

MAPEMANETO GEOLÓGICO AUXILIADO POR IMAGENS GEOFÍSICAS E DE SATÉLITE, APLICADOS A ROCHAS ÍGNEAS: O EXEMPLO DO BATOLITO ÁGUAS BELAS – CANINDÉ, DOMÍNIO PERNAMBUCO ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL

Charles Henrique Fernandes Sales das Neves¹

Valderez Pinto Ferreira¹

Sergio Pacheco Neves²

Paulo de Barros Correia²

10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v27n2p20-37

¹NEG-LABISE, Departamento de Geologia DGEO/CTG/UFPE, e-mail: charleshfs@hotmail.com; valderez@ufpe.br;

²Departamento de Geologia DGEO/CTG/UFPE, e-mail: serpane@hotmail.com.br; paulobc@ufpe.br

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um mapeamento geológico na escala de 1:50.000 usando como ferramenta auxiliar imagens geofísicas de magnetometria e gamaespectometria, além das imagens de satélite ASTER e LandSAT. A região mapeada abrange a porção noroeste do batólito Águas Belas-Canindé, domínio Pernambuco-Alagoas da Província Borborema, nordeste do Brasil. As imagens de magnetometria e satélite permitiram a interpretação visual de duas direções principais para o arcabouço estrutural da área: NE-SW e NW-SE. As imagens de gamaespectometria foram utilizadas, juntamente com os dados de campo, para delimitar os contatos entre as unidades litológicas da área (plútons graníticos Maravilha, Serra da Caiçara, Tanquinho, e Santana do Ipanema, e Anfibólito). Essas imagens possibilitaram ainda a identificação de uma variação faciológica no plúton Serra da Caiçara, a qual se apresenta como uma variação de potássio (K), que aumenta das bordas para o centro. Em campo foi identificado que essa variação está associada ao aumento na concentração de feldspato potássico e, consequentemente, à diminuição da quantidade de minerais máficos (ex: hornblenda). As direções estruturais foram confirmadas em campo e associadas à orogênese Brasileira-Pan Africana. A direção NW-SE foi identificada como uma fase de baixo ângulo, associada ao ápice da compressão durante a formação do supercontinente Gondwana. Os marcadores estruturais observados, como foliação sigmoide, lineação de estiramento e dobramentos da foliação, com inclinação no sentido de transporte (linha de charneira na direção NE), indicam transporte tectônico para SE. A direção NE-SW foi gerada em sequência, devido ao escape lateral, e corresponde à transcorrência com cinemática sinistral. A movimentação das zonas NE-SW provocou o arrasto da foliação preexistente, formando uma grande trama semelhante a uma trama S-C, bem marcada em imagens magnetométricas.

Palavras chave: Mapeamento Geológico; Magnetometria; Gamaespectometria; Imagens de Satélite; Batólito Águas Belas Canindé

ABSTRACT

In this work we have used geophysical images of magnetometry and gammaspectrometry, as well as ASTER and LandSAT satellite images as support for a geological mapping. The mapped region is located in the northwestern portion of the Aguas Belas-Canindé batholith, Pernambuco-Alagoas domain of the Borborema Province, northeast of Brazil, and the scale used was 1:50,000. The magnetometry and satellite images allowed the visual interpretation of two main directions for the structural framework of the area: NE-SW and NW-SE. The gammaspectrometry images were used, together with field data, to delimit contacts between the lithological units (Maravilha, Serra da Caiçara, Tanquinho, and Santana do Ipanema granite plutons and Amphibolite). In addition, these images allowed the identification of a faciological variation in the Serra da Caiçara pluton, marked as a variation of potassium (K), which increases from the edges to the center of the pluton. In the field it was identified that this variation is associated with the increase in the concentration of K-feldspar and, consequently, the reduction of the mafic minerals (eg. hornblende). The structural directions were confirmed in the field and interpreted as associated with the Brasiliano-Pan African orogenesis. The NW-SE direction was identified as a low-angle phase, associated with the peak of compression during the formation of the Gondwana supercontinent. The observed structural markers such as sigmoid foliation, mineral stretching lineation and foliation folding, with slope in the transport sense (NE-hinge line), indicated tectonic transport for SE. The NE-SW direction was generated in sequence, due to lateral escape, and corresponds to a transcurrence with sinistral kinematics. The movement along the NE-SW shear zones has caused the preexisting foliation to trawl, forming a large plot similar to an S-C frame, well marked in magnetometric images.

Keywords: Geological mapping; Magnetometry; Gammaspectrometry; Satellite images; Águas Belas-Canindé batholith

INTRODUÇÃO

A utilização de métodos geofísicos e de sensoriamento remoto vem se tornando uma ferramenta fundamental para o mapeamento geológico, principalmente na confecção de mapas base e nos ajustes do mapa geológico final. O domínio Pernambuco - Alagoas, nordeste do Brasil, apesar do crescente aumento nos estudos de suas unidades litológicas nos últimos anos, ainda possui poucas informações de mapeamento geológico de detalhe (1:50.000), limitando-se basicamente a mapas regionais (Mendes et al., 2009, folha Arapiraca, SC.24-X-D,

na escala de 1:250.000; Silva Filho et al., 2002).

Neste trabalho foi realizado mapeamento geológico na escala de 1:50.000, no qual foram utilizadas como suporte interpretações feitas em imagens geofísicas e de sensoriamento remoto, correlacionadas com as feições encontradas em campo. A área mapeada engloba parte do batólito Águas Belas-Canindé, Alagoas, sendo assim composta basicamente de rochas graníticas. Para o mapeamento, fez-se uso de imagens geofísicas e de

sensoriamento remoto para melhor caracterizar e delimitar as unidades, investigar o arcabouço estrutural da área mapeada e a colocação deste em um contexto regional. Este trabalho, assim, mostra a utilidade das imagens de satélite para delimitar diferentes unidades graníticas de composições mineralógicas semelhantes, e que são de difícil delimitação.

GEOLOGIA REGIONAL

A área estudada está localizada na Província Borborema (Almeida et al., 1981), (Fig.1), a qual foi afetada pela Orogênese Brasileira (650 – 570 Ma) e possui cerca 450.000 km². Está situada ao norte do Cráton do São Francisco, a oeste é recoberta pela bacia do Parnaíba e a Leste pelas bacias costeiras do Ceará, Potiguar, Paraíba-Pernambuco e Sergipe-Alagoas.

Ao longo dos anos, diversos autores sugeriram diferentes compartimentações para a Província Borborema (Van Schmus et al., 1995; Santos, 1996; Medeiros, 1998; Brito Neves et al., 2000; Van Schmus et al., 2008; Neves, 2015), baseando-se em dados litoestratigráficos, feições estruturais,

dados geocronológicos e assinaturas geofísicas. Van Schmus et al. (1995) propõem a Província Borborema em Domínio Setentrional, Domínio Central e Domínio Meridional. Posteriormente, foram identificados seis domínios crustais na Província Borborema: Médio Coreau; Pernambuco-Alagoas; Rio Grande do Norte; Riacho do Pontal; Sergipano e Cráton São Francisco (Van Schmus et al., 2008). Neves (2015) reitera o modelo proposto em Van Schmus et al. (1995), renomeando as três principais subprovíncias da Província Borborema (Fig.1) em: Norte, localizada a norte da zona de cisalhamento Patos; Central, delimitada pelas zonas de cisalhamento Patos (a norte) e Pernambuco Leste e Oeste (a sul).

Uma das principais características da Orogênese Brasileira é a abundância de intrusões graníticas (Sial, 1986; Ferreira et al., 1998). Silva Filho et al. (2014) sugerem que estas intrusões graníticas na Província Borborema possam ser separadas em pré-colisional (650 – 640 Ma), sin-colisional (620 – 600 Ma), pós-colisional (580 – 550 Ma) e pós-tectônico (550 – 530 Ma).

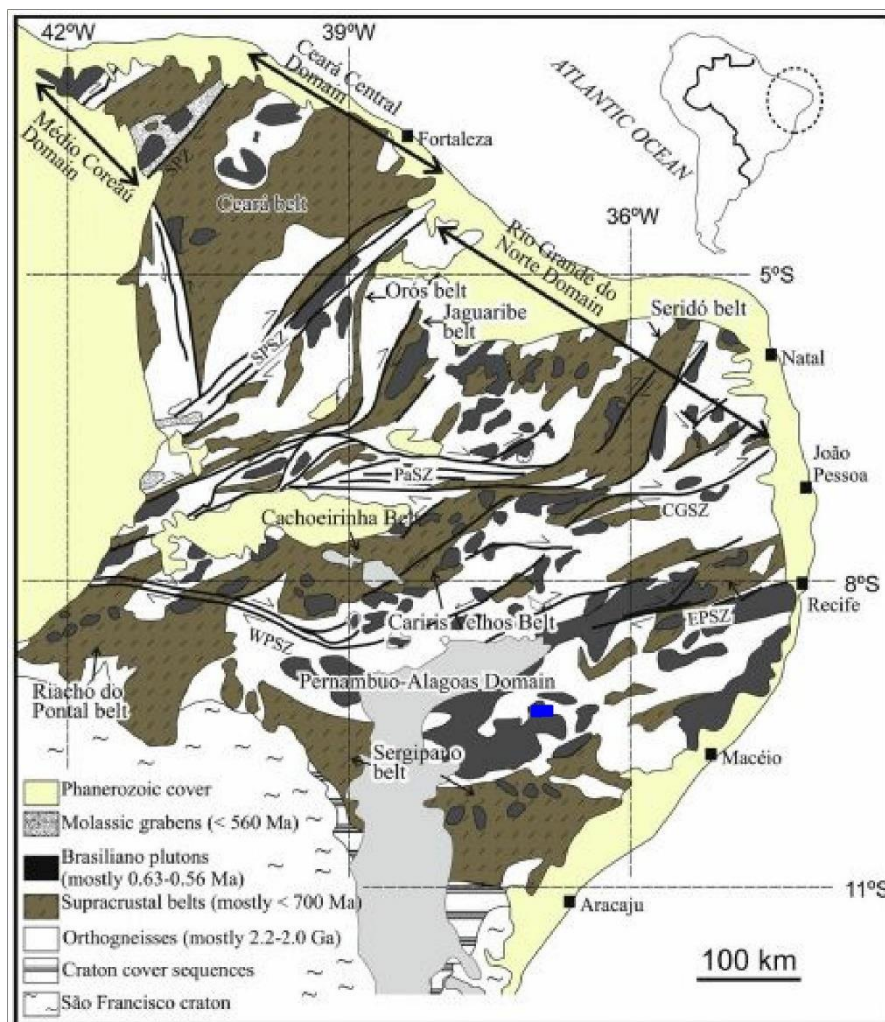


Figura 1: Esboço da Província Borborema e seus limites. Mostrando as zonas de cisalhamento: ZcCG – Campina Grande, ZcPL – Pernambuco Leste, ZcPO – Pernambuco Oeste, ZcPa – Patos, ZcSP – Senador Pompeu, ZcS – Sobral. A área de estudo representada pelo retângulo azul. Fonte Neves (2015).

As principais características estruturais da Província Borborema são as suas zonas de cisalhamento com direção NE-SW e E-W (Vauchez et al., 1995; Neves, 2003). As zonas de cisalhamento Pernambuco e Patos (ambas E-W) são duas das principais estruturas da província e apresentam cinemática dextral. A movimentação dessas estruturas ocasionou a formação de algumas zonas de cisalhamento (NE-SW), que por sua vez apresentam cinemática sinistral (Jardim de Sá, 1994). As zonas de cisalhamento de direção NE-SW possuem cinemática dextral, bem marcadas, na província Norte (Saraiva dos Santos et al., 2008).

Diversos plútons graníticos e sieníticos estão associados com essas zonas de cisalhamento (Ferreira et al., 1998; Neves & Mariano, 1999; Neves et al., 2000; Silva & Mariano, 2000). Neves et al. (2008) restringem o período de atividade principal da zona de cisalhamento Pernambuco entre 587 e 573 Ma.

Domínio Pernambuco – Alagoas

O Domínio Pernambuco-Alagoas (PEAL) (Fig.2), onde se encontra a área estudada, possui uma forma triangular com 70.000 km² de área, delimitado a norte pela Zona de Cisalhamento

Pernambuco e a sul pelas rochas do Domínio Sergipano e Riacho do Pontal (Van Schmus et al., 2008). O domínio encontra-se dividido em duas partes por sedimentos fanerozóicos da Bacia do Jatobá (Silva Filho et al., 2002).

Santos (1996); e Medeiros (1998); agruparam as rochas metamórficas do PEAL nos complexos Cabrobó e Belém do São Francisco. O complexo Cabrobó é uma unidade predominantemente supracrustal dividido em três suítes (Venturosa, Inhapi e Palmares). É composto de biotita-granada gnaisses, com intercalação de quartzito, quartzoxisto, rochas calcio-silicática, anfibolito, e ortognaisses migmatizados. O complexo Belém de São Francisco é composto de rochas crustais profundas predominantemente ígneas (migmatitos e ortognaisses), que variam em composição de tonalito a granito (Van Schmus et al., 2008). Silva Filho et al. (2002) apresentam uma idade de 2.079 ± 34 Ma para a cristalização do protólito dos ortognaisses do Complexo Belém do São Francisco e uma idade metamórfica de 655 ± 7 Ma, sugerindo assim que o complexo de Belém do São Francisco constitui o embasamento do complexo Cabrobó.

As principais zonas de cisalhamento que compõem o PEAL e regem sua estruturação são: Zona de Cisalhamento Pernambuco de direção E-W e cinemática dextral; as zonas de cisalhamento de cinemática sinistral e direção NE-SW Rio da Chata, Palmares, Limitão Caetés, Itaíba e São Bento do Uma; e as zonas de cisalhamento transpressivas de direção NE-SW Garanhuns e Maravilha. Silva Filho et al., (2002) identifica cinco batólitos graníticos no PEAL, são eles: Garanhuns, Ipojuca-Atalaia, Correntes-Marimbondo, Águas Belas-Canindé e Buíque-Paulo Afonso (Fig. 2). Os plútons (Maravilha, Serra da Caiçara, Tanquinho, Santana do Ipanema e Anfibolito) que afloram na área de estudo deste trabalho (Fig. 3) fazem parte do batólito Águas Belas-Canindé.

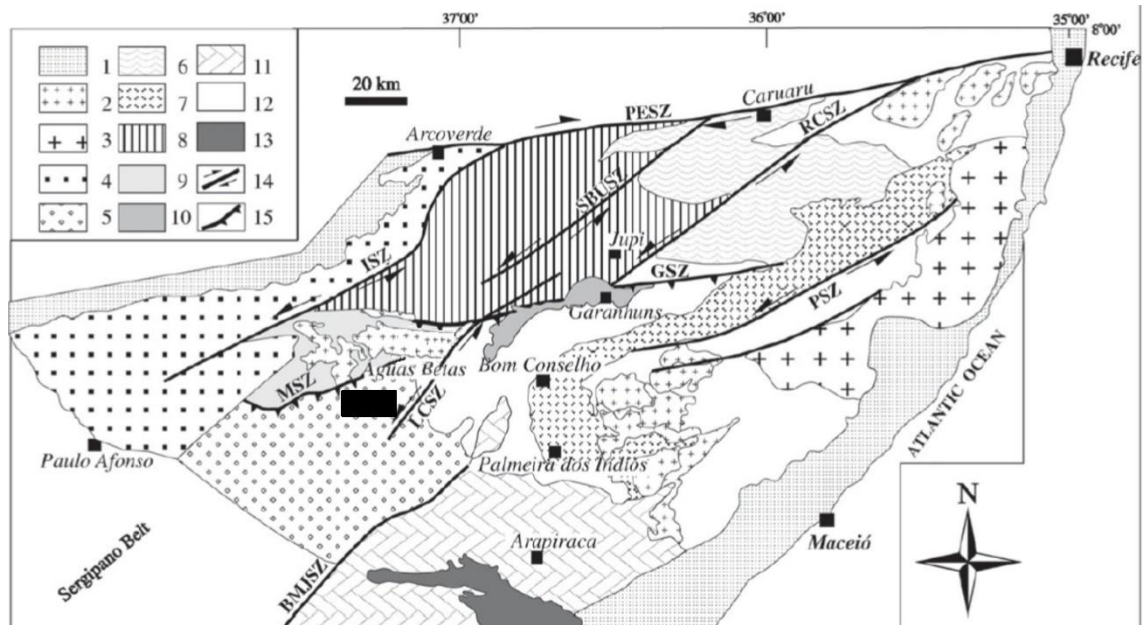


Figura 2: Mapa geológico simplificado do Domínio Pernambuco – Alagoas (Silva Filho et al., 2010), mostrando a localização da área estudada (retângulo preto). 1 - Cobertura sedimentar paleozóica; 2 - Granitoides brasileiros; 3 - Batólito Ipojuca-Atalaia; 4 - Batólito Buíque-Paulo Afonso; 5 - Batólito Águas Belas-Canindé; 6 - Batólito Garanhuns; 7 - Sequência Palmares; 8 - Sequência Venturosa; 9 - Quartzito Garanhuns; 10 - Sequência Inhapi; 11 - Alagoana Sub- cinturão; 12 - Complexo Belém do São Francisco; 13 - Bloco arqueano; 14 - Zona de cisalhamento transcorrentes (PESZ-Pernambuco; RCSZ-Rio da Chata; PSZ-Palmares; LCSZ-Limitão-Caetés; ISZ-Itaíba; SBUSZ-São Bento do Una); 15 - Zona de cisalhamento transpressiva (GSZ-Garanhuns, zona de cisalhamento MSZ-Maravilha).

GEOLOGIA LOCAL

Os mapas geológicos tomados como base para este trabalho (ex: Mendes et al., 2009, folha Arapiraca, SC.24-X-D, na escala de 1:250.000; Silva Filho et al., 2002) são de escala regional e não individualizam as unidades litológicas aqui identificadas: plútons Maravilha, Serra da Caiçara, Tanquinho, Santana do Ipanema e

Anfibolito. Estes plútons foram separados com o auxílio de sensoriamento remoto e mapas geofísicos gamaespectrométricos (contagem individual dos radioelementos Th, U e K; distribuição ternária destes elementos) associados a mapeamento geológico de detalhe (Fig. 3).

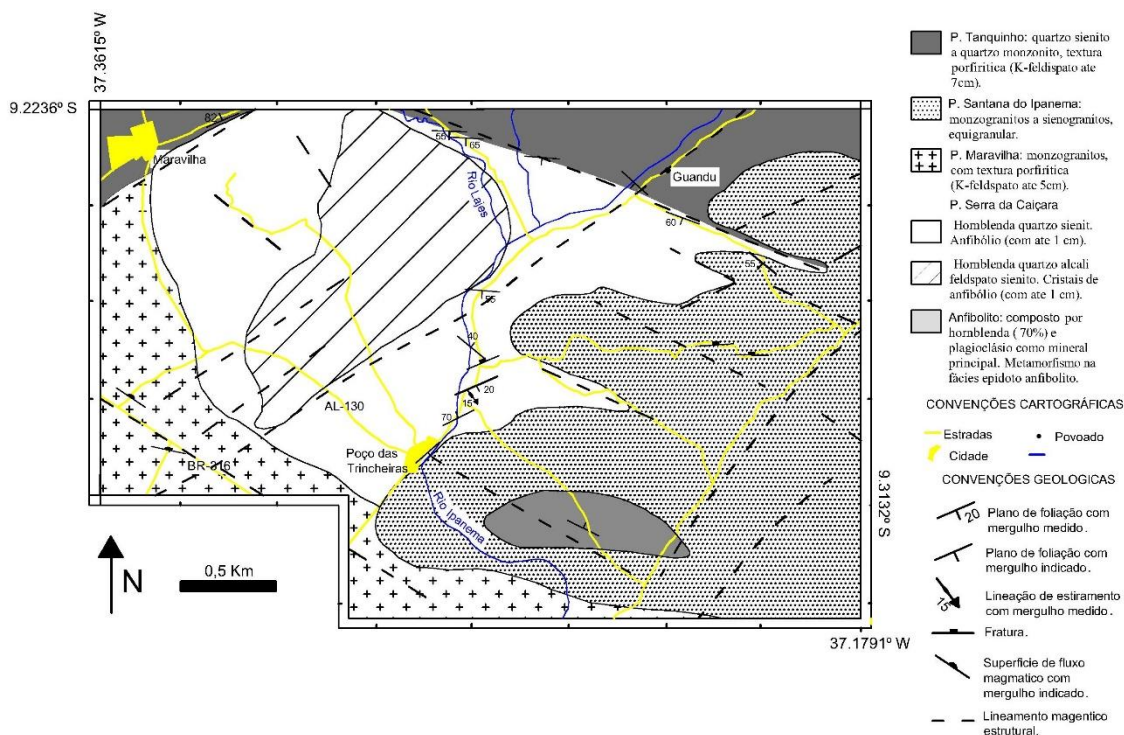


Figura 3: Mapa geológico de porção do batólito Águas Belas – Canindé, Domínio Pernambuco – Alagoas da Província Borborema, região a norte de Santana do Ipanema – AL. Mapa enfatizando as principais unidades mapeadas. Escala de 1:50000.

Plúton Maravilha

É constituído por monzogranitos (Fig. 4a), com textura porfirítica caracterizada por fenocristais de feldspato potássico (chegando a atingir 5 cm). A associação mineral é constituída pelos minerais félsicos: feldspato potássico, plagioclásio e quartzo. As fases máficas são biotita e anfibólito. Epídoto, titanita, magnetita e pirita estão presentes como minerais acessórios. Uma de suas principais características é uma forte foliação magmática, que preferencialmente possui direção NW-SE.

Plúton Serra da Caiçara

Consiste de hornblenda quartzo sienito a hornblenda quartzo álcali feldspato sienito, localmente porfirítico. Não possui orientação preferencial aparente dos minerais. A assembleia mineral desta unidade é dada por feldspato potássico, quartzo e plagioclásio. Anfibólito é o

principal componente máfico e titanita, epídoto e magnetita compõem a mineralogia acessória. Os cristais de anfibólito, que chegam a atingir 1 cm em seu maior comprimento (Fig. 4b), juntamente com a ausência de biotita distinguem esta unidade das demais.

Plúton Tanquinho

É composto de quartzo sienito a quartzo monzonito (Fig. 4c). As rochas possuem textura porfirítica, dada pelos fenocristais de feldspato potássico (com até 7 cm de comprimento), envoltos por uma matriz de composição quartzo feldspática (a matriz possui leve orientação dos minerais por fluxo do magma), com biotita e anfibólito presentes. A associação mineral é composta por feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, compondo as fases félsicas. As fases máficas incluem biotita e hornblenda. Titanita e magnetita ocorrem como minerais acessórios.

Plúton Santana do Ipanema

As rochas dessa unidade são monzogranitos a sienogranitos equigranulares (Fig. 4d). A assembleia mineral essencial é composta por feldspato potássico, plagioclásio e quartzo, enquanto biotita e, menos frequentemente, hornblenda são as principais fases máficas. Titanita e magnetita também estão presentes como minerais acessórios. As rochas desta unidade apresentam uma leve orientação magmática na direção WNW-ESE.

Anfibolito

Esta unidade é composta majoritariamente por hornblenda (chega a 70% de hornblenda) e plagioclásio como minerais principais (Fig. 4e), e titanita e epídoto como minerais acessórios. A associação mineral sugere um metamorfismo na fácies epídoto anfibolito. A rocha encontra-se orientada na direção 120° Az.

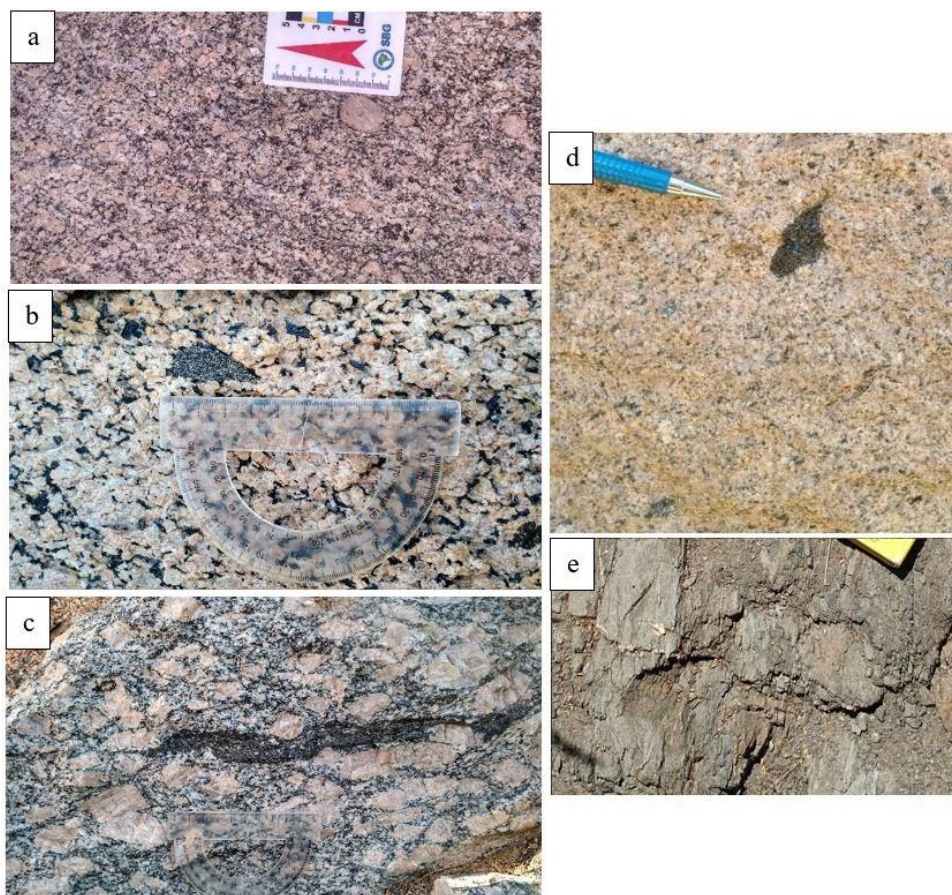


Figura 4: a) Plúton Maravilha, monzogranito de textura porfirítica, na imagem é possível observar um megacristal de K-feldspato com 3cm em seu eixo maior. b) Plúton Serra da Caiçara, hornblenda quartzo sienito, destaque para os cristais de anfibólio que atingem 1cm em seu eixo maior e para presença de enclaves dioríticos. c) Plúton Tanquinho, quartzo monzonito com textura porfirítica dada pelos megacristais de K-feldspato com até 7cm em seu eixo maior. d) Plúton Santana do Ipanema, sienogranito equigranular rico em biotita, na imagem é possível observar aglomerados desse mineral. e) Anfibolito, metamorfismo na fácies epídoto anfibolito.

MÉTODOS

Geofísica

Os dados geofísicos foram adquiridos junto à biblioteca da CPRM-Recife (Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Recife) no formato GRD, aptos para serem trabalhados no Oasis Montaj 6.4.2. Os arquivos obtidos de magnetometria e gamaespectrometria são referentes às folhas Arapiraca (1:250.000) e Santana do Ipanema (1:100.000).

Os dados de magnetometria e gamaespectrometria foram coletados durante o projeto Aerogeofísico Paulo Afonso-Teotônio Vilela (código: 1104). A empresa responsável pelo levantamento e processamento dos dados foi a Microsurvey Aerogeofísica e Consultoria Científica Ltda, a serviço da CPRM, no ano de 2011. O levantamento abrangeu os Estados de Alagoas, Pernambuco, Bahia e Sergipe, numa área total de 40.819 km², que foi sobrevoada a uma altura de voo de 100 m. As linhas de produção possuem uma direção N-S e foram feitas a um espaçamento de 0,5 km, enquanto as linhas de controle, perpendiculares às de produção, foram feitas com um espaçamento de 10 km. O tempo de integração gama foi de 1 segundo, o que representa uma distância de 73,6 m entre os pontos de medida no solo. Já o intervalo de leitura do magnetômetro foi de 0,01 segundos, que para uma velocidade de 265 km/h da aeronave representa um espaçamento de 0,736 m no terreno.

Os dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos foram processados através do software Oasis

Montaj 8.2 da Geosoft pela CPRM. Os mesmos foram interpolados utilizando o método Bidirecional, com célula de 250 m.

Os mapas magnetométricos trabalhados foram: Contorno do Campo Magnético Anômalo Total, Primeira Derivada na direção Z, Amplitude do Sinal Analítico (Nabighian, 1984; Roest et al., 1992), Inclinação do Sinal Analítico (TDR), também chamado de Tilt Derivative, (Miller & Singh, 1994) e Modelo Digital de Elevação de Terreno. A magnetometria permite analisar a diferenças magnéticas associadas principalmente à composição das rochas, no tocante aos minerais magnéticos (magnetita, ilmenita, pirrotita e hematita). Nos mapas, os alinhamentos de alto ou baixo magnético, ou até mesmo estruturas bipolares, indicam a presença de possíveis estruturas geológicas lineares (falhas, fraturas, zonas de cisalhamento). Com isso, esses mapas foram utilizados para interpretação visual de lineamentos magnéticos estruturais. Apresenta-se neste trabalho o mapa magnético de Tilt Derivative (Fig. 5), que se baseia na razão entre a derivada vertical (VDR) e a derivada horizontal total (THDR); ele normaliza a primeira em relação à segunda. Por extrair o ângulo que tangencia a razão entre derivadas, o Tilt Derivative destaca anomalias tanto de grandes ou pequenas amplitudes, ou seja, ele é eficaz no balanceamento de amplitudes de diferentes anomalias. Segundo Verduzco et al. (2004), as vantagens deste método são a capacidade de normalizar imagens provenientes de dados de campo magnético e o fato de ter bons resultados na presença de ruído.

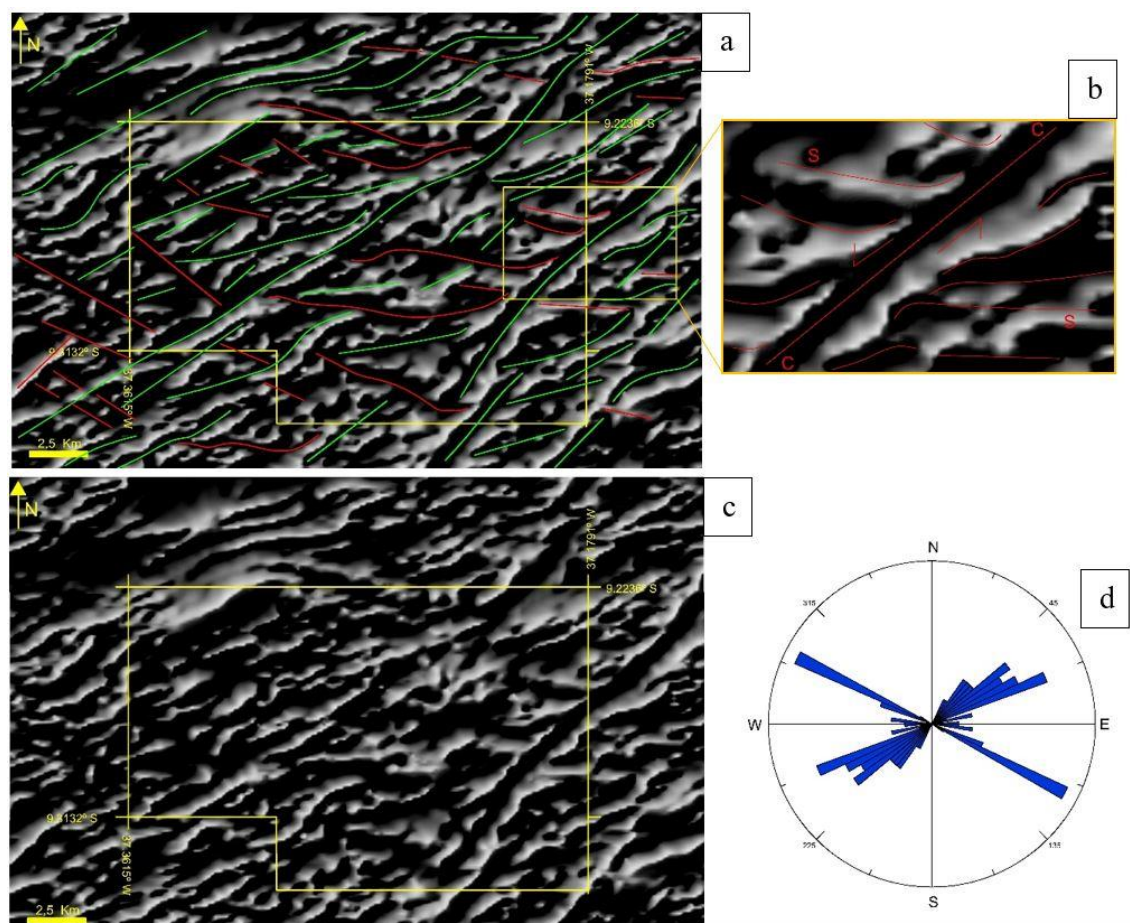


Figura 5: a) Mapa de Tilt Derivative, com as marcações dos principais lineamentos magnéticos nas direções NE-SW (verde) e WNW-ESE (vermelho). b) Recorte do mapa de Tilt Derivative, enfatizando a similaridade com as estruturas tipo S-C, produzidas pela movimentação sinistral das estruturas de direção NE-SW. c) Mapa de Tilt Derivative, sem as marcações dos principais lineamentos magnético. d) Diagrama apresentando as direções dos lineamentos magnéticos marcados, enfatizando o predomínio das direções NW-SE e NE-SW. Polígono amarelo delimitando a área mapeada (Fig. 3).

As imagens gamaespectrométricas utilizadas foram: contagem individual dos radioelementos (K, eTh e eU) e distribuição ternária dos radioelementos (Fig. 6). Esse método possibilita fazer uma medição da variação geoquímica dos elementos potássio (K), urânio (U) e tório (Th). Essa medição ocorre a partir da emissão da radiação gama do potássio e dos isótopos filhos do Th e U, com alcance de 30cm de profundidade (Dickson e Scott, 1997). Os elementos Th e U não emitem radiação gama, por isso utiliza-

se a radiação emitida pelos seus isótopos filho ^{208}Ti e ^{204}Bi , respectivamente. Com esses mapas foi possível fazer uma separação prévia das unidades, baseadas na variação dos radioelementos. Esses mapas, posteriormente, ajudaram na delimitação lateral das unidades, juntamente com os pontos obtidos em campo que marcavam as relações de contato entre as mesmas. Além disso, foi permitido também identificar uma variação faciológica no plúton Serra da Caiçara, que será discutido mais à frente.

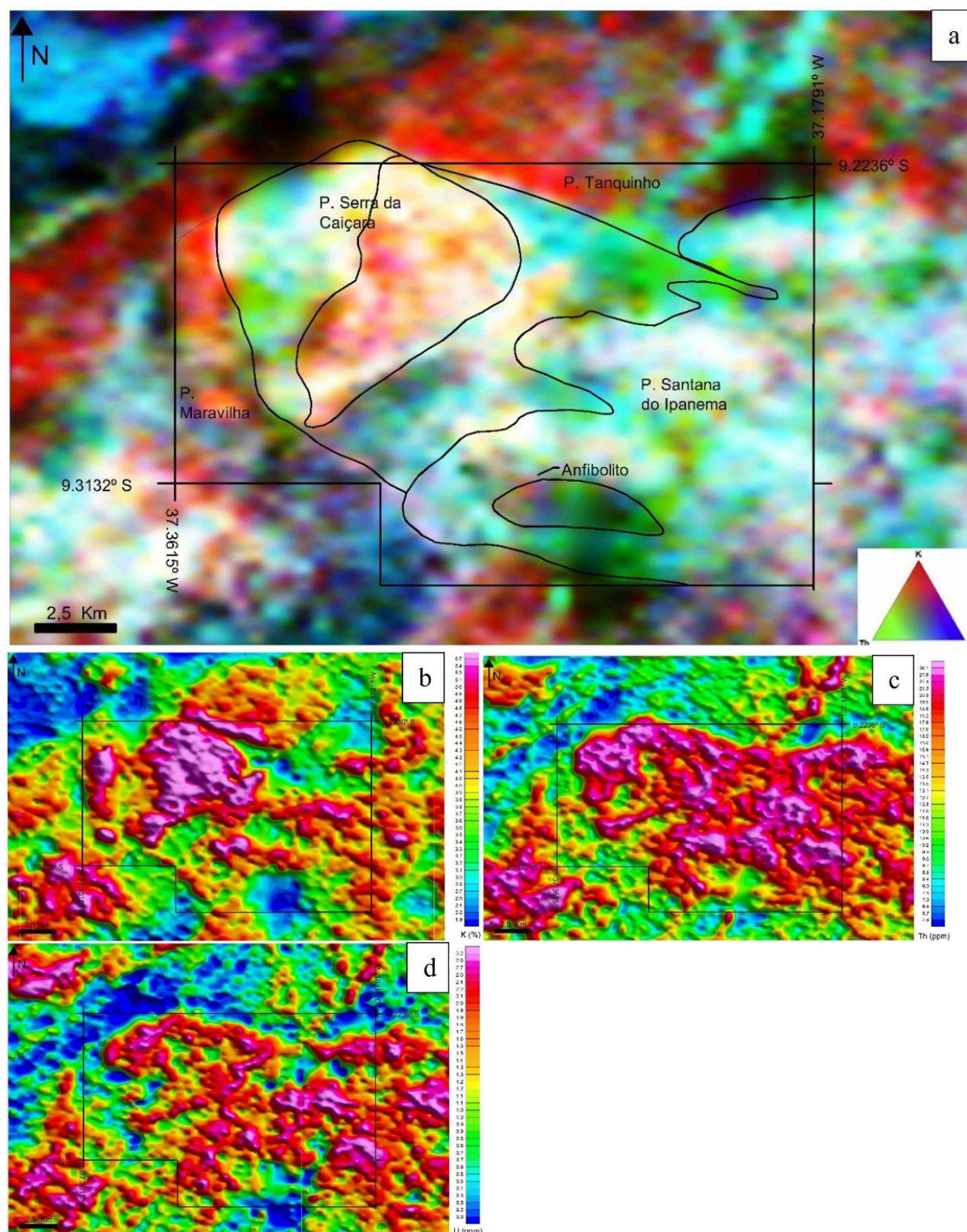


Figura 6: a) Mapa de distribuição ternária dos radioelementos (K, U e Th). b) Mapa de concentração de potássio (K). c) Mapa de concentração de tório (Th). d) Mapa de concentração de urânio (U). Mapas utilizados para identificar as diferentes concentrações dos radioelementos que caracterizam cada rocha estudada, além da variação faciológica do plúton Serra da Caiçara que é dada pela variação na concentração de feldspato potássico que aumenta em direção ao centro do corpo. Polígono preto delimita a área onde foi realizado o mapeamento geológico (Fig.2).

Sensoriamento Remoto

De modo a confrontar e embasar a veracidade dos lineamentos magnéticos estruturais interpretados com os mapas geofísicos magnetométricos, foram utilizadas as imagens de satélite ASTER, Global Digital Elevation Model (GDEM) e LandSAT. Estes satélites obtêm as informações dos alvos desejados a partir da interação da radiação eletromagnética com os objetos, sem que haja contato entre o alvo e o sensor. As imagens ASTER foram obtidas em 17 de outubro de 2011 e disponibilizadas pela NASA através do site earthexplorer.usgs.gov. Posteriormente, estas imagens foram trabalhadas no software ENVI 4.7, no

qual foram aplicados filtros direcionais visando o realce das estruturas paralelas as direções dos filtros, os filtros que melhor enfatizaram as estruturas principais da área foram os de direção 90Az (Fig.7a) e 180Az (Fig.7b).

As imagens de sensoriamento remoto foram utilizadas para visualização de lineamentos estruturais, os quais nas imagens de satélite se apresentam como bordas. Bordas são limites entre dois objetos espectralmente distintos, com variação significativa dos níveis de cinza (Meneses e Almeida, 2012). Em particular, as imagens LandSAT, foram utilizadas também para marcar estradas e vias de acesso aos afloramentos, cursos de água, além dos contornos das cidades e povoados.

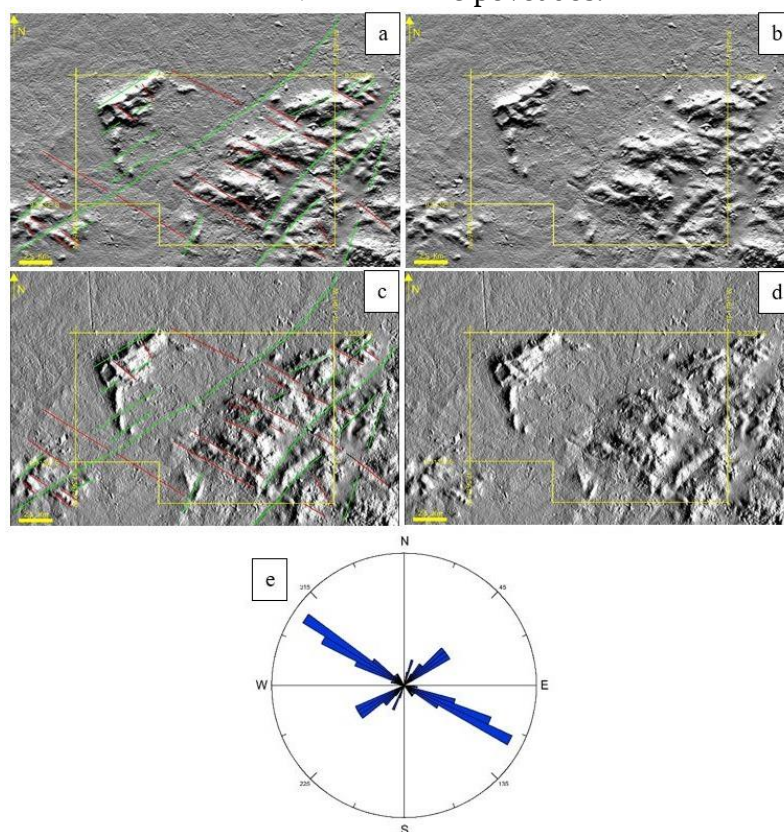


Figura 7. Imagens de satélite ASTER. Ênfase para marcação das estruturas NE-SW (verde) e WNW-ESSE (vermelho) principais. a) Imagem após a aplicação do filtro direcional na direção 90Az, com a marcação das estruturas interpretadas. b) Imagem a sem a marcação das estruturas. c) Imagem após aplicação do filtro direcional na direção 180Az, com a marcação das estruturas interpretadas. d) Imagem c sem a marcação das estruturas. e) diagrama de roseta com as direções dos principais lineamentos observados.

]

RESULTADOS

Foi realizada a integração dos dados interpretados previamente, com as imagens geofísicas e de satélite, com os dados obtidos no trabalho de campo, em que foram visitados 100 afloramentos representativos das unidades encontradas na área mapeada.

Os mapas geofísicos, em especial os diagramas ternários, juntamente com dados obtidos em trabalhos de campo permitiram a individualização das diferentes unidades litológicas da área mapeada. Além disso, identifica-se também uma variação faciológica no plúton Serra da Caiçara, discutida adiante.

As cinco unidades principais foram identificadas na área estudada (Fig. 6) são: Maravilha, que possui maior concentração de Urânio (U). Tanquinho, que possui anomalias significativas e uniformes de Potássio (K). Serra da Caiçara, que é marcada por uma variação na concentração dos radioelementos da borda do corpo para o centro, se sobressaindo a anomalia de Potássio. Santana do Ipanema, que não apresenta variações significativas, demonstrando considerável homogeneidade, e Anfibolito, que apresenta anomalias de Tório (Th) e Urânio.

DISCUSSÃO

Os mapas geofísicos magnéticos (magnético de campo total, primeira derivada na direção Z, Amplitude do Sinal Analítico e TILT) juntamente com as imagens de satélite deixam claras a existência de duas direções principais das estruturas na região, uma na direção NE-SW e outra na direção NW-SE (Fig. 3 e 5). Os mapas geofísicos por possuir maior amplitude de sinal que as imagens de satélite, permitem identificar mais estruturas, porém em ambos os métodos fica clara a existência das duas direções principais, facilmente observadas nos diagramas de roseta apresentados nas

figuras 3d e 5e. A resposta obtida com a aplicação do filtro TILT é a que melhor destaca as estruturas, possibilitando também fazer análise cinemática das mesmas (Fig. 3b).

Essas tendências direcionais estão associadas com a orogênese Brasileira-Pan Africana, que teve seu auge compressional na Província Borborema por volta de 620 Ma (Santos et al., 2003; Castro et al., 2003; Van Schmus et al., 2008). Em campo foram encontradas duas fases de deformação associadas a essas duas direções principais, uma de baixo ângulo e outra transcorrente. Foi possível identificar que a direção NW-SE estaria associada à fase de baixo ângulo, mesma direção apresentada em Silva Filho et al. (2007) para a sequência Venturosa; já a direção NE-SW, provavelmente relacionada com a fase transcorrente.

O plúton Serra da Caiçara possui idade de cristalização U-Pb de 616 ± 3.5 Ma (Mendes et al., 2009), que se aproxima da idade do auge da compressão na Província Borborema e marca bem a deformação de baixo ângulo. Associados a essa deformação, foram identificados afloramentos que apresentam foliação sigmoide, lineação de estiramento mineral e dobramentos da foliação, com inclinação no sentido do transporte (linha de charneira na direção NE). Todos os casos indicam um transporte para SE (Fig. 8). A tectônica de baixo ângulo no domínio Pernambuco – Alagoas também afeta as sequências Inhapi (rochas metassedimentares) e Venturosa (rochas metaígneas), possuindo linhas de estiramento principal NW-SE (Silva Filho et al., 2007), direção semelhante a encontradas na área mapeada.

É possível que durante a fase de transcorrência, que sucede a fase de baixo ângulo, as zonas de cisalhamento transcorrentes NE-SW tenham sido formadas através de escape lateral, devido à compressão. A movimentação

sinistral das zonas de cisalhamento NE-SW provocou um arrasto da foliação preexistente na direção WNW-ESE, formando um arcabouço semelhante a uma trama S-C (Fig. 5b) de grandes dimensões (Martini & Bitencourt, 2014).

Associado às zonas de cisalhamento transcorrentes NE-SW podem ser encontrados grandes enclaves

anfibolíticos (~1m), orientados segundo a direção NE-SW (Moyen *et al.*, 2003), bandas de cisalhamento, foliação de alto ângulo com direção NE-SW e deformação de feldspato potássico (fig. 9). Tais feições são encontradas nas bordas dos corpos, principalmente do Serra da Caiçara.

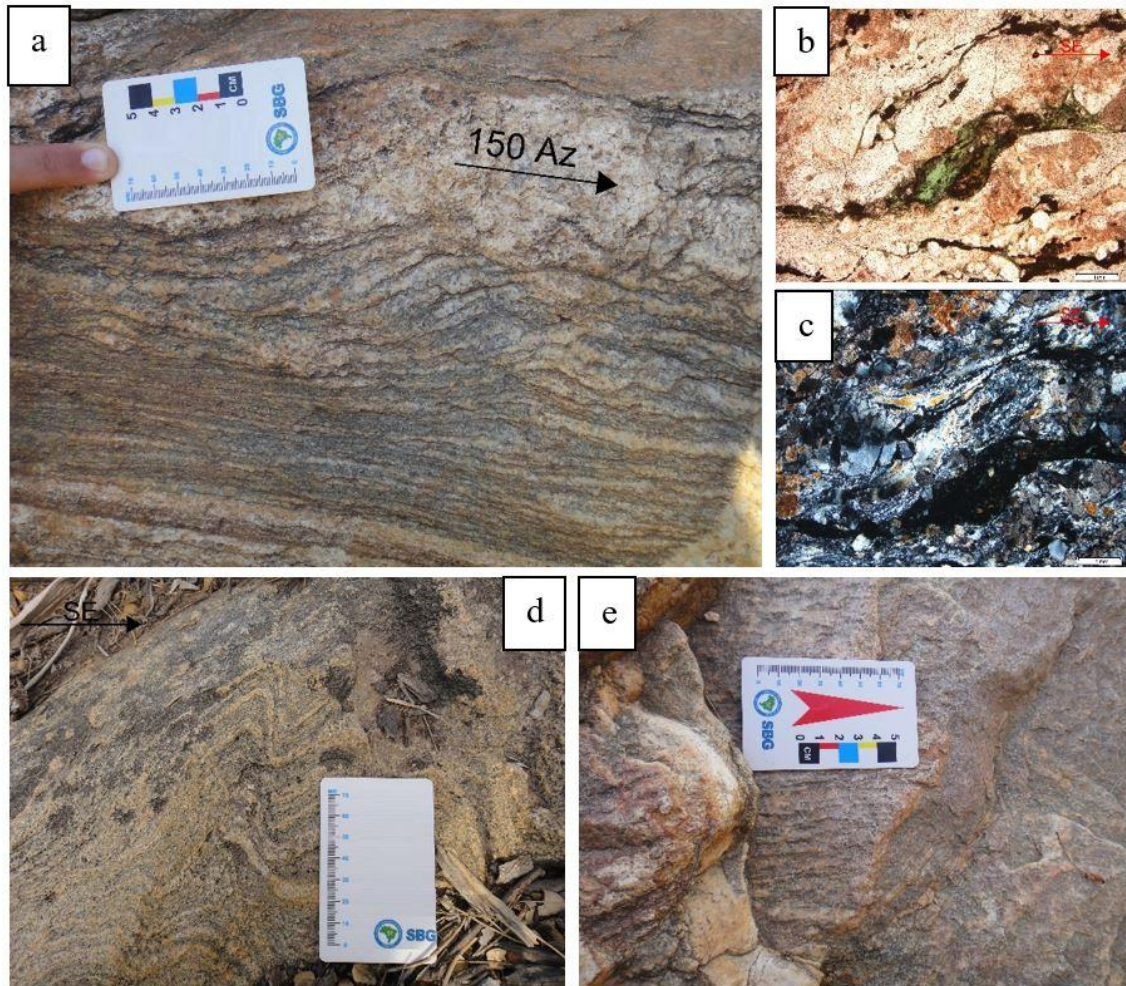


Figura 8: a) foliação sigmoide, indicando transporte do topo para 150Az. b) e c) Trama S-C observada em lâmina delgada, também indicando transporte do topo para SE; em nicois paralelos (b), nicois cruzados (c) ambas com escala de 1mm. d) Foliação apresentando dobras inclinadas para sudeste (linha de charneira com atitude 35°/22Az). e) Lineação de estiramento com sentido de caimento para SE (atitude 14°/141Az). Todas as imagens representam feições do plúton Serra da Caiçara.

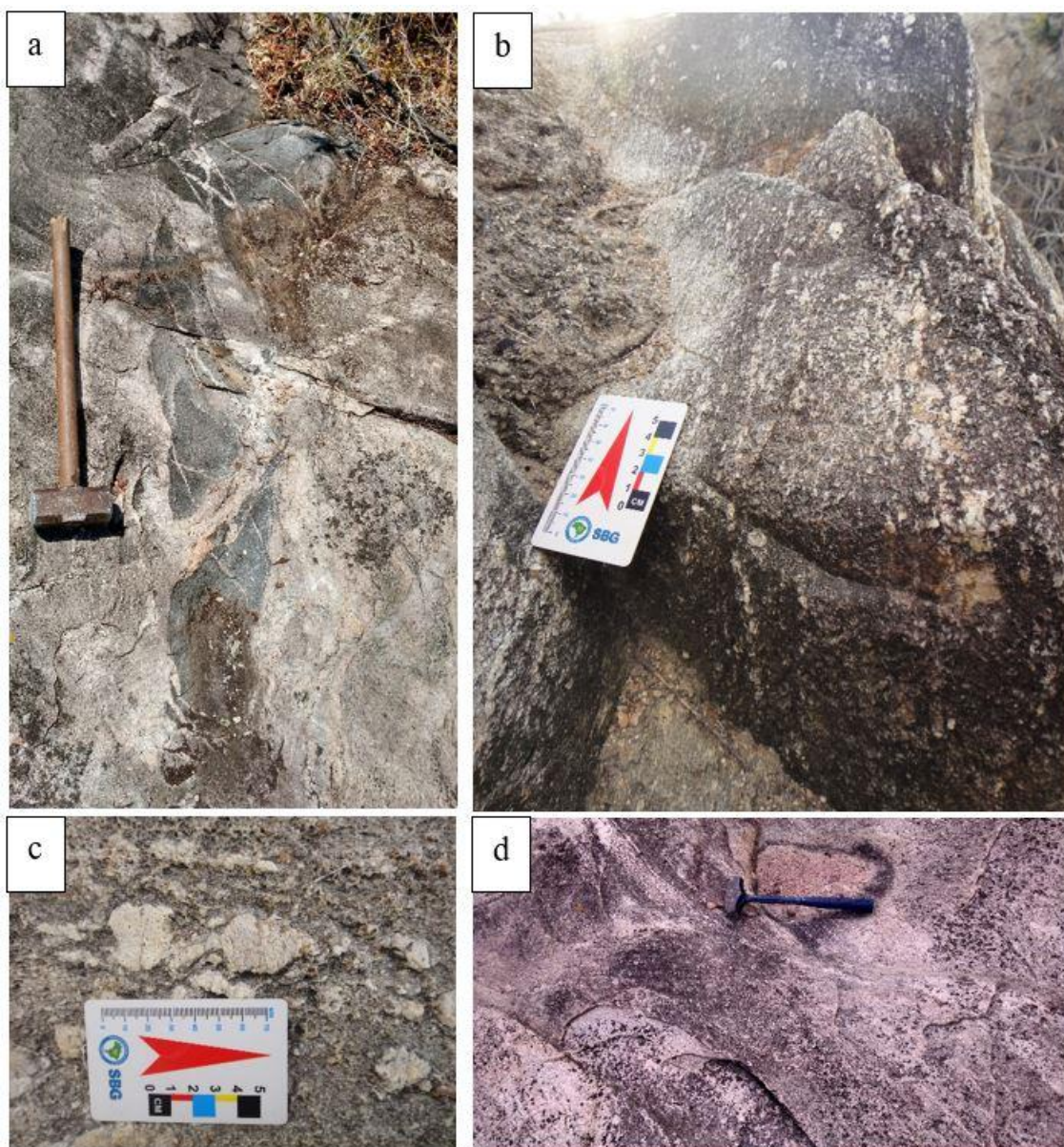


Figura 9: Feições associadas as zonas de cisalhamento NE-SW a) Enclaves anfibolíticos com aproximadamente 1m, orientados NE-SW; cabo da marreta apontando para direção NE. b) Foliação de alto ângulo (inclinação 82°), observada na borda noroeste do plúton Serra da Caiçara. c) Deformação dúctil em feldspato potássico, observado em afloramento do plúton Tanquinho. d) banda de cisalhamento indicando uma cinemática sinistral. Todas as imagens se encontram em planta.

Analisando as características observadas nos trabalhos com os mapas de contagem individual e distribuição ternária dos radioelementos (K, Th e U) para as cinco unidades principais: plútons Maravilha, Tanquinho, Serra da Caiçara, Santana do Ipanema e Anfibolito (Fig. 6), foi possível identificar que as fortes anomalias de

potássio observadas no plúton Tanquinho, associadas com a grande concentração de feldspatos potássicos presente. Vale salientar que nesta unidade os cristais de feldspato potássico chegam a atingir 7cm de comprimento no maior eixo. No centro do plúton Serra da Caiçara onde as anomalias de potássio se sobressaem, também é maior a

concentração de feldspato potássico (facies hornblenda quartzo álcali feldspato sienito). Vale destacar que sem o auxílio das imagens em questão, seria muito mais difícil a delimitação do Anfibolito, visto que não são encontrados muitos afloramentos desta unidade em campo, devido a uma forte alteração intempérica.

CONCLUSÃO

As imagens magnetométricas e de sensoriamento remoto permitiram a identificação de duas direções estruturais principais, associadas à orogênese Brasileira: uma fase de baixo ângulo, de direção NW-SE; e uma subsequente fase transcorrente de direção NE-SW e cinemática sinistral, a qual foi observada em imagens magnéticas. Foi destacada a utilização do filtro TILT aplicado na magnetometria para marcação das estruturas. O trabalho possibilitou também a separação e delimitação das cinco unidades da área (plútons Maravilha, Serra da Caiçara, Tanquinho, Santana do Ipanema e Anfibolito), além da identificação da variação faciológica no plúton Serra da Caiçara.

Por fim, o trabalho contribui para maior conhecimento dos plútons que compõem o batólito Aguas Belas – Canindé, além de inclusão do arcabouço estrutural da área no contexto tectônico da Província Borborema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) e ao National Aeronautics and Space Administration (NASA) por fornecer os dados utilizados nesse trabalho. Agradecemos também à UFPE pela estrutura oferecida, como também agradecemos às instituições financiadoras deste trabalho: a FACEPE através do processo APQ-1738-1.07/12 e

CNPq através do processo 471034/2012-6, que custearam as atividades de campo. Por fim, também agradecemos a Pierre Baracho, pelo auxílio em campo, e Ruth Freitas pelas correções ortográficas.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Science Review*, 17: 1-19.
- Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds) *Tectonic evolution of South America*. International Geological Congress p. 151-182.
- Castro, N.A., Basei, M.A.S., Sato, K., 2003. Nd data from Central Ceará Domain: Archean relics, Paleoproterozoic record and Neoproterozoic crustal reworking. In: *Proceedings IV Symposium on South American Isotope Geology, Brazil*, pp. 160–163.
- Dickson, B. L., Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australia Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 187-200.
- Ferreira, V.P., Sial A.N., Jardim de Sá, E.F. 1998. Geochemical and isotopic signatures of the Proterozoic granitoids in terranes of the Borborema Province, northeastern Brazil. *Journal South American. Earth Science* 11, 439-455.
- Jardim de Sá, E.F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Panafricana. Tese de

- Doutorado, Universidade de Brasília - 762p.
- Martini, A. & Bitencourt, F. 2014. Caracterização cinemática de uma zona de cisalhamento transcorrente de direção NNE marcada na evolução de seu magmatismo granítico sintectônico na região de Camboriú, SC. Geol. USP, Sér. cient., v. 14, n. 3, p. 6-74.
- Medeiros, V. C., Santos, E. J. 1998. Folha Garanhuns (SC.24-X-B, escala 1:250.000). Integração Geológica (Relatório Interno), CPRM. Recife-PE, Brasil.
- Meneses, P. R., Almeida, T. de., 2012. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. UnB/CNPq, Brasília, p. 176-179.
- Mendes, V.A., Brito, M.F.L., Paiva, I.P., 2009. Programa Geologia do Brasil-PGB. Arapiraca. Folha SC.24-X-D. Estados de Alagoas, Pernambuco e Sergipe. Mapa Geológico. Recife: CPRM, 2009, 1 mapa, color, 112,37 cm x 69,42 cm. Escala – 1:250.000.
- Miller, H.G. & SINGH, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics. 32(2-3): 213–217.
- Moyen J. F., Nédélec A., Martin H., Jayananda M., 2003. Syntectonic granite emplacement at different structural levels: the Closepet granite, South India. Journal of Structural Geology, 25, 611–631.
- Nabighian, M., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations. Geophysics 49, 780e786.
- Neves, S.P. & Mariano, G., 1999. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: the Pernambuco lineament, northeastern Brazil. J. Struct. Geol, 21, p.1369–1383.
- Neves, S.P., Vauchez, A., Feraud, G., 2000. Tectono-thermal evolution, magma emplacement, and shear zone development in the Caruaru area (Borborema Province, NE Brazil). Precambrian Re, 2000, 99, p.1-32.
- Neves, S.P., 2003. Proterozoic history of the Borborema Province (NE Brazil): correlations with neighboring cratons and Pan-African belts, and implications for the evolution of western Gondwana. Tectonics 22 (4), 1031.
- Neves, S.P., Bruguier, O., Bosch, D., Silva, J.M.R., Mariano, G., 2008. U-Pb ages of plutonic and metaplutonic rocks in southern Borborema Province (NE Brazil): timing of Brasiliano deformation and magmatism. Journal of South American Earth Sciences, 25, 285-297.
- Neves, S. P. 2015. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brasil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. Journal of South American Earth Sciences, (58), 150-164.
- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3D analytical signal. Geophysics 57 (1), 116e125.
- Santos, E.J., 1996. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39º, Salvador, Anais, 6: 47-50.
- Santos, T.J.S., Santos, A.A., Dantas, E.L., Fuck, R.A., Parente, C.V., 2003. Nd Isotopes and the provenance of metasediments of the Itatiaia Group, northwest

- Borborema Province, NE Brazil. Proceedings of the IV Symposium on South American Isotope Geology, Brazil, pp. 286–289.
- Saraiva dos Santos, T. J., Fetter, A. H., Hackspacher, P. C., Van Schmus, W. R., Nogueira Neto, J. A., 2008. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 271–284.
- Sial, A. N., 1986. Granite types in northeast Brazil Current Knowledge. *Revista Brasileira de Geociências*, 16, 54-72.
- Silva, J.M.R. & Mariano, G., 2000. Geometry and kinematics of the Afogados da Ingazeira shear zone, northeast Brazil. *International Geology Review*, v. 42, p.86-95.
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Van Schmus, W. R. 2002. Crustal evolution of the Pernambuco-Alagoas complex, Borborema Province, NE Brasil: Nd isotopic data from Neoproterozoic granitoids. *Gondwana Research*, 5, 409–422.
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Van Schmus, W. R., Armstrong, R. A., Rangel Da Silva, J. M., Osako, L. S., Concentino, L. M. 2014. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and Nd signatures of supracrustal sequences and orthogneisses constrain the Neoproterozoic evolution of the Pernambuco-Alagoas domain, southern part of Borborema Province, NE Brazil. *International Journal of Earth Science (Geologische Rundschau)*, Springer.
- Van Schums, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, P.C., Babinsky, M. 1995. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of African Earth Sciences*, 8, 267-288.
- Van Schmus, W. R., Oliveira, E. P., Silva Filho, A. F., Toteu, S. F., Penaye, J., Guimarães, I. P. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brasil and the Central African Fold Belt. *Geological Society, London, Special Publications* 2008. v. 294, p. 69-99.
- Verduzco, B., Fairhead, C., Green, C., Mackenzie, C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116-119.