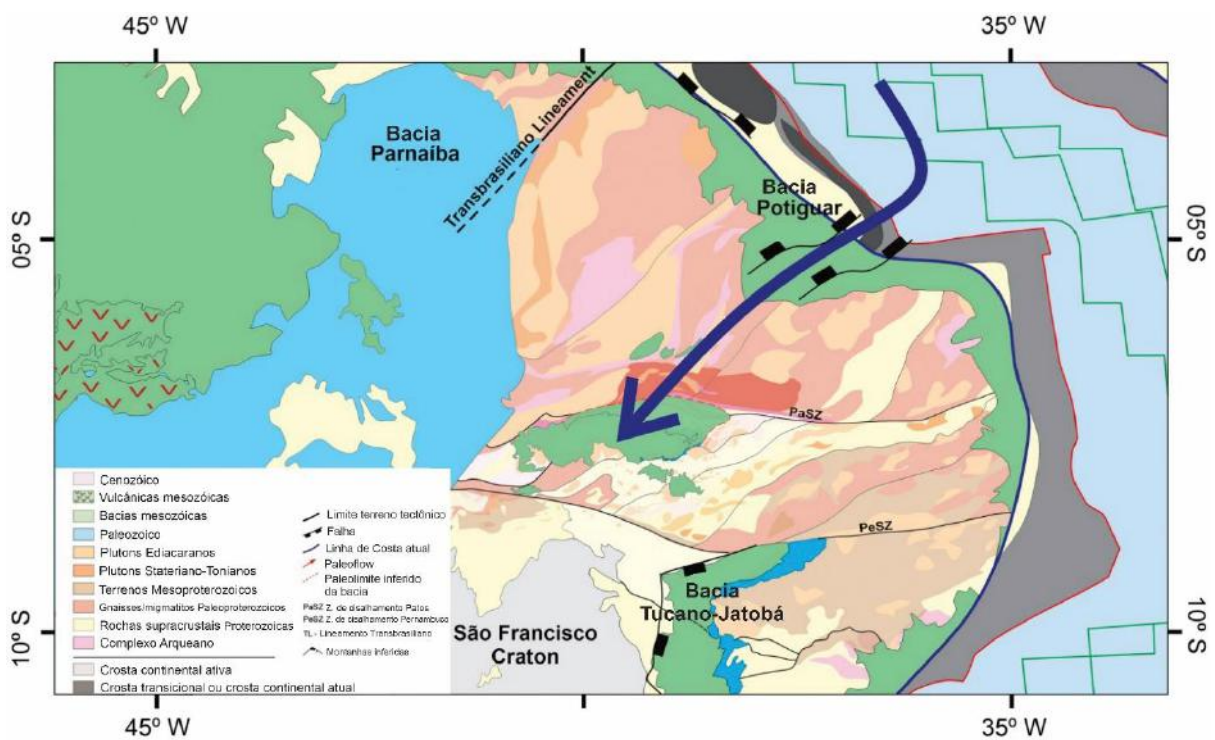


Figura 11. Reconstrução do nordeste da placa Sul-Americana. A seta em azul indica a possível incursão marinha no continente, iniciada na Bacia do Potiguar, durante a abertura do Oceano Atlântico. | Fonte: Godot Souza *et al.* (2022).

Dessa forma, foram escolhidas as bacias que melhor se relacionam com o cenário da entrada do mar através da porção equatorial do Atlântico Sul, sendo, então, as bacias do Potiguar, Rio do Peixe e Araripe. O embasamento e a estratigrafia dessas bacias serão detalhados a seguir.

4.2. O embasamento cristalino pré-cambriano: Província Borborema

Introduzida primeiramente por Almeida *et al.* (1981), a Província Borborema (Figura 12) é classificada como um complexo orogênico fortemente afetado por eventos magmáticos, metamórficos e deformacionais do ciclo Pan-Africano Brasileiro no final do Neoproterozoico (650-500 Ma), durante a amalgamação do paleocontinente Gondwana. Atualmente, a província compreende a maior porção do embasamento das bacias sedimentares encontradas no nordeste brasileiro (Santos *et al.*, 2010).

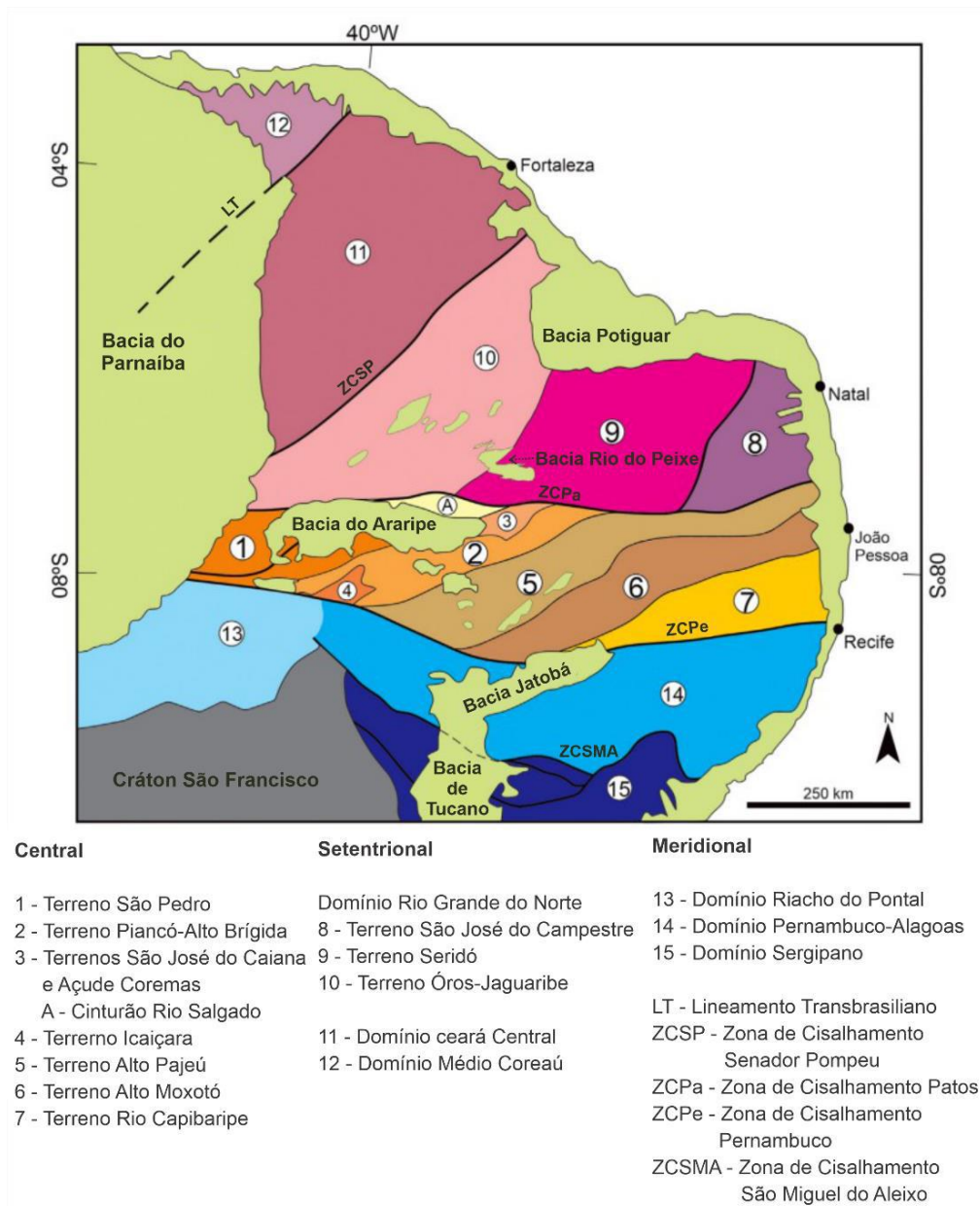


Figura 12. Compartimentação tectônica da Província Borborema. É possível localizar espacialmente no mapa as três bacias sedimentares contempladas pela pesquisa, sendo elas a Bacia do Araripe, Bacia Rio do Peixe e Bacia Potiguar. | Fonte: Adaptado de Godot Souza *et al.* (2022).

A Província Borborema é formada essencialmente por ortognaisses e paragnaisses do Arqueano ao Paleoproterozoico, sobrepostas por unidades metavulcanosedimentares mesoproterozoicas a neoproterozoicas. Posteriormente, essas rochas foram intrudidas por plutons tonianos a ediacaranos formados durante os eventos tectonometamórficos Brasileiro e Cariris Velhos (Santos *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2022). Todas essas unidades estão compartimentadas em subprovíncias, denominadas de Borborema Setentrional, Borborema Central e Borborema Meridional (Figura 12).

A origem da Província Borborema ainda se encontra em discussão, possuindo algumas hipóteses para a sua formação. Entre os principais modelos, está a proposta de Neves *et al.* (2006, 2009). Os autores defendem que a Província provém de um bloco estável desde o Paleoproterozoico que formava parte do supercontinente Atlântica. A partir do Neoproterozoico, começou a se estabelecer um tectonismo distensivo, formando bacias intracontinentais, que passaram posteriormente por inversão tectônica.

Outro modelo proposto seria o modelo acrescionário, com pequenas variações, dependendo dos autores. Entre elas, está a acreção de terrenos exóticos provenientes dos crátons São Francisco, Congo e Amazônico e Oeste África durante o Neoproterozoico (Brito Neves *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2018). Outra teoria, defendida majoritariamente por Caxito *et al.* (2014, 2016, 2020) e Basto *et al.* (2019), seria a origem a partir de ciclos de Wilson relacionados ao rifteamento de um suposto paleocontinente, há 920 Ma, e formação de duas ou mais zonas de subducção no Neoproterozoico. Por fim, outra teoria seria de que a formação da Província Borborema se deu através do retrabalhamento do Cráton São Francisco durante o Neoproterozoico, formando zonas de subducção na margem norte (Ganade de Araujo *et al.*, 2014, 2021).

4.3. Bacia do Araripe

Localizando-se a sul do Lineamento Patos e cobrindo porções dos estados do Ceará, Piauí e Pernambuco, a Bacia do Araripe (Figura 13) compõe o grupo de bacias interiores do nordeste do Brasil, gerada a partir da reativação de estruturas antigas do embasamento pré-cambriano da província Borborema no contexto da abertura do Oceano Atlântico (Assine, 2007). Possui uma área aproximada de 12.200 km² e, apesar de possuir uma sedimentação de maior extensão em direção E-W, a grande maioria das formações que constituem a bacia é controlada por *grábens*

de direção NE-SW e que formam as duas principais sub-bacias que integram a Bacia do Araripe, denominadas de Feitoria, à Oeste, e Cariri, à Leste (Assine, 2007; Rios-Netto *et al.*, 2012).

A estratigrafia da Bacia do Araripe segue sendo, até o presente momento, alvo de discussões, surgindo proposições de diversos autores ao longo dos anos que se divergem ou se complementam. Entre os principais trabalhos utilizados para compor essa pesquisa, estão as propostas de Ponte & Appi (1990) e Assine (2007).

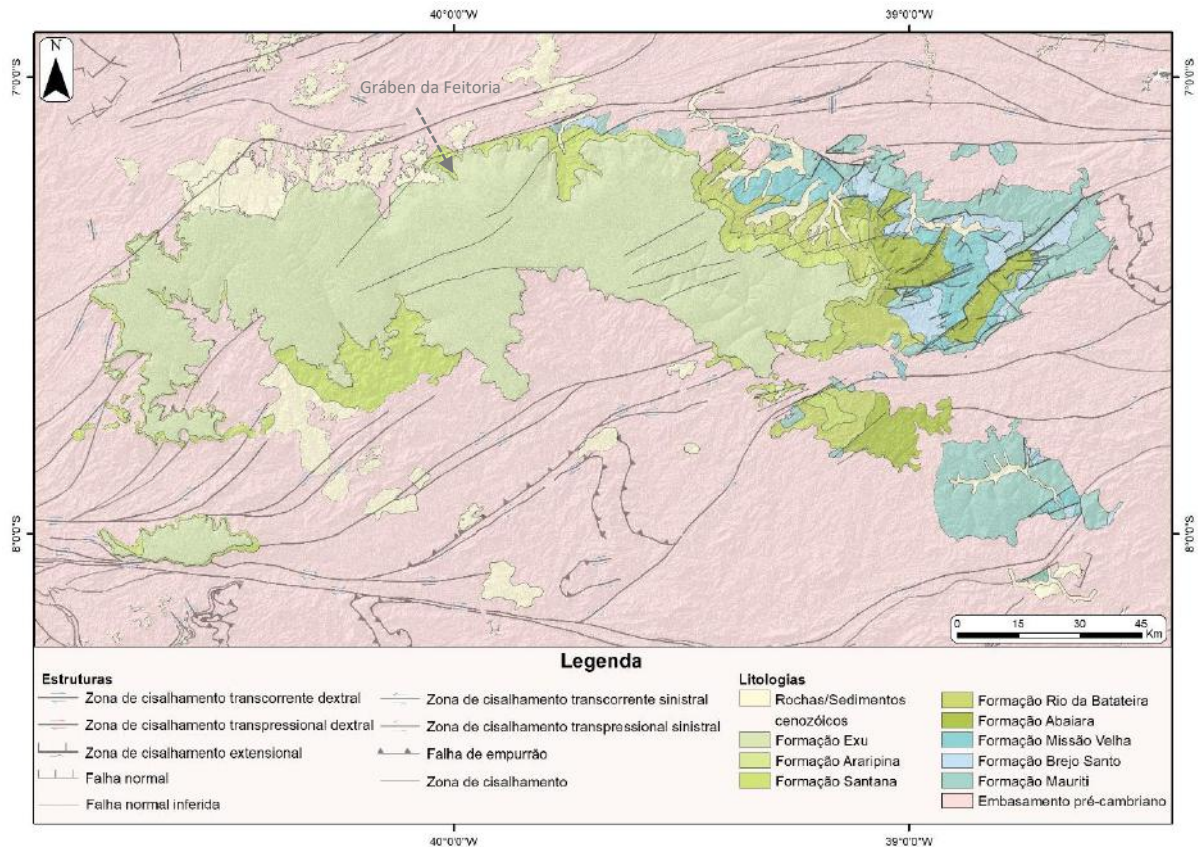


Figura 13. Mapa geológico e estrutural da Bacia do Araripe. | Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).

4.3.1. Estratigrafia da Bacia do Araripe

A Bacia do Araripe (BAr) é majoritariamente dividida em quatro superseqüências: uma unidade pré-jurássica, uma do Jurássico Superior, uma do Cretáceo Inferior e a última depositada no Cenomaniano-Aptiano (Ponte & Appi, 1990; Assine, 1992, 2007).

A unidade mais antiga sobre o embasamento cristalino é a Formação Mauriti. Essa formação (também denominada de Formação Cariri) é majoritariamente constituída por arenitos,

interpretados como fácies de intensa fluviais entrelaçados (Braun, 1996; Ponte & Appi, 1990; Assine, 2007). Entretanto, a idade paleozoica da Formação Mauriti não é consenso e outras propostas já foram apresentadas. Por ser afossilífera, a idade paleozoica foi atribuída a esta unidade apenas por correlação estratigráfica com a formação Tacaratu (Bacia Tucano-Jatobá). Entretanto, Carvalho *et al.* (1995) posicionou essa formação no Cretáceo inferior a partir da identificação de pegadas de dinossauros marcadas nos estratos.

Iniciando a Supersequência Pré-Rifte, encontra-se a Formação Brejo Santo. Foi depositada no período de subsidência mecânica, decorrente do estiramento crustal que precedeu a fase rifte. É essencialmente formada por folhelhos e lamitos vermelhos e comumente são encontrados Ostracodes do Andar Dom João. É considerada a primeira formação depositada na Era Mesozoica, datada como Jurássico Superior (Assine, 2007).

Logo em seguida, de idade tithoniana, há a Formação Missão Velha. Essa unidade é a unidade mais nova da Supersequência Pré-Rifte e é majoritariamente formada por arenitos quartzosos – por vezes feldspáticos e/ou caoliníticos – e localmente conglomeráticos. Encontra-se depositada nos grábens Cariri e Feira Nova e é controlada por falhas (Assine, 2007).

A fase Rifte da Bacia do Araripe é marcada pela deposição da Formação Abaiara, de idade neocomiana. Distingue-se da fase Pré-Rifte devido à grande variação faciológica e escassos registros fossilíferos, incluindo a ausência de ostracodes da base da formação (Coimbra *et al.*, 2002). É definida principalmente por folhelhos e siltitos intercalados por arenitos finos, além de localmente possuir lentes de arenitos quartzosos finos a muito grossos conglomerados. A associação de fácies indica uma sedimentação em tratos deposicionais continentais (Assine, 2007).

A Supersequência Pós-Rifte marca uma discordância regional reconhecida em todas as bacias da margem leste brasileira. Inicia-se com a deposição da formação aptiana intitulada de Rio da Batateira (também denominada de Barbalha). Predominam arenitos com intercalações de folhelhos e níveis finos de conglomerados (Ponte & Appi, 1990; Assine, 2007). A análise da distribuição espacial de fácies descritas para essa formação indica um forte controle estrutural, possibilitando o estabelecimento de um sistema fluvial (NW/SE), concordante com o eixo da sub-bacia do Cariri (Freitas, 2010). Sua deposição também é considerada como a primeira gerada a partir de um ambiente de anoxia, preservando boa quantidade de matéria orgânica (Assine, 2007).

Sobreposta à Formação Rio da Batateira, encontra-se a Formação Santana. É constituída da base para o topo por calcários laminados, camadas de gipsita, folhelhos escuros, arenitos calcíferos, argilitos e arenitos argilosos. Na camada de folhelhos, encontra-se concreções calcárias com macrofósseis preservados (Saraiva *et al.*, 2007). Acima das concreções, destaca-se a existência de uma camada de coquina.

Logo acima, há a Formação Araripina (ou Arajara). Essa formação, de idade albiana, é constituída essencialmente por ritmitos com presença de lentes de arenitos estratificados. Destaca-se a ocorrência de estruturas sindeposicionais (Assine, 2007). Ponte e Appi (1990) interpretam as associações de fácies como um ambiente transicional litorâneo.

Por fim, encontrando-se no topo da Bacia do Araripe, há a Formação Exu, datada do final do Albiano. É basicamente formada por arenitos fluviais em discordância erosiva com a Formação Araripina. Há ciclos de granodecrescência ascendente, marcada por finas camadas de conglomerados na base, arenitos estratificados e, por vezes, camadas pelíticas típicas de planícies de inundação.

Essa formação se depositou no início de um soerguimento na porção oriental da Província Borborema, resultando em um retorno às condições de sedimentação continental. Esse soerguimento, de direção oeste, promoveu uma mudança na paleocorrente, deixando de ser direcionada para o sul (padrão de todas as unidades desde a Formação Brejo Santo) e passando a ter um rumo a oeste (Assine, 1994, 2007).

4.4. Bacia Rio do Peixe

A Bacia do Rio do Peixe (BRP; Figura 14) se encontra inserida no Domínio Rio Grande do Norte, encaixado em um sistema de riftes abortados com *trend* NE-SW instalados no embasamento pré-cambriano da Província Borborema, no Nordeste brasileiro. Esse sistema foi gerado a partir do stress ocasionado pela ruptura do noroeste do Gondwana e abertura do Atlântico Sul durante o período Cretáceo.

A bacia é controlada por semi-grábens que agem como depocentros. Os semi-grábens que compõem o Rio do Peixe são Icózinho, Pombal, Brejo das Freiras e Sousa, sendo os dois últimos os principais depocentros. A espessura do Brejo das Freiras pode chegar a 2 km, enquanto os semi-grábens menores (Icózinho e Pombal) não chegam a 500 m. O semi-gráben Brejo das Freiras é controlado por uma falha normal de direção NE-SW, posicionada em sua borda SE,

com mergulho para NW. Já o semi-gráben Sousa tem seu eixo maior orientado na direção E-W e limitada ao sul pela falha São Gonçalo, de mesma direção e mergulho para N. Esse semi-gráben compreende dois depocentros separados por uma falha de direção NE-SW e mergulho para NW (Rapozo, 2020).

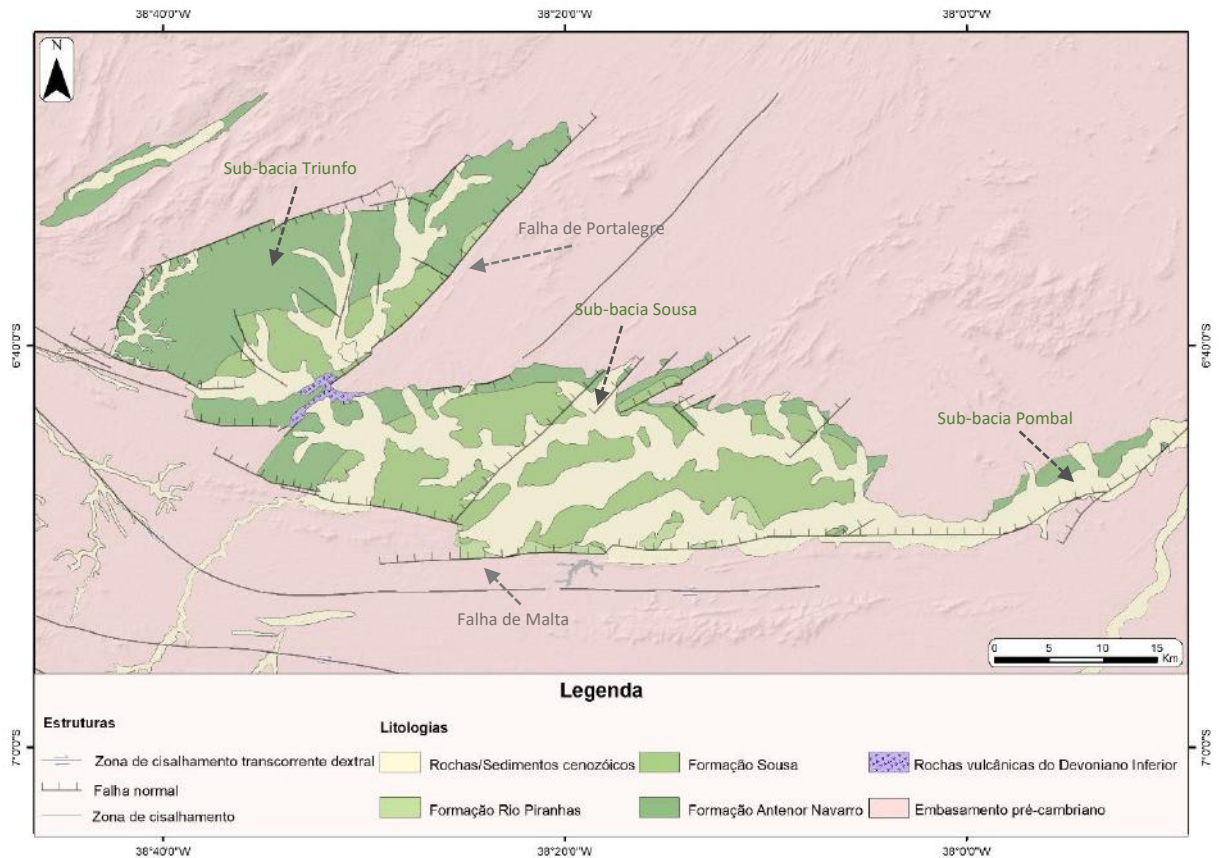


Figura 14. Mapa geológico e estrutural da Bacia Rio do Peixe. | Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).

4.4.1. Estratigrafia da Bacia Rio do Peixe

As unidades sedimentares que compõem a Bacia Rio do Peixe se limitam em dois intervalos de idade: unidades devonianas (Grupo Santa Helena) e unidades cretáceas (Grupo Rio do Peixe). As formações devonianas são denominadas de Formação Pilões e Triunfo. Já as formações cretáceas são as formações Sousa, Piranhas e Antenor Navarro (Silva *et al.*, 2014).

A Formação Pilões é composta principalmente por siltitos e argilitos laminados ou maciços, com intervalos carbonosos betuminosos. Isoladamente ou em ciclos rítmicos, há o aparecimento

de arenitos de granulação fina a grossa. De acordo com Silva *et al.* (2014), essa formação teria se originado a partir de uma mudança no ambiente deposicional de transicional para continental.

A Formação Triunfo é formada majoritariamente por arenitos grossos a conglomeráticos com estratificação cruzada e conglomerados, intercalados com arenitos e localmente pelitos. O sistema deposicional dessa unidade é interpretado como fluviodeltaico em um contexto de ambiente deposicional continental. Essa formação é correlacionada com as formações Jaicós e Itaim da Bacia do Parnaíba (Silva *et al.*, 2014).

Silva *et al.* (2014) também interpretam uma unidade vulcanoclástica formada por brecha vulcânica, com fragmentos de rocha do embasamento, cloritizadas e localmente há ingnibritos. Essa unidade é classificada como informal pois só foi estudada petrograficamente e não há uma área de ocorrência plenamente delimitada.

Entre as formações cretáceas, inicia-se com a Formação Antenor Navarro. Córdoba *et al.* (2008) descrevem essa unidade como sendo constituída por conglomerados e arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada. Esses arenitos são relacionados a um sistema deposicional formado por leques aluviais ou fluviais e direção de transporte para SE e S.

A formação Sousa é composta por folhelhos e siltitos intercalados a arenitos, com marcas de onda e laminações plano-paralelas e cruzadas. Os sistemas deposicionais variam, sendo interpretados como subaquosos a drenagens efêmeras, com paleocorrente também para SE e S (Córdoba *et al.*, 2008; Rapozo, 2020).

Por fim, a Formação Rio Piranhas é constituída por arenitos finos a grossos com estratificações cruzadas e intercaladas com pelitos e arenitos grossos e conglomerados, formados em um sistema deposicional de leques aluviais de margem falhada associadas a sistemas fluviais entrelaçados (Córdoba *et al.*, 2008; Rapozo, 2020).

4.5. Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar (BPo; Figura 15) - A área de sedimentação da parte exposta é de aproximadamente 26.700 km², e a parte submersa é de aproximadamente 195.400 km². Geologicamente, é limitada a leste pela bacia Pernambuco-Paraíba pelo Alto de Touros, a

noroeste pela bacia do Ceará pelo Alto de Baluarte e ao sul por rochas cristalinas do embasamento. A bacia também possui uma área *offshore* equivalente a 26.500 km².

A bacia é controlada por um sistema de grábens e horsts gerados durante a fragmentação do Gondwana Oeste e fazem parte do Sistema de riftes Cretáceos do Nordeste brasileiro. O registro estratigráfico do rifte Atlântico foi dividido em três etapas, denominadas de Supersequência Rifte (subdividida em Rifte I e Rifte II), Supersequência Pós-Rifte e Supersequência Drifte (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

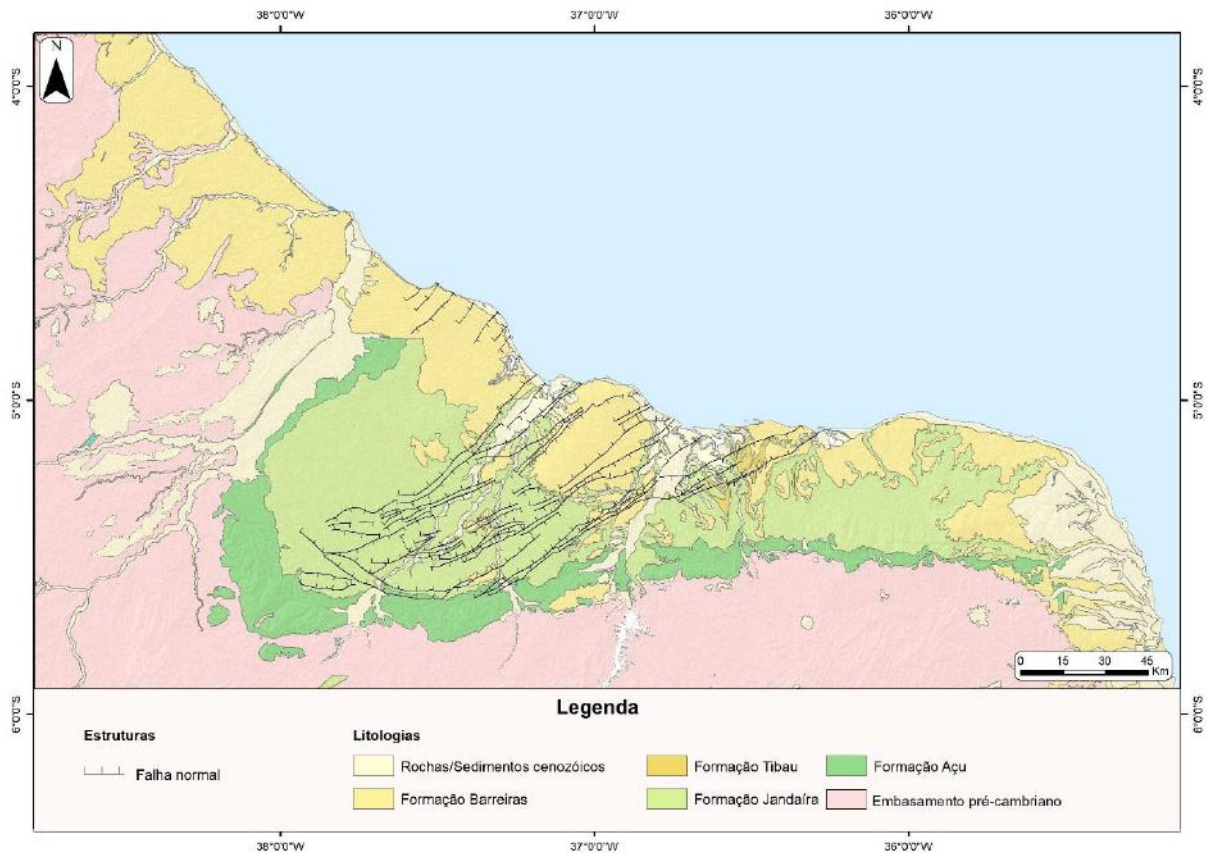


Figura 15. Mapa geológico e estrutural da Bacia Potiguar. | Fonte: Adaptado de Equipe de Geoprocessamento do Projeto ALAGOAS (CDGG).

4.5.1. Estratigrafia da Bacia Potiguar

Pessoa Neto *et al.* (2007) classificam os depósitos relacionados à fase Rifte como sendo predominantemente fluvio-deltaicos e lacustres e estão diretamente relacionados às formações Pendência e Pescada, de idades Berriasiano/Eo-Aptiano. Em seguida, a Supersequência Pós-Rifte é formada por depósitos fluvio-deltaicos e marca os primeiros registros de ingresso

marinha, presentes na formação Alagamar (Aptiano). Por fim, na Supersequência Drifte, os depósitos são flúvio-marinho transgressivos, relacionados às formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas, Jandaíra e Ubarana. Todas são recobertas por uma sequência clástica e carbonática regressiva das formações Ubarana, Tibau e Guimarães (todas *offshore*). Por fim, as rochas vulcânicas ligadas à formação Macau foram depositadas entre o Eoceno e o Oligoceno.

A fase Rife I é principalmente marcada pelo desenvolvimento de calhas tectônicas relacionadas ao estiramento crustal que precedeu a ruptura do Gondwana Oeste. Essas calhas possibilitaram o desenvolvimento de um sistema fluvio-deltaico e fan-deltaico que foi responsável pela deposição dos sedimentos da Formação Pendência – constituída principalmente de arenitos e fan-glomerados. Os sedimentos que ocorrem na porção submersa referentes a essa fase são escassos e estritos ao prolongamento do rifte emerso de direção NE (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

A fase Rife II é marcada pelo desenvolvimento da futura margem equatorial – a partir da evolução de um regime transcorrente. Esse sistema possibilitou que houvesse o levantamento e erosão da porção emersa e transportasse o eixo de rifteamento para a porção submersa. Nesse período, a direção de transporte passa a ser E-W e não mais NNW, como foi desenvolvido durante a fase Rife I. Durante essa fase, foi depositada a formação Pescada – de sedimentação dominada por sistemas, controlada por um sistema de falhas de direções WNW-ESSE (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

A fase Pós-Rife é protagonizada por um período de relativa calma e gradativa mudança de regime continental para marinho. Os primeiros registros de ingressão marinha são encontrados nos sedimentos transicionais da formação Alagamar, indo de uma sedimentação fluvio-deltaica a folhelhos transicionais (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

Por fim, a fase Drifte – do Albiano ao recente – inicia-se durante a fase de subsidência termal e costuma-se dividir em duas etapas: as sequências Marinhas Transgressivas (Eoalbioano ao Eocampaniano) e as sequências Marinhas Regressivas (Neocampaniano ao Holoceno). As sequências transgressivas formaram-se devido a formação de uma grande calha fluvial de orientação NE-SW. A transgressão ocorrida durante o Neocretáceo fez com que houvesse o empilhamento vertical de sistemas fluviais, com sistemas entrelaçados na base, passando a meandantes grosso, meandantes finos e estuarinos no topo. Finaliza-se com a implantação de uma plataforma carbonática dominada por maré (Formação Jandaíra). As sequências marinhas regressivas correspondem a sistemas mistos formados por leques costeiros, plataformas rasas

de bordas carbonáticas e sistemas de talude (Formações Barreiras, Tibau, Guamaré e Ubarama (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

Por fim, houve, durante a formação da bacia, três eventos magmáticos principais, conhecidos como Ceará Mirim, Cuó e Macau. A Formação Ceará Mirim ocorre em forma de diques de diabásio de orientação E-W no embasamento e estão relacionados à gênese do rifte. A Formação Serra do Cuó ocorre como derrames de basalto. Já a Formação Macau ocorre como basaltos intercalados aos sedimentos da sequência regressiva e são datados do Eoceno/Oligoceno (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

5. DADOS UTILIZADOS

5.1. Poços exploratórios

Com a finalidade de organizar a compilação dos dados de poços, gerou-se uma tabela com as informações de cada poço (Tabela 1), informando de qual bacia pertence, o nome de registro do poço, o estado em que se encontra, as formações descritas e o operador. Essas informações foram colhidas majoritariamente no banco de dados público da ANP e de dados de projetos já publicados, compilados em revisão bibliográfica, incluindo os poços do Projeto Santana II, realizado pela CPRM na Bacia do Araripe. Através das coordenadas, foi possível identificar espacialmente onde se encontram os poços registrados no banco de dados. A partir do posicionamento dos furos, foram escolhidos os poços aqui analisados, priorizando uma amostragem representativa da área da bacia.

É importante ressaltar que o não aparecimento de alguma formação no poço não necessariamente significa a não deposição. A total erosão da unidade também é um fator relevante ao se analisar os dados dos perfis compostos. Para a extrapolação das formações essa informação foi levada em consideração para que o prolongamento em subsuperfície fosse mais coerente ao cruzar com as outras informações compiladas na pesquisa, como seções geológicas e os mapas estruturais das bacias sedimentares.

TABELA DE POÇOS					
Nº	Bacia Sedimentar	Poço	Estado	Formações Descritas	Operador
1	Potiguar	1-MP-2-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Barreiras	Não Informado
				Jandaíra	
				Açu	
				Alagamar	
2	Potiguar	1-RAP-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Jandaíra	Petrobras
				Açu	
3	Potiguar	1-PV-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Jandaíra	Petrobras
				Açu	
				Alagamar	
				Pendência	
4	Potiguar	3-MO-18-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Jandaíra	Petrobras
				Açu	
5	Potiguar	1-MPE-8-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Barreiras	Petrosynergy
				Tibau/Guamaré	
				Jandaíra	
6	Potiguar	1-BRSA-354-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Açu	Potiguar E&P S.A.
				Alagamar	
				Pendência	
				Jandaíra	
7	Potiguar	1-SBD-1D-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Açu	Potiguar E&P S.A.
				Alagamar	
				Pendência	
8	Potiguar	1-BE-1D-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Jandaíra	Potiguar E&P S.A.
				Açu	
				Alagamar	
9	Potiguar	6-BRSA-588-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Pendência	Potiguar E&P S.A.
				Jandaíra	
				Açu	
				Alagamar	
				Pendência	

10	Potiguar	1-BRSA-533-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Jandaíra	Potiguar E&P S.A.
				Açu	
				Alagamar	
11	Potiguar	1-UBZ-2-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Pendência	Petrosynergy
				Jandaíra	
				Açu	
12	Potiguar	4-SCJ-3-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Alagamar	Não Informado
				Jandaíra	
				Pendência	
13	Potiguar	1-PC-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Jandaíra	3R Macau
				Açu	
14	Potiguar	1-SCA-2-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Tibau/Guamaré	Não Informado
				Jandaíra	
				Açu	
15	Potiguar	4-SO-4-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Barreiras	Não Informado
				Jandaíra	
				Açu	
16	Potiguar	1-RAM-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Alagamar	Petrobras
				Jandaíra	
				Açu	
17	Potiguar	1-LS-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Pendência	Não Informado
				Barreiras	
				Jandaíra	
18	Potiguar	1-LM-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Açu	Não Informado
				Jandaíra	
				Alagamar	
19	Potiguar	1-JC-1-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Barreiras	Não Informado
				Jandaíra	
				Açu	

20	Potiguar	1-PSY-3-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Barreiras	Petrosynergy
				Jandaíra	
				Açu	
				Alagamar	
21	Potiguar	1-QTR-2-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Pendência	Quantra
				Barreiras	
				Jandaíra	
				Açu	
22	Potiguar	2-PU-1A-RN	Rio Grande do Norte (RN)	Alagamar	Não Informado
				Pendência	
				Barreiras	
23	Potiguar	4-FZB-347-CE	Ceará (CE)	Jandaíra	Petrobras
				Açu	
24	Araripe	1-PS-01-CE	Ceará (CE)	Santana	CPRM
25	Araripe	1-PS-02-CE	Ceará (CE)	Missão Velha	CPRM
26	Araripe	1-PS-03-CE	Ceará (CE)	Missão Velha	CPRM
27	Araripe	1-PS-04-CE	Ceará (CE)	Missão Velha	CPRM
28	Araripe	1-PS-05-CE	Ceará (CE)	Missão Velha	CPRM
29	Araripe	1-PS-06-CE	Ceará (CE)	Santana	CPRM
				Missão Velha	
30	Araripe	1-PS-07-CE	Ceará (CE)	Santana	CPRM
				Missão Velha	
31	Araripe	1-PS-08-CE	Ceará (CE)	Missão Velha	CPRM
32	Araripe	1-PS-09-CE	Ceará (CE)	Santana	CPRM
				Missão Velha	
33	Araripe	1-PS-10-CE	Ceará (CE)	Santana	CPRM
				Missão Velha	
34	Araripe	1-PS-11-CE	Ceará (CE)	Santana	CPRM
				Missão Velha	
35	Araripe	1-PS-12-CE	Ceará (CE)	Exu	CPRM
				Santana	

36	Araripe	1-PS-13-CE	Ceará (CE)	Mauriti	CPRM
				Santana	
37	Araripe	1-PS-14-CE	Ceará (CE)	Missão Velha	CPRM
				Santana	
44	Rio do Peixe	1-BRSA-901-PB	Pernambuco (PE)	Antenor Navarro	Petrobras
				Antenor Navarro	
45	Rio do Peixe	1-BRSA-909-PB	Pernambuco (PE)	Sousa	Petrobras
				Devoniano	
46	Rio do Peixe	1-BRSA-919-PB	Pernambuco (PE)	Antenor Navarro	Petrobras
				Sousa	
47	Rio do Peixe	1-UTC-06-PB	Pernambuco (PE)	Sousa	UTC Engenharia
48	Rio do Peixe	1-UTC-04-PB	Pernambuco (PE)	Sousa	UTC Engenharia
				Antenor Navarro	

Tabela 1. Compilação dos dados de perfis compostos de poços exploratórios realizados nas bacias do Araripe, Rio do Peixe e Potiguar.

5.2. Sísmica e seções geológicas

Além de perfis compostos de poços exploratórios, foram utilizados dados de seções geológicas e perfis sísmicos interpretados. Foi feita uma compilação dos dados para cada bacia. Dessa maneira, ao observar as interpretações feitas em subsuperfície e sabendo a localização das seções e das linhas sísmicas, é possível estimar a presença de determinada formação na porção interpretada.

Para a Bacia do Araripe, foram utilizadas seções geológicas geradas através da interpretação de duas linhas sísmicas (Assine, 1990), realizadas pela Dra. Pâmela Richetti, integrante do Projeto ALAGOAS, em conjunto com a equipe de sísmica, e cedidas para a colaborar nesta pesquisa (Figura 16). Além disso, também foi utilizada a seção geológica publicada por Assine (2007; Figura 17).

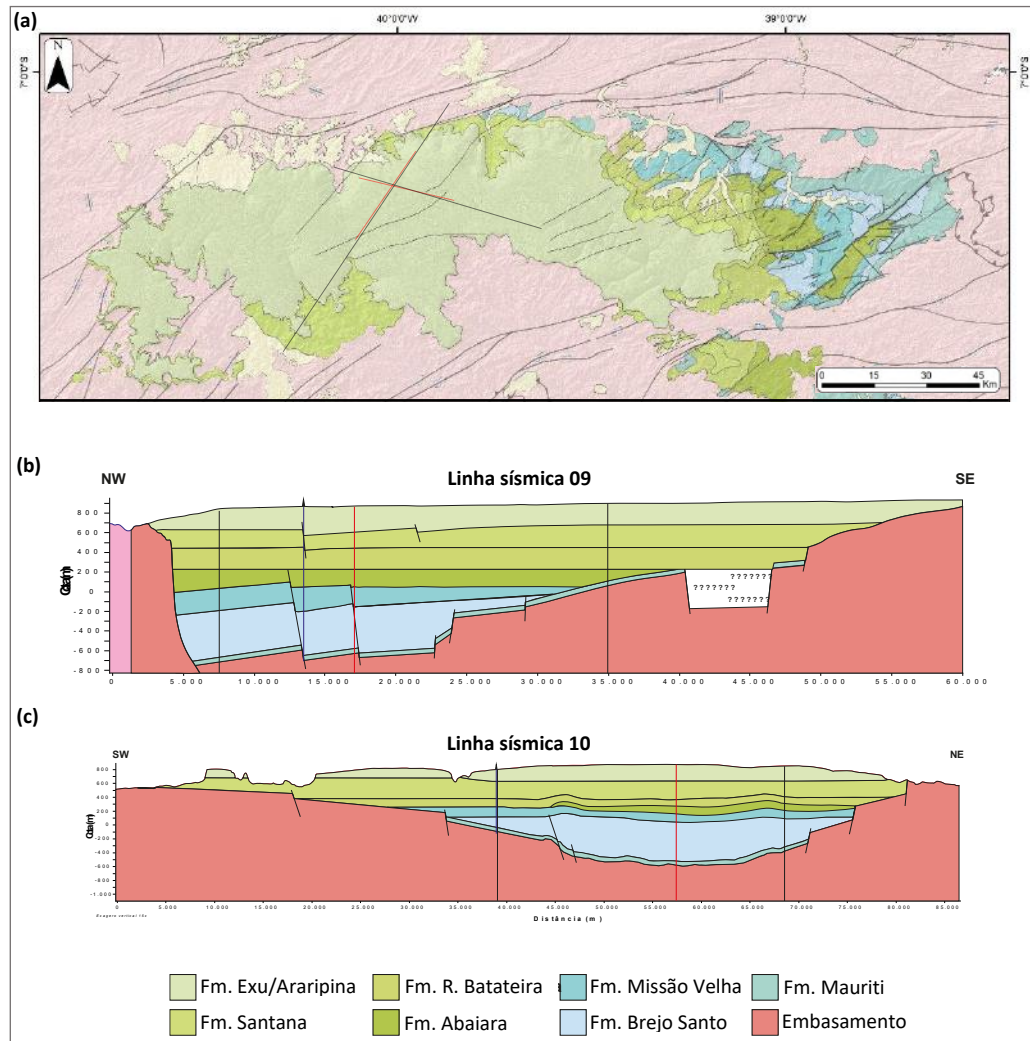


Figura 16. (a) Mapa geológico da Bacia do Araripe com a localização de duas linhas sísmicas (linhas vermelhas) utilizadas como base para a interpretação das seções geológicas (linhas pretas). (b) Seção geológica NW-SE da Bacia do Araripe. (c) Seção geológica SW-NE da Bacia do Araripe. | Fonte: Richetti *et al.* (2022).

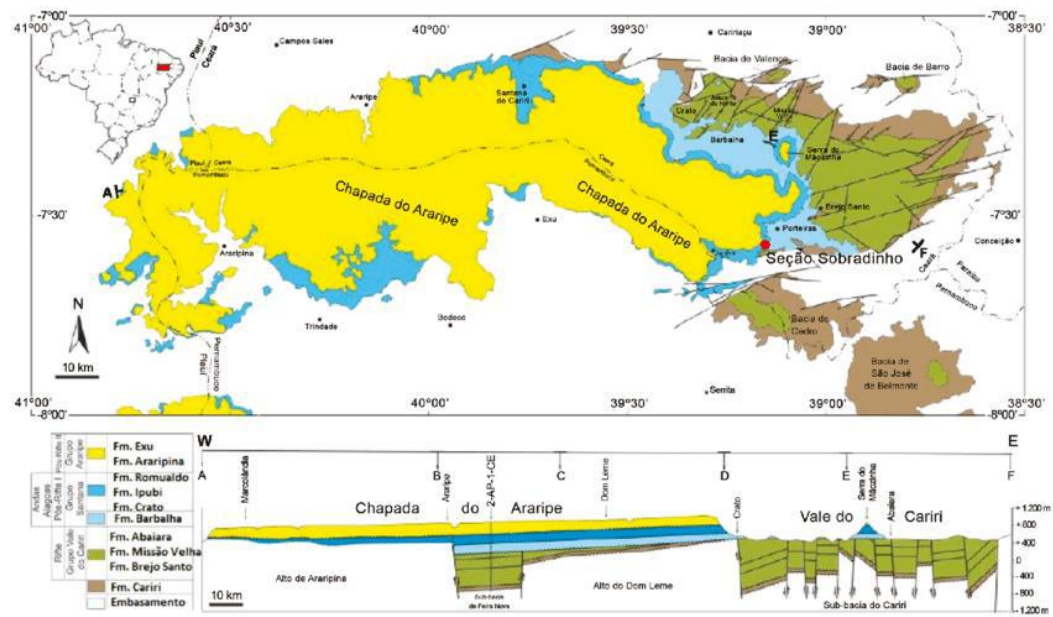


Figura 17. Seção geológica da Bacia do Araripe. | Fonte: Assine (2007).

Para a Bacia Rio do Peixe, foram principalmente utilizados os dados interpretados da integração de três seções sísmicas 2D. O levantamento sísmico foi adquirido pelo Projeto Bacias Interiores e interpretados por Nunes da Silva (2009), utilizando-se como base a estratigrafia proposta por Córdoba *et al.* (2008; Figura 18).

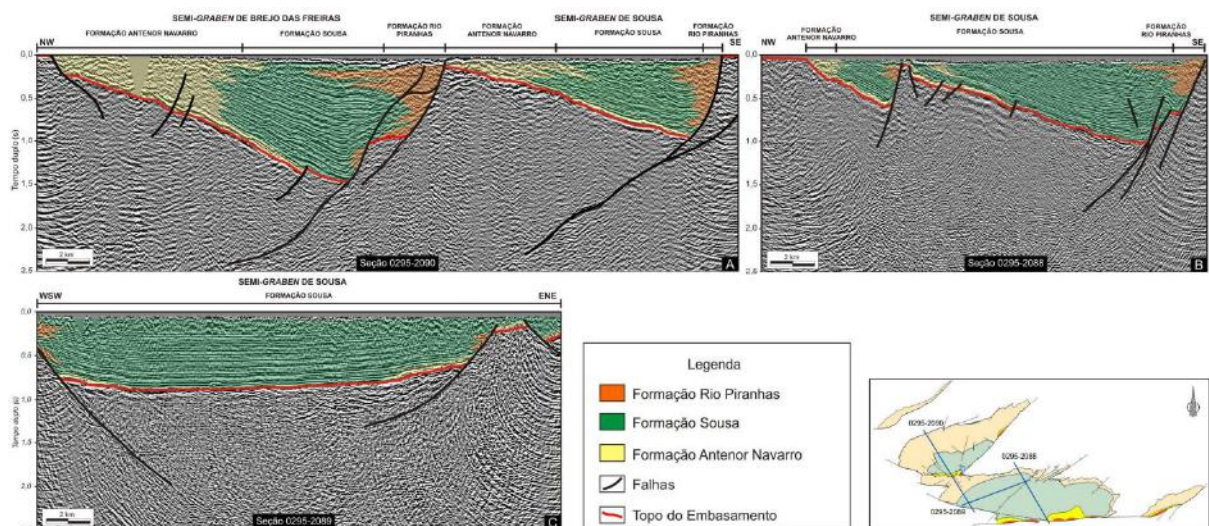


Figura 18. Seções geológicas da Bacia Rio do Peixe interpretadas através de seções sísmicas. | Fonte: Nunes da Silva (2009).

Para a Bacia do Potiguar, foi utilizado um compilado de seções geológicas divulgadas no relatório de 2017 da Superintendência de Definição de Blocos da Agência Nacional do Petróleo (ANP), utilizando-se como base as interpretações realizadas e publicadas por Bertani *et al.* (1990; Figura 19).

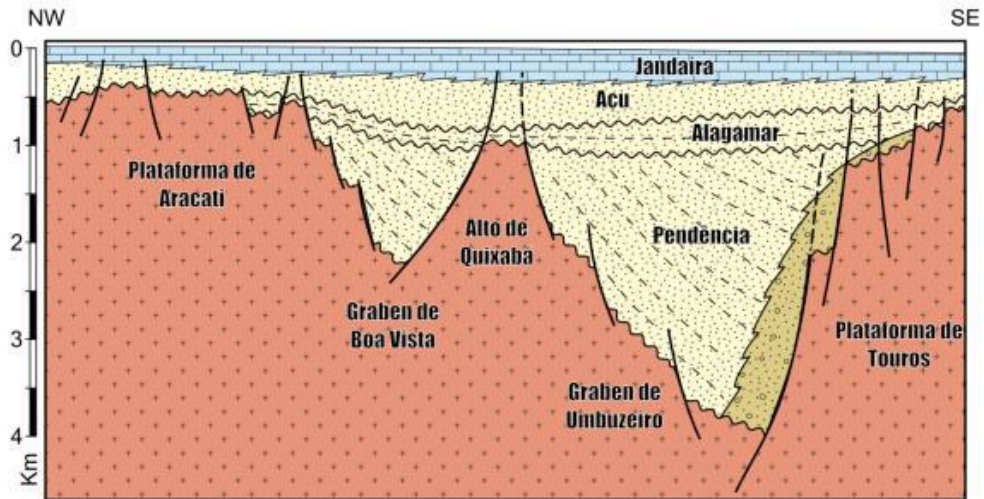


Figura 19. Seção geológica da Bacia Potiguar. | Fonte: modificado de Bertani *et al.* (1990).

5.3. Banco de dados GIS do CDGG

Todos os dados das seções foram cruzados com as informações de poço e interpretados em conjunto com o mapa estrutural e geológico do banco de dados do Centro Digital Gondwana de Geoprocessamento (CDGG). As informações estruturais e geológicas foram majoritariamente compiladas dos mapas publicados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e atualizados com publicações de diferentes autores.

Algumas formações possuem controle estrutural bem marcado. O mapeamento das principais estruturas e grábens, formadas durante o período de rifte do paleocontinente Gondwana, é importante para conseguir traçar os limites das extrapolações em subsuperfície de cada formação.

6. MAPAS GEOLÓGICOS DAS FORMAÇÕES SEDIMENTARES EXTRAPOLADAS

6.1. Bacia do Araripe

A Bacia do Araripe possui, no total, oito formações, iniciando pela Formação Mauriti, em seguida da Formação Brejo Santo, Missão Velha, Abaiara, Rio da Batateira, Santana, Araripina e, por fim, a Formação Exu. Para fins dessa pesquisa, todas as formações foram extrapoladas, obtendo-se uma possível área deposicional mínima de cada unidade.

6.1.1. Formação Mauriti

Essa formação sedimentar, abaixo de todas as demais da bacia, ainda não tem sua idade de sedimentação definida. Dessa forma, aqui entende-se que a Formação Mauriti é uma unidade pré-Brejo Santo, ou seja, compõe, na estratigrafia, a formação base da Bacia do Araripe.

A partir dos dados de 14 poços e das seções geológicas, foi possível traçar uma possível área mínima deposicional da formação. A porção extrapolada está demarcada no mapa em uma linha pontilhada (Figura 20). É possível observar uma larga extrapolação da área em relação aos afloramentos. Por ser a formação base da Bacia do Araripe, é de se esperar que houvesse poucos afloramentos e sua deposição real tenha sido completamente soterrada pelas formações mais novas. Além disso, devido a existência de discordâncias no registro da bacia, esses períodos de erosão podem ter contribuído também para apagar parte do registro dessa formação mais antiga (Figura 10).

É interessante também se atentar ao controle estrutural. A formação se estende por toda a porção leste e central da bacia, mas é interrompida pela falha que controla o principal gráben do Araripe, o Gráben da Feitoria (Figura 13).

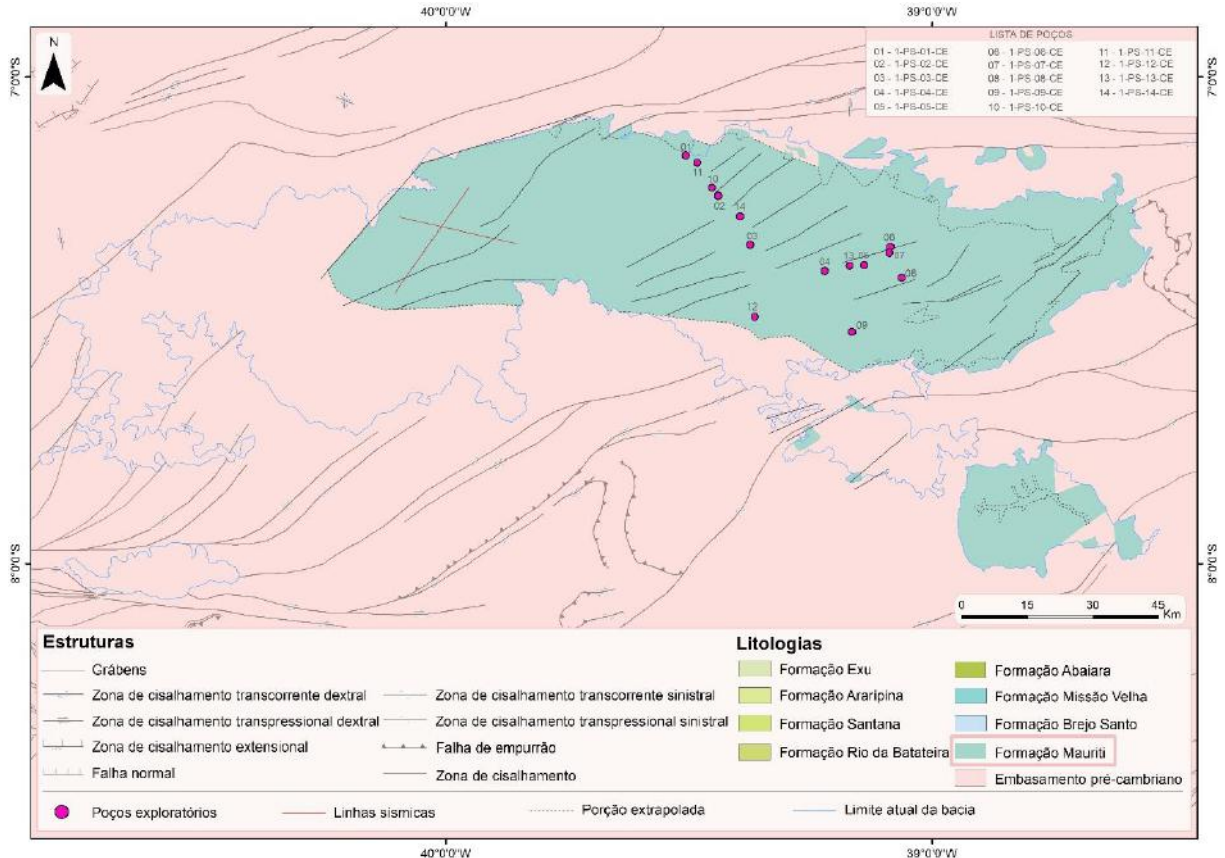


Figura 20. Mapa geológico da Formação Mauriti extrapolada, Bacia do Araripe.

6.1.2. Formação Brejo Santo

A Formação Brejo Santo é a segunda formação a se depositar na Bacia do Araripe (Figura 21). É interessante observar que os registros do Brejo Santo estão diretamente relacionados aos grábens que controlam a Bacia do Araripe.

Para a extrapolção em subsuperfície dessa unidade, foi necessária a utilização das seções interpretadas através de seções sísmicas (Figura 16). As linhas cruzadas conseguem colaborar de maneira mais efetiva na visão espacial da deposição das formações de acordo com os espaços de acomodação gerados pelos grábens. Além das duas seções geradas pelo projeto, utilizou-se como base a seção geológica feita por Assine *et al.* (2007). Essa seção ajuda a reforçar a interpretação feita nas seções geradas pelas linhas sísmicas e confirma o controle estrutural da Formação Brejo Santo limitado ao Gráben da Feitoria.

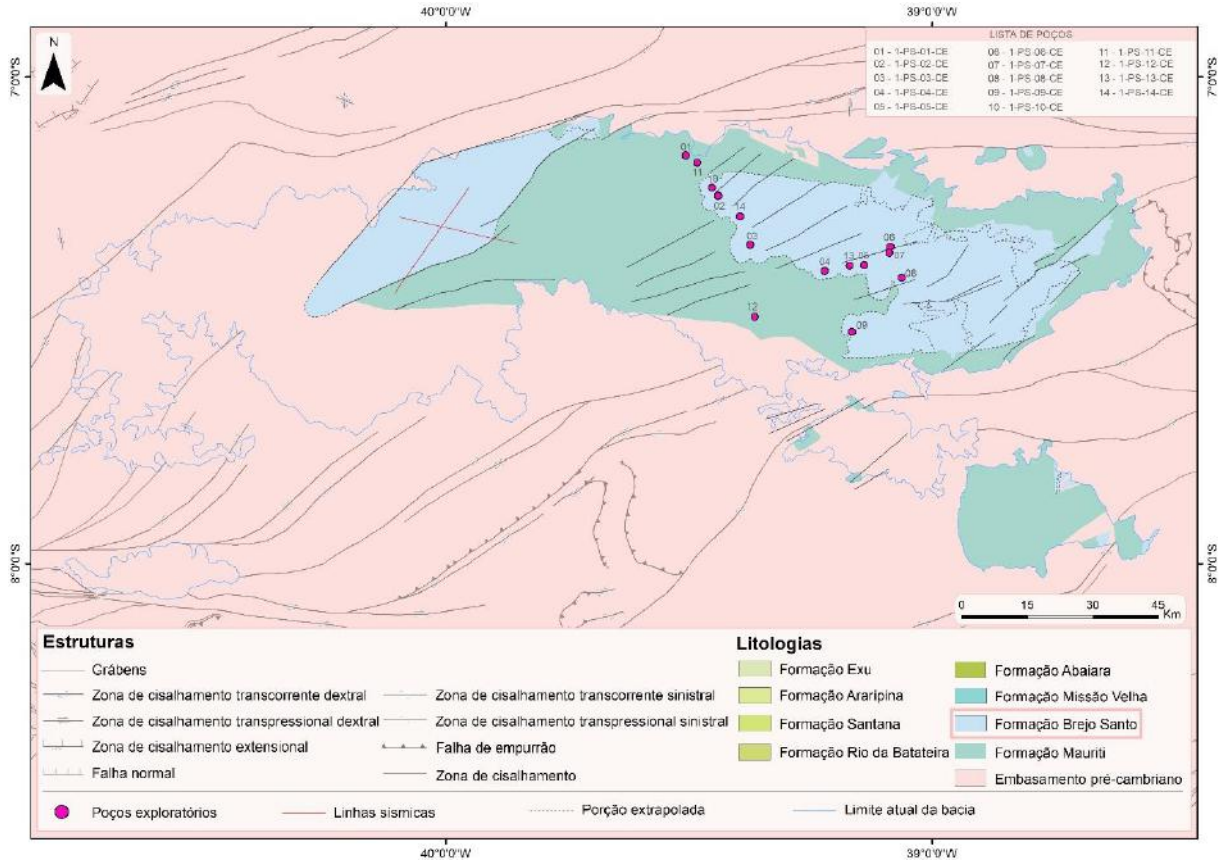


Figura 21. Mapa geológico da Formação Brejo Santo extrapolada, Bacia do Araripe.

6.1.3. Formação Missão Velha

A terceira formação depositada na bacia é a Formação Missão Velha (Figura 22). De maneira similar às formações anteriores, a Formação Missão Velha também se concentra em duas porções principais na bacia, a porção leste, onde se encontram os afloramentos, e na região do Gráben da Feitoria.

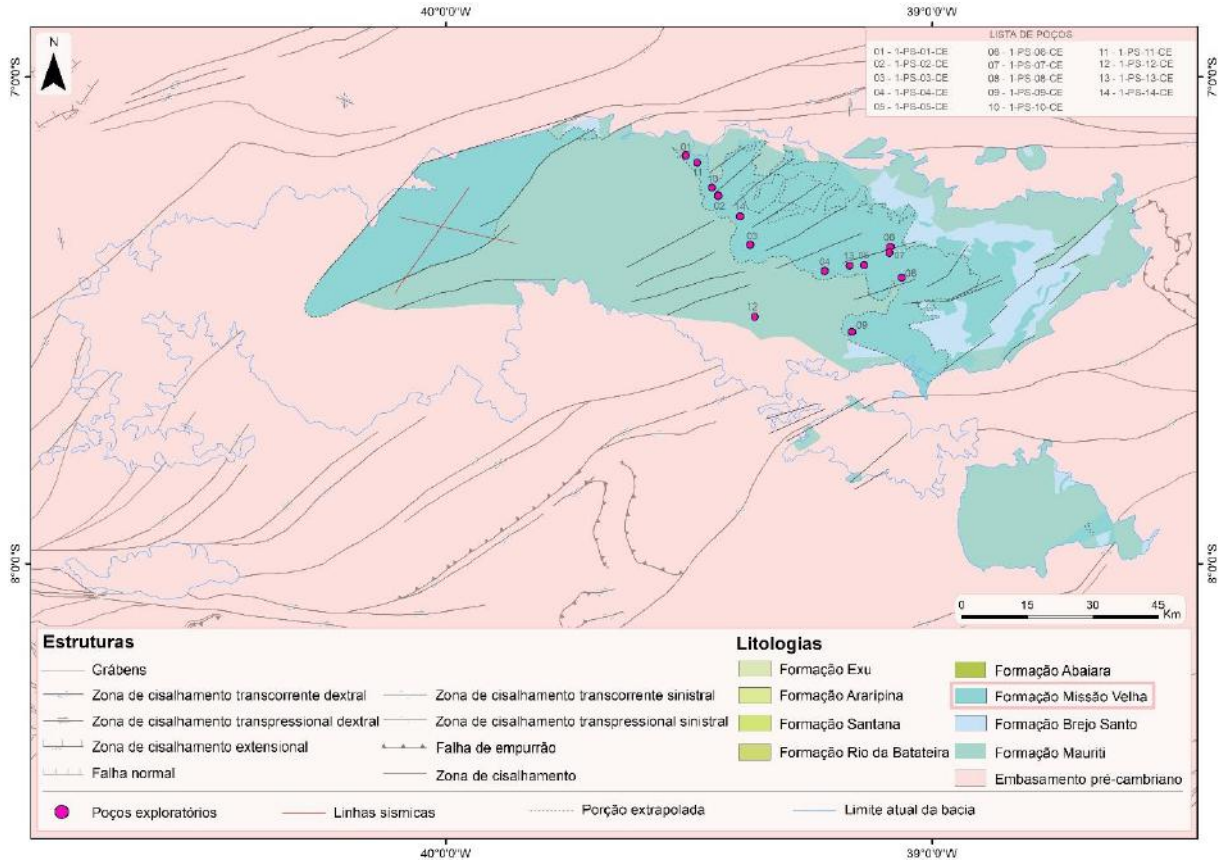


Figura 22. Mapa geológico da Formação Missão Velha extrapolada, Bacia do Araripe.

6.1.4. Formação Abaiara

A quarta formação é a Formação Abaiara (Figura 23). Novamente, há uma concentração dos afloramentos na porção leste da Bacia do Araripe e à oeste, na região do Gráben da Feitoria. Entretanto, já é possível observar uma certa extrapolção para uma porção além do controle estrutural das falhas principais que limitam o gráben, sendo apenas limitado pela sua borda oeste.

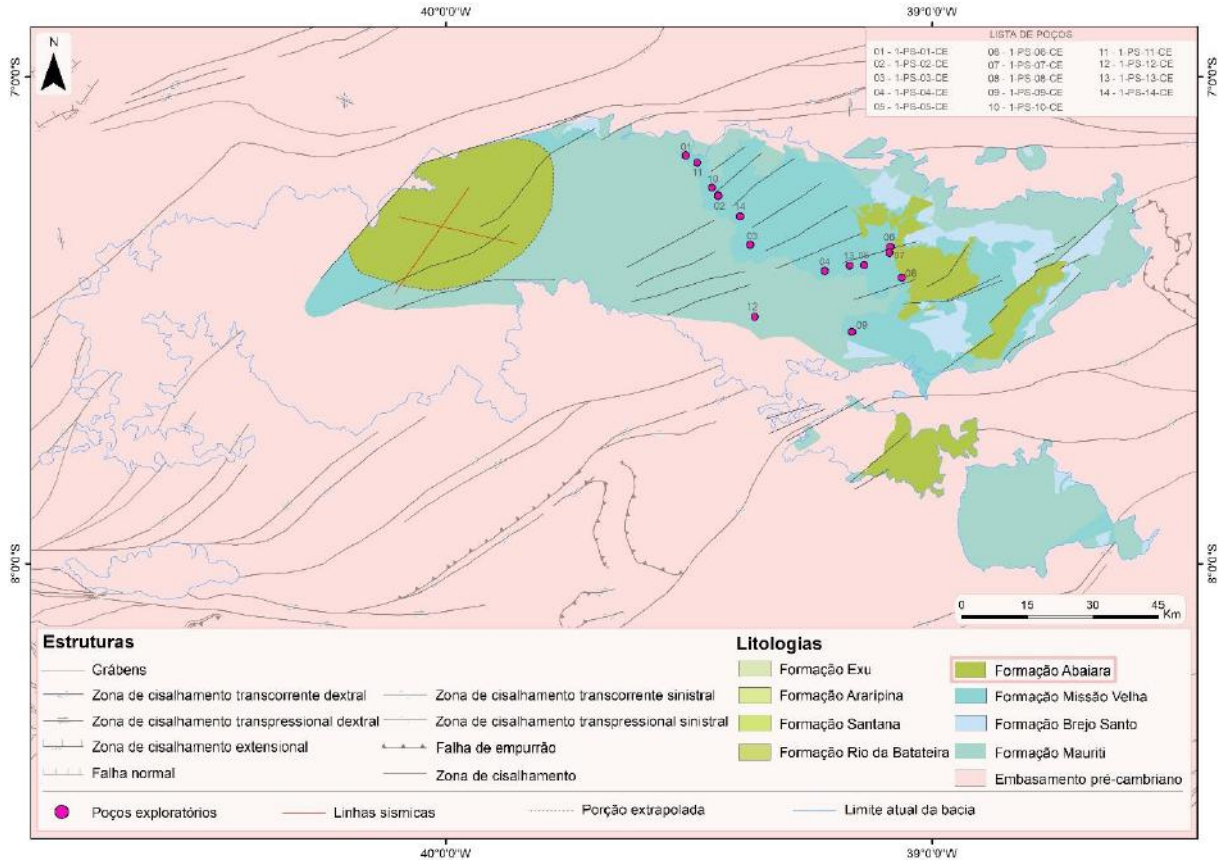


Figura 23. Mapa geológico da Formação Abaiara extrapolada, Bacia do Araripe.

6.1.5. Formação Rio da Batateira

A Formação Rio da Batateira (Figura 24), quinta formação da Bacia do Araripe, começa a fugir do padrão deposicional apresentado pelas outras formações anteriores. A unidade segue sendo controlada pela borda oeste do Gráben da Feitoria (Figura 13), entretanto ela se prolonga por toda a porção central e leste da bacia. As informações foram principalmente interpretadas pelas seções geológicas compiladas.

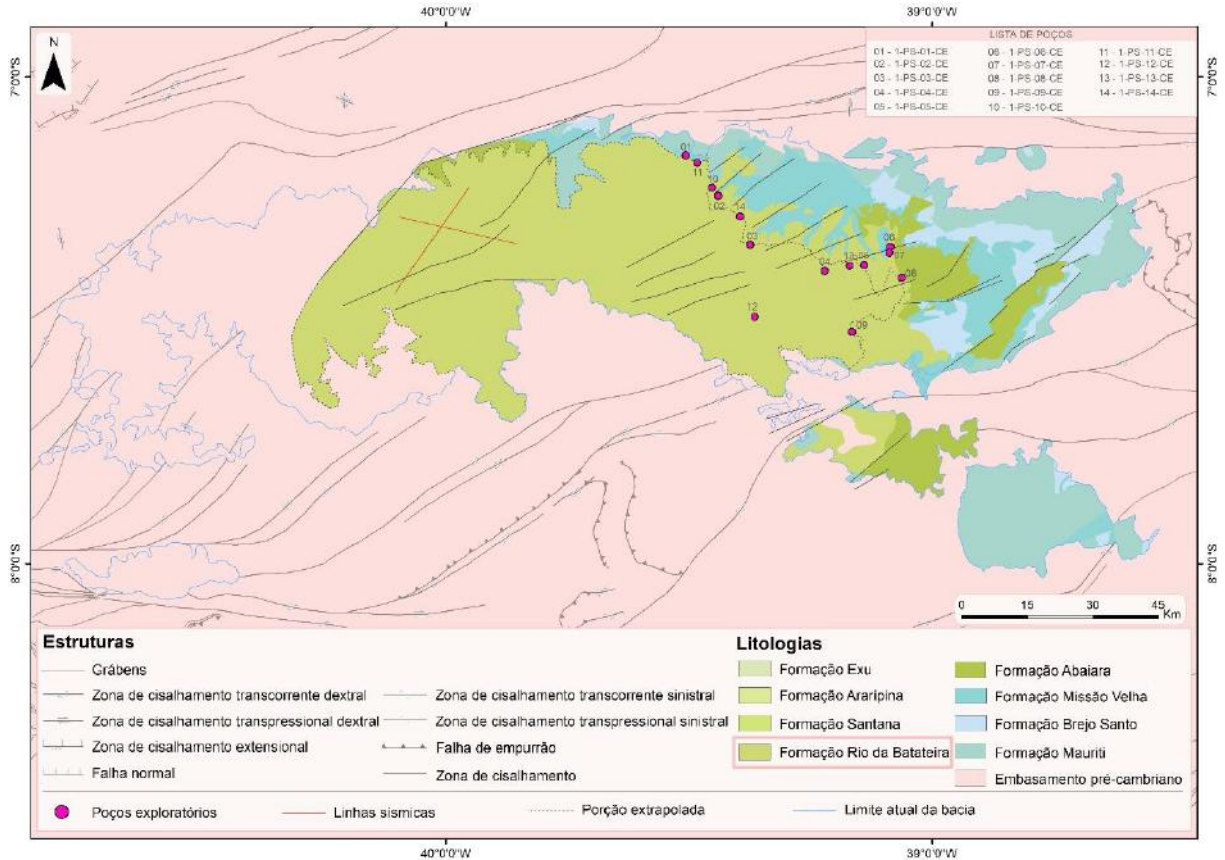


Figura 24. Mapa geológico da Formação Rio da Batateira extrapolada, Bacia do Araripe.

6.1.6. Formação Santana

A sexta formação é a Formação Santana (Figura 25). Seu registro que ultrapassa totalmente o controle estrutural do Gráben da Feitoria, sendo possível extrapolar a sua área deposicional por toda a porção oeste e central da bacia.

A sua extrapolação foi possível ao cruzar as informações de nove poços exploratórios que registram o aparecimento da formação, além das três seções geológicas utilizadas na pesquisa. Os afloramentos na porção oeste da bacia confirmam a diferença do controle deposicional em relação às outras formações anteriores.

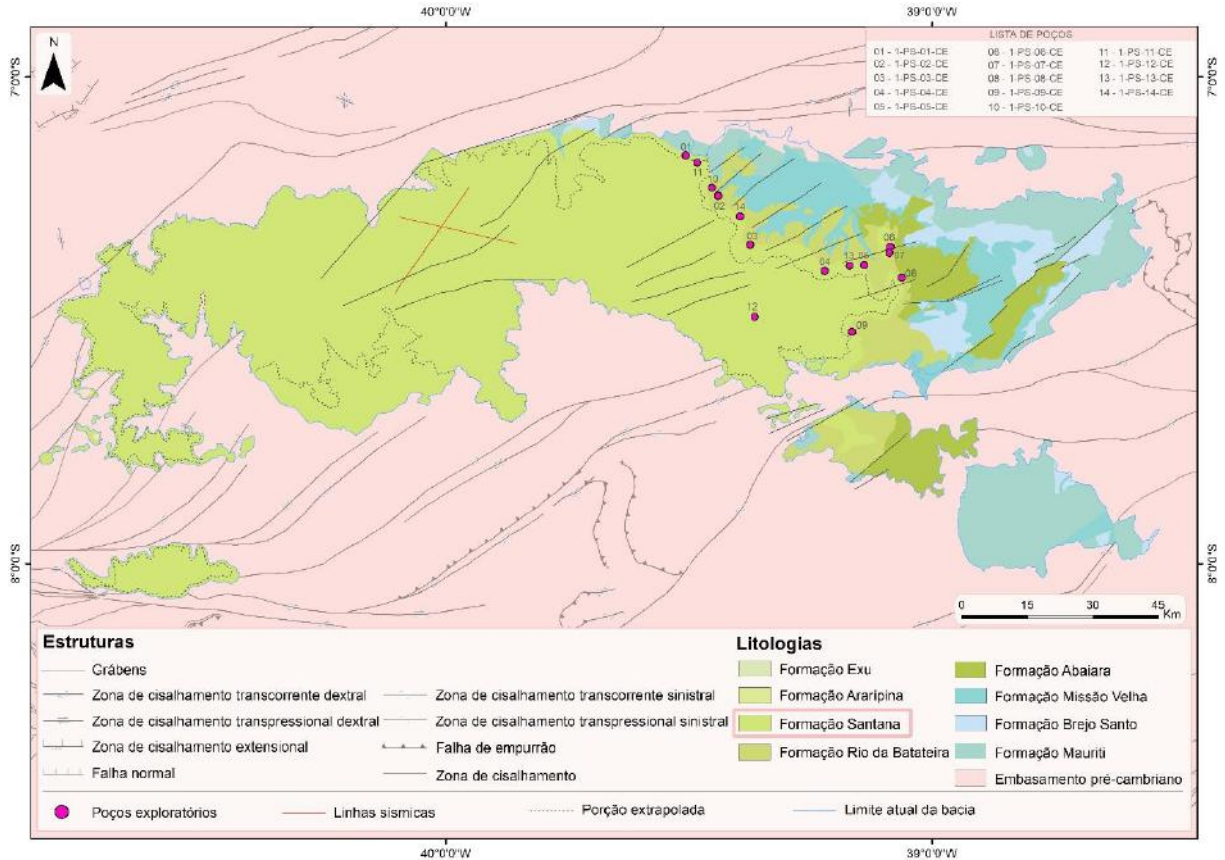


Figura 25. Mapa geológico da Formação Santana extrapolada, Bacia do Araripe.

6.1.7. Formação Araripina e Exu

A sétima e oitava formação (Figura 26), denominadas de Araripina e Exu, sucessivamente, precisaram ser extrapoladas com a mesma área deposicional. Isso se motivou pelo fato de haver poucas informações da Formação Araripina que pudessem ser utilizadas para estendê-la de maneira independente. Há uma falta de registros nos perfis compostos e raros afloramentos mapeados. Além disso, a seção de Assine *et al.* (2007) não distingue ambas as formações, colocando-as como uma única unidade. Dessa maneira, aqui entende-se que a Formação Araripina possui uma área deposicional mínima compatível com a área de sedimentação mínima da Formação Exu – que se resume nos afloramentos mapeados, visto que é a última formação depositada na Bacia do Araripe, não sendo soterrada por formações mais novas.

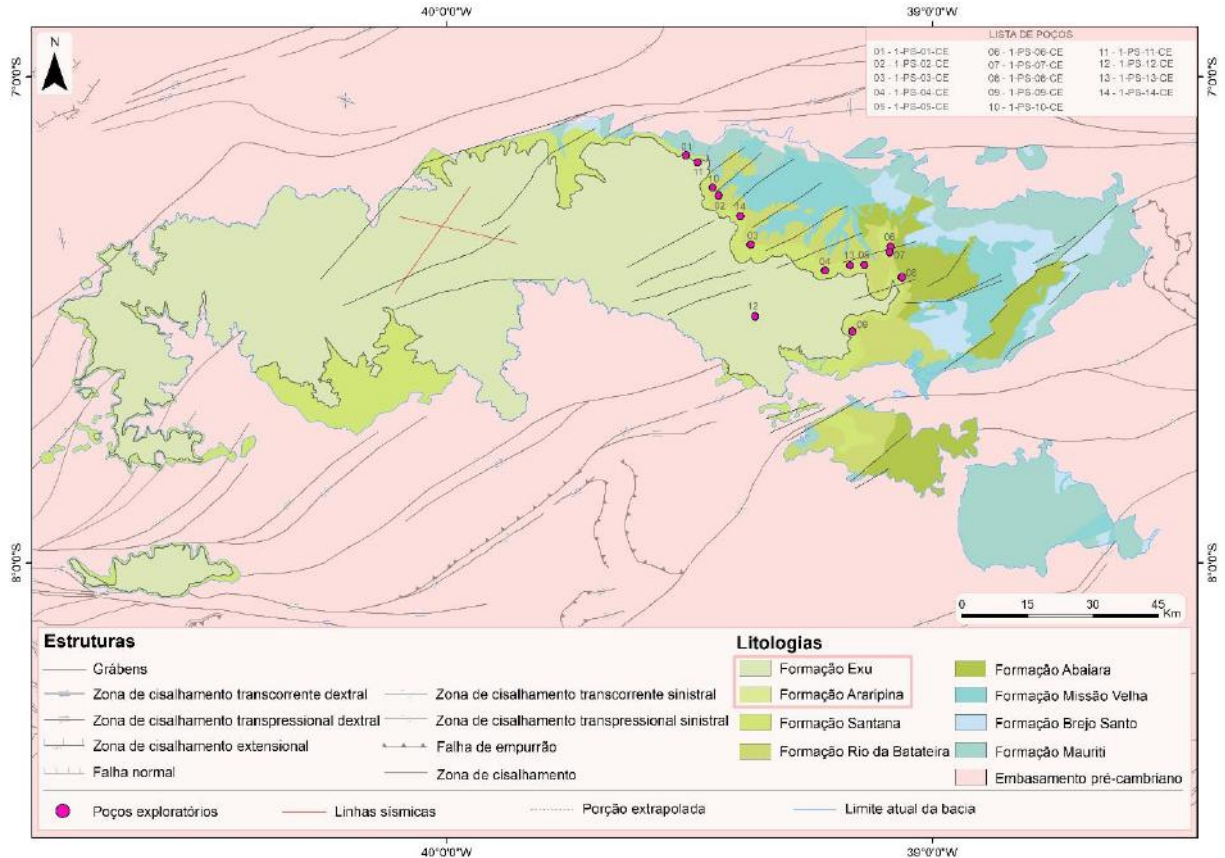


Figura 26. Mapa geológico das formações Araripina e Exu empilhadas extrapoladas, Bacia do Araripe.

6.2. Bacia Rio do Peixe

A Bacia Rio do Peixe possui um total de três formações cretáceas, sendo elas: Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. Para extrapolar a área de sedimentação foi necessário o uso de cinco poços exploratórios, além das seções geológicas interpretadas por sísmica.

6.2.1. Formação Antenor Navarro

A Formação Antenor Navarro (Figura 27), se concentra na porção oeste da bacia, limitada principalmente pela sub-bacia do Triunfo e é controlada estruturalmente pela Falha Portalegre (Figura 14). Também é encontrada em afloramento à norte da sub-bacia de Sousa e na sub-bacia Pontal, à leste (Figura 14). Os dados dos perfis compostos foram necessários para entender a sua deposição por baixo da Formação Sousa.

A baixa distribuição de poços exploratórios na bacia é um limitador para que houvesse uma interpretação bem detalhada do espaço deposicional mínimo da formação, sendo necessário principalmente o uso das seções geológicas para estimar a área (Figura 18).

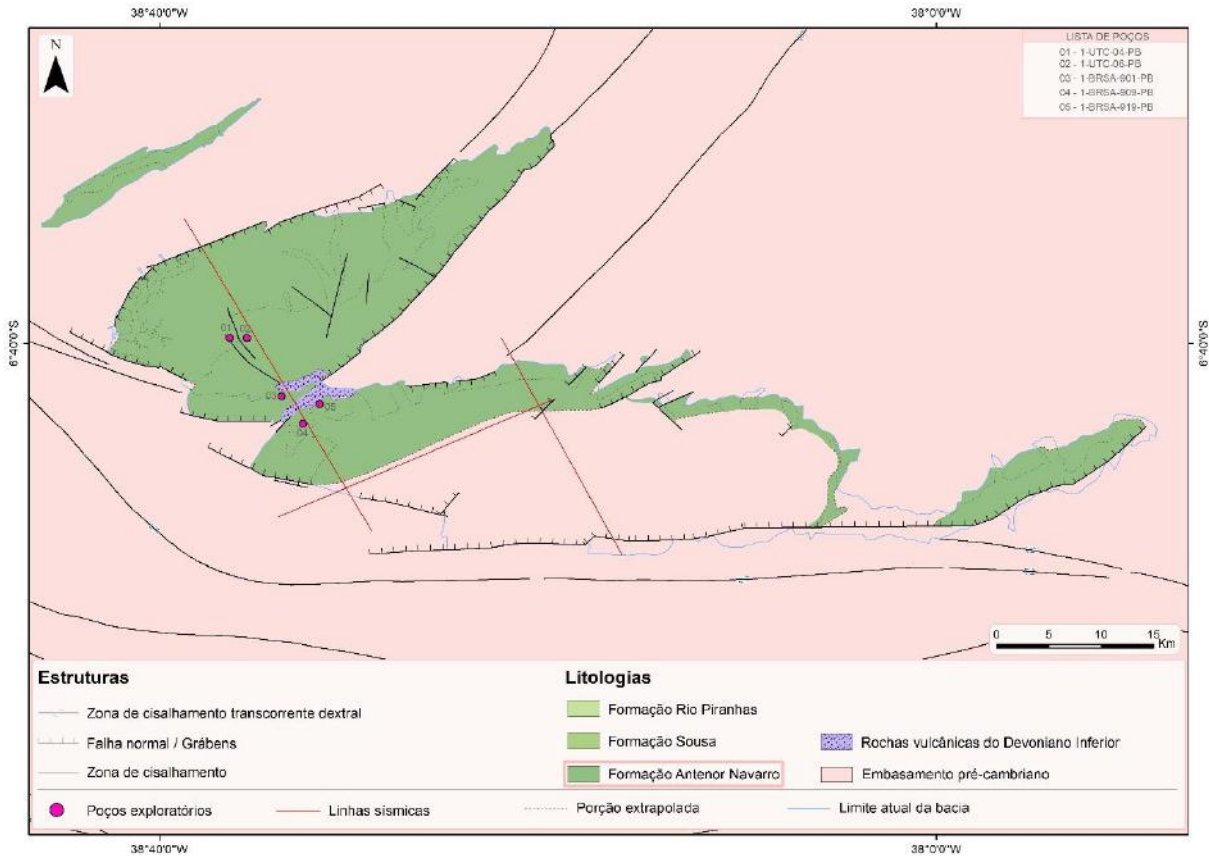


Figura 27. Mapa geológico da Formação Antenor Navarro extrapolada, Bacia Rio do Peixe.

6.2.2. Formação Sousa

A segunda formação da Bacia Rio do Peixe é a Formação Sousa (Figura 28). É encontrada em alguns afloramentos na sub-bacia do Triunfo, mas é principalmente compartimentada na sub-bacia de Sousa, ocupando uma larga escala e sendo limitada a sul pela falha de Malta. Para a sua extrapolação, também foram usadas as informações, principalmente, das seções geológicas, sendo possível estendê-la por toda a porção abaixo da sedimentação cenozoica encontrada na bacia.

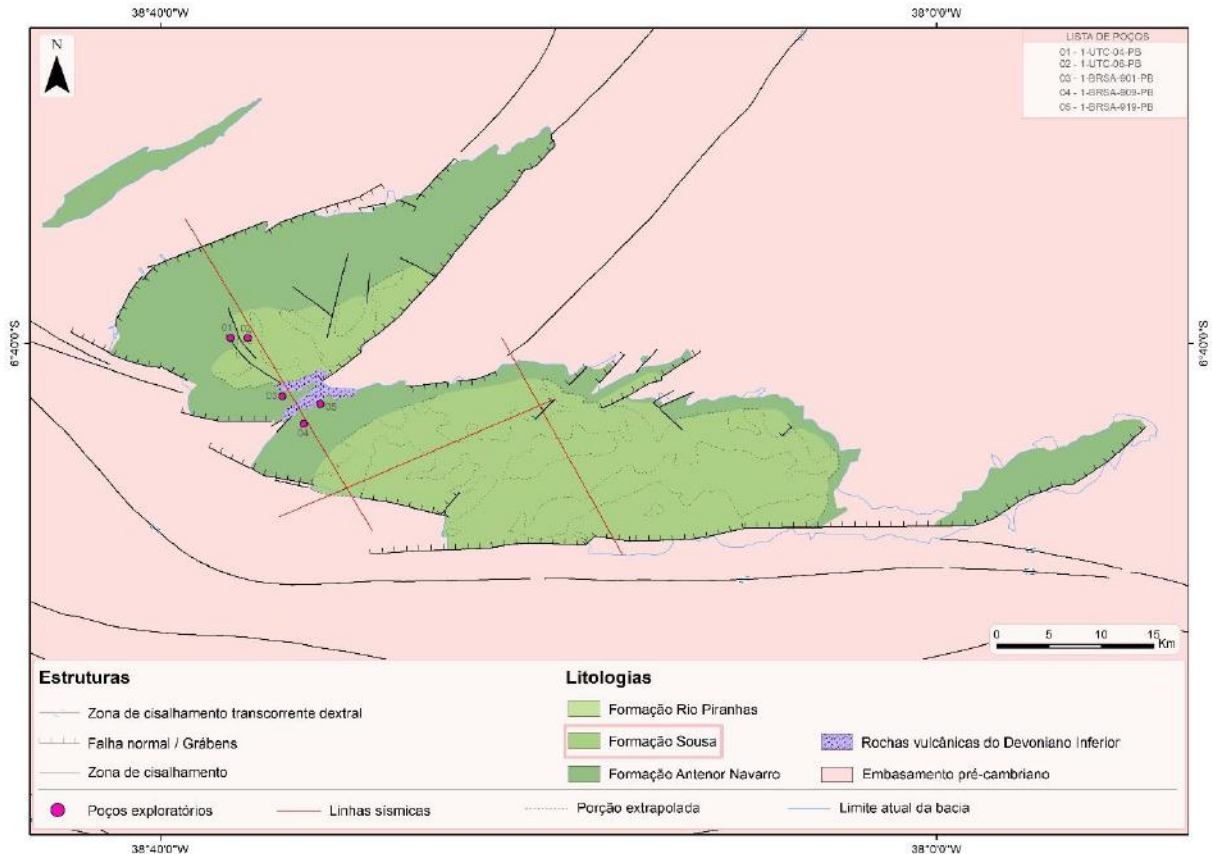


Figura 28. Mapa geológico da Formação Sousa extrapolada, Bacia Rio do Peixe.

6.2.3. Formação Rio Piranhas

A última formação da Bacia Rio do Peixe, a Formação Rio Piranhas (Figura 29), não possui informações suficientes para poder extrapolá-la para porções além dos afloramentos. Por ser a última formação a se depositar, ela não foi encoberta por formações mais recentes, apenas por sedimentos cenozoicos. Entretanto, a falta de informações de poços não permite fazer interpretações maiores.

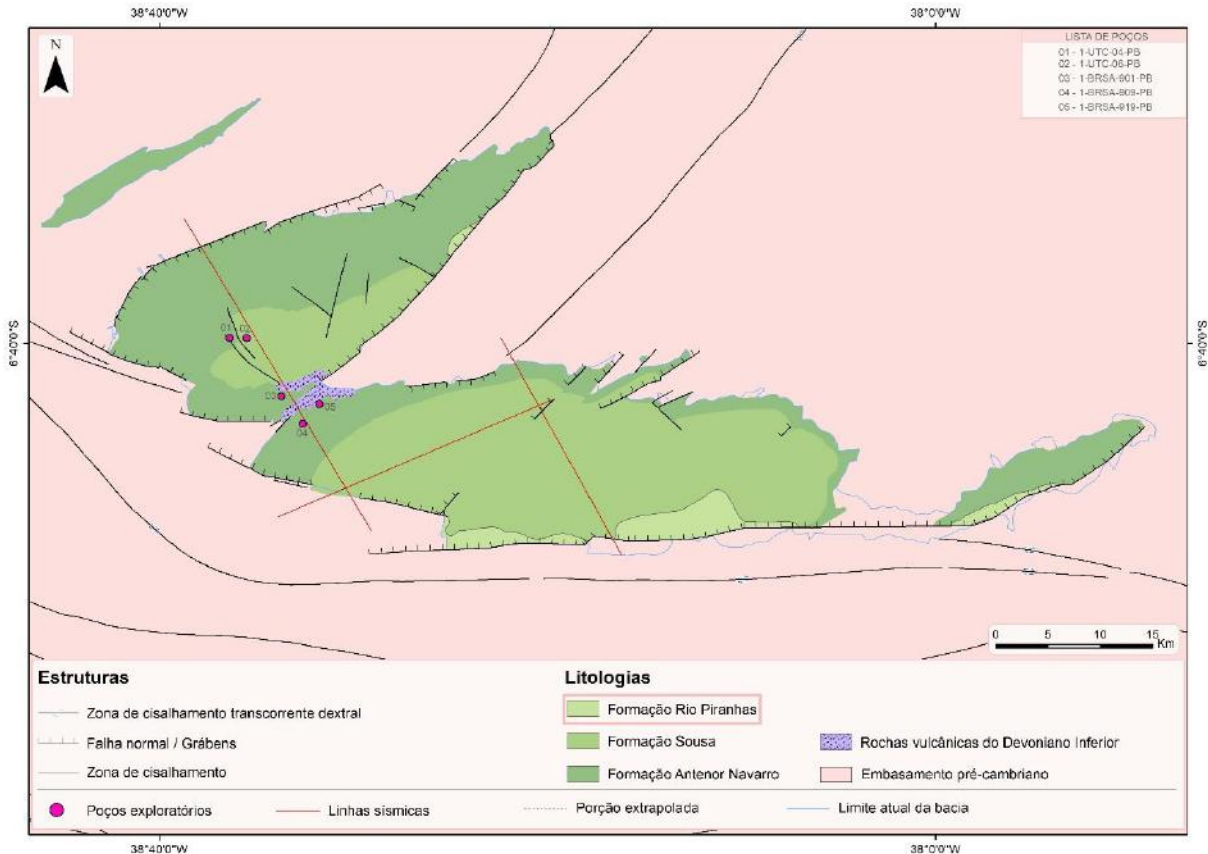


Figura 29. Mapa geológico da Formação Rio Piranhas extrapolada, Bacia Rio do Peixe.

6.3. Bacia Potiguar

A porção *onshore* mesozoica da Bacia Potiguar é constituída por quatro formações: Formação Pendência, Formação Alagamar, Formação Açú e Formação Jandaíra. Foram usados dados de 23 poços exploratórios escolhidos de maneira a contemplar toda a delimitação atual da bacia. Junto a essas informações, foram utilizados uma série de seções geológicas compiladas e apresentadas na seção de “Dados utilizados”.

6.3.1. Formação Pendência

A Formação Pendência (Figura 30) é a formação base da Bacia Potiguar. Atualmente, essa unidade não possui afloramentos, sendo encontrada apenas em registros de poços e seções

sísmicas. Para que houvesse sua extrapolação, foi necessário cruzar os dados de poços em conjunto com o mapa estrutural, para compreender o controle estrutural da formação.

A sedimentação da Bacia Potiguar é controlada pelos diversos grábens formados durante o período de rifte do paleocontinente Gondwana. Dessa forma, as primeiras unidades depositadas se encontram limitadas pelos grábens. Os dados de seções indicavam uma possível deposição nos grábens Boa Vista, Guamaré, Umbuzeiro e Apodi. Essa informação se confirmou com os dados dos perfis compostos analisados. Dessa maneira, foi possível traçar uma possível área deposicional mínima da formação.

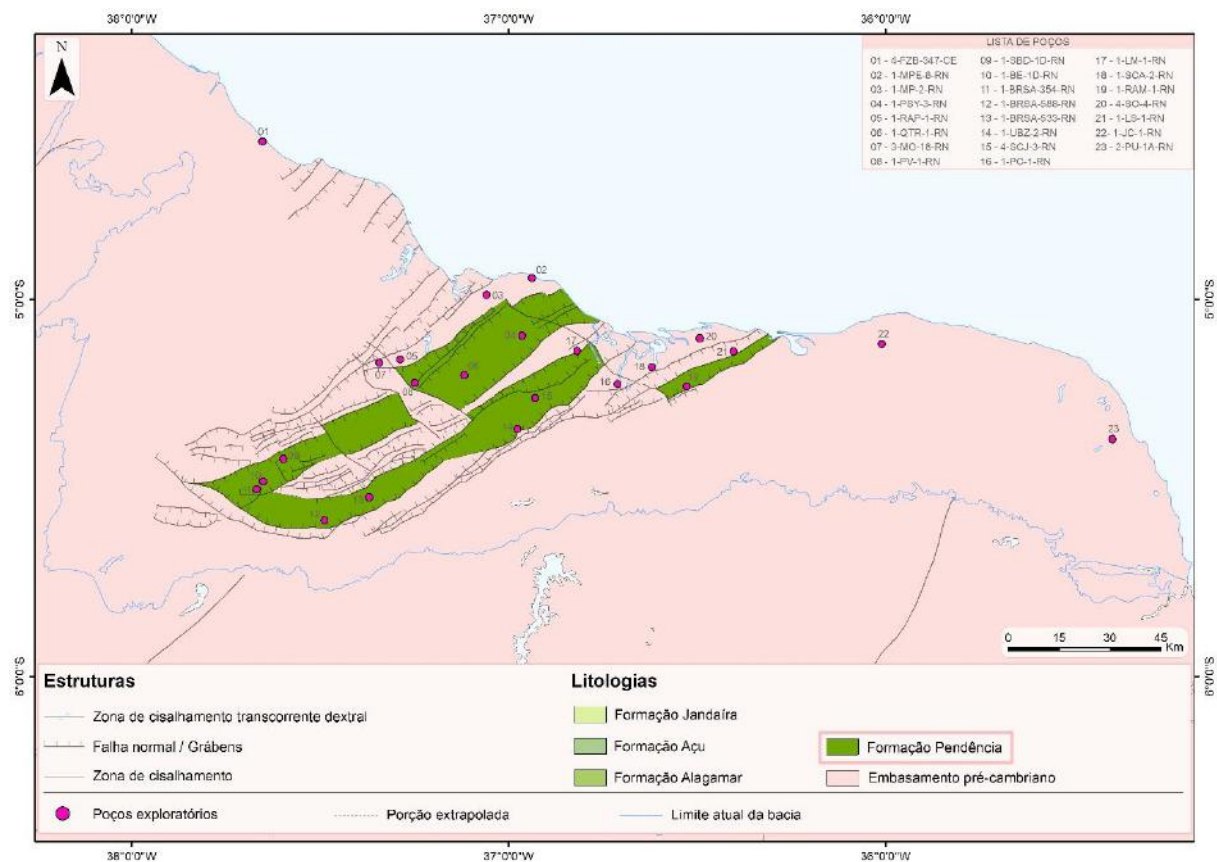


Figura 30. Mapa geológico da Formação Pendência extrapolada, Bacia Potiguar.

6.3.2. Formação Alagamar

De maneira similar à Formação Pendência, a segunda formação da Bacia Potiguar, a Formação Alagamar (Figura 31), também não possui afloramentos. Dessa forma, o mesmo método foi utilizado para propor um espaço deposicional em subsuperfície da bacia. Os dados de seções e poços indicavam um aparecimento da formação mesmos grábens Boa Vista,

Guamaré, Umbuzeiro e Apodi, entretanto além desses, também há registros de deposição no Alto Macau.

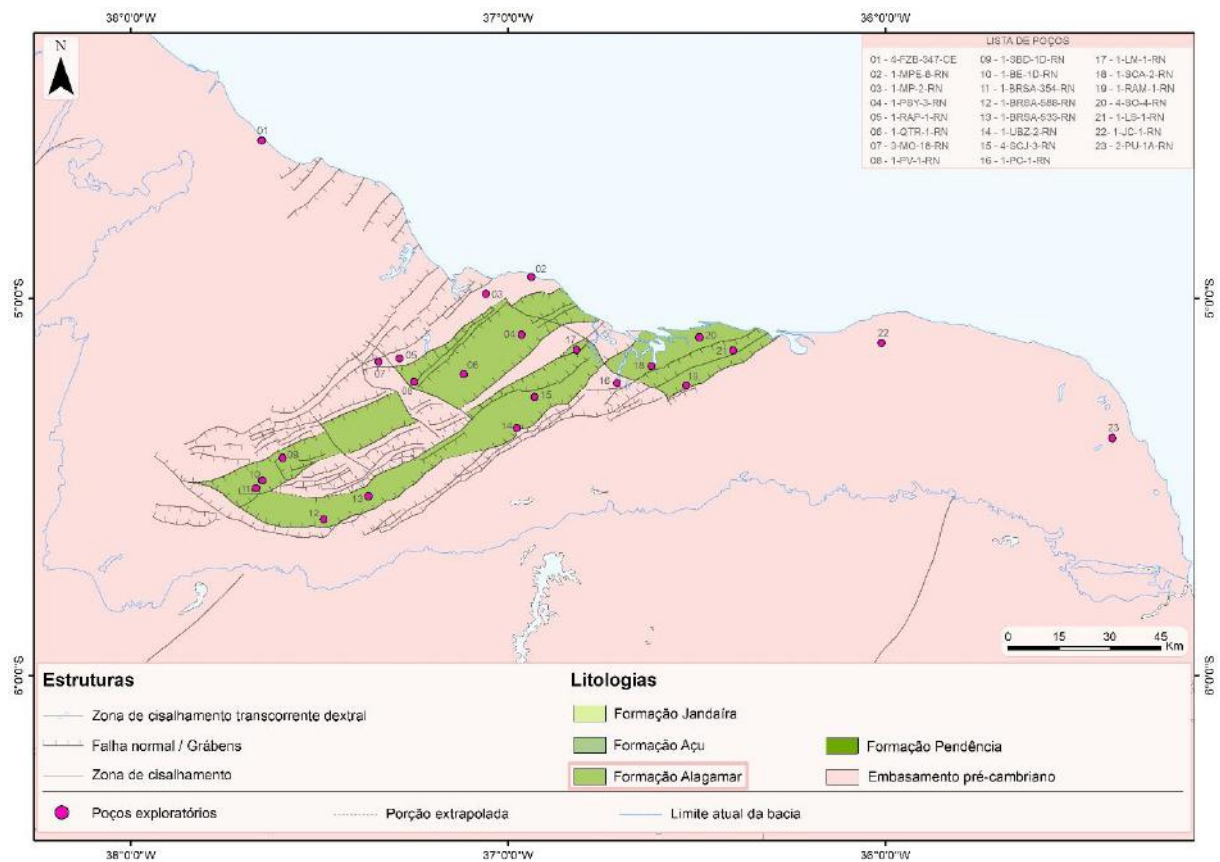


Figura 31. Mapa geológico da Formação Alagamar extrapolada, Bacia Potiguar.

6.3.3. Formação Açú

Diferentemente das formações anteriores, a terceira formação da Bacia Potiguar, Formação Açú (Figura 32), já não possui um controle estrutural limitado pelos grábens, possuindo uma área de deposição muito superior às formações Pendência e Alagamar. Essa é a primeira formação da bacia que possui afloramentos na superfície. Os dados de poços foram essenciais para estender os afloramentos para porções abaixo das unidades mais novas da bacia.

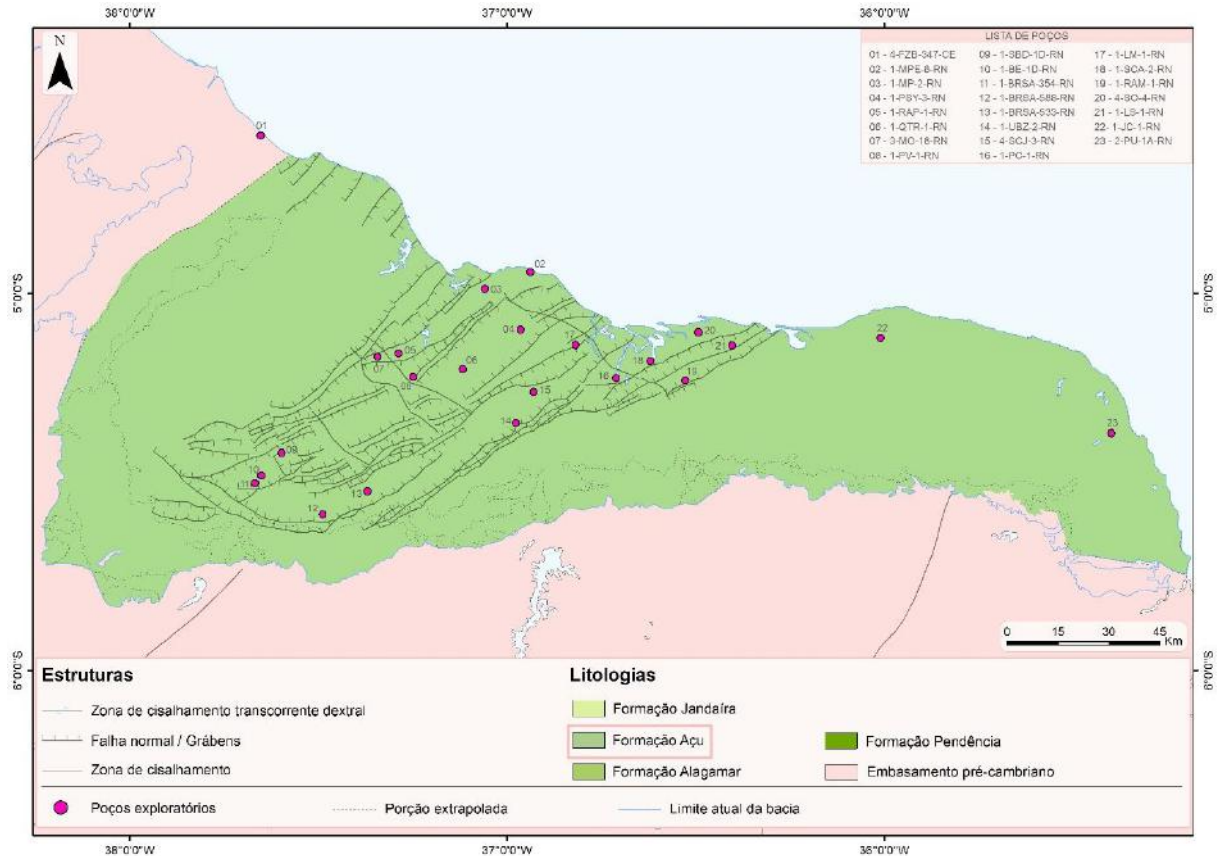


Figura 32. Mapa geológico da Formação Açú extrapolada, Bacia Potiguar.

6.3.4. Formação Jandaíra

A última formação mesozoica *onshore* da Bacia Potiguar é a Formação Jandaíra (Figura 33). De maneira parecida à Formação Açú, ela também não possui um controle estrutural bem marcado, sendo encontrada em boa parte das delimitações atuais da bacia. Os dados de poços permitiram estendê-las por baixo das formações cenozoicas.

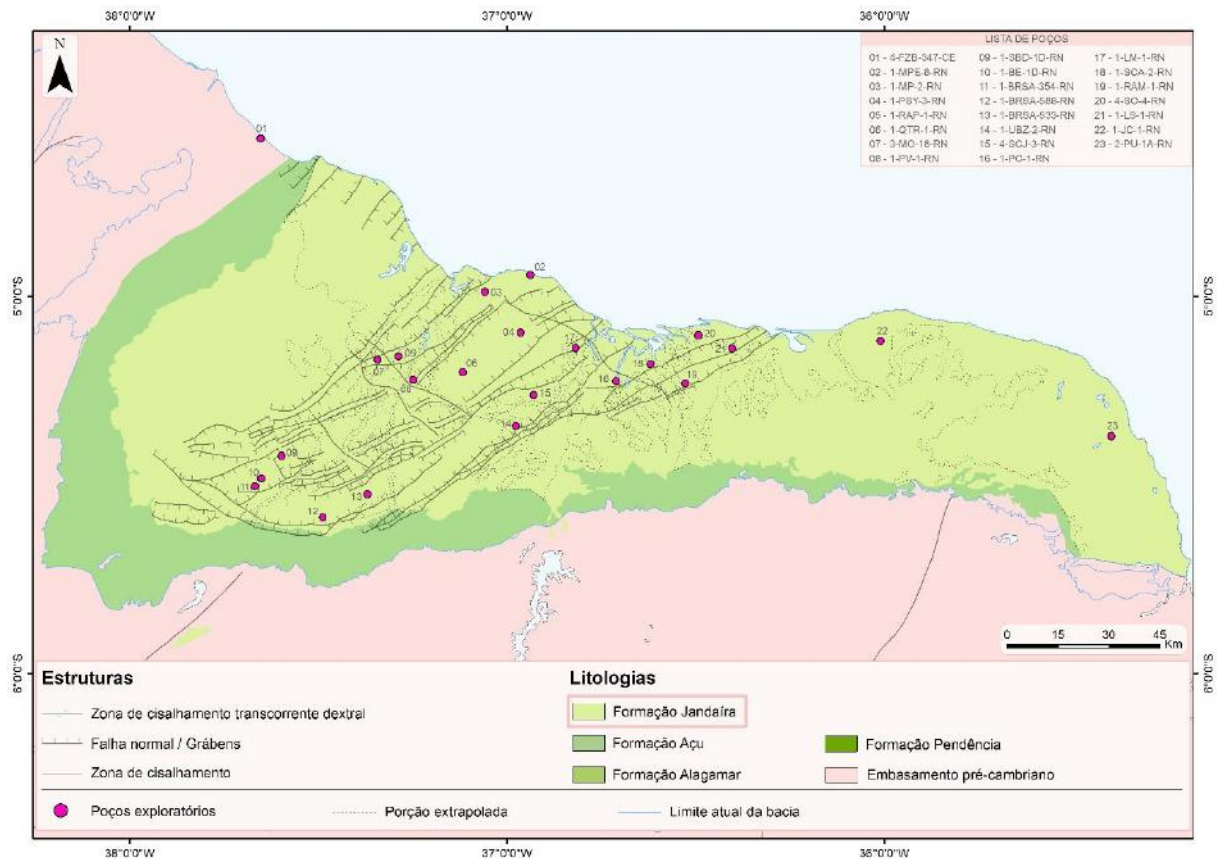


Figura 33. Mapa geológico da Formação Jandaíra extrapolada, Bacia Potiguar.

7. MODELOS DE RECONSTRUÇÃO CINEMÁTICA

A partir da análise dos mapas geológicos das formações extrapoladas das três bacias-chave escolhidas e da compilação das cartas estratigráficas, optou-se por reconstruir as formações em um total de oito idades diferentes, sendo elas: 150 Ma, 140 Ma, 125 Ma, 120 Ma, 115 Ma, 110 Ma, 100 Ma e 95 Ma. Foi utilizada como referência para a escolha das idades de reconstrução, as idades deposicionais das formações do Araripe, que coincidem com idades deposicionais das formações das outras bacias. Apenas o mapa de 95 Ma, foi feito de acordo com a Formação Jandaíra, da Bacia Potiguar, pois é uma unidade mais nova que as demais formações das outras bacias.

As coordenadas inseridas nos mapas correspondem às coordenadas atuais da placa fixa, ou seja, são referentes às coordenadas atuais da porção sul e central do continente africano.

Outro fator a se atentar nos mapas é a quebra de placas. Como explicado anteriormente na sessão “Conceitos fundamentais sobre reconstrução cinemática”, é necessário haver um

recorte nas placas rígidas para corrigir a deformação intraplaca e poder alcançar um encaixe mais preciso. Dessa maneira, o recorte utilizado por Heine *et al.* (2013) e reproduzido nos mapas aqui propostos interferem em alguns momentos no posicionamento das formações, que acabam se sobrepondo em determinadas idades, podendo dificultar uma análise espacial da deposição de algumas unidades.

7.1. Reconstrução em 150 Ma

Ao reconstruir as formações na idade de 150 Ma (Figura 34) é importante ter a noção de que apenas a Bacia do Araripe estava em plena deposição nesse momento (Figura 10). Além disso, ainda não há um consenso sobre a real idade inicial de formação da bacia, porém sabe-se que as duas unidades iniciais são a Formação Mauriti e a Formação Brejo Santo. Chegou-se na proposta de 150 Ma pois as formações Missão Velha e Abaiara também possuem registros do início do Cretáceo Inferior. Dessa forma, optou-se por reconstruir as formações Mauriti e Brejo Santo como sendo pré-formação Missão Velha.

A Formação Mauriti (BAr) é constituída por uma sedimentação típica de sistemas fluviais entrelaçados, enquanto a Formação Brejo Santo possui uma sedimentação lacustre (Assine, 2007).

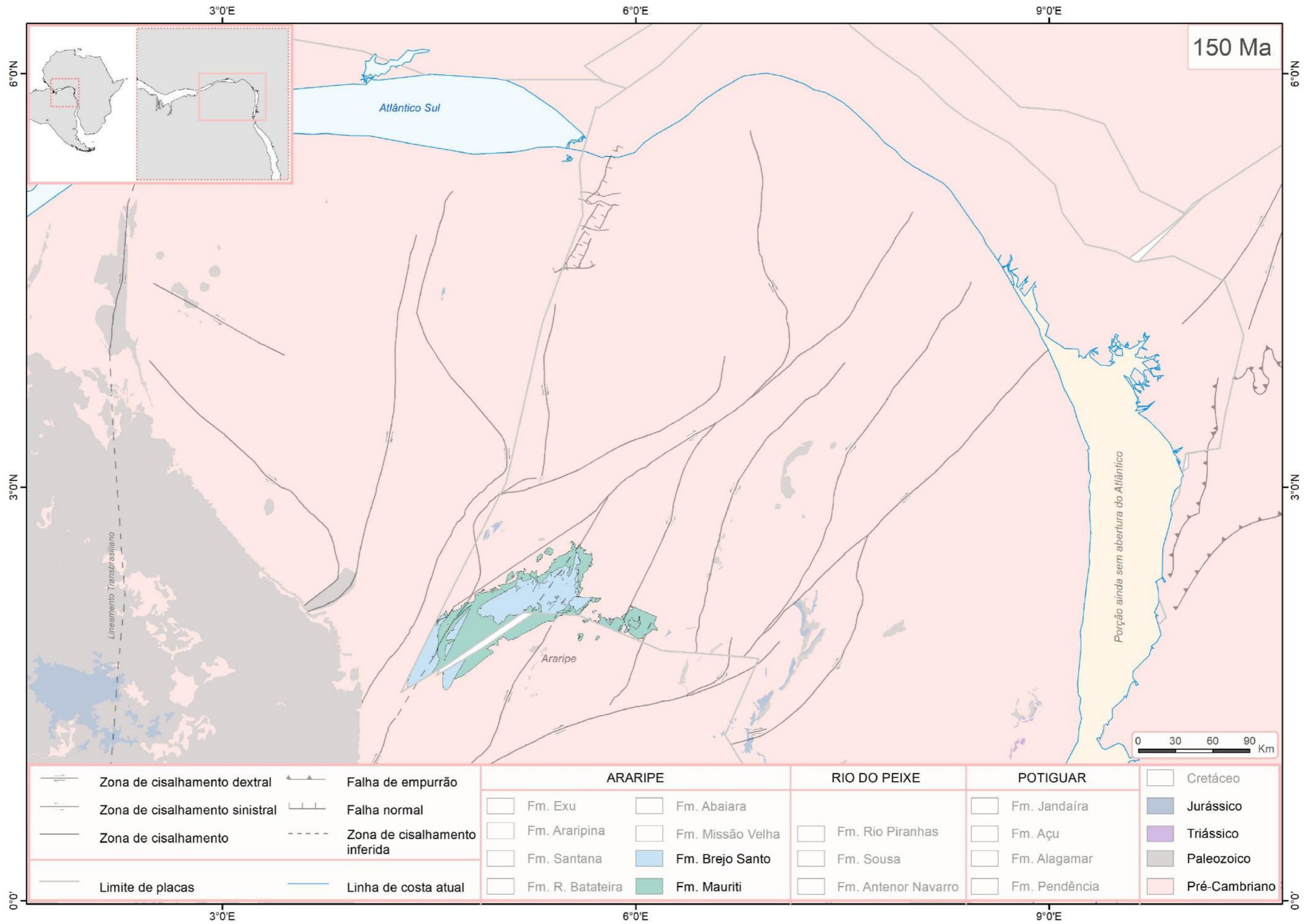


Figura 34. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 150 Ma.

7.2. Reconstrução em 140 Ma

Em 140 Ma (Figura 35), a Formação Missão Velha (BAr) estaria se depositando. Nesse momento também já haveria registros de deposição na bacia Rio do Peixe. Dessa forma, as formações Antenor Navarro e Sousa (BRP) são crono-correlatas entre si e crono-correlatas com a Formação Missão Velha (BAr).

A Formação Antenor Navarro (BRP) é descrita como um sistema deposicional formado por leques aluviais ou fluviais, enquanto os sistemas deposicionais da Formação Sousa variam de subaquosos a drenagens efêmeras (Córdoba *et al.*, 2008; Rapozo, 2020). Já a Formação Missão Velha, na Bacia do Araripe, possui uma sedimentação majoritariamente de arenitos, formada em um sistema de planícies fluviais entrelaçados por canais rasos e de alta energia (Assine, 2007).

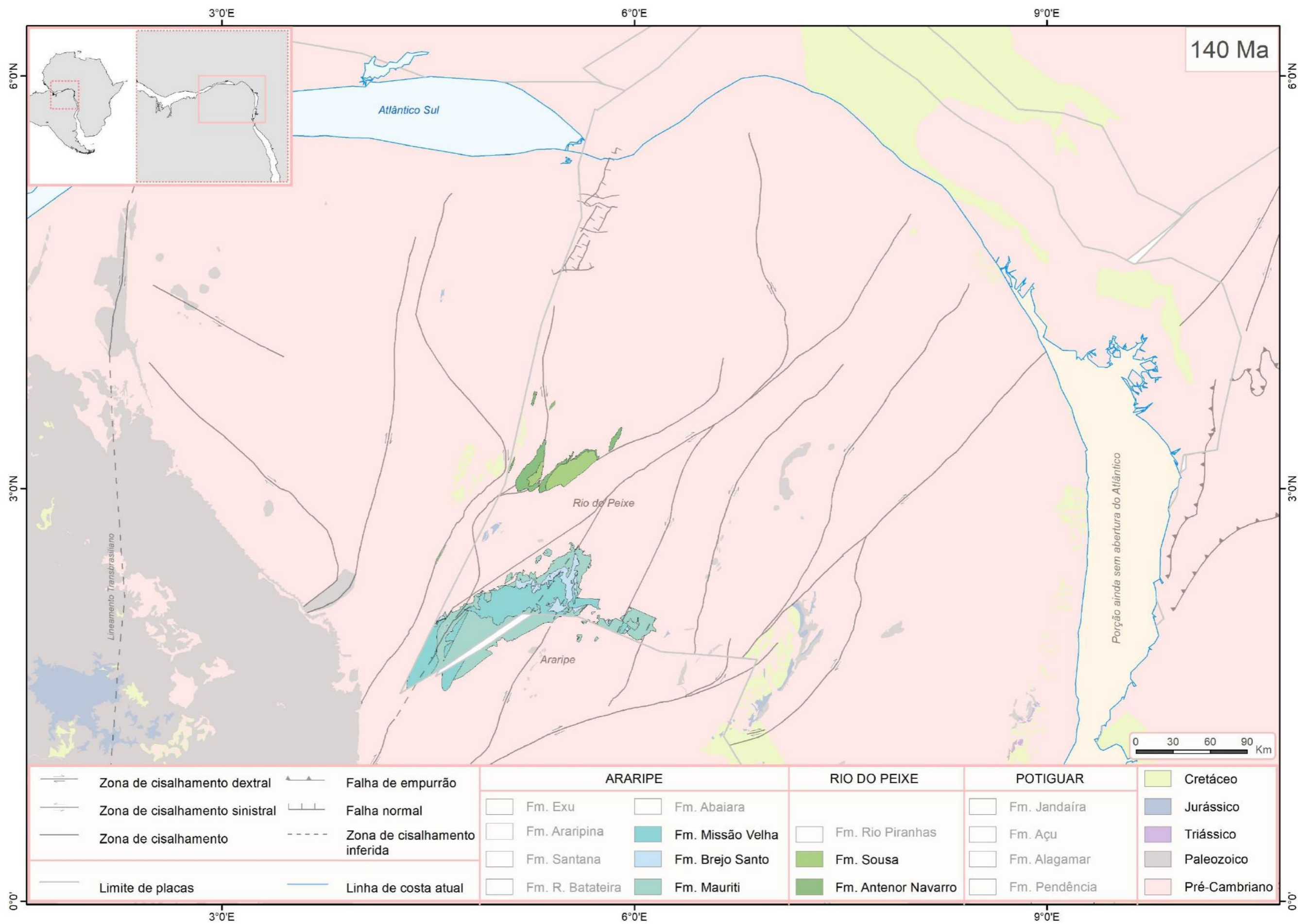


Figura 35. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 140 Ma.

7.3. Reconstrução em 125 Ma

O período entre 140 Ma e 130 Ma não possui grandes alterações no padrão deposicional das bacias, havendo apenas a deposição da Formação Rio Piranhas, na bacia Rio do Peixe. Entretanto, a partir de 125 Ma (Figura 36), começa-se a formar a primeira unidade da Bacia Potiguar (Formação Pendência). É crono-correlata com a Formação Abaiara (BAr), que estava em plena deposição neste período, e ambas são crono-correlatas com a Formação Rio Piranhas (BRP).

A Formação Rio Piranhas (BRP) é descrita como de sistema deposicional de leques aluviais associadas a sistemas fluviais entrelaçados (Córdoba *et al.*, 2008). Já a Formação Abaiara é interpretada como uma unidade heterogênea, em que a associação de fácies indica um sistema fluvial meandrante na base que gradualmente passa para sistema deltaico lacustre raso (Fambrini *et al.*, 2020). Entretanto, a Formação Pendência, na Bacia Potiguar, é descrita como de sistema fluvio-deltaico (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

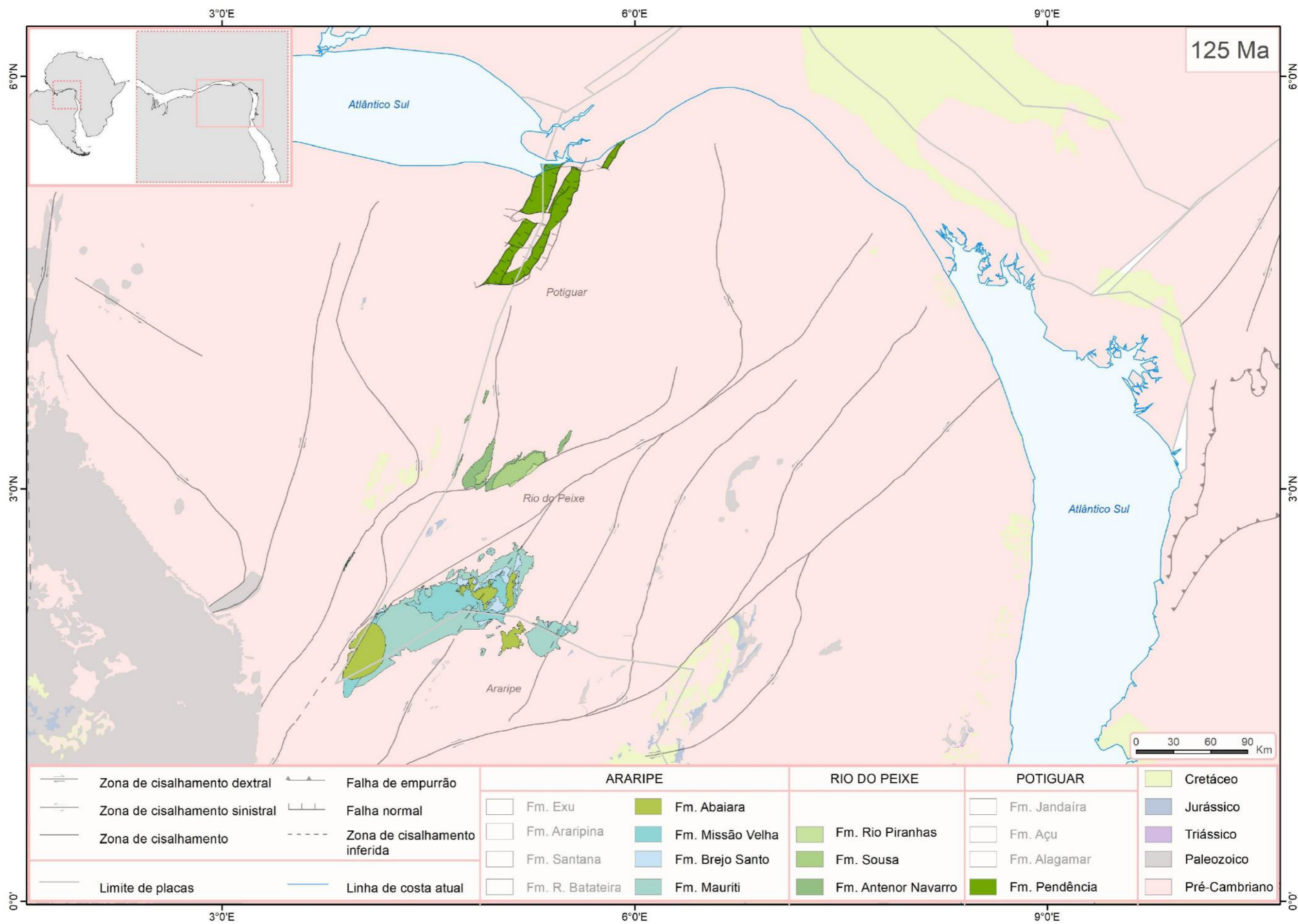


Figura 36. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 125 Ma.

7.4. Reconstrução em 120 Ma

Em 120 Ma (Figura 37), a Bacia Rio do Peixe já cessou sua deposição. A Bacia do Araripe está em sua fase pós-rifte, depositando os sedimentos que constituem a Formação Rio da Batateira. Já a Bacia Potiguar está em plena deposição da Formação Alagamar.

A Formação Rio da Batateira (BAr) possui um sistema que se difere dos sistemas das formações anteriores, sendo o primeiro registro de um sistema lacustre (Assine, 2007). Enquanto isso, a Formação Alagamar (BPo) possui registro de um sistema fluvio-deltaico a folhelhos transicionais, indicando o início da ingressão marinha (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

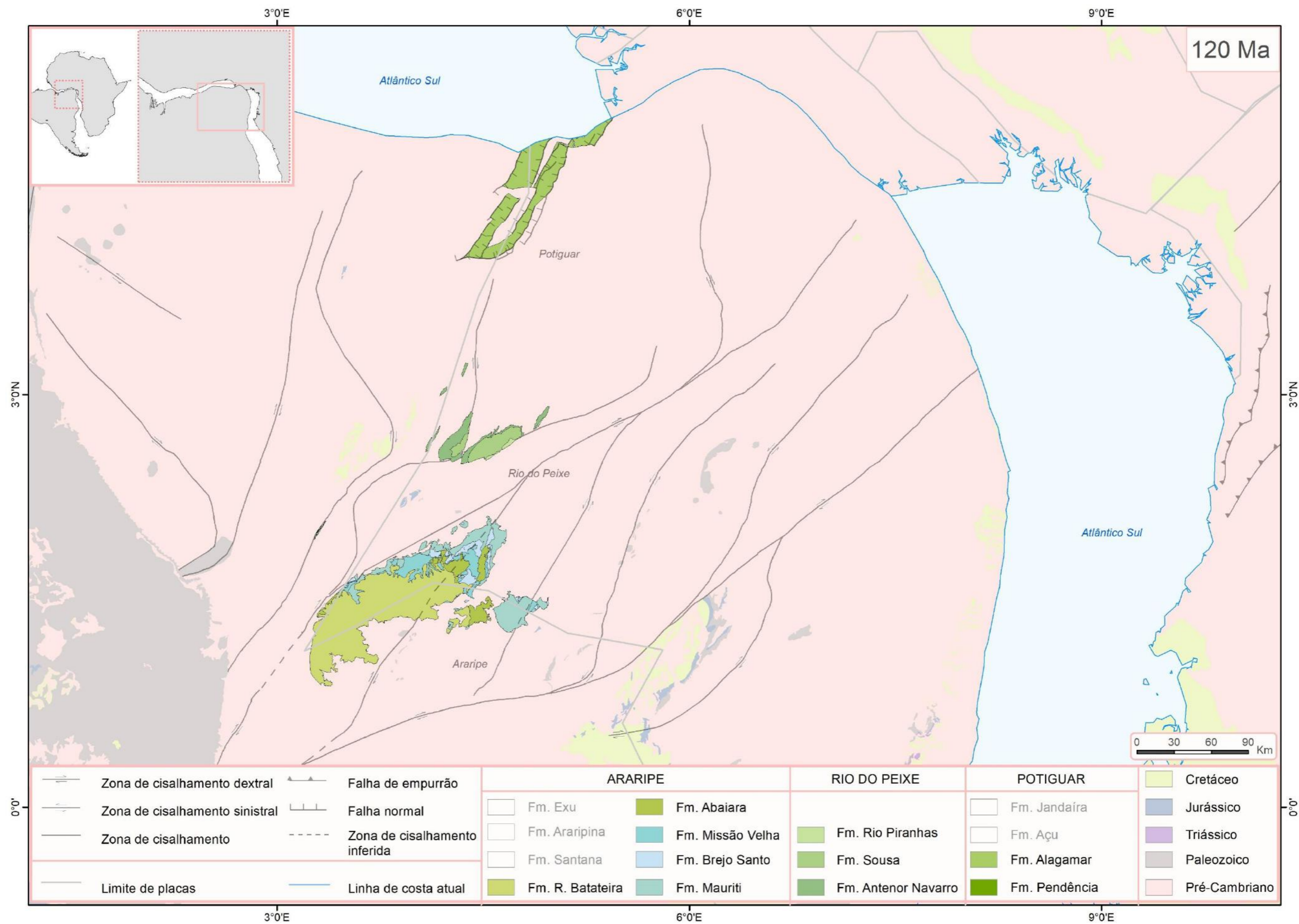


Figura 37. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 120 Ma.

7.5. Reconstrução em 115 Ma

Em 115 Ma (Figura 38), as formações crono-correlatas que estão em deposição são Alagamar (em seu estágio final, marcado pela ingressão marinha), na Bacia Potiguar, e a Formação Santana, na Bacia do Araripe.

A Formação Santana é a primeira formação da Bacia do Araripe a registrar a ingressão marinha, possuindo uma sedimentação predominantemente de calcários e folhelhos.

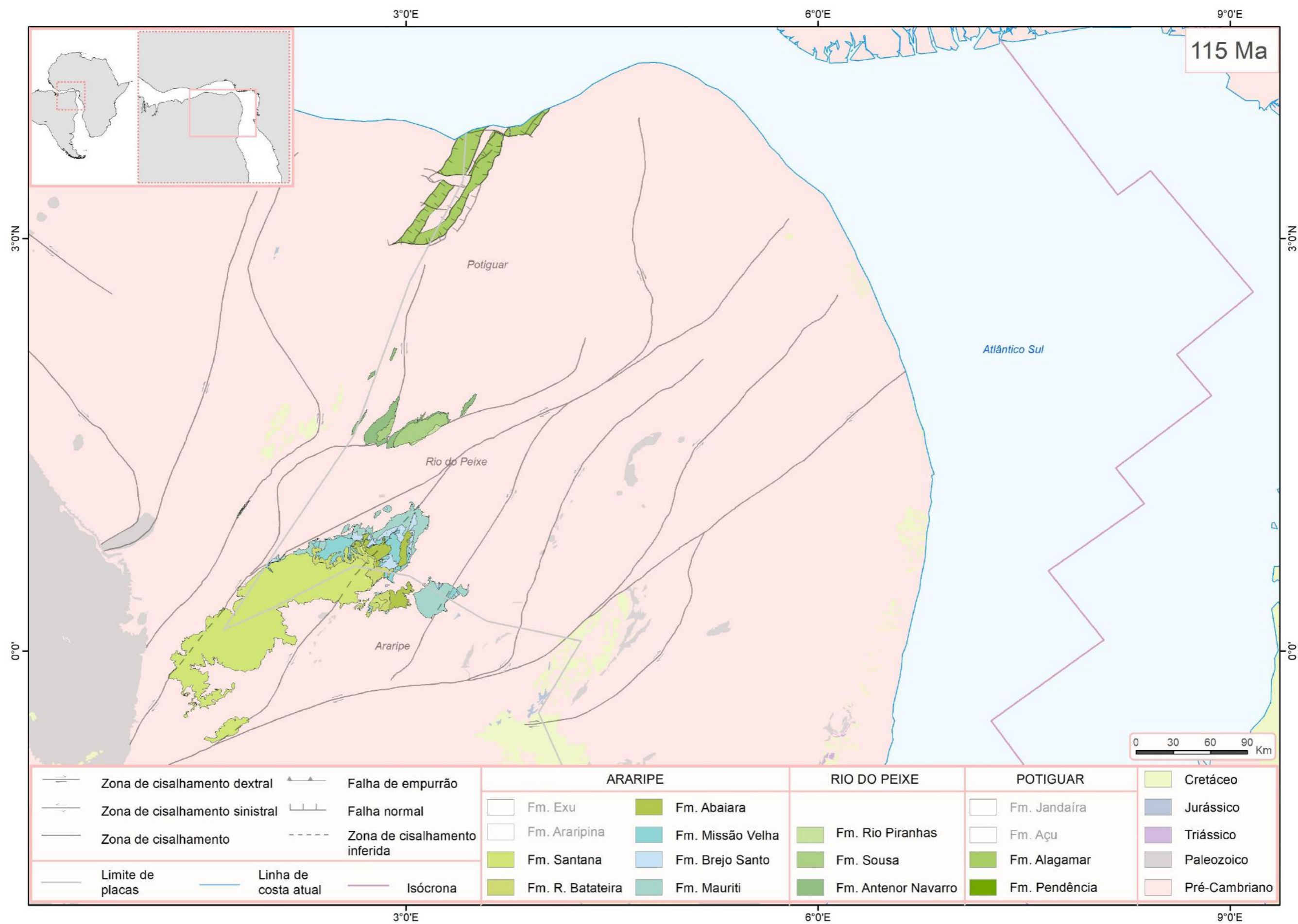


Figura 38. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 115 Ma.

7.6. Reconstrução em 110 Ma

Em 110 Ma (Figura 39) começa a haver a deposição concomitante da Formação Araripina, na Bacia do Araripe, e da Formação Açú, na Bacia Potiguar.

A Formação Araripina (BAr) já não possui mais registros de ingressão marinha, sendo limitados apenas na Formação Santana (BAr). É caracterizada por uma sedimentação típica de planícies de leques aluviais medianos a distais depositadas em ambiente lagunar e planície de inundação sob totais condições oxidantes (Assine, 2007). Já a Formação Açú (BPo) é descrita por Pessoa Neto *et al* (2007) como sendo de sistema fluvial a marinho.

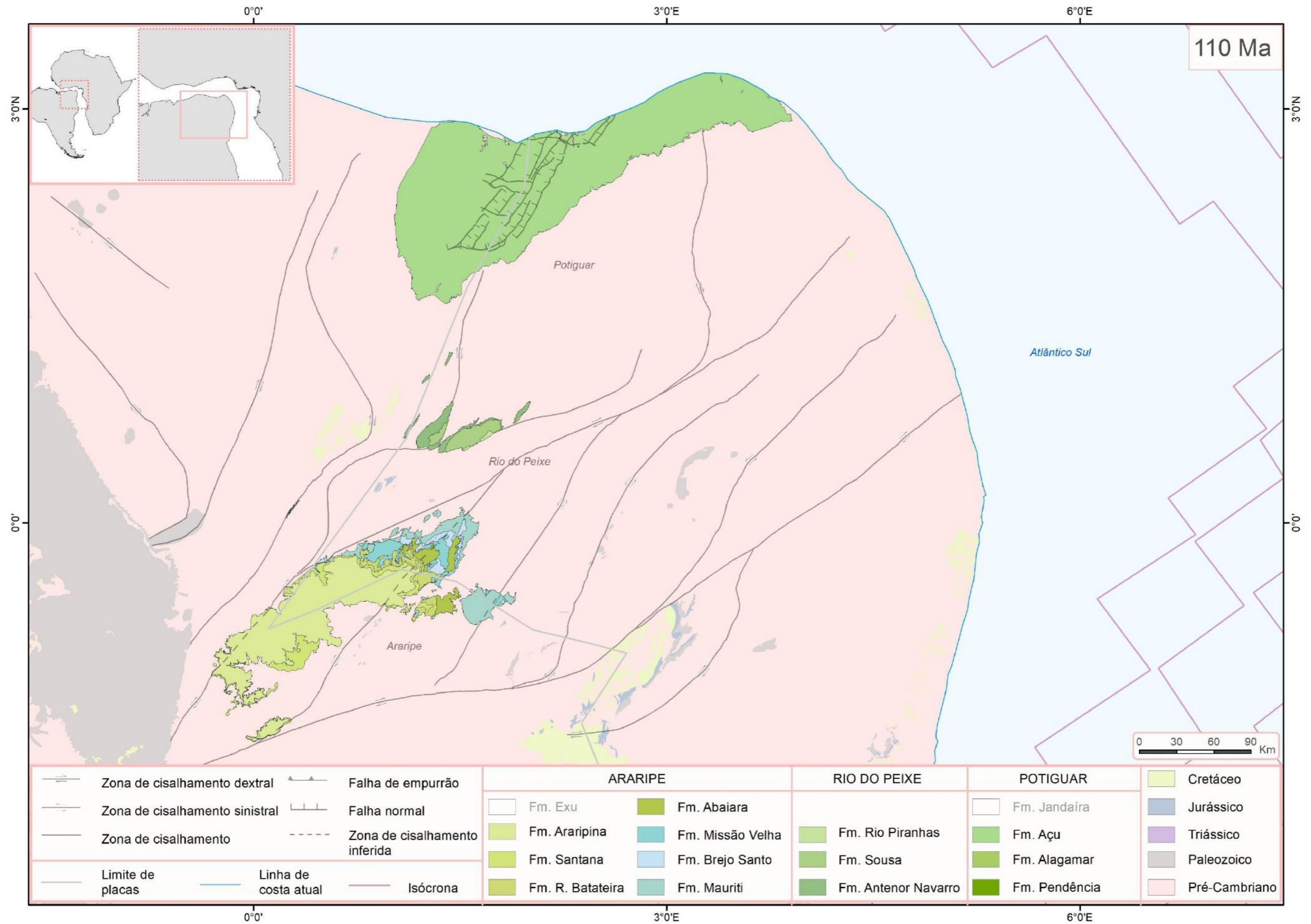


Figura 39. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 110 Ma.

7.7. Reconstrução em 100 Ma

Em 100 Ma (Figura 40) a última formação preservada da Bacia do Araripe já está em plena deposição, sendo crono-correlata à formação Açú, na Bacia Potiguar.

A associação de fácies da Formação Exu é caracterizada como típica de sistemas fluviais entrelaçados, voltando a ter uma deposição similar ao início da formação da bacia (Assine, 2007; Fambrini *et al.*, 2020).

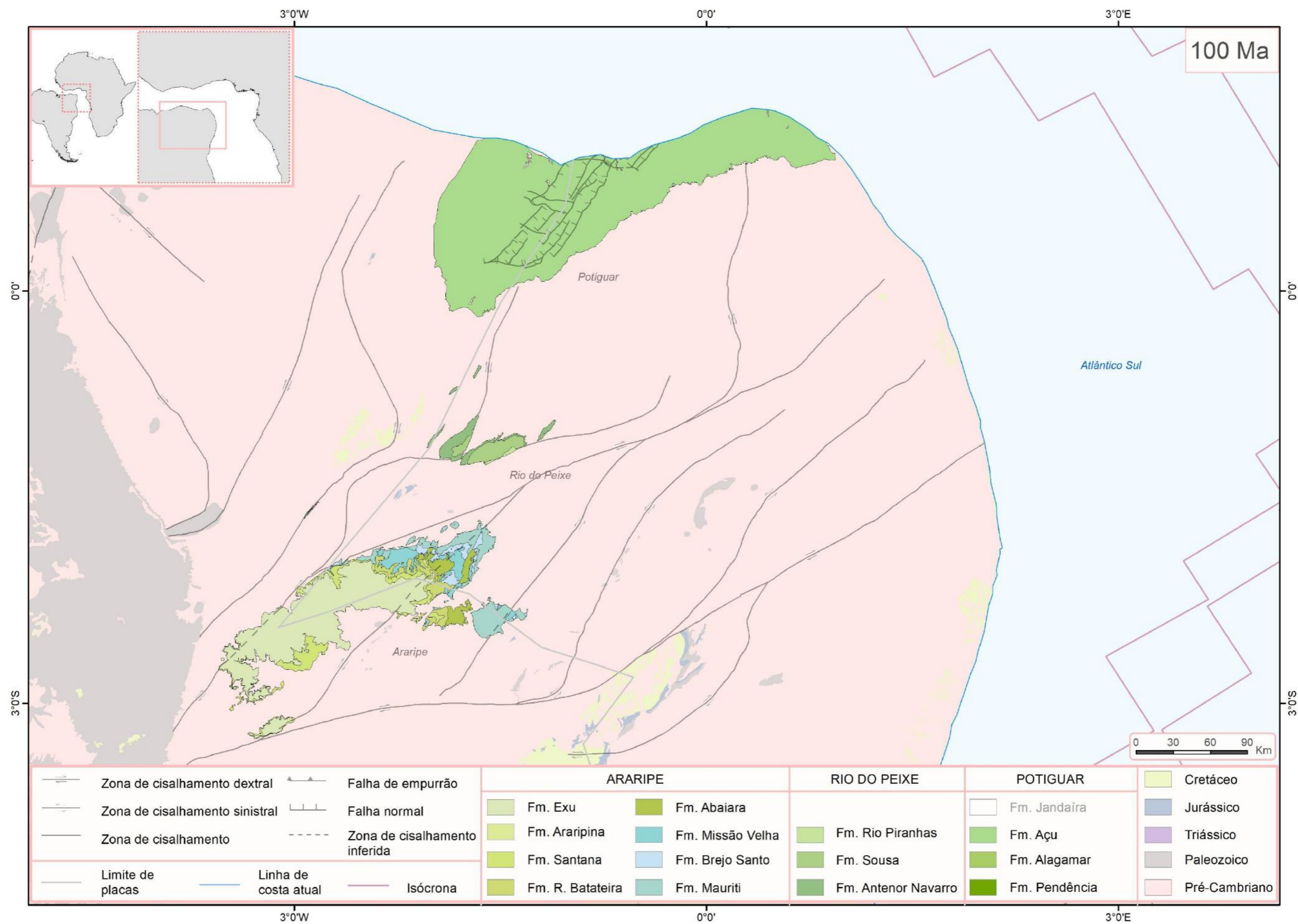


Figura 40. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 100 Ma.

7.8. Reconstrução em 95 Ma

Por último, em 95 Ma (Figura 41), as bacias do Araripe e Rio do Peixe já estão depositadas. Apenas a Bacia Potiguar continua com deposição (e permanece até o Cenozoico).

O início do Cretáceo Superior é marcado pela deposição da última formação cretácea da bacia Potiguar, a Formação Jandaíra. Os registros dessa formação remontam à superfície de inundação máxima, sendo composta majoritariamente por rochas carbonáticas (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

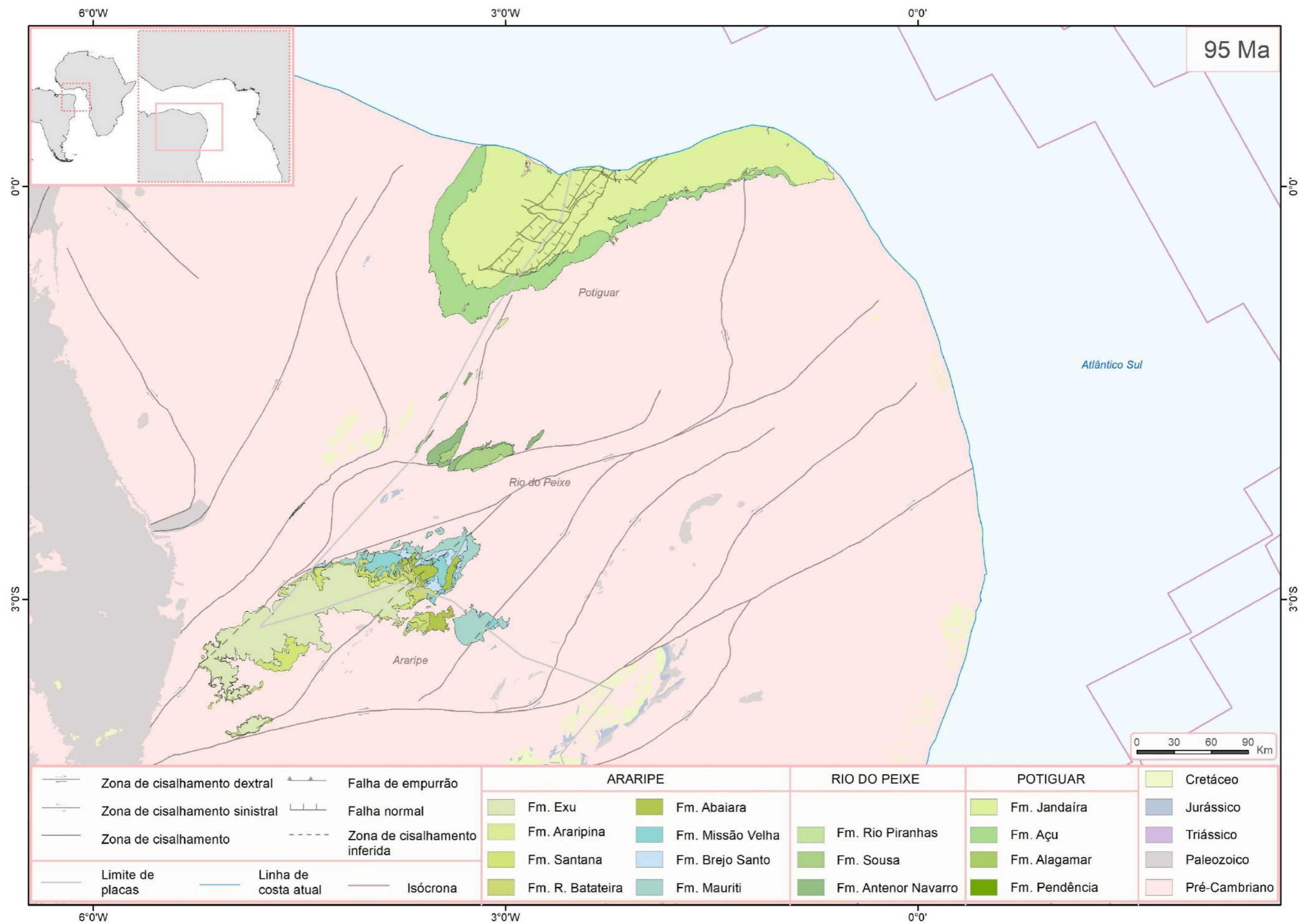


Figura 41. Mapa paleogeográfico do nordeste brasileiro reconstruído para a idade de 95 Ma.

8. DISCUSSÕES

Com os mapas reconstruídos, é possível permitir uma comparação entre formações crono-correlatas das diferentes bacias. Dessa forma, os mapas contribuem para compreender a evolução tectônica das bacias e, conseqüentemente, a evolução dos ambientes deposicionais ao longo do tempo em determinada região.

Entre os principais pontos a serem observados nos mapas é a similaridade deposicional entre a Bacia Rio do Peixe e as formações crono-correlatas da Bacia do Araripe (Figuras 35 e 36). As formações Antenor Navarro (BRP), Sousa (BRP) e Missão Velha (BAr) são descritas como de sistemas fluviais, além de possuírem uma paleocorrente de mesma direção, majoritariamente S-SW (Córdoba *et al.*, 2008; Godot Souza *et al.*, 2022). O mesmo ocorre com as Formações Rio Piranhas (BRP) e Abaiara (BAr), possível de observar, também, na Figura 36. Essas informações ganham um peso maior ao analisar a configuração espacial deposicional. Todas as bacias (incluindo a Bacia Potiguar) estão posicionadas espacialmente em sentido NE-SW (Figuras 36 a 41), o que entra em concordância com a paleocorrente descrita. Essa configuração pode indicar uma possível ligação entre elas, o que é corroborado pelo arcabouço estrutural das três bacias, possuindo um controle majoritariamente NE-SW. Essa interpretação colabora para a ideia de que haveria um sistema de calhas em sentido NNE-SSW que estaria interligando as bacias.

A distribuição espacial das formações da Bacia Potiguar, seguindo o *trend* NE-SW dos grábens, indica que, caso o mar tenha ingressado por essa bacia no sentido do interior do Gondwana, a água teria se aproveitado das calhas estruturais que estariam ligando as bacias. Essa hipótese também é concordante com os fósseis encontrados na Formação Santana que possuem similaridades com os encontrados em Tethys (Maisey, 2000; Brito e Yabumoto, 2011; Arai, 2014, 2016; Lindoso e Carvalho, 2021). Entretanto, um ponto negativo nessa hipótese é o fato de que as idades das formações marinhas das bacias do Araripe e Potiguar não parecem concordar. A Formação Santana (BAr), que carrega os primeiros e únicos registros marinhos da Bacia do Araripe, possui uma idade próxima a 115 Ma (Figura 39), o que não correlaciona perfeitamente com as idades das formações marinhas da Bacia Potiguar. Apesar da Formação Alagamar (BRP) ser a primeira unidade a possuir registros da entrada do mar na Bacia Potiguar e ser considerada mais antiga que a Formação Santana (Figura 36), esses registros marinhos são encontrados nas camadas mais superiores da Formação, sendo, portanto, uma deposição crono-correlata ou mais nova que a deposição marinha na Bacia do Araripe, visto que a deposição da

Formação Alagamar se deu até o início do Albiano (Assine, 2007). Além disso, as formações subsequentes da Bacia Potiguar (Açu e Jandaíra) seguem possuindo registros marinhos, o que não bate com as descrições das formações subsequentes da Bacia do Araripe (Araripina e Exu) e que são crono-correlatas com as formações marinhas da Bacia Potiguar (Figuras 39, 40 e 41).

Dessa maneira, os dados de bibliografia, ao serem interpretados em conjunto com os mapas paleogeográficos, trazem fatores concordantes e, ao mesmo tempo, discordantes com a proposta da entrada do mar através da Bacia Potiguar, deixando ainda em aberto o possível curso da água.

8.1. Correlação com a Bacia do Parnaíba

Uma outra rota de ingressão marinha poderia ser através da Bacia do Parnaíba, que possui uma ampla distribuição da Formação Codó. Para essa discussão, foi gerado um mapa paleogeográfico reconstruído para a idade de 115 Ma, incluindo as formações mesozóicas da Bacia do Parnaíba (Figura 42). Essa idade foi escolhida por ser a idade de deposição da Formação Santana (BAr), utilizada nessa pesquisa como o principal registro marinho no interior do continente.

Para isso, foi utilizado os dados cedidos pelo Dr. Alessandro Palmeira (integrante do Projeto ALAGOAS), que realizou a extrapolação das formações mesozoicas da bacia a través de uma metodologia diferente da que foi implementada nessa pesquisa (Palmeira *et al.* 2022; Palmeira *et al.*, no prelo). Os dados de subsuperfície das formações foram obtidos a partir da interpolação dos dados de poços exploratórios.

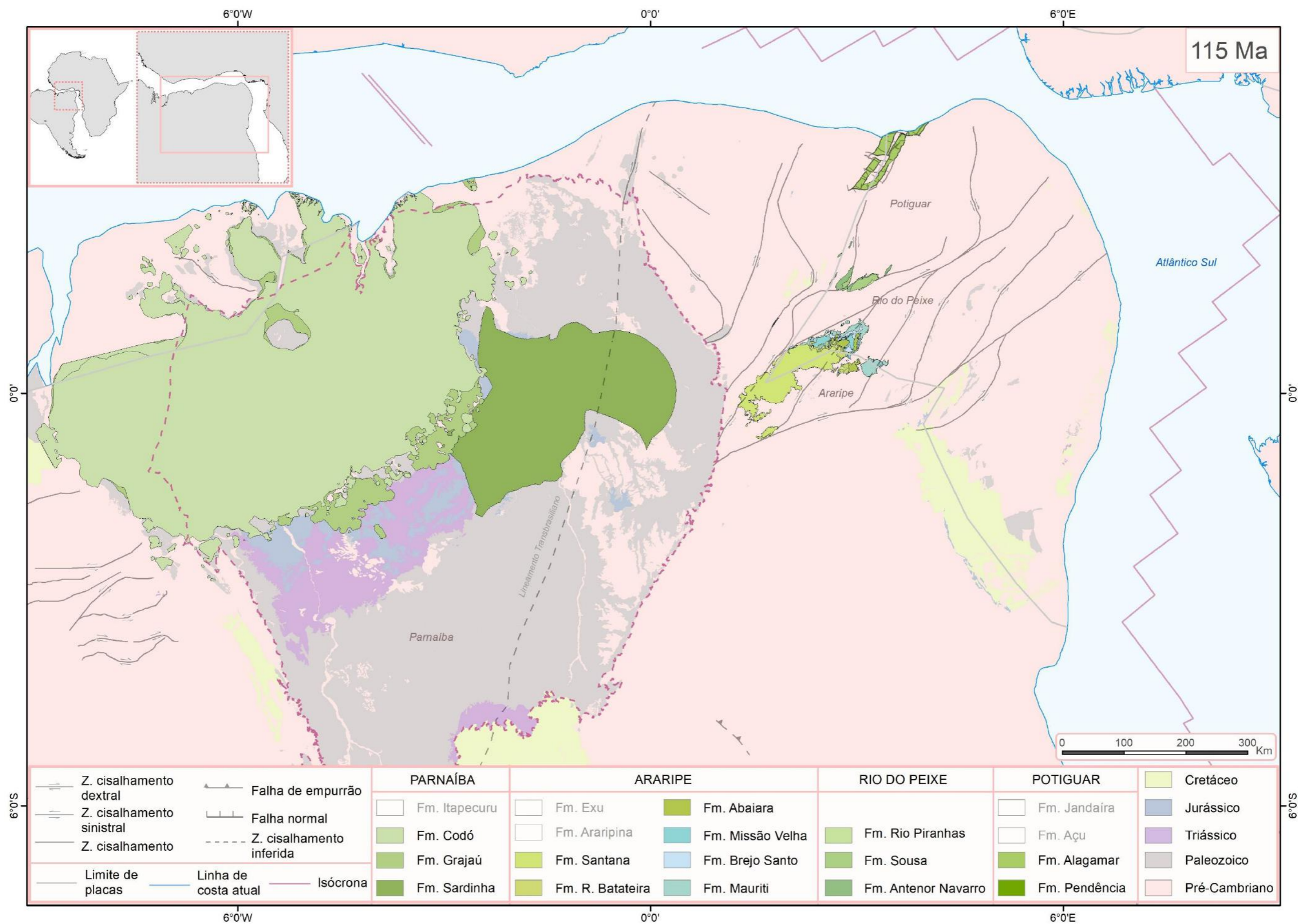


Figura 42. Mapa paleogeográfico do norte-nordeste do Brasil reconstruído para 115 Ma. Foco nas reconstruções das bacias do Parnaíba, Araripe, Rio do Peixe e Potiguar.

Dessa maneira, é possível observar na Figura 42 a presença das formações cretáceas Sardinha, Codó e Grajaú. A Formação Grajaú, crono-correlata às formações Rio da Batateira e Alagamar, é descrita como constituída por arenitos provenientes de depósitos de canal ativo e abandonado, além de lacustre e deltaico (Mendes, 2007; Cruz, 2021). A Formação Codó é composta por calcários e folhelhos betuminosos, formada em ambiente deposicional lacustre (Paz e Rossetti, 2006).

Ao analisar a distribuição espacial da área deposicional das formações sedimentares cretáceas da Bacia do Parnaíba, é perceptível uma concentração maior no extremo oeste/noroeste da bacia, não havendo ocorrências sedimentares em superfície ou subsuperfície próximas das demais bacias analisadas no trabalho, ou seja, na porção leste da Bacia do Parnaíba. Esse fator pode estar ligado a uma não deposição das formações ou a uma total erosão na porção leste da bacia.

Dados de paleocorrente da Formação Codó (crono-correlata à Formação Santana) e da Formação Itapecuru indicam um sentido de fluxo E-SE (Cruz, 2021). Esse fluxo poderia direcionar sedimentos para a Bacia do Araripe. Porém, para isso, seria necessária uma topografia favorável que permitisse uma conexão entre as duas bacias, o que não foi claramente identificado até então. Dados recentes (Assine *et al.*, 2014; Custódio *et al.*, 2017), indicam que não houve uma comunicação topográfica entre as duas bacias, o que impediria o contato entre elas.

É importante ressaltar que os dados obtidos neste trabalho não são suficientes para afirmar o caminho de entrada do mar no continente sul-americano. Ambos os caminhos aqui analisados, com percursos pela porção equatorial do Atlântico Sul, possuem fatores e registros concordantes e discordantes em ambas as hipóteses, sendo, portanto, inconclusivo. A hipótese do percurso pelo sul não foi analisada nesse trabalho.

Porém, os mapas das formações extrapoladas e os mapas paleogeográficos são extremamente importantes para se ter uma visão espacial da distribuição das áreas de sedimentação simultaneamente ao estiramento do Gondwana e posterior abertura do Oceano Atlântico. Esses mapas, integrados com estudos de ambientes deposicionais, paleontológicos, proveniência e paleocorrentes, colaboram efetivamente com interpretações sobre o possível caminho de entrada da água no nordeste do Brasil.

9. CONCLUSÃO

A metodologia do trabalho se mostrou válida ao ilustrar espacialmente, em planta, a paleogeografia do Jurássico e Cretáceo. O manuseio dos dados com mais precisão, a partir do georreferenciamento deles em superfície e subsuperfície, resultou nos mapas de reconstrução quantificados a partir de modelos cinemáticos. Esse tipo de metodologia contribui para estudos de correlação estratigráfica entre bacias e colaborando na organização espacial e informacional dos dados deposicionais das formações sedimentares.

Entre as recomendações, sugere-se que a mesma metodologia seja aplicada para as bacias *offshore* e da contraparte africana, que se comunicam diretamente com as bacias do nordeste brasileiro. Além disso, seria interessante que a metodologia também fosse aplicada para outras bacias que estão envolvidas diretamente com as discussões sobre a entrada do mar no continente, como as bacias do Parnaíba e Tucano-Jatobá. Dessa forma, ao quantificar melhor as bacias sedimentares *onshore* e *offshore*, será possível traçar melhor as possíveis correlações entre as bacias e, assim, supor com maior precisão um provável percurso da entrada do mar durante o processo de rifte e drifte do paleocontinente Gondwana.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1–29.

ARAI, M.; Lana, C.C.; Pedrão, E., 1994. Ecozona *Subtilisphaera* spp.: Registro eocretáceo de um importante episódio ecológico do Oceano Atlântico primitivo. *Acta Geologica Leopoldensia* XVII 39, 521–538.

ARAI, M., 2014. Aptian/Albian Early Cretaceous. Paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian Journal of Geology* 44, 339–350.

ARAI, M., 2016. Reply to the comments of Assine *et al.* (Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective”). *Brazilian Journal of Geology* 46, 9–13.

ASSINE, M.L., 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 22, 289–300.

ASSINE, M.L., 1994. Paleocorrentes e paleogeografia na Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 24, 223–232.

ASSINE, M.L., 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15, 371–389.

ASSINE, M.L.; Perinotto, J.A.J.; Custódio, M.A.; Neumann, V.H.M.L.; Varejao, F.G.; Mescolotti, P.C., 2014. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras* 22, 3–28.

BERTANI, R. T.; Costa, I.G.; Matos, R.M.D., 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: GABAGLIA, G P.R.; MILANI, E.J. (ed.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1990. p. 291-310.

BEURLIN, K., 1966. Novos equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 38, 455–464.

BONIFACIO, J.F., 2020. Análise dos modelos de reconstrução do Gondwana Ocidental: Conexões entre o nordeste do Brasil e noroeste da África. Rio de Janeiro, 2020. 103p. Trabalho

de Conclusão de Curso em Geologia. Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

BRAUN, O.P.G., 1966. Estratigrafia dos sedimentos da parte inferior da região Nordeste do Brasil bacias do Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe (Boletim n. 236). Divisão de Geologia e Mineralogia/DNPM, Rio de Janeiro.

BRITO, P.M.; Yabumoto, Y., 2011. An updated review of the fish faunas from the Crato and Santana formations in Brazil, a close relationship to the Tethys fauna. Bulletin of the Kitakyushu Museum of Natural History and Human History Series: A Natural History 9, 107–136.

BULLARD, E.; Everett, J.E.; Smith, A. G. Fit of the continents around the atlantic. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 258, n. 1088, p. 41–51, 1965.

CARVALHO, I.S., Viana, M.S.S., Lima Filho, M.F., 1995. Os icnofósseis de dinossauros da bacia do Araripe Cretáceo Inferior, Ceará – Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências 67, 433–442.

CARVALHO, I.S.; Melo, J.H.G.; Hasui, Y.; Carneiro, C. D. R.; Almeida, F. F. M.; & Bartorelli, A., 2012. Bacias interiores do Nordeste. Geologia do Brasil. 1ed. São Paulo: Beca Editora.

COIMBRA, J.C.; Arai, M.; Correño, A.L., 2002. Biostratigraphy of lower cretaceous microfossils from the Araripe Basin, northeastern Brazil. Geobios 35, 687–698.

CÓRDOBA, V.C.; Antunes A.F.; Jardim de Sá E.F.; Nunes da Silva A.; Sousa D.C.; Lins F.A.P.L., 2008. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe Nordeste do Brasil: integração de dados a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295_rio_do_peixe_2d. Boletim de Geociências da Petrobras, 16 (1): 53-68.

CRUZ, K.A.C, 2021. Proveniência sedimentar dos arenitos do Jurássico e do Cretáceo (formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru) da porção centro-oeste da Bacia do Parnaíba, região de Grajaú, Maranhão. Rio de Janeiro, 2021. 172p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

CUSTÓDIO, M.A.; Quaglio, F.; Warren, L.V.; Simões, M.G.; Fürsich, F.T.; Perinotto, J.A.J.; Assine, M.L., 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation Araripe

Basin, sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingression in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology* 359, 1–15.

DARROS DE MATOS, R. M.; Krueger, A.; Norton, I.; & Casey, K., 2021. The fundamental role of the Borborema and Benin–Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous Rift system. *Marine and Petroleum Geology*, 127, 104872.

DU TOIT, A. L., 1937. Our wandering continents: a hypothesis of continental drifting.

FAMBRINI, G.L.; Silvestre, D.C.; Barreto Junior, A.M.; Silva-Filho, W.F., 2020. Estratigrafia da Bacia do Araripe: estado da arte, revisão crítica e resultados novos. *Geologia USP Série Científica* 20, 16–212.

GODOT SOUZA, J.F.; Isozaki, Y.; Tsutsumi, Y.; *et al.*, 2022. Provenance analysis of the Araripe intracontinental basin, northeast Brazil – 70 Routes for proto-Atlantic marine incursions in northwest Gondwana. *Sedimentary Geology*, v. 440, p. 106243.

GÓES, A. M. O.; & FEIJÓ, F. J., 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p. 57 – 67.

GOLDBERG, K.; Premaor, E.; Bardola, T.; Souza, P.A., 2019. Aptian marine ingression in the Araripe Basin: implications for paleogeographic reconstruction and evaporite accumulation. *Marine and Petroleum Geology* 107, 214–221.

HEINE, C.; Zoethout, J.; Müller, R. D., 2013. Kinematics of the South Atlantic rift. *Solid Earth*, v. 4, n. 2, p. 215–253.

KROTH, M.; Borghi, L.; Bobco, F.E.R.; *et al.*, 2021. Aptian shell beds from the Romualdo Formation (Araripe Basin): Implications for paleoenvironment and paleogeographical reconstruction of the Northeast of Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 426, p. 106025.

LIMA, M.R., 1978. *Palinologia da Formação Santana Cretáceo do Nordeste do Brasil*. Universidade de São Paulo, São Paulo (335 pp).

LINDOSO, R.M.; Carvalho, I.S., 2021. The Cretaceous fishes of Brazil: a paleobiogeographic perspective. In: Pradel, A., Denton, J.S.S., Janvier, P. (Eds.), *Ancient Fishes and Their Living*

Relatives: A Tribute to John G. Maisey. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, Germany, pp. 227–232.

LOURENÇO, M.C.M., 2020. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe, NE do Brasil: porção NW do semi-gráben de Sousa. 2020. 91f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

MAISEY, J.G., 2000. Continental break up and the distribution of fishes of Western Gondwana during the Early Cretaceous. *Cretaceous Research* 21, 281–314.

MARTIN, A. K.; Hartnady, C. J. H.; Goodlad, S. W., 1981. A revised fit of South America and South-Central Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 54, n. 2, p. 293–305.

MENDES, M.S., 2007. Análise estratigráfica do intervalo formacional Grajaú-Codó (Aptiano) da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 147p.

MOULIN, M.; Aslanian, D.; Unternehr, P., 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, v. 98, n. 1–2, p. 1–37.

MÜLLER, R. D.; Zahirovic, S.; Williams, S. E.; Cannon, J.; Seton, M.; Bower, D. J.; *et al.*, 2019. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic. *Tectonics*, 38(6), 1884-1907.

NAVA, Alejandro., 1998. La inquieta superficie terrestre. Fondo de Cultura Económica.

NETO, O. P.; Soares, U. M.; Silva, J. G. F.; Roesner, E. H.; Florencio, C. P.; & Souza, C. A. V., 2007. Bacia potiguar. *Bol Geoc PETROBRAS*, 15(2), 357-369.

NUNES DA SILVA, A., 2009. Arquitetura litofácies e evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe Nordeste do Brasil (Doctoral dissertation, MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 108p).

NÜRNBERG, D.; Müller, R. D., 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics*, v. 191, n. 1–2, p. 27–53.

- OSSETTI, D. F.; Truckenbrodt, W.; Santos Junior, A. E., 2001. Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001.
- PALMEIRA, A. F.; Schmitt, R. S.; Assis, A.P.; Figueiredo, J. J. P.; D´Souza, L. S.; Soares M. T. C., 2022. Uso de Técnicas de Modelagem Geoestatística para a Representação Tectono-Sedimentar das Unidades Cretáceas da Bacia do Parnaíba (Brasil). In: IX Simpósio de Quantificação em Geociências, Campinas – SP. Anais, SGB, p.2.
- PALMEIRA, A. F.; Schmitt, R. S.; Assis, A.P.; Figueiredo, J. J. P.; D´Souza, L. S.; Soares M. T. C., Gama, M. F. P. 3D Modeling Techniques Applied for Sequential Restoration of Parnaíba Basin, Brazil.(Mesozoic Sequence). (no prelo).
- PAULA-FREITAS, A. B. L., 2010. "Análise estratigráfica do intervalo siliciclástico aptiano da Bacia do Araripe (Formação Rio da Batateira)." Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil (MSc Thesis), 2010.
- PAZ, J.D.S., Rossetti, D.F. 2006. Paleohydrology of an Upper Aptian lacustrine system from northeastern Brazil: Integration of facies and isotopic geochemistry. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(2): 247-266.
- PONTE, F.C.; Appi, C.J., 1990. Proposta de Revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. *Proceedings of the 36th Brazilian Congress of Geology* 1 pp. 211–226 Natal, Rio Grande do Norte, Brazil.
- RAPOZO, B. F., 2020. Evolução tectono-estratigráfica da porção central da Bacia do Rio do Peixe, NE do Brasil. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 106p.
- REEVES, C. V.; Teasdale, J. P.; Mahanjane, E. S., 2016. Insight into the eastern margin of Africa from a new tectonic model of the Indian Ocean. *Geological Society Special Publication*, v. 431, n. 1, p. 299–322.
- RICHETTI, P. C.; Schmitt, R. S.; Reeves, C., 2018. Dividing the South American continent to fit a Gondwana reconstruction: A model based on continental geology. *Tectonophysics*, v. 747–748, n. October 2017, p. 79–98.

- RICHETTI, P. C.; Zwaan, F., Schreurs, G.; Schmitt, R. S.; & Schmid, T. C., 2022. Analogue modelling of basin inversion: the role of oblique kinematics and implications for the Araripe Basin (Brazil). *EGUsphere*, 1-33.
- RIOS-NETTO, A.M.; Regali, M.D.S.P.; Carvalho, I.S.; & de Freitas, F.I., 2012. "Palinoestratigrafia do intervalo Alagoas da Bacia do Araripe, nordeste do Brasil." *Revista Brasileira de Geociências* 42.2: 331-342.
- SANTOS, E.J.; Van Schmus, W.R.; Kozuch, M.; Brito Neves, B.B., 2010. The Cariris Velhos tectonic event in northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 29, 61–76.
- SARAIVA, A. A. F.; Hessel, M. H.; Guerra, N. C., & Fara, E., 2007. Concreções calcárias da Formação Santana, Bacia do Araripe: uma proposta de classificação. *Estudos Geológicos*, 17(1), 40-57.
- SILVA, J. G. F. D.; Córdoba, V. C.; & Caldas, L. H. D. O., 2014. Proposta de novas unidades litoestratigráficas para o Devoniano da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 44, 561-578.
- VAN DER VOO, R., 1987. Apparent polar wander. In: *Structural Geology and Tectonics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 15–18.
- VAZ, P.T.; Rezende, N.G.A.M.; Wanderley Filho, J.R.; Silva Travassos, W.A., 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15: 253-263.
- VIANA, M., 1998. The Proto-Atlantic Albian way and its influence on the South American African life. *Boletín de la Asociación Paleontológica del Golfo San Jorge* 2, 32–34.
- WEGENER, A., 1924. *The origin of continents and oceans*, traduzido por JGA Skerl. Dutton and Co., New York.