

O arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe, Província Borborema, baseado em dados aeromagnetométricos

*The structural framework of the Araripe Sedimentary Basin,
Borborema Province, based on aeromagnetic data*

Clyviuk Renna Camacho^{1,2}, Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e Sousa³

¹Departamento de Geologia, Programa de Pós-graduação em Geologia, Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental, Laboratório de Hidrogeologia, Universidade Federal do Ceará - UFC, Avenida da Universidade, 2.853, Bloco 912, CEP 60020-181, Fortaleza, CE, BR (clyviuk.camacho@cprm.gov.br)

²Diretoria de Hidrogeologia e Gestão Territorial - DHT, Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Belo Horizonte, MG, BR

³Departamento de Sensoriamento Remoto e Geofísica - DISEGE, Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Fortaleza, CE, BR (frederico.oliveira@cprm.gov.br)

Recebido em 07 de março de 2016; aceito em 06 de setembro de 2017

Resumo

Este trabalho apresenta uma interpretação atualizada da estruturação interna da Bacia Sedimentar do Araripe, localizada ao sul da porção setentrional da Província Borborema, por meio do processamento e da análise de dados aerogeofísicos de magnetometria pertencentes à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. Essa bacia é reconhecida como um conjunto de meio-grábens assimétricos, fragmentados por altos de embasamento e complexos sistemas de falhas e lineamentos E-W a NE-SW, associados ao *trend* estrutural do Orógeno Borborema, e NW-SE, relacionados a processos extencionais cuja evolução poderia estar associada ao *rift-valley* na extremidade norte do *rift* abortado da Bacia do Recôncavo. A partir da imagem geofísica do campo magnético anômalo foram extraídas suas derivadas de primeira ordem nas direções x, y, z, seu gradiente horizontal total, sua amplitude do sinal analítico (ASA) e inclinação do sinal analítico. A deconvolução de Euler foi aplicada ao *grid* ASA, o que permitiu uma aproximação da posição horizontal e estimativa da profundidade do topo das principais fontes magnéticas. A análise conjunta dos diversos mapas gerados permitiu uma interpretação regional dos domínios e lineamentos magnéticos, os quais foram associados às principais estruturas em subsuperfície que compõem o arcabouço da bacia. Os resultados demonstram que a compartimentação estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe é muito mais complexa do que a descrita anteriormente por outros autores. O padrão estrutural da bacia apresenta variação lateral, de W para E, conforme demonstrado pela divisão dos domínios magnéticos, indicando haver variações substanciais na espessura das rochas sedimentares, com áreas mais espessas a E e mais rasas a W.

Palavras-chave: Bacia do Araripe; Aeromagnetometria; Deconvolução de Euler; Arcabouço estrutural.

Abstract

This paper aims an updated interpretation of the Araripe Sedimentary Basin internal structure, located in the south portion of the Borborema Province, Brazilian northeast, through aeromagnetic data interpretation, provided by the Geological Service of Brazil. This basin is recognized as a set of asymmetrical half-grabens fragmented by basement highs, complex faults system and E-W to NE-SW lineaments, those associated with the Borborema Orogen trend, and NW-SE lineaments, related to extensional processes whose evolution could be associated to the Reconcavo Basin aborted-rift system. From the geophysical map of total magnetic intensity, the first order derivatives were extracted the in the x, y, z directions; and the total horizontal derivative, the analytic signal amplitude (ASA) and the tilt derivative were obtained. The Euler deconvolution was applied to the ASA grid, allowing an estimation of the depth and horizontal position of the top of the main anomalous magnetic sources. The joint analysis of the various maps made possible the interpretation of magnetic domains and lineaments, which were associated with the main subsurface geological structures that make up the structural framework of the basin. The structural pattern of the basin shows remarkable lateral variation, from W to E, as shown by the division of the magnetic domains, indicating substantial variations in the thickness of the sedimentary rocks above the basement.

Keywords: Araripe Basin; Airborne magnetometry; Euler deconvolution; Structural framework.

INTRODUÇÃO

A Bacia Sedimentar do Araripe localiza-se ao sul da porção setentrional da Província Borborema, sul do estado do Ceará, na divisa entre os estados de Pernambuco, Paraíba e Piauí (Figura 1). Trata-se da mais extensa bacia interior do nordeste brasileiro (Assine, 2007).

Os processos de ruptura do supercontinente Gondwana Ocidental levaram à abertura do Oceano Atlântico Sul, e à consequente formação dos continentes Sul-Americano e Africano. Tais processos de ruptura ocorridos no Eocretáceo originaram as bacias interiores do nordeste brasileiro, sendo as mais significativas a Bacia Sedimentar do Araripe, a Bacia Sedimentar do Rio do Peixe e a Bacia Sedimentar de Iguatu, arranjadas ao longo do *trend* Cariri-Potiguar (Matos, 1992).

Os primeiros estudos geológicos sobre a Bacia Sedimentar do Araripe começaram ainda no século XIX, relacionados à ocorrência de fósseis na região. Desde então, diversos trabalhos foram realizados com o intuito de ampliar a compreensão sobre a gênese e o desenvolvimento dessa bacia. Um histórico detalhado dos principais

estudos feitos na Bacia do Araripe pode ser encontrado em Ponte e Ponte-Filho (1996).

No que se refere à compartimentação estrutural e às estimativas de profundidade máxima da Bacia do Araripe, alguns desses estudos merecem destaque:

1. Foi realizada uma série de levantamentos magnetométricos e gravimétricos na região do Araripe por Oliveira (1983), Rand (1983), e Rand e Manso (1984), esse último propondo uma compartimentação em duas sub-bacias, Cariri (leste) e Feitoria (oeste), em função da identificação de anomalias Bouguer na área de estudos com contrastes relevantes em comparação com a densidade crustal média de referência, além de estimar uma espessura máxima de 2.400 m para o pacote sedimentar;
2. Matos (1992) fez uso de um maior conjunto de dados e atualizou essa estimativa para 1.800 m de espessura;
3. Ambas as estimativas foram revisadas por Ponte e Ponte Filho (1996), que correlacionaram dados de poços estratigráficos profundos — destaque para os poços 2-AP1-CE (1.498 m), 4-BO-1-PE (915 m) e PS-12-CE (330 m) —, resultados de perfilagem geofísica (raios gama

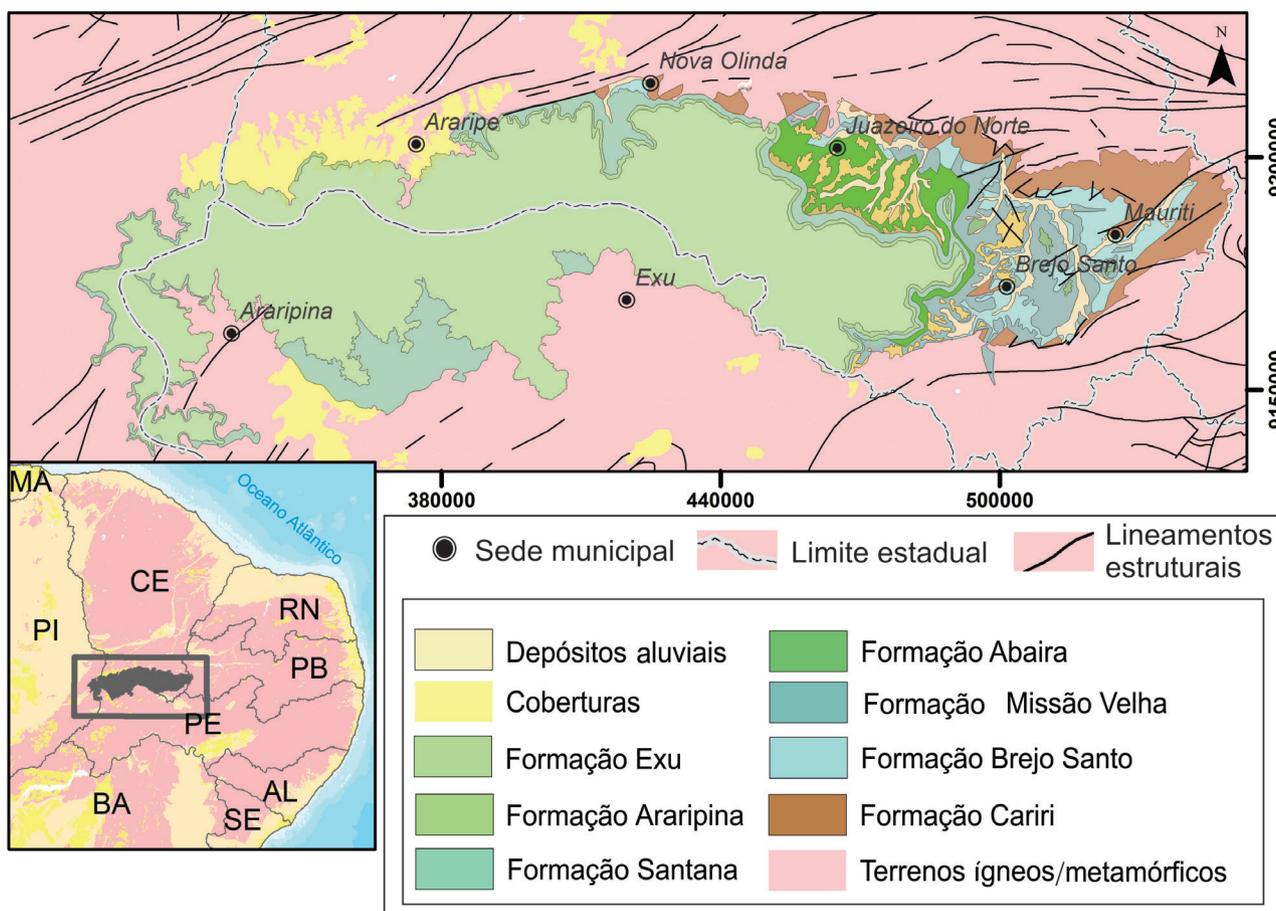


Figura 1. Localização e mapa geológico da Bacia Sedimentar do Araripe.

e resistividade), e cerca de 10 perfis sísmicos de reflexão para propor uma atualização no entendimento do arcabouço estrutural da Bacia do Araripe;

4. Assine (2007) utilizou a descrição dos poços e os dados de perfilagem geofísica para descrever a estratigrafia da região da Bacia Sedimentar do Araripe;
5. Castro e Castelo Branco (1999) trabalharam com a inversão de dados gravimétricos, utilizando um maior conjunto de dados e um ajuste mais acurado nos contrastes de densidade ($-0,50 \text{ g/cm}^3$) em relação a Rand e Manso (1984) e Matos (1992). Com isso, obtiveram estimativas de profundidades próximas aos valores dos poços estratigráficos conhecidos;
6. Marques et al. (2014) compararam dados gravimétricos terrestres e de satélite, além de imagem SRTM e medidas de campo para propor uma compartimentação estrutural com *trend* diferente daqueles de Ponte e Ponte-Filho (1996) e Assine (2007), além de defender a ocorrência de um processo de inversão durante a evolução tectônica recente da Bacia do Araripe.

Entre os diversos métodos geofísicos possíveis, o presente trabalho utiliza a magnetometria em função da sua capacidade de identificação de lineamentos mesmo em subsuperfície. Tais lineamentos podem ser associados a estruturas como zonas de cisalhamento, falhas e diques, por exemplo. Sendo assim, por meio do processamento e da interpretação dos dados aerogeofísicos de

magnetometria, este trabalho pretendeu contribuir para uma melhor compreensão do arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe.

Geologia

O embasamento sob a Bacia Sedimentar do Araripe é constituído por terrenos cristalinos pré-cambrianos, contendo rochas magmáticas e metamórficas, litologias pertencentes a diferentes domínios tectônicos do sistema orogênico Borborema (Delgado et al., 2003). Os terrenos do embasamento formam um conjunto de corpos lenticulares justapostos e sigmoides, separados por zonas de cisalhamento transcorrentes (Carvalho et al., 2012).

A forma, o tamanho, a geometria e o estilo de formação da bacia são similares a modelos preditivos de bacias do tipo *pull-apart* (Silva, 1983). Matos (1992) descreve as bacias intracontinentais eocretácias do nordeste brasileiro com uma geometria controlada por zonas de cisalhamento proterozoicas de direção NE-SW. Segundo esse autor, a Zona de Cisalhamento Patos (ZCP), composta por uma série de falhas, apresenta uma geometria sigmoidal e, durante o Cretáceo, sofreu uma distensão de direção NW-SE, transformando as falhas, inicialmente transpressionais, em falhas normais, dando origem às bacias interiores do nordeste (Figura 2).

A seqüência sedimentar que compõe a bacia apresenta discordâncias regionais e hiatos deposicionais (Ponte

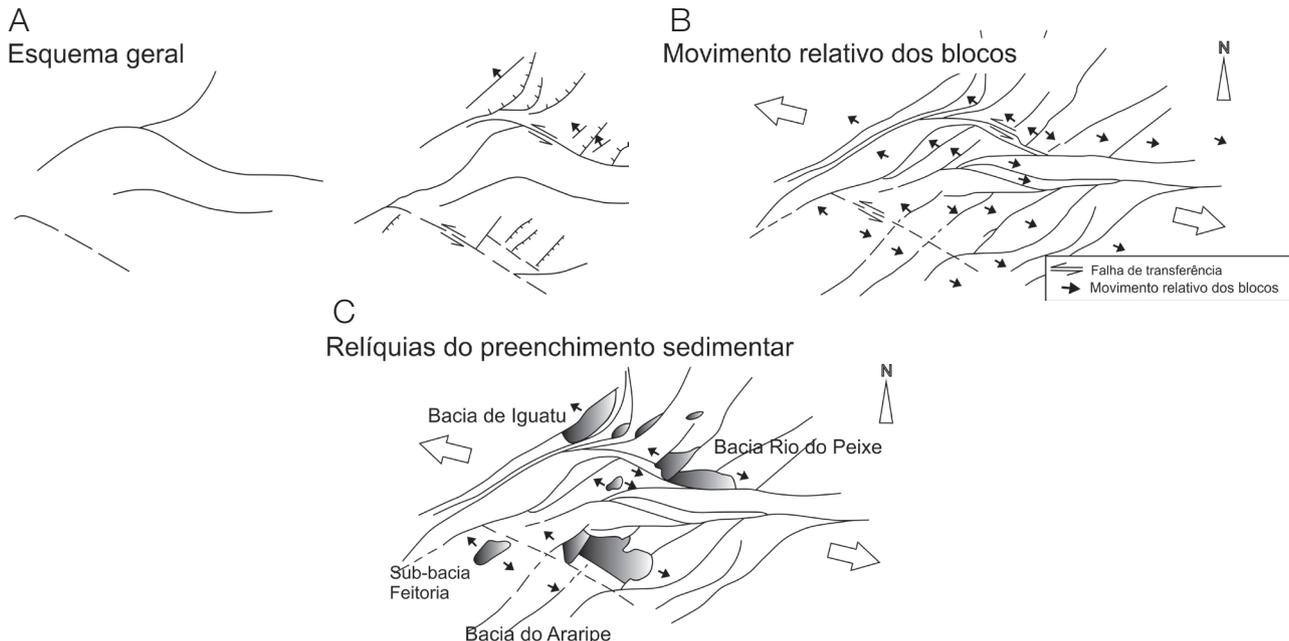


Figura 2. Modelo de evolução da bacia (modificado de Matos, 1992). Esforços NW-SE associados a falhas e zonas de cisalhamento preexistentes deram origem às bacias interiores do nordeste. (A) Esquema geral; (B) movimento relativo dos blocos; (C) relíquias do preenchimento sedimentar.

et al., 1991), que segmentam o registro sedimentar. Os materiais e processos que formaram a bacia a dividem em uma coluna estratigráfica com quatro pulsos (Assine, 2007): o primeiro, sequência paleozoica, é composto pela formação Cariri (arenitos e ortoconglomerados), com origem nas cinéclises intracratônicas e formada no período Ordoviciano; o segundo, a supersequência pré-*rift*, formações Brejo Santo (folhelhos e arenitos) e Missão Velha (arenitos), do período Jurássico Superior, é formado em um contexto de subsidência mecânica produzido por estiramento litosférico visco-elástico; o terceiro, supersequência *rift*, constituída pela Formação Abaiara (folhelhos, siltitos, arenitos e conglomerados), com idade no Cretáceo Inferior, foi formado por uma tectônica rúptil; por fim, o quarto pulso, a supersequência pós-*rift*, dividido em sequências K40-K60, representadas pelas formações Barbalha (conglomerados, folhelhos e arenitos) e Santana (calcários, siltitos, argilitos, gipsita e anidrita), com tectônica de subsidência flexural e formada durante o Eocretáceo; e K70-K80, formações Araripina (folhelhos e arenitos) e Exu (arenitos), com tectônica interpretada por

um soerguimento epirogênico diferenciado, apresentando basculamento para W, com formação desde o Eocretáceo até o Neocretáceo.

A Figura 3 mostra o perfil do poço 2AP-1-CE descrito por Ponte e Ponte Filho (1996), que atingiu o embasamento a 1.497 m ao lado da coluna litoestratigráfica descrita por Assine (2007) e da perfilagem de raios gama.

Ponte e Ponte Filho (1996) propuseram uma estruturação para a Bacia Sedimentar do Araripe baseada em dados geofísicos e perfuração de poços, o que resultou na melhor representação estrutural descrita para a bacia até então. Esses autores subdividem a bacia em: Sub-bacia Leste ou Sub-bacia do Cariri e Sub-bacia Oeste ou Sub-bacia de Feitoria, separadas pelo alto estrutural denominado de *horst* de Dom Leme. A bacia é composta então por grábens assimétricos com direção preferencial NE-SW, com falhamentos orientados em três direções principais: NE, E-W e NW.

A arquitetura interna da Bacia Sedimentar do Araripe pode ser descrita por dois compartimentos superpostos e

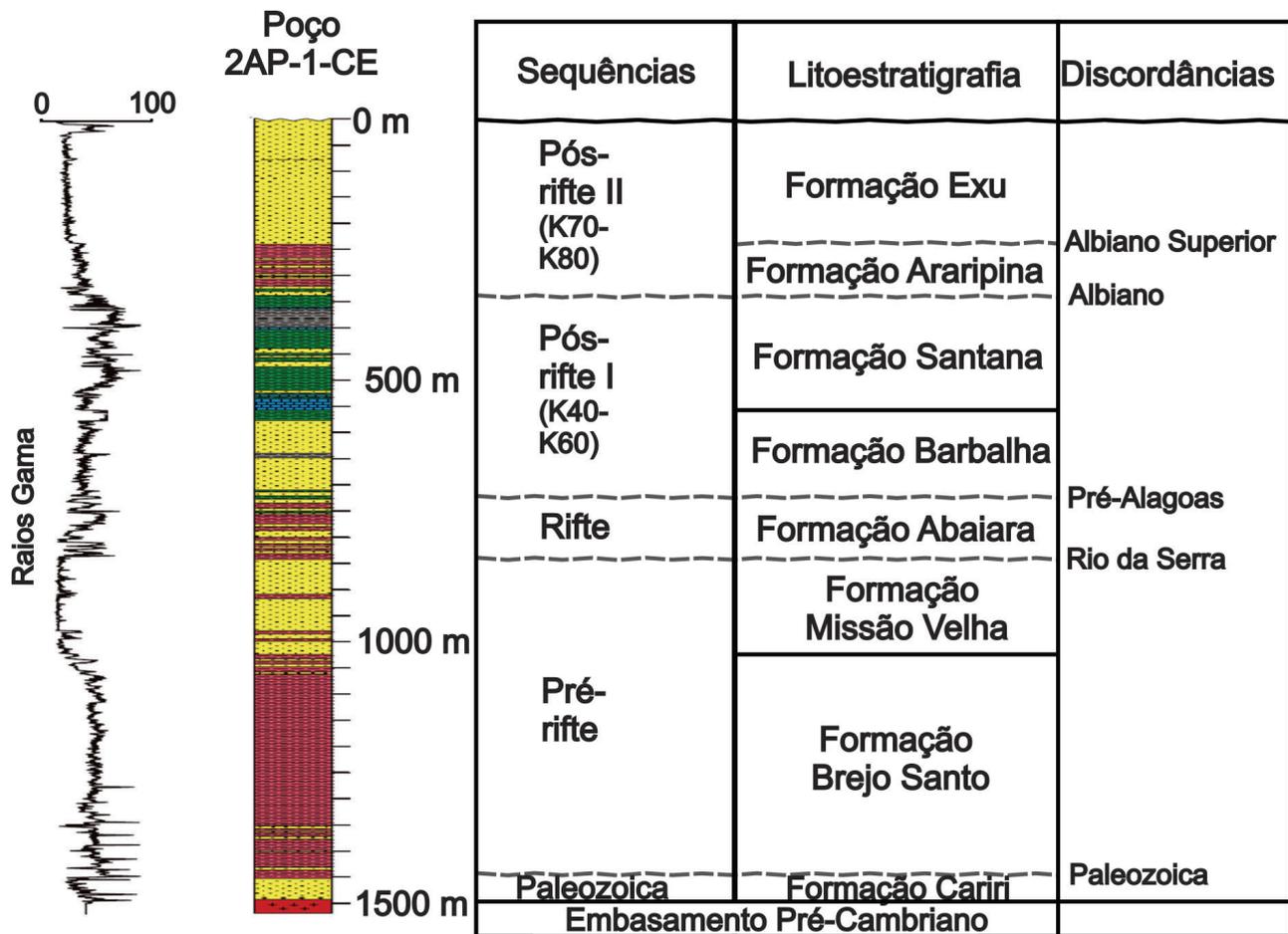


Figura 3. Perfil do poço 2AP-1-CE descrito por Ponte e Ponte-Filho (1996), associado à coluna litoestratigráfica, modificado da proposta de Assine (2007).

de estilos estruturais distintos (Ponte e Ponte Filho, 1996). O compartimento inferior, caracterizado por bacias do tipo *rift*, divididas internamente por blocos estruturais (grábens e *horsts*), e o compartimento superior, representado pela cobertura tabular que constitui a Chapada do Araripe (Veríssimo e Aguiar, 2005).

No compartimento inferior ocorre um conjunto de meio-grábens assimétricos, fragmentados por altos de embasamento e complexos sistemas de falhas e lineamentos E-W a NE-SW, associados ao *trend* estrutural do Orógeno Borborema, e NW-SE, relacionados a processos extencionais cuja evolução poderia estar relacionada ao *rift-valley* na extremidade norte do *rift* abortado da Bacia do Recôncavo (Silva, 1988). No compartimento superior as camadas não apresentam uma estruturação aparente. Alguns autores, como Marques et al. (2014) e Silva et al. (2003), advogam a existência de movimentação compressional na bacia, reativando estruturas pre-existentes e mantendo um *trend* estrutural semelhante ao que as originou.

Entre as estruturas geológicas presentes na região de estudo, correlacionadas à bacia, a ZCP merece destaque. É uma feição regional com traçado levemente curvilíneo (Angelim et al., 2004), onde seu maior desvio está no setor oeste (Corsini et al., 1996), região sob a Bacia Sedimentar do Araripe em que a zona de cisalhamento desenvolve um grande “S”, iniciando com traçado E-W e seguindo uma inflexão para NE, e retornando à direção do traçado inicial na porção norte da bacia. A ZCP apresenta uma curva convergente, gerando uma estrutura de ejeção, ou duplex, com caráter de flor positiva (Hasui, 2012). Viegas (2013) descreve a história deformacional da ZCP como uma evolução diacrônica, em que a porção sul apresenta idades mais recentes em relação à porção norte. A ZCP representa uma estrutura pós-colisional, gerada após a colagem de blocos crustais, provavelmente como resultado da transferência progressiva de esforços

colisionais em deslocamentos transcorrentes durante o evento Brasileiro.

Ponte e Ponte Filho (1996) propuseram uma estruturação para a bacia baseada em dados geofísicos e perfuração de poços, o que resultou na melhor representação estrutural descrita para a bacia até então (Figura 4).

MÉTODOS

Os dados geofísicos utilizados foram retirados da base de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), referentes aos projetos aerogeofísicos PE/PI (2006), Novo Oriente (2009) e PB/RN/PE/CE (2010), realizados pelo consórcio Lasa Ltda. e Prospectors Ltda. O campo geomagnético na área de estudo tem intensidade aproximada de 24.000 nT, inclinação e declinação magnéticas estimadas em -20.1 e -21.87° , respectivamente. A altura de voo foi fixada em 100 m, o espaçamento entre as linhas de voo (N-S) em 500 m e as linhas de controle (E-W) em 5.000 m. O sistema aeromagnético utilizado consiste em um sensor de vapor de césio modelo Geometrics G-822-A (tipo *stinger*) acoplado à cauda da aeronave. As leituras do magnetômetro foram realizadas a cada 0,1 segundo, o que equivale, para a velocidade média de 270 km/h da aeronave, a aproximadamente 7,5 m no terreno investigado.

Os dados foram processados com o uso do *software* Oasis Montaj, versão 9.1, da Geosoft™. Foi aplicada a remoção do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) aos dados, resultando em um canal no *database* referente às anomalias magnéticas crustais. O método de interpolação bidirecional foi utilizado nesses dados, com célula de um quarto do espaçamento entre as linhas de voo (125×125 m). Esse método é amplamente aplicado a dados adquiridos de forma orientada porque é inerente a esse interpolador reforçar as tendências perpendiculares à direção das

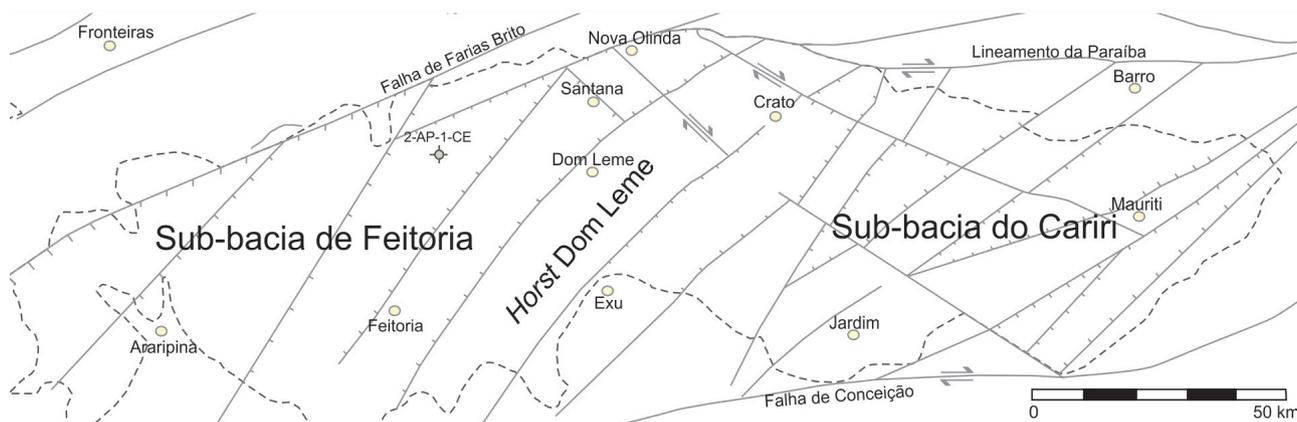


Figura 4. Estruturação interna da Bacia Sedimentar do Araripe proposta por Ponte e Ponte-Filho (1996) com a localização do poço 2-AP-1-CE, modificado.

linhas de voo, diminuindo a presença de ruídos no dado. O *grid* resultante representa o campo magnético anômalo (CMA), o qual foi devidamente filtrado para remoção de ruídos relacionados à direção de voo por meio da aplicação do filtro cosseno direcional, com azimute $\alpha = 0$, paralelo à linha de voo.

A partir do *grid* CMA foram extraídas as derivadas de primeira ordem nas direções x , y , z . Em seguida, foi obtido o gradiente horizontal total (GHT), cujo efeito é um realce que provoca máximos nas bordas e mínimos relativos nos centros dos corpos anômalos (Cordell e Graunch, 1985). A Equação 1 traz a formulação básica do GHT:

$$GHT = \left[\left(\frac{\partial (CMA)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial (CMA)}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

A amplitude do sinal analítico (ASA) (Nabighian, 1972; Roest et al., 1992) é obtida pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos três gradientes ortogonais — derivados do campo magnético nas direções x , y , z —, conforme Equação 2. Essa técnica de realce maximiza a amplitude nas bordas, com mínimos relativos nos centros dos corpos causadores das anomalias magnéticas (Ferreira et al., 2010).

Discussões sobre o grau de independência da ASA em relação à inclinação magnética são encontradas em diversos trabalhos, avaliando que a ASA é uma boa alternativa em relação à redução ao polo para regiões de baixas latitudes ou em terrenos onde há forte magnetização remanente (Keating e Pilkington, 2004; Verduzco et al., 2004; Li, 2006; Ferreira et al., 2010).

$$ASA = \left[\left(\frac{\partial (CMA)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial (CMA)}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial (CMA)}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

A inclinação do sinal analítico (ISA) (Miller e Singh, 1994) é um método de realce do CMA que tem como atributo equalizar as amplitudes para um mesmo patamar, posicionando as anomalias sobre os centros das fontes magnéticas, independente de sua profundidade (Ferreira et al., 2010). A Equação 3 apresenta a expressão matemática da ISA. Ferreira et al. (2010) entendem que essa característica faz da ISA um bom marcador de centros de corpos magnéticos.

$$ISA = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial CMA}{\partial x}}{GHT} \right) \quad (3)$$

A aplicação da equação homogênea de Euler (ou deconvolução de Euler) como uma ferramenta de interpretação de campos potenciais tem tido vários avanços significativos, desde o trabalho de Thompson (1982). A seguir, a expressão

matemática da deconvolução de Euler (Equação 4), conforme Reid et al. (1990):

$$(x - x_0) \frac{\delta y}{\delta x} + (y - y_0) \frac{\delta y}{\delta x} + (z - z_0) \frac{\delta y}{\delta x} = n(B - T) \quad (4)$$

onde:

x_0, y_0, z_0 : posição da fonte anômala;

B: campo magnético regional;

T: campo magnético anômalo; e

n: índice estrutural.

A profundidade estimada do topo de uma dada fonte magnética é derivada a partir do campo magnético e de seus gradientes, e o grau de homogeneidade da equação de Euler é expresso como um “índice estrutural”, um fator exponencial que corresponde à taxa de decaimento da anomalia magnética com a distância entre a fonte e o ponto de medida, também relacionado à forma geométrica da fonte anômala (Reid et al., 1990; Barbosa e Silva, 2005). A Tabela 1 apresenta a relação entre o índice estrutural e as geometrias de corpos causadores das anomalias.

Uma janela de busca normalmente é especificada, a qual é utilizada na inversão para localização de cada solução da equação de Euler. O algoritmo movimenta essa janela de tamanho fixo sobre todo o *grid* e calcula a solução para cada nova posição. A solução é gravada no *database* se a incerteza da profundidade obtida é menor ou igual a um dado limite de tolerância especificado.

A deconvolução de Euler padrão é comumente empregada na interpretação de dados potenciais porque ela requer pouco conhecimento *a priori* sobre a geometria da fonte e não necessita de informação a respeito do vetor magnetização na área de estudos (Portela Filho e Ferreira, 2003). Essa formulação clássica da deconvolução de Euler tem como deficiência a presença de uma indesejável nuvem de soluções (Barbosa e Silva, 2005). A alternativa escolhida neste trabalho foi o uso da deconvolução de Euler localizada sobre os picos do mapa da ASA (Thurston e Smith, 1997). Nesse caso, uma rotina de pesquisa de picos da ASA é o primeiro passo do algoritmo, o qual localiza as altas amplitudes e estima o tamanho da janela usando os locais de pontos de inflexão adjacentes. Esses locais e tamanhos de janelas são usados para definir as janelas de solução da deconvolução

Tabela 1. Índices estruturais: magnetometria.

Índice estrutural	Geometria da fonte
0	Contato
0,5	Falhas
1	Diques/soleiras
2	Tubo (<i>pipe</i>)
3	Esfera

Fonte: Reid et al., 1990.

de Euler, e o resultado normalmente produz muito menos soluções do que a deconvolução padrão, pois apenas um pequeno subconjunto das células do *grid* será o centro dos “picos” nos dados. O principal benefício desse algoritmo é a redução da nuvem de soluções possíveis indesejáveis, o que facilita o processo de análise e interpretação dos dados (Thurston e Smith, 1997; Keating e Pilkington, 2004).

O fluxo de processamento dos dados geofísicos está demonstrado na Figura 5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do processamento dos dados geofísicos explicitou a existência de uma grande quantidade de lineamentos magnéticos no interior da Bacia Sedimentar do Araripe. Os principais lineamentos destacados nos mapas gerados neste trabalho foram interpretados e comparados com resultados de outros autores da região do Araripe.

As rochas do embasamento sob a bacia apresentam-se com forte deformação e fraturamento, próximas ou compondo as zonas de cisalhamento existentes na região, sendo evidenciadas pelo padrão textural de maior rugosidade e contraste, efeitos das altas amplitudes e frequências do sinal magnético.

Algumas anomalias magnéticas de alta amplitude e formato semicircular, enumeradas de 1 a 4, localizam-se na região central da bacia (Figura 6A), próximos ao município pernambucano de Exu, evidenciando que mesmo a sobreposição de um pacote sedimentar espesso não conseguiu atenuar o sinal magnético por completo. Isso fornece indícios da presença de corpos rochosos em subsuperfície com alta susceptibilidade magnética. Esses corpos rochosos, ainda não descritos, apresentam-se como importantes alvos de futuros estudos geocientíficos para uma melhor compressão dos processos de formação e evolução da Bacia do Araripe.

A região oeste ao município de Araripe apresenta a resposta magnética de mais alta frequência dentre toda a extensão da bacia. Ponte e Ponte-Filho (1996) descrevem esse trecho como sendo a plataforma de Araripe-Araripe (Figura 6A). Dali até o município de Santana do Cariri (CE), a bacia apresenta uma região de forte atenuação do sinal magnético, exatamente sobre a área onde foi perfurado o poço estratigráfico 2- API-CE com 1.498 m (Figura 3). Desse ponto em diante, uma resposta de maior amplitude, aproximadamente entre os municípios de Santana do Cariri e Exu, se faz presente nos mapas magnetométricos.

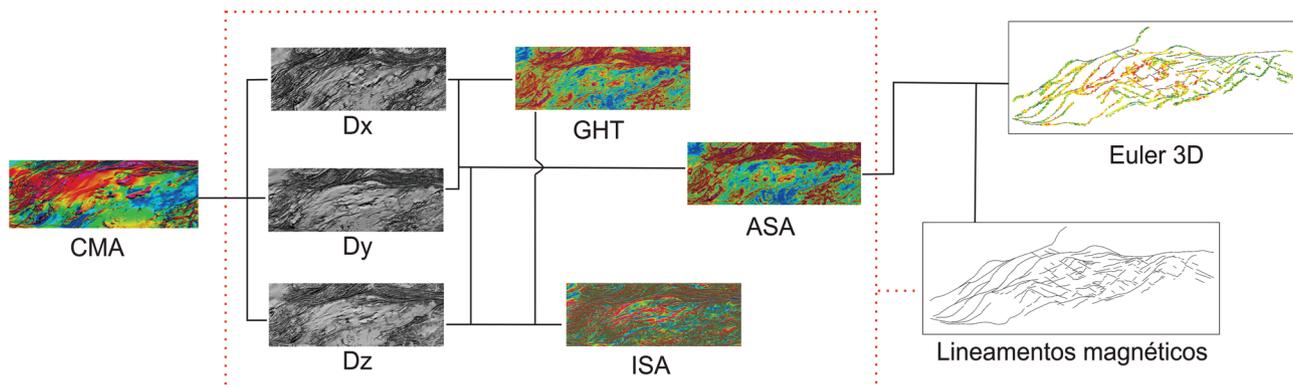
As derivadas de primeira ordem nas direções x , y , z (Figuras 6D, 6C e 6B, respectivamente) possibilitam a identificação do padrão sigmoidal e as direções de lineamentos magnéticos, com *trend* principal NE-SW. A primeira derivada em x (Figura 6D) resalta, ainda, uma direção de lineamentos NW-SE na porção leste da bacia. A partir da interpretação das derivadas, foi feita a divisão de domínios magnéticos da bacia, apresentada na Figura 7A. Essa divisão foi feita levando-se em conta a amplitude e o padrão textural presente nos mapas magnéticos. Esses domínios foram definidos em quatro:

1. Araripe-Araripe;
2. Feitoria;
3. Crato-Juazeiro; e
4. Mauriti.

É possível uma correlação com os trabalhos de Rand e Manso (1984) e Ponte e Ponte-Filho (1996), que subdividem a bacia em duas partes, representadas no mapa de domínios magnéticos deste trabalho como:

1. Domínios 1 e 2: Sub-bacia de Feitoria; e
2. Domínios 3 e 4: Sub-bacia do Cariri.

Na região dos domínios magnéticos 3 e 4 (Figura 7A) é possível perceber que o sinal magnético, normalmente



CMA: campo magnético anômalo; Dx: primeira derivada na direção x ; Dy: primeira derivada na direção y ; Dz: primeira derivada na direção z ; GHT: gradiente horizontal total; ASA: amplitude do sinal analítico; ISA: inclinação do sinal analítico.

Figura 5. Fluxo de processamento dos dados geofísicos.

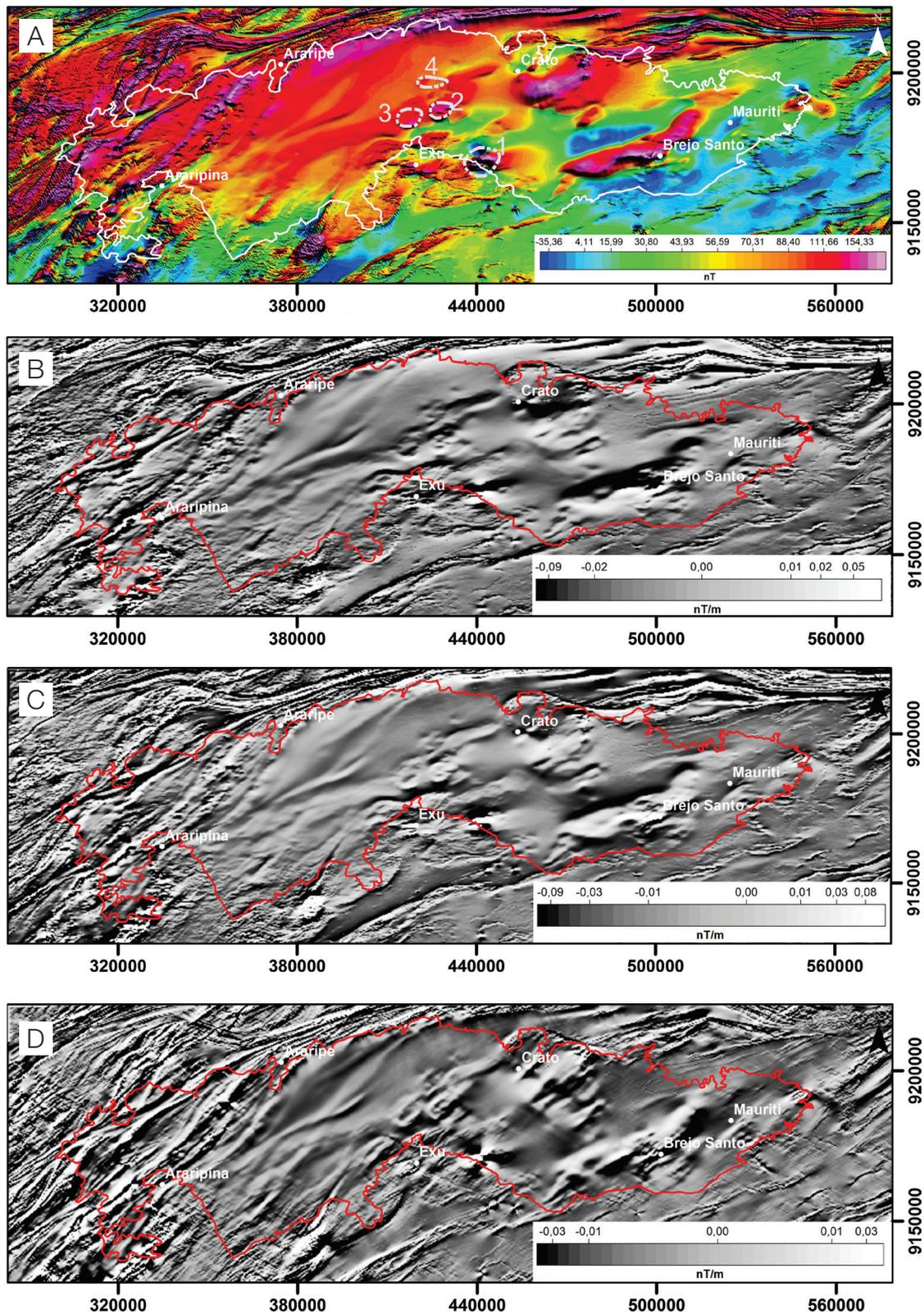


Figura 6. (A) Mapa do campo magnético anômalo evidenciando uma clara variação da resposta magnética ao longo da Bacia do Araripe, com destaque para as anomalias semicirculares de 1 a 4; (B), (C) e (D) lineamentos magnéticos em evidência nas derivadas de primeira ordem em z, y, x, respectivamente.

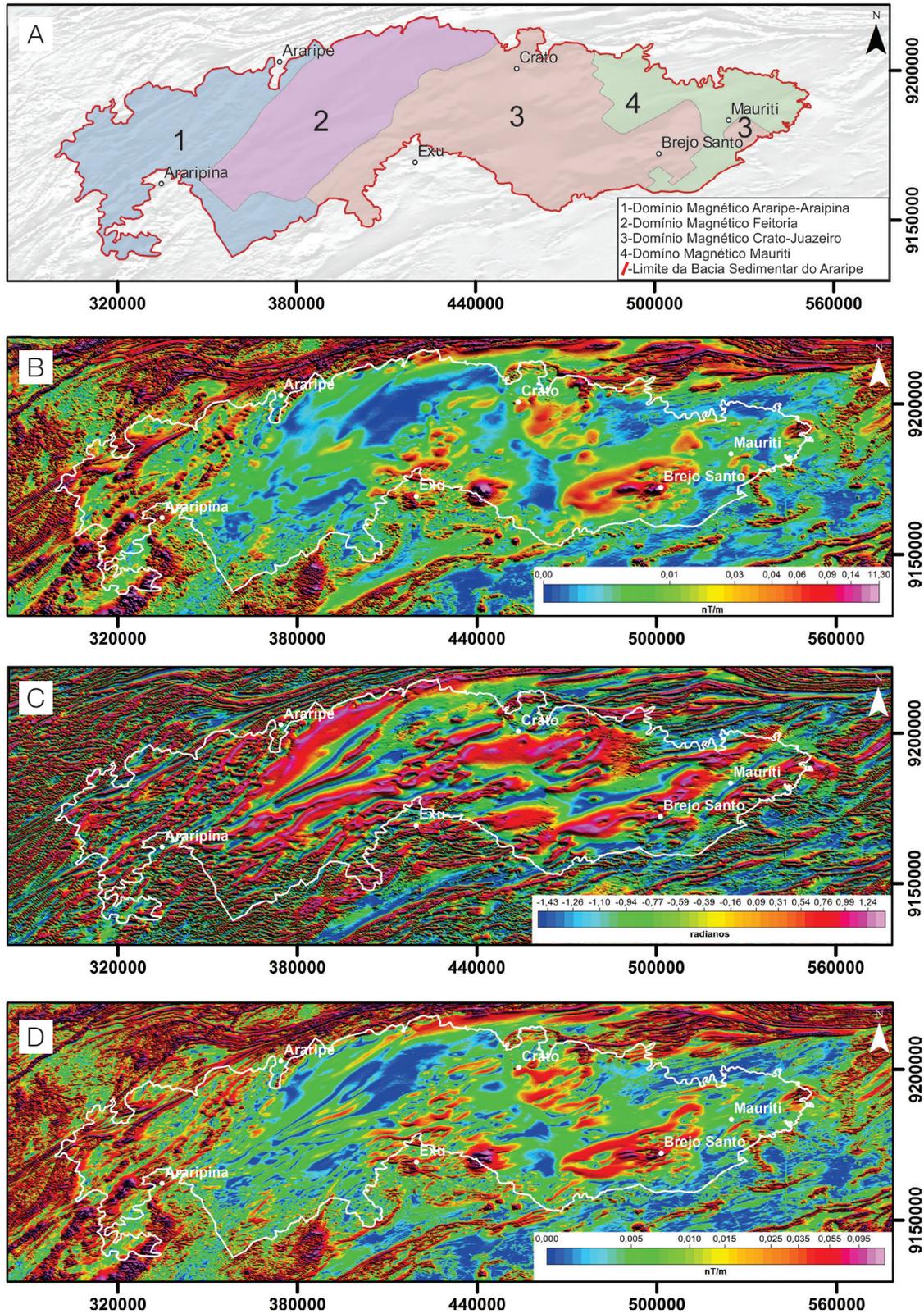


Figura 7. (A) A divisão dos domínios magnéticos em função da variação do padrão de resposta magnética observada, principalmente, no campo magnético anômalo e derivadas de primeira ordem; (B) amplitude do sinal analítico; (C) inclinação do sinal analítico, que tem como resultado uma equalização na amplitude dos lineamentos magnéticos em geral, proporcionando observar a relação de corte entre os diversos alinhamentos presentes no mapa; (D) gradiente horizontal total, evidenciando feições como lineamentos e contatos litológicos.

atenuado em função das rochas sedimentares, apresenta regiões de alta amplitude, fornecendo indícios sobre a presença de diversos blocos rochosos que compõem o arcabouço estrutural dessa área. Essas regiões foram descritas por Ponte e Ponte-Filho (1996) como o *horst* de Brejo Santo-Mauriti, limítrofe ao gráben da Serra das Cacimbas-Palestina, e o *horst* de Barbalha, entre os grábens de Crato-Juazeiro e Missão Nova-Jenipapeiro. Nesse contexto, as anomalias apresentam direção NE-SW e limites fragmentados, formados por pequenos blocos em suas margens. Um *trend* NW-SE se faz mais presente entre as estruturas de segunda ordem dessa região.

Os mapas ASA, ISA e GHT (Figuras 7B, 7C e 7D, respectivamente) ressaltam diversos grupos de alinhamentos magnéticos alongados, de direção preferencial NE-SW, formando um padrão sinuoso/sigmoidal, demonstrando a forte complexidade estrutural da região e permitindo, ainda, uma correlação com o estilo estrutural das zonas de cisalhamento presentes no embasamento. São visíveis blocos de dimensões variadas que constroem a estrutura interna da bacia. Chamam atenção as grandes anomalias magnéticas próximas às cidades de Brejo Santo, Crato e Exu, de formato alongado na direção NE-SW, e que apresentam uma grande quantidade de pequenas estruturas bem marcadas, indicando a presença de vários corpos justapostos formando complexas estruturas maiores.

O método da deconvolução de Euler 3D localizada (Figura 8A) proporcionou resultados confiáveis quanto à estimativa de profundidade do topo das principais fontes magnéticas presentes na área de estudos, com a vantagem adicional de apresentar uma nuvem de soluções bem menor, em comparação à deconvolução de Euler tradicional. É importante salientar que as rochas sedimentares presentes na área de estudo provocam uma atenuação marcante do sinal magnético, e é possível observar esse efeito principalmente nos mapas CMA e derivadas de primeira ordem, na parte central e leste da Bacia do Araripe. Na região central, as profundidades inferidas com a deconvolução de Euler estão próximas às encontradas por Ponte e Ponte-Filho (1996) e Castro e Castelo Branco (1999). Todos os índices estruturais da Tabela 1 foram testados; o índice estrutural escolhido foi de 0,5, uma vez que esse valor possibilita estimativas de profundidade mais adequadas para cada um dos pontos de pico do *grid* ASA relacionáveis a corpos com geometrias lineares.

Entre as zonas de cisalhamento presentes na área de estudo, destacam-se a ZCP e a Farias Brito (ZCFB), que mergulham sob a bacia descrevendo um traçado sigmoidal. A ZCP sofre uma inflexão para sul na região a leste de Araripe e se divide em dois grandes segmentos principais, que mergulham sob a bacia, delimitando em seu

segmento mais a oeste o limite leste da plataforma de Araripe-Araripe. Na porção sudoeste da bacia em direção à Pernambuco, os dados revelam a existência de uma crosta menos magnética cujo padrão monótono do sinal é alterado principalmente pela presença de alinhamentos de primeira ordem na direção NE-SW, correlacionados à Falha de Conceição, e de segunda ordem na direção NW-SE, os quais podem ser relacionados às falhas e diques originados devido a processos extencionais ocorridos na extremidade norte da Bacia do Recôncavo.

Os dados obtidos corroboram a tese de que o setor oeste da bacia, a partir do *horst* Dom Leme, apresenta um padrão estrutural sigmoidal NE-SW, fortemente influenciado pelas grandes estruturas regionais presentes no embasamento: a ZCP. A plataforma Araripe-Araripe, que aparenta possuir um pacote sedimentar menos espesso, inferência essa baseada pelo padrão textural dos mapas magnéticos, tem seu limite marcado pela ZCP. A partir daí, para leste, ocorre um aprofundamento da bacia, caracterizada por uma forte atenuação do sinal magnético, indicando a presença do gráben de Feitoria, cujo pacote sedimentar alcança profundidades da ordem de 1.500 m. Ainda nessa região, a ZCP teria dado origem ao alto estrutural de Feitoria.

Para o domínio magnético Araripe-Araripe, as profundidades estimadas para os topos das anomalias magnéticas estão, majoritariamente, entre 200 e 800 m (Figura 8A).

No setor central da bacia, a deconvolução de Euler 3D forneceu estimativas de profundidades até um máximo de 1.147 m; essas soluções estão próximas ao poço 2-AP-1-CE, com 1.497 m de sedimentos descritos. Nessa região, Castro e Castelo Branco (1999), com o uso da gravimetria, indicaram haver um pacote sedimentar com cerca de 1.500 m de espessura.

A região interpretada como divisora dos setores da bacia, *horst* Dom Leme, apresenta um formato sinuoso e padrão textural ocasionado por dados de mais alta frequência e amplitude nos mapas magnéticos, o que reforça a interpretação de um alto estrutural. Composto essa região da bacia foram identificadas três anomalias magnéticas dipolares de formato semicircular, com alta susceptibilidade magnética, que podem estar associadas a intrusões magmáticas. Identificado como a estrutura regional responsável pela separação das sub-bacias de Feitoria e Cariri, ou seja, um limite entre os setores da bacia, o *horst* Dom Leme apresenta uma transição entre os dois padrões estruturais, linear a oeste e fragmentado em sua porção leste.

Para o setor leste da bacia a deconvolução mostra um resultado semelhante ao observado no setor central, com valores de profundidade máxima próximas a 1.100 m. Nessa região, a maior nuvem de resultados está associada ao gráben de Crato-Juazeiro e ao gráben da Serra das

Cacimbas-Palestina. A análise dos resultados demonstra, também, redução da profundidade dos lineamentos nas bordas da bacia, o que condiz com uma redução do pacote sedimentar e uma transição para o embasamento, demonstrando uma continuidade das estruturas internas e externas à Bacia Sedimentar do Araripe.

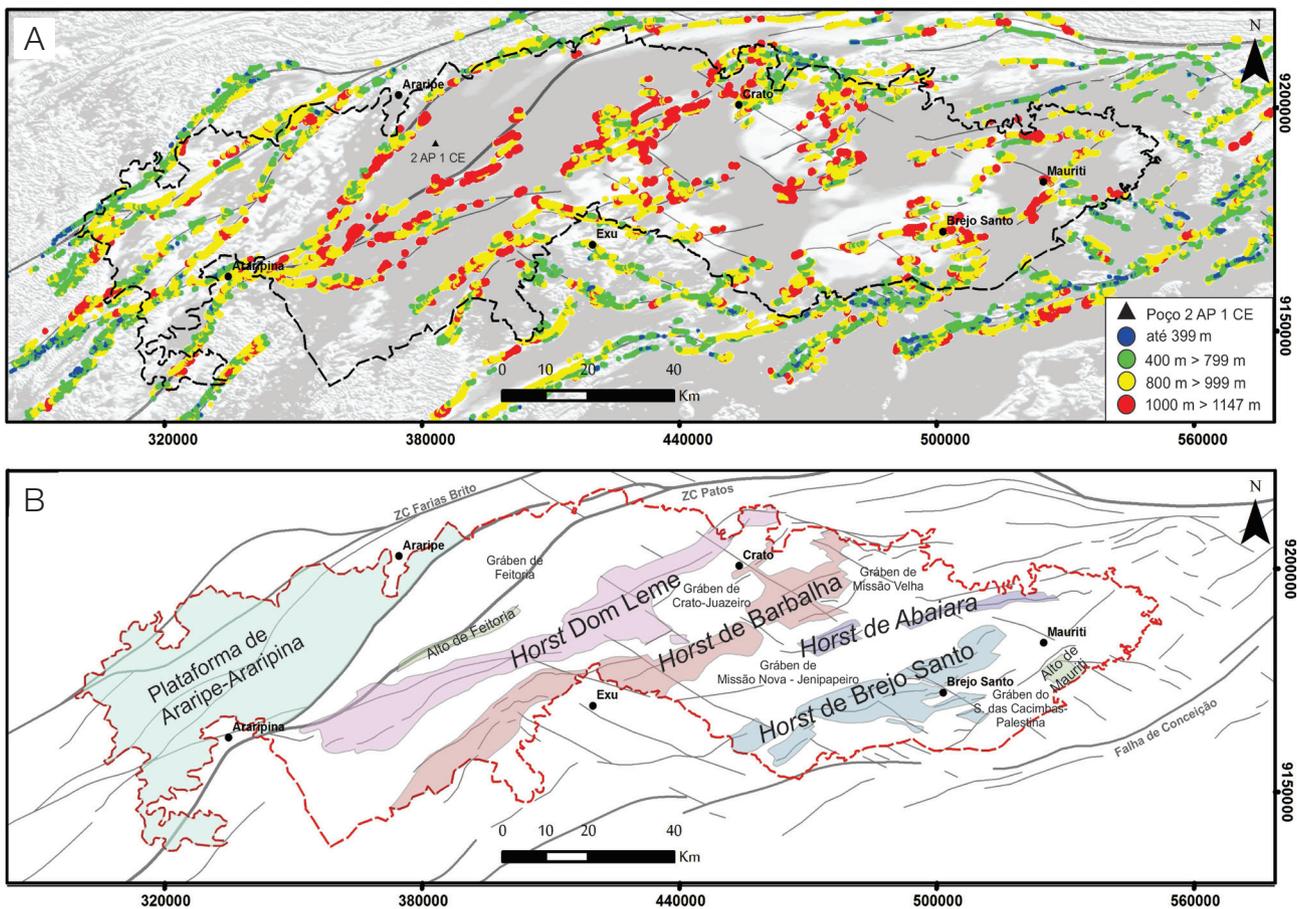
O setor leste da bacia apresenta um padrão estrutural mais complexo, com a presença das feições sigmoidais NE-SW recortadas por lineamentos NW-SE, fragmentando os blocos que compõem o arcabouço estrutural desse setor. O gráben Crato-Juazeiro está em uma região marcada pela atenuação do sinal magnético, indicando a existência de um espesso pacote sedimentar, e encaixado entre os *horsts* Dom Leme e Barbalha. Esse último apresenta um padrão semelhante ao *horst* Dom Leme, com a presença de uma anomalia magnética semicircular de alta susceptibilidade a sudeste, próxima ao município de Exu, e uma estruturação mais fragmentada a nordeste. Os *horsts* de Abaiara e Brejo Santo têm um padrão estrutural semelhante, com corpos alongados formados por

vários blocos justapostos, o que indicaria a existência de um complexo de *horsts*.

A partir dos resultados obtidos por meio desse processamento geofísico, uma nova interpretação do arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe foi proposta e apresentada na Figura 8B.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma compartimentação estrutural mais atualizada para a Bacia Sedimentar do Araripe, a partir de dados magnéticos, e permite inferir a posição de diversas estruturas ainda não mapeadas, além de fornecer indícios sobre a geometria dos blocos que compõem a bacia, os quais estariam fortemente ligados às estruturas presentes no embasamento, como a ZCP e a ZCFB, e também a processos tectônicos que deram origem à bacia, segmentando-a gradativamente de oeste para leste, num arranjo complexo de grábens e *horsts*.



ZC: Zona de Cisalhamento.

Figura 8. (A) Resultado da deconvolução de Euler 3D, com índice estrutural 0,5, evidenciando o topo das principais estruturas magnéticas com geometria linear; (B) interpretação do arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe baseada na identificação dos principais lineamentos magnéticos.

O método da deconvolução de Euler 3D apresentou uma boa correlação de profundidades com trabalhos anteriores. Os lineamentos magnéticos foram evidenciados pelas soluções dispostas em forma retilínea, devido também à escolha correta do índice estrutural de 0,5 para os cálculos. Na região do gráben de Feitoria, delimitado neste trabalho, as maiores profundidades foram observadas, com estimativas de 1.147 m, valor que ocorre próximo ao poço 2-AP-1-CE, com pacote sedimentar de 1.497 m de profundidade, indicando a presença de minerais com alta susceptibilidade magnética, no interior do pacote de rochas sedimentares que compõem a bacia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE) da CPRM, Serviço Geológico do Brasil, pela cessão dos dados aerogeofísicos e disponibilização dos demais recursos que possibilitaram aos autores a realização deste trabalho. Clyvikh Renna Camacho agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa na forma de bolsa de auxílio do programa de mestrado em geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Professor Itabaraci Nazareno Cavalcante e a Jaime Quintas dos Santos Colares, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Angelim, L. A. A., Vasconcelos, A. M., Gomes, J. R. C., Wanderley, A. A., Forgiarini, L. L., Medeiros, M. F. (2004). Folha SB.24 Jaguaribe. In: C. Schobbenhaus, J. H. Gonçalves, J. O. S. Santos, M. B. Abram, R. Leão Neto, G. M. M. Matos, R. M. Vidotti, M. A. B. Ramos, J. D. A. Jesus (Eds.), *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM.
- Assine, M. L. (2007). Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 371-389.
- Barbosa, V. C. F., Silva J. B. C. (2005). Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro - um tutorial. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(3), 243-250.
- Castro, D. L., Castelo Branco, R. M. G. (1999). Caracterização da arquitetura interna das bacias rift do Vale do Cariri (NE do Brasil), com base em modelagem gravimétrica 3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 17, 129-144.
- Carvalho, I. S., Freitas, F. I., Neumann, V. (2012). Chapada do Araripe. In: Y. Hasui, C. D. R. Carneiro, F. F. M. Almeida, A. Bartorelli (Orgs.), *Geologia do Brasil* (1, 510-513). São Paulo: Beca.
- Cordell, L., Graunch, V. J. S. (1985). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: W. J. Hinze (Ed.), *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps* (v. 1, 181-197). Oklahoma: SEG.
- Corsini, M., Vauchez, A., Caby, R. (1996). Ductile duplexing at a bend of a continental-scale strike-slip shear zone: example from NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 18(4), 385-394.
- Delgado, I. M., Souza, J. D., Silva, L. C., Silveira Filho, N. C., Santos, R. A., Pereira, A. J., Guimarães, J. T., Angelim, L. A. A., Vasconcelos, A. M., Gomes, I. P., Lacerda Filho, J. V., Valente, C. R., Perrotta, M. P., Heineck, C. A. (2003). Geotectônica do Escudo Atlântico. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* (1, 227-258). Brasília: CPRM.
- Ferreira, F. J. F., Souza, J., Bongioiolo, A. B. S., Castro, L. G., Romeiro, M. A. T. (2010). Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 2193. Brasília: SBGf. CD-ROM.
- Hasui, Y. (2012). Sistema Orogênico Borborema. In: Y. Hasui, C. D. R. Carneiro, F. F. M. Almeida, A. Bartorelli (Orgs.), *Geologia do Brasil* (1, 254-288). São Paulo: Beca.
- Keating, P., Pilkington, M. (2004). Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysical Prospecting*, 52(3), 165-182.
- Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2), 13-16.
- Marques, F. O., Nogueira, F. C. C., Bezerra, F. H. R., Castro, D. L. (2014). The Araripe Basin in NE Brazil: An intracontinental graben inverted to a high-standing horst. *Tectonics*, 630, 251-264.
- Matos, R. M. D. (1992). The Northeastern Brazilian rift system. *Tectonics*, 11, 766-791.
- Miller, H. G., Singh, V. (1994). Potential field tilt: a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal cross section: Its properties

- and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.
- Oliveira, E. (1983). *A Chapada do Araripe: sua representação pela gravimetria*. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Ponte, F. C., Hashimoto, A. T., Dino, R. (1991). *Geologia das bacias sedimentares mesozoicas do interior do Nordeste do Brasil*. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Ponte, F. C., Ponte-Filho, F. C. (1996). *Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe*. Recife: DNPM.
- Portela Filho, C. V., Ferreira, F. J. F. (2003). Estimativas das taxas de extensão crustal da região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná) com base em modelagens aeromagnéticas. In: *VIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*. Rio de Janeiro: SBGf. CD-ROM.
- Rand, H. M. (1983). *Levantamento gravimétrico e magnetométrico da Bacia Araripe*. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Rand, H. M., Manso, V. A. V. (1984). Levantamento gravimétrico e magnetométrico da Bacia do Araripe. *XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 4, 2011-2016. Rio de Janeiro: SBG.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I. W. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, 55, 80-91.
- Roest, W. R., Verhoef, J., Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116-125.
- Silva, A. J. C. L. P., Lopes, R. C., Vasconcelos, A. M., Bahia, R. B. C. (2003). Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* (v. 1, 55-85). Brasília: CPRM.
- Silva, M. A. M. (1983). *The Araripe Basin, Northeastern Brazil: regional geology and facies analyses of a Lower Cretaceous Evaporitic depositional complex*. Tese (Doutorado). Nova York: Columbia University.
- Silva, M. A. M. (1988). Evaporitos do Cretáceo da Bacia do Araripe: ambiente de deposição e história diagenética. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 2(1), 53-63.
- Thompson, D. T. (1982). EULDPH: a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.
- Thurston, J. B., Smith, R. S. (1997). Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI(TM) method. *Geophysics*, 62, 807-813.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., Mackenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116-119.
- Veríssimo, L. S., Aguiar, R. B. (2005). *Hidrogeologia da porção oriental da bacia sedimentar do Araripe*. Meta A. Diagnóstico do estado da arte. Brasil: CPRM. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/araripe_meta_A.PDF>. Acesso em: 15 abr. 2015.
- Viegas, L. G. F. (2013). *Mecanismos de Deformação e Cronologia de Eventos na Zona de Cisalhamento Patos (Província Borborema, Nordeste do Brasil)*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.