

Geomorfometria e aeromagnetometria integradas para análise da correspondência entre lineamentos morfoestruturais e magnéticos na Bacia Paraíba, nordeste do Brasil

Clódis de Oliveira Andrades Filho^{1,4}

Dilce de Fátima Rossetti^{1,2}

Francisco Hilario Rego Bezerra³

¹ Universidade de São Paulo – USP/IGc
CEP 05.508-080 – São Paulo – SP, Brasil
andradesfilho@usp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – 12.227-010 – São José dos Campos – SP, Brasil
rossetti@dsr.inpe.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
CEP 59.072-970 – Natal – RN, Brasil
bezerrafh@geologia.ufrn.br

⁴ Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS
CEP 95.400-000 – São Francisco de Paula – RS, Brasil
clodis-filho@uergs.edu.br

Abstract. The northeast region of Brazil has been the target of studies which have shown the relevance of seismic events in recent geological times; however, the genesis of these events is still unknown. This work integrates geomorphometric data derived from interferometric radar and aerogeophysical magnetic data for the analysis of spatial and directional relationship between morphostructural and magnetic lineaments in the Paraíba Basin, northeastern Brazil. The objective is to evaluate the correspondence between the deep tectonic structures in the subsurface, and the features, observed through the relief, on the surface. Geomorphometric products were used for extracting morphostructural lineaments, such as aspect, horizontal curvature and altimetry. Data regarding the anomalous magnetic field and the so-called product ‘first vertical derivative’ were used for detection of magnetic lineaments. From the analysis performed using the Geographic Information System SPRING 5.2, it was possible to identify important spatial and directional correspondences which enables proposing that areas of pre-existing shear in the study area were reactivated in the Cenozoic, more specifically in the Late Quaternary. This is proposed due to the similarity between the main orientations of lineaments E-W, NE-SW and NW-SE of sedimentary units and the area of the Precambrian basement. In addition, the geographical distribution of magnetic and morphostructural lineaments shows strong correspondence, particularly along major rivers and valleys of central onshore portion of the Paraíba Basin.

Palavras-chave: interferometric radar, airborne geophysics, geology, radar interferométrico, aerogeofísica, geologia.

1. Introdução

Lineamentos morfoestruturais são expressões morfológicas do relevo que podem ter relação com feições subsuperficiais geológicas, e tratam-se de elementos importantes para a caracterização da paisagem visando à reconstrução do arcabouço tectônico. Isto porque os lineamentos podem ter equivalência com estruturas tectônicas, tais como fraturas e falhas (Morelli e Piana, 2006). Esses lineamentos são, em geral, expressos por: a) cristas de cordilheiras ou limites de áreas elevadas; b) linhas de drenagem; c) linhas de costa; e d) linhas representativas de contatos litológicos. Já os lineamentos magnéticos são feições observadas de forma indireta através do realce de anomalias do campo magnético da Terra capazes de revelar estruturas tectônicas como falhas e zonas de cisalhamento, contatos geológicos de unidades distintas e intrusão de corpos magnéticos do tipo dique (Oliveira, 2008).

Diversos produtos de sensoriamento remoto têm sido utilizados na análise de lineamentos morfoestruturais, especialmente por sensores ópticos em regiões áridas e semiáridas (p.e., Ramli et al., 2010). A hegemônica importância de dados ópticos visando estudos geomorfológicos diminui drasticamente em áreas com cobertura vegetal densa, frequência de nuvens e uso

intenso da terra, que são elementos particularmente problemáticos nas áreas tropicais úmidas e que podem reduzir ou até excluir a possibilidade de visibilidade de feições morfoestruturais. Nesse sentido, o uso de dados provenientes de radar se torna fundamental para realce de morfologias, especialmente quando estes dados são responsáveis pela geração de modelos digitais de elevação (MDE). Os dados de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR), adquiridos durante o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), são de particular interesse, pois estão disponíveis gratuitamente para grande parte do planeta. Apesar de MDE's desta natureza serem já bastante utilizados em estudos de cunho geológico, a sua integração com dados de subsuperfície como dados aeromagnéticos, capazes de revelar estruturas com até quilômetros de profundidade (Oliveira, 2008), ainda carece de pesquisas. Um levantamento aerogeofísico recente realizado na faixa costeira do nordeste brasileiro pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) foi responsável pela geração de dados magnéticos em alta resolução espacial que incluem a área da Bacia Paraíba. A expectativa é que novos levantamentos sejam realizados em diversas partes do território nacional e seja possível um aprimoramento no mapeamento de estruturas tectônicas e por isso é fundamental a realização de estudos que atestem a eficácia do uso destes dados. Assim, este trabalho propõe a discriminação de lineamentos morfoestruturais e magnéticos e uma análise da relação da disposição espacial e direcional entre as morfoestruturas passíveis de detecção por dados geomorfométricos e as estruturas profundas detectáveis em dados geofísicos aeromagnéticos.

2. Área de Estudo

A Bacia Paraíba abrange uma faixa costeira entre a Zona de Cisalhamento Pernambuco (ao sul) e o Alto Estrutural Mamanguape (ao norte) (Figura 1) na Província Estrutural da Borborema, nordeste do Brasil. Esta área pertence a um conjunto tectono-estratigráfico maior, cujo modelo é marcado pela alternância de blocos do embasamento pré-brasiliano, estes circundados por faixas móveis brasilianas. Grandes fraturas e zonas de cisalhamento cortam a Província da Borborema (Figura 1) se prolongando até as coberturas sedimentares da faixa leste da margem atlântica. Essas estruturas, aparentemente formadas no ciclo Brasiliano (~540 Ma) foram reativadas no Cenozoico e foram responsáveis por desencadear eventos deposicionais e erosionais em bacias marginais, como a Bacia Paraíba.

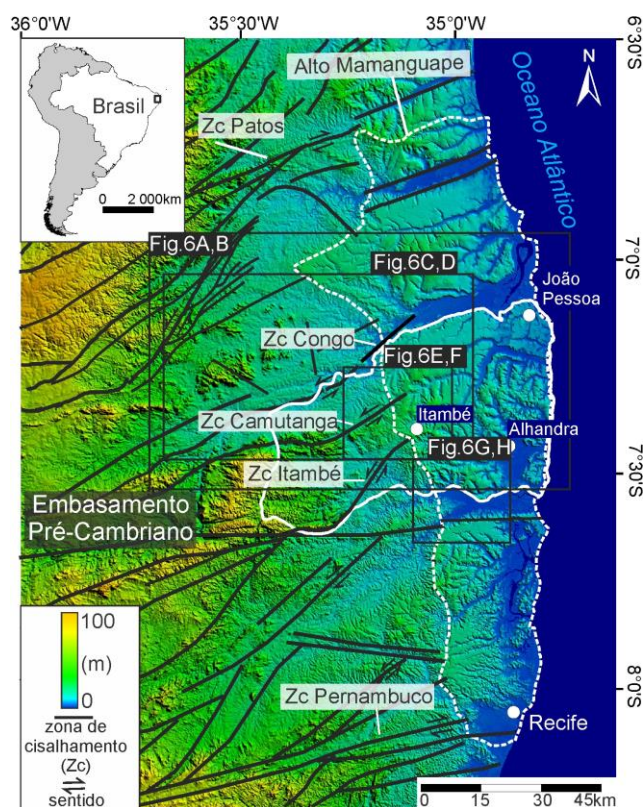


Figura 1. Localização da área de estudo. A linha tracejada branca delimita a Bacia Paraíba. O polígono delimitado por linha contínua branca representa a área foco de estudo (ver figura 2).

O estudo se concentra na porção central emersa da Bacia Paraíba (Figura 2) e área do embasamento precambriano adjacente. Na bacia sedimentar, em superfície, as unidades sedimentares (Rossetti et al., 2012) são representadas calcários da Formação Gramame (Cretáceo Tardio) e predominantemente pelos arenitos intercamadados a conglomerados e argilitos, inconsolidados a semi-consolidados, da Formação Barreiras (Mioceno) e pelos endurecidos sedimentos arenosos e conglomeráticos da unidade Pós-Barreiras 1-PB1 (Pleistoceno Tardio) que contém grande presença de sismitos, e os depósitos arenosos, em geral friáveis e maciços, da unidade Pós-Barreiras 2-PB2 (Holoceno).

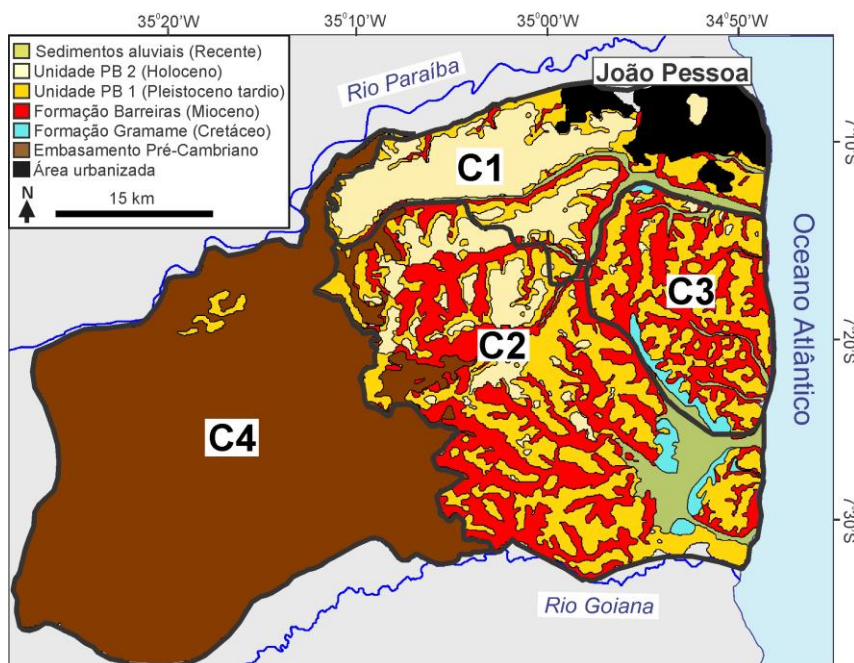


Figura 2. Mapa geológico da porção central emersa da Bacia Paraíba (Andrades-Filho et al., 2014).

3. Material e Métodos

Para extração dos lineamentos morfoestruturais foram utilizados dados de elevação (i.e., altimetria – ZN) e os produtos relativos às variáveis geomorfológicas de orientação de vertentes (ON) e curvatura horizontal (HN) disponíveis no Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil TOPODATA (Valeriano e Rossetti, 2012). Estes dados estão apresentados em grade cuja célula possui dimensão de 1 arco de segundo (i.e., ~ 30 m) refinados do SRTM-3" (i.e., ~90 m). A partir destes produtos foi empregada a técnica de vetorização por interpretação visual. Especificamente, no produto ZN foram gerados diferentes padrões de paletas de cores e sombreamentos. A partir destas bases foram extraídos traços retilíneos ou suavemente encurvados de relevo positivo e negativo (p.e., Figura 3) no SPRING 5.2. Com base no padrão de distribuição dos lineamentos a área foi discriminada em compartimentos morfoestruturais. A disposição espacial e direcional de lineamentos foi analisada para área dos compartimentos morfoestruturais. Para a análise direcional, as informações estatísticas foram representadas em diagramas em roseta, obtidos com intervalos de 10°, segundo frequência absoluta (i.e., número absoluto de lineamentos em determinada direção).

Para extração dos lineamentos magnéticos foi utilizada a base de dados geofísicos de aeromagnetometria obtidos no âmbito do Projeto Aerogeofísico Borda Leste do Planalto da Borborema (LASA e Prospectors, 2008) comissionado pela CPRM. Estes dados estão disponíveis na escala 1:100.000 em grid de 125 m × 125 m. O voo foi realizado com linhas de espaçamento de 500 m e linhas de controle espaçadas em 5000 m, orientadas na direção N-S e E-W, respectivamente. A altura de voo foi fixada em 100 metros em relação à superfície do terreno. As aeronaves foram equipadas com magnetômetro e posicionadas com uso de sistema GPS (*Global Positioning System*) com precisão de 1 m. As medições foram feitas a cada 0,1 segundos, o que é equivalente, dependendo da velocidade média da aeronave, a uma medição a cada 7,7 metros (LASA e Prospectors, 2008). Os dados magnéticos foram submetidos a rotinas de micro-nivelamento destinado à extração de sinais espúrios de alta frequência decorrentes do processo de

nivelamento. A contribuição do campo magnético de referência internacional (IGRF) foi subtraída dos dados micro-nivelados. Além da base original magnética (nT), também foi utilizado neste trabalho o produto processado denominado primeira derivada vertical do campo magnético (nT/m). O produto processado foi gerado a partir do emprego do filtro denominado 1ª derivada vertical. Este filtro foi aplicado após a execução da transformada rápida de Fourier (FFT), no domínio do número de onda. As possibilidades de métodos de processamentos de dados geofísicos em programas computacionais são amplamente discutidas por Oliveira (2008).

A partir das variações e representações contínuas dos sinais magnéticos, foram identificados e traçados lineamentos magnetométricos. O objetivo desta etapa foi à obtenção de um mapa de lineamentos magnéticos e a realização da análise das possíveis relações espaciais destes lineamentos com os lineamentos morfoestruturais. A análise direcional destes foi realizada de forma similar aos lineamentos morfoestruturais.

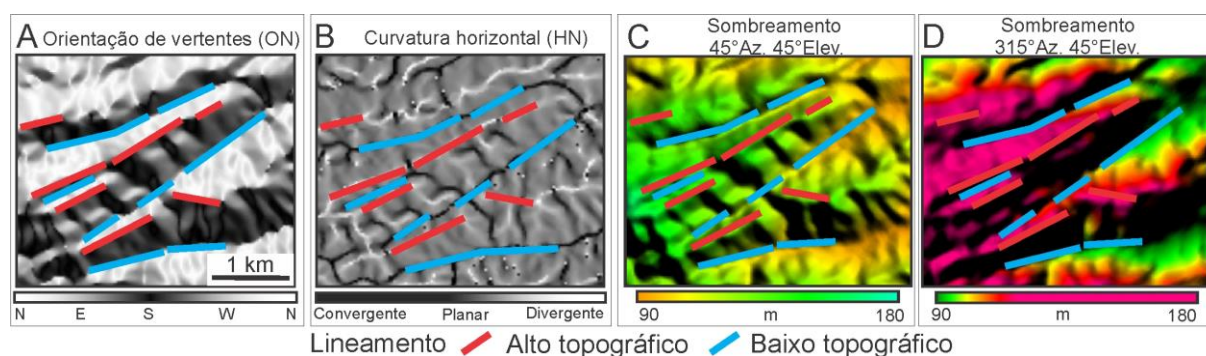


Figura 3. Área amostral com a representação de lineamentos em baixo e alto topográfico nos produtos do MDE-SRTM: ON (A), HN (B) e relevo sombreado (C e D).

4. Resultados e Discussão

As propriedades dos lineamentos morfoestruturais, tais como densidade e distribuição espacial, levaram ao reconhecimento de quatro compartimentos (i.e., C1 a C4, Figura 4A-C). Os compartimentos C1 a C3 correspondem às unidades sedimentares da Bacia do Paraíba e o C4 corresponde ao embasamento pré-cambriano (Figura 2). O C1, que ocorre principalmente sobre o PB2, localizado ao norte da área de estudo, caracteriza-se pela menor densidade de lineamentos. A maioria destes lineamentos extraídos é de relevo negativo, já que esta área é bastante plana. C2 e C3 correspondem a áreas com predomínio da Formação Barreiras e PB1. No entanto, o C2, localizado no centro da área de estudo, mostra uma moderada densidade de lineamentos e o C3, no extremo leste da área de estudo, apresenta densidade moderada a alta. Já o C4, o que corresponde à área com predominância de rochas do embasamento pré-cambriano no oeste, caracteriza-se pela predominância de valores de densidade de lineamentos moderados e elevados.

As tendências de lineamentos não mudam muito quando se comparam os compartimentos morfoestruturais C2 e C3 da Bacia do Paraíba, que têm orientações principais E-W, NE-SW, NW-SE e, menos comumente, orientações N-S (Figura 5). Os lineamentos do embasamento pré-cambriano (ou seja, C4) também são semelhantes, exceto pela falta de uma tendência N-S bem definida. No entanto, C1 é um pouco diferente de todos os outros compartimentos, com as principais tendências para NE-SW e NW-SE e secundariamente E-W.

Levando-se em conta o número total de lineamentos relativos às unidades geológicas individuais, o embasamento pré-cambriano apresentou o maior número, ou seja, 3.876 lineamentos. No entanto, o valor também foi elevado nas unidades sedimentares, que juntas somaram 2.535 lineamentos. Entre as unidades sedimentares, a Formação Barreiras e PB1 exibiram quantidade equivalente de lineamentos, ou seja, 1531 e 1518, respectivamente. Por outro lado, a unidade PB2 exibiu quantidade muito menor de lineamentos, apenas 364, sendo que sua área de ocorrência é aproximadamente equivalente à Formação Barreiras e PB1.

Os lineamentos magnéticos estão bem distribuídos ao longo da área de estudo (Figura 4D-F). Os compartimentos C1 a C3 tiveram, em geral, distribuição de densidade baixa e moderada, com um ligeiro aumento da concentração deste último para o oeste, perto da fronteira com o C4. A densidade de lineamentos aumenta ligeiramente no compartimento C4, que tem predominantemente valores moderados. Além disso, neste compartimento os lineamentos são mais extensos do que nas unidades sedimentares.

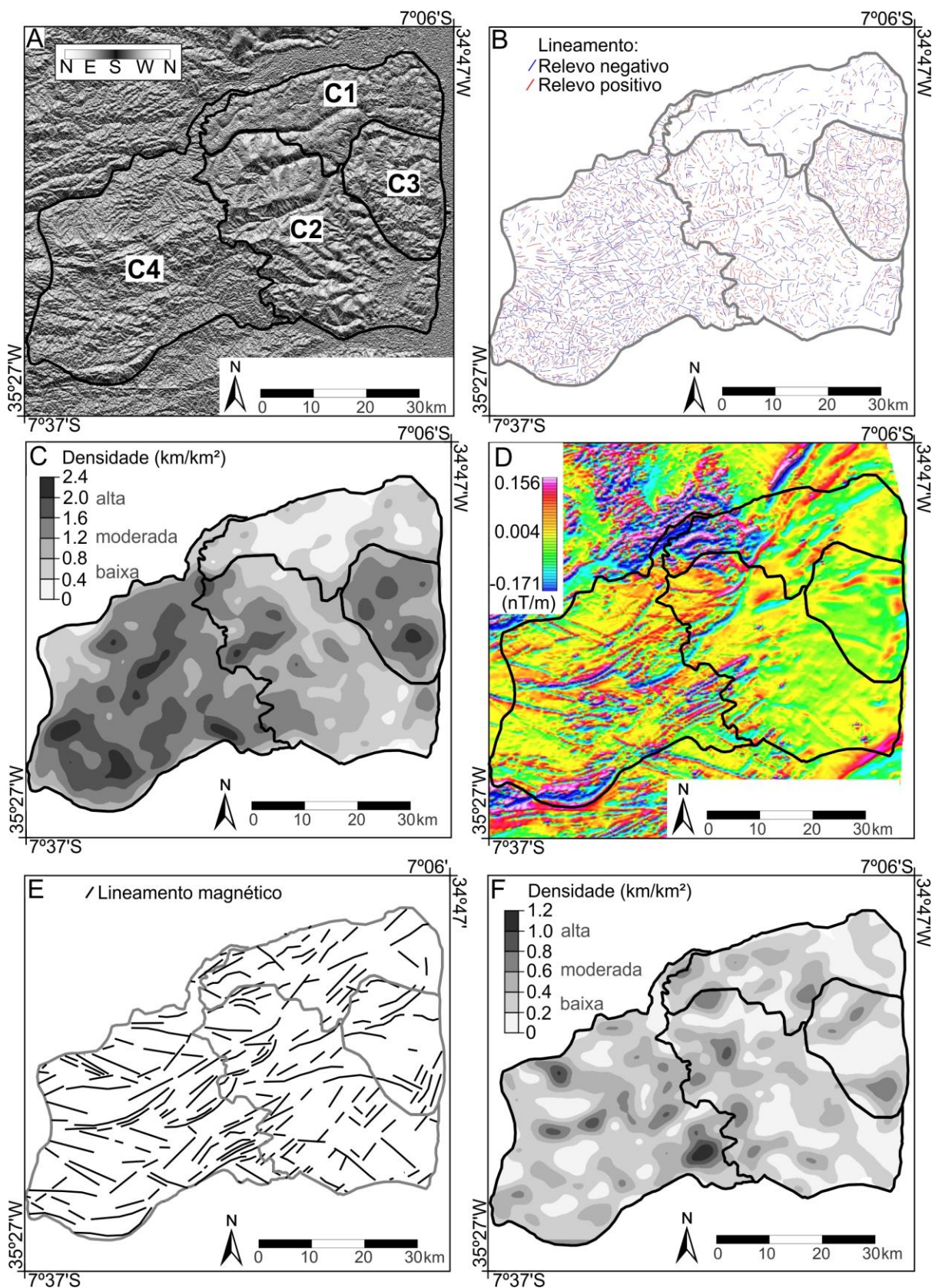


Figura 4. Distribuição de lineamentos morfoestruturais e magnéticos na área de estudo. A) variável morfométrica orientação de vertentes e compartimentos morfoestruturais (C1, C2, C3 e C4); B) mapa de lineamentos morfoestruturais; C) mapa de densidade de lineamentos morfoestruturais; D) primeira derivada vertical do campo magnético anômalo; E) mapa de lineamentos magnéticos; F) mapa de densidade de lineamentos magnéticos. Ver A para localização dos compartimentos morfoestruturais (polígonos em A-F).

Os lineamentos magnéticos exibem padrões consistentes sobre os compartimentos C1 a C3, com uma tendência principal NE-SW e uma tendência secundária NW-SE. Além disso, o C2 e C3 têm também uma tendência E-W bem definida, embora secundária. No embasamento pré-cambriano, os lineamentos magnéticos possuem tendências direcionais principais ENE-WSW, WNW-ESE e E-W.

Considerando a quantidade total de lineamentos, o embasamento pré-cambriano registrou um valor mais elevado do que as unidades sedimentares em conjunto (Figura 5). A Formação Barreiras e PB1 apresentaram mais lineamentos, variando 215-196, respectivamente, enquanto PB2 exibiram apenas 72 lineamentos.

Uma comparação entre os lineamentos morfoestruturais e magnéticos levou à constatação de que eles nem sempre estão associados espacialmente. Em geral, a melhor coincidência nestes dados é encontrada em associação com o embasamento pré-cambriano. Sobre a bacia sedimentar, os lineamentos magnéticos estão menos realçados, e muitos deles não correspondem exatamente com os lineamentos de natureza morfoestrutural. No entanto, há setores onde os dados magnéticos exibem boa correspondência com lineamentos morfoestruturais. Por exemplo, o rio Paraíba que tem muitos lineamentos na direção NE-SW com perfeita concordância entre os dados magnéticos e morfoestruturais (Figura 6A-B). Um segmento longo deste rio ocorre ao longo de uma anomalia magnética bem definida no centro do Gráben de Cariatá, previamente definido por Bezerra et al. (2008) (Figura 6C-D). Além disso, os lineamentos magnéticos e morfoestruturais têm boa correspondência ao longo do curso superior de Mamuaba e alto bloco do embasamento na porção oeste (Figura 6E-F). O vale do rio Goiana apresenta um alargamento anômalo na zona próxima à costa (leste), com um ramo retangular exibindo lineamentos morfoestruturais com correspondência nos dados magnéticos (Figura 6G-H).

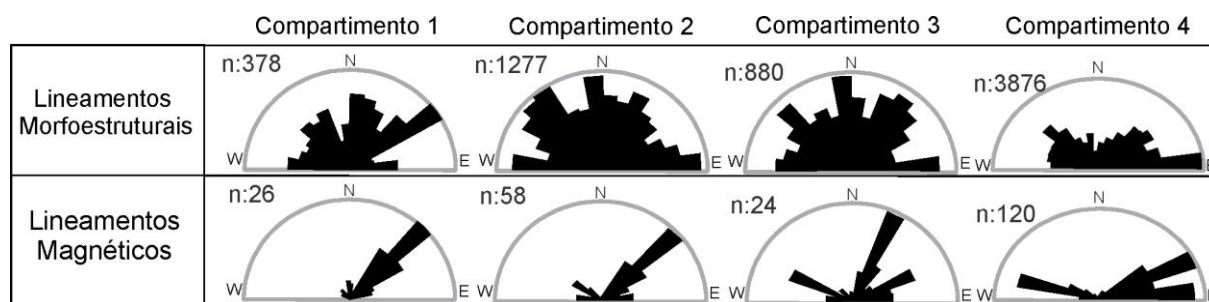


Figura 5. Diagramas de roseta e quantidade de lineamentos morfoestruturais e magnéticos.

Os dados aqui apresentados tem uma grande contribuição no que diz respeito às evidências de que a Bacia do Paraíba foi amplamente afetada por atividade tectônica pós-rifte. As morfoestruturas e estruturas profundas registradas, principalmente, sobre a Formação Barreiras e PB1. Os lineamentos morfoestruturais, geralmente compatíveis, registrados nos compartimentos C2 e C3, em relação aos lineamentos sobre o embasamento pré-cambriano (i.e., C4), levou à dedução de que os eventos que afetaram a Formação Barreiras e PB1 são atribuídos à reativação de estruturas tectônicas pré-existentes. A maioria dos lineamentos da área de estudo pode estar relacionada com reativações de zonas de cisalhamento pré-existentes e outras grandes estruturas lineares que se estendem sobre o embasamento pré-cambriano. Assim, as estruturas com tendências direcionais E-W, NE-SW e NW-SE foram reativadas ao longo do tempo, estendendo sua influência para a Bacia do Paraíba.

O fato de o embasamento pré-cambriano apresentar uma densidade muito maior de lineamentos morfoestruturais em relação às unidades sedimentares é, provavelmente, devido à sobreposição de eventos de deformação diferentes pelos quais estas rochas foram afetadas desde o período pré-cambriano. As tendências e densidade de lineamentos morfoestruturais equivalentes nos compartimentos C2 e C3, em áreas de predomínio da Formação Barreiras e PB1, pode ser uma sugestão de que houve reativação tectônica, durante e/ou após a deposição dos sedimentos do pleistoceno tardio (i.e., PB1). Isso porque, se um significativo tectonismo afetou a Formação Barreiras antes da deposição da unidade PB1, a primeira teria sido impressa por uma maior quantidade de lineamentos. É também interessante notar que a quantidade mais baixa de lineamentos na unidade PB2 é compatível com a sua idade mais jovem em relação à unidade de PB1.

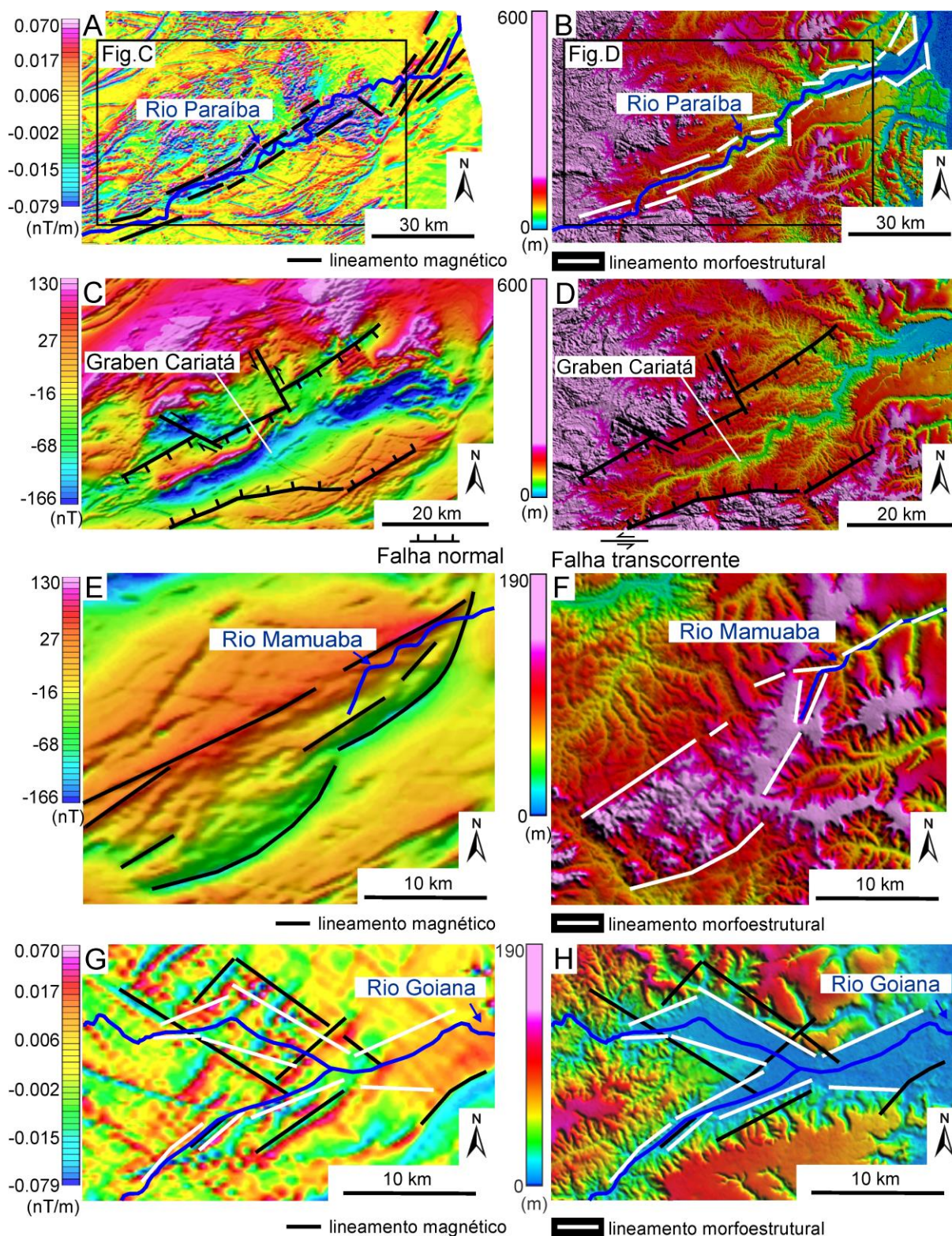


Figura 6. Correspondência entre lineamentos morfoestruturais e magnéticos. A, C, E, G) Dado magnético; B, D, F, H) MDE-SRTM.

Os lineamentos magnéticos serem mais expressivos sobre o embasamento pré-cambriano sugere que estes registram as zonas de cisalhamento profundas pré-existentes. Embora não inteiramente correlacionados com os lineamentos morfoestruturais, as tendências direcionais ENE-WSW, WNW-ESE e E-W dominantes nos lineamentos magnéticos não diferem muito da tendência registrada nas morfoestruturas do embasamento pré-cambriano, o que fortalece ainda

mais a sua inter-relação. A presença de muitos lineamentos magnéticos na área de predomínio das unidades sedimentares que não correspondem diretamente com os lineamentos morfoestruturais foi apresentada em outros setores, e pode estar ligada a (p.e., Jacques et al, 2014): (i) muitas estruturas profundas não chegam a afetar as unidades sedimentares; e / ou (ii) as estruturas profundas podem ter gerado diferentes estilos de deformação sobre a cobertura sedimentar, o que poderia ter atenuado o seu efeito em pequenas profundidades através de formação de estruturas menores que não estão, necessariamente, posicionadas no mesmo ponto na superfície.

5. Conclusão

As variáveis geomorfométricas orientação de vertentes e curvatura horizontal, associadas aos produtos de relevo sombreado foram eficazes para detecção de lineamentos morfoestruturais, relativos à expressividade superficial de estruturas tectônicas. Já os dados geofísicos do campo magnético anômalo e primeira derivada vertical foram fundamentais para extração de lineamentos magnéticos, relativos à expressividade em profundidade de estruturas tectônicas. A integração destes produtos permitiu obter uma relação, mesmo que nem sempre direta, entre a ocorrência de importantes estruturas tectônicas em subsuperfície e superfície. Estas estruturas pré-existentes foram, provavelmente, reativadas no Cenozoico, Quaternário tardio, e foram responsáveis pelo controle tectônico observado atualmente na paisagem a partir das principais feições geomorfológicas da área de estudo, especialmente na rede de drenagem do rio Paraíba, Goiana e Mamuaba.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, pelo auxílio à pesquisa (Projeto # FAPESP#06/04687-7) e pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor, e ao CNPq, pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo e terceiro autor. Agradecemos ao Prof. Walter Eugênio Medeiros (UFRN) e Roberto Gusmão de Oliveira (CPRM) pela contribuição no tratamento dos dados geofísicos aeromagnéticos.

Referências Bibliográficas

- Andrades-Filho, C. O.; Rossetti, D. F.; Bezerra, F. H. R.; Medeiros, W. E.; Valeriano, M. M.; Cremon, E. H.; Oliveira, R. G. Mapping Neogene and Quaternary sedimentary deposits in northeastern Brazil by integrating geophysics, remote sensing and geological field data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 316-327, 2014.
- Bezerra, F. H. R.; Neves, B. B. B.; Correa, A. C. B.; Barreto, A. M. F.; Suguio, K.. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin - The Cariatá trough, northeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 1, 555-582, 2008.
- Jacques, D.; Machado, R.; Oliveira, R. G.; Ferreira, F. J. F.; Castro, L. G.; Nummer, A. R. Correlation of lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, 39-64, 2014.
- LASA Engenharia e Prospecções S/A e PROSPECTORS Aerolevantamentos e Sistemas Ltda, 2008. **Projeto levantamento aerogeofísico borda leste do Planalto da Borborema**. Rio de Janeiro, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 401 pp.
- Oliveira, R. G. **Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)**. 413 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008
- Morelli, M.; Piana, F. Comparison between remote sensed lineaments and geological structures in intensively cultivated hills (Monferrato and Langhe domains, NW Italy). **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, 4471-4493, 2006.
- Ramli, M. F.; Yusof, N.; Yusof, M. K.; Juahir, H.; Shafri, H. Z. M. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 69, 215-233, 2010.
- Rossetti, D. F.; Góes, A. M.; Bezerra, F. H. R.; Valeriano, M. M.; Brito-Neves, B. B.; Ochoa, F. L. Contribution to the stratigraphy of the onshore paraíba basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 2, p. 313-333, 2012.
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F.. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.