Análise multiespacial para mapeamento geológico: estudo de caso no corpo gabróico-granítico, Faixa de Dobramentos Sergipana

Multispacial analytics to geological mapping: case study at gabroic-granitic body, Sergipano Fold Belt

> Lauro Roberto de Jesus Rosa Geólogo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil lauro.geo@ufrgs.com.br

> > Cristine Lenz Dra. Geóloga, Universidade Federal de Sergipe, Brasil crislenz@yahoo.com.br

> > Adriane Machado Dra. Geóloga, Universidade Federal de Sergipe, Brasil adrianemachado@yahoo.com.br

Luciana Oliveira dos Santos Geóloga, Universidade Federal de Sergipe, Brasil luciana_oliver19@yahoo.com.br

> Lucas Santana Menezes Geólogo, Defesa Civil de Sergipe, Brasil Isanttana@yahoo.com.br

Resumo

Novos dados geológicos foram obtidos em um corpo gabróico-granítico na Faixa de Dobramentos Sergipana (Capela, SE), utilizando as técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento integradas, em uma escala de semi-detalhe (1: 30.000). Esse corpo é constituído de um conjunto de rochas ígneas, compostas principalmente por gabros, ocorrendo ainda quartzo-dioritos e granodioritos. Nesse estudo, foram utilizados dados de magnetometria, de imagens de satélite *Landsat 8* e dados *TOPODATA*, geoprocessados no *software Quantum Gis*. As informações obtidas, associadas a dados de trabalhos de campo, permitiram a identificação de novas litologias e estruturas, o que levou a uma melhor delimitação desse *pluton* no campo e a obtenção de um novo mapa geológico da região estudada. Com essas informações, foi possível concluir que o corpo estudado é resultado de vários pulsos magmáticos, associados a processos de mistura de magmas, que originaram uma grande variedade de rochas ígneas na área.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento, Corpo Gabróico-Granítico.

Abstract

New lithological data were obtained of a gabbroic-granitic body in Sergipano Fold Belt (Capela, SE), using remote sensing and geoprocessing as integrated techniques in a semi-detail scale (1:30,000). This body is composed by a number of igneous rocks, mainly gabbros, besides quartz-diorites and granodiorites. In this study, it was used magnetometry data, satelite images of *Landsat* 8 and *TOPODATA* data, geoprocessed in *Quantum Gis* software. With these data, coupled with informations obtained in fieldworks, it was possible to identify new lithologies and structures, and as a consequence, to obtain a better field limits for this igneous *pluton* and a new geological map of the studied area. It is possible to conclude that these rocks are the result of many magmatic pulses, with several mixing processes, which originated a great variety of igneous rocks in the area.

Keyword:. Remote sensing, Geoprocessing, Gabbroic-Granitic body.

1. INTRODUÇÃO

A região dos corpos gabróicos-graníticos (CGG) no centro leste de Sergipe foi pesquisada, pois carece de investigações científicas, tendo sido estudada em detalhe anteriormente apenas por Britto (2012) e Santos (2014), em monografias de conclusão de curso. Esses trabalhos prévios na região, que consistiram em mapeamento geológico, juntamente com análises petrográficas e geoquímicas, permitiram identificar uma grande variedade de litologias e a sua complexidade geológica. Essas informações se mostram contrárias ao que se lê no relatório do mapeamento regional de Sergipe, de escala 1: 250.000, que mostra uma sucinta descrição referindo-se à rochas máficas e ultramáficas. Sendo assim, se viu a necessidade de realizar um mapeamento de semi-detalhe na região, a fim de redefinir os limites litológicos e compreender melhor as suas características geológicas.

Este trabalho objetivou integrar diferentes técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para o mapeamento geológico em escala de semi-detalhe, 1: 30.000 do CGG. Considerando que não há uma metodologia específica para mapeamento geológico de áreas intemperizadas, a integração do maior número de informações é vital para o sucesso de um projeto (BARBOSA et al., 2013). Sendo assim, diversos estudos foram realizados para o mapeamento geológico do CGG, visando levantar dados e correlacionar com as informações geradas através do uso de técnicas de geoprocessamento, de sensoriamento remoto, de dados aerogeofísicos e de elevação do terreno, que contribuíram de forma substancial para o entendimento da geologia desse *pluton*.

O CGG aflora no Domínio Macururé da Faixa de Dobramentos Sergipana (FDS) que está inserida na Província Borborema, composta na região essencialmente por micaxistos, de arcabouço arenítico e com algumas áreas que sofreram metamorfismo de contato, formando cornubianitos. Essas rochas são de idade Neoproterozóico, metamorfizadas durante o Ciclo Brasiliano (SANTOS et al., 1998; BRITTO, 2012; SANTOS, 2014). Nessa mesma época, e posteriormente ao Ciclo Brasiliano, o CGG intrudiu as rochas da FDS, e por processos de assimilação e diferenciação, formou uma variedade de rochas ígneas como gabros, tonalitos e granodioritos, que possuem xenólitos de xistos do Domínio Macururé, além de bolsões de macrocristais de piroxênio e plagioclásio e/ou granada + plagioclásio e quartzo.

2. ÁREA DE ESTUDO, MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Localização da área

A área de estudo possui aproximadamente 36 km² de extensão e está localizada próximo ao Povoado Pedras, no Município de Capela, no Vale do Cotinguiba, Centro-Norte do Estado de Sergipe (Fig. 1). A região de estudo apresenta relevo de tabuleiro, dissecado pela drenagem diversificada, a qual compreende parte da Bacia Hidrográfica do Rio Japaratuba. A área de estudo encontra-se na FDS, onde parte está recoberta pelo quaternário, representado principalmente pela Formação Barreiras (SANTOS et al., 1998).



Figura 1 - Mapa de localização mostrando a área de estudo, próximo à Sede Municipal de Capela-SE. As estradas assinaladas mostram o trajeto desde a capital de Sergipe, Aracaju até a área estudada (adaptado de Secretaria de Recursos Hídricos de Sergipe et al., 2013).

2.2. Contexto geológico

Segundo Davison e Santos (1989), o desenvolvimento da Província Borborema ocorreu em dois estágios colisionais, entre 620 e 570 Ma. O evento colisional I ocorreu entre 620-610 Ma no lado oeste da Província, entre o Bloco Parnaíba, o Cráton Amazônico-Africa Ocidental e o antigo embasamento da Província. O evento colisional II ocorreu entre 590-580Ma no sul da Província

Borborema com o Cráton São Francisco formando a Faixa de Dobramentos Sergipana, onde a deformação ocorreu ao longo de zona de cisalhamento com magmatismo associado, indicados por dados geocronológicos (U-Pb) e termocrononológicos (Ar-Ar) (ARAÚJO et al.,2013).

Trabalhos mais recentes reclassificaram a Faixa de Dobramentos Sergipana como Sistema Orogênico Sergipano (CONCEIÇÃO et al., 2016; SANTOS, 2016; PEREIRA et al., 2017; LISBOA et al., 2016). No entanto, outros autores como Neves et al. (2016), Silva Filho et al. (2016) e Menezes (2017) não adotaram este termo. E no entendimento de que um Sistema Orogênico seria algo mais complexo, prefere-se continuar com a nomenclatura Faixa de Dobramentos Sergipana, a qual continua bem estabelecida na literatura.

A evolução estrutural da FDS pode ser resumida em três eventos. D1, D2 e D3, passando de Fácies Xisto verde para Anfibolito, e interpretado como tardi para pós-tectônico. O evento D1 compreende o compartilhamento entre o contato do embasamento e as camadas de foliação paralela ao S0 e S1, dobras recumbentes, intrafoliadas, napples de trend WNW-ESE no S1 e duplicação da estratigrafia, envolvendo o embasamento. No evento D2 ocorre a orogênese, perpendicular, em um regime sinistral transpressivo, com dobras bem apertadas a amplas e trends WNW-ESE, associado com foliação penetrativa S2 e escorregamento oblíquo. O evento D3 é marcado pela orogenia paralela ao escorregamento, com mergulho subhorizontal ao longo dos planos S0/S1/S2, kink bands e crenulação com trend S-N, NNE-SSW ou NNW-SSE (DEL' REY SILVA, 1995) (Figura 2).

Na região há dois corpos gabróicos-graníticos, o corpo Capela I e o corpo Capela II denominados por Britto, 2012. A área de estudo tem como principal enfoque o corpo Capela II, o qual se encontra mais a noroeste, circundado pelos micaxistos do Domínio Macururé (Figura 3).



Figura 2 - Desenho esquemático da evolução estrutural da Faixa de Dobramentos Sergipana. Evento D1: cisalhamento e encurtamento paralelo à camada. Evento D2: encurtamento perpendicular à orogenia em regime transpressivo sinistral. Evento D3: deslizamento paralelo à orogenia (modificado de Del' Rey Silva, 1995).



Figura 3 - Mapa geológico na escala 1 : 250.000, dentro do retângulo mais interno encontra-se o corpo Capela II, a noroeste e a sudeste, observa-se parte do corpo Capela I (Adaptado do mapa geológico da CPRM e Codise, 1998; Secretaria de Recursos Hídricos et al., 2013).

O Domínio Macururé

O Domínio Macururé faz contato ao sul, com o Domínio Vaza-Barris, através de uma zona de cisalhamento transpressiva (Falha São Miguel do Aleixo), na porção centro da Faixa de Dobramento Sergipana (HUMPHREY; ALLARD, 1968; BRITO NEVES, 1977; D'EL-REY SILVA, 1995). A litologia é representada por xistos (muscovita - quartzo - granada - feldspatos), metaritmitos e paragnaisses, com porfiroblastos de granadas variando de 0,3 mm até 0,8 mm, derivados de rochas ígneas ou sedimentares ricas em quartzo, como determinado por dados de elementos maiores e traço (Lima, et al.., 2014). A foliação principal mostra-se dobrada, com ondulações regionais quilométricas, que representam deformações polifásicas, observando-se localmente clivagem de crenulação. O metamorfismo, neste domínio, é do Fácies Anfibolito e granitos e granodioritos são frequentes como corpos intrusivos (OLIVEIRA et al., 2010).

Corpos Gabróicos e Graníticos

Corpos intrusivos de composição granítica ocorrem em todo o Domínio Macururé, como granitos do tipo Glória, presentes tanto no lado oriental (parte Alagoana) quanto no lado ocidental (SILVA, 1992). O CGG constitui-se de granitos compostos por quartzo, plagioclásio, K-feldspato, biotita, muscovita, granada e hornblenda com afinidades de associações leucocráticas peraluminosas. Dioritos formados por plagioclásio, K-feldspato, quartzo, biotita, muscovita, granada, apatita, diopsídio e hornblenda, de afinidade cálcio alcalina, alto-K e metaluminoso. E gabros com hornblenda, diopsídio, biotita, plagioclásio, quartzo, K-feldspato, muscovita e apatita (BRITTO, 2012; SANTOS, 2014).

2.3. Métodos

Imagens de satélite

Na fase pré-campo foi realizado o planejamento para os dias de pesquisa de campo que consistiu no uso de dados do tipo *TOPODATA* e imagens de satélite do tipo *Landsat 8* obtidas de forma gratuita pelo *Earth Explorer* (http://earthexplorer.usgs.gov/), um sistema de busca da *United States Geological Survey* (USGS). A seleção levou em consideração as características texturais da imagem e as particularidades da área, além de fatores que podem auxiliar na interpretação das imagens, como recobrimento de nuvens, ângulo e azimute da elevação solar para realce das estruturas geológicas, bandas correspondentes com o objetivo de estudo, dentre outros. Através da classificação supervisionada da imagem digital e também com a análise e interpretação visual destas imagens em formato analógico, realiza-se a individualização dos diferentes tipos litológicos, bem como a identificação de feições superficiais.

A principal preocupação em relação ao uso das imagens de satélite refere-se à escala, mas com o avanço da tecnologia e a liberação de imagens de satélite de alta resolução, esse problema mostra-se cada vez menor. Para o dimensionamento da geologia, se deve levar em conta a relação da área imageada e o pixel do terreno. Imagens *Landsat* melhoradas por processamento podem ser ampliadas até 1: 25 000 e imagens SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la terre*) até 1:15 000 mantendo os atributos geológicos (Martini, 2002).

As imagens *Landsat* 8 são de alta resolução, composto por 8 bandas multiespectrais de resolução de 30 m, 1 banda pancromátrica de resolução de 15 m e mais duas bandas térmicas. As imagens são importadas em formato *GeoTIFF*, georreferenciadas e possuem projeção UTM, *Datum* WGS 1984, sendo necessário reprojetá-las para o hemisfério Sul. Elas são descarregadas em

diferentes bandas, sendo necessário o seu tratamento e podem ser combinadas de diferentes formas, onde sua composição RGB pode ser de cores verdadeiras (bandas 4/3/2) ou de falsa cor (bandas 5/4/3, 6/5/4), estes são alguns exemplos. O comportamento das rochas nas imagens aqui no Brasil compreende uma combinação das respostas entre rocha, solo e vegetação. Para o estudo de rochas, estruturas ou água subterrâneas, as melhores bandas correspondem ao infravermelho próximo, com o apoio de uma banda visível centrada na faixa verde. Sendo as composições de falsa cor, as melhores representativas para interpretação da litologia (MARTINI, 2002). E foi justamente a composição de falsa cor que este trabalho optou para interpretação de feições geológicas e geomorfológicas, mas também a composição de cor verdadeira a fim de identificar seus diferentes atributos.

Para o tratamento dessas imagens foi usado o *software spectral transformer 2.0* em sua versão trial, juntamente as 3 bandas usadas, para confecção das imagens foi adicionada a banda pancromátrica, com a utilização desta última, as composições RGB passam a possuir resolução de 15 m, e assim permite o aumento da escala. Estas imagens permitiram gerar uma imagem anáglifo e interpretar a geologia e geomorfologia, e os dados que não puderam ser gerados automaticamente foram traçados de forma manual. Também se utilizou a base de dados do mapeamento realizado pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) no Estado de Sergipe e da SRH (Secretaria de Recursos Hídricos de Sergipe) para integrar mais informações ao conjunto de dados.

Os dados *TOPODATA*, precisamente do quadrante SC-24-Z-B, foram utilizados para interpretação de lineamentos estruturais, drenagem, modelo tridimensional, e junto com a imagem *Landsat 8*, a imagem anáglifo. Estes dados possuem espaçamento entre os pixels de 30 m e são obtidos no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<u>http://www.dsr.inpe.br</u>/<u>topodata /acesso.php</u>). Ele é gerado pelo processamento de dados da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que possui 90m de espaçamento entre os pixels e que são obtidos no site da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (<u>http://www.relevobr.cnpm.</u> embrapa.br/download/pb/pb.htm). Seu processamento consiste na geração de grades de altitude, em um Modelo Digital de Elevação (MDE), transformado para um *surfer grid* e convertido em *Geotiff* (INPE, 2016).

Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos compreendem uma incrível ferramenta para geológia, o uso de dados de magnetometria, por exemplo, permite diferenciar a litologia pelas diferentes feições magnéticas em superfície, associados a lineamentos estruturais (BARBOSA et al., 2013). Segundo CARRINO et al. (2007) altos valores de magnetometria podem indicar a presença de corpos

máficos-ultramáficos. A magnetometria não reflete necessariamente as propriedades das rochas e sim de minerais magnéticos, basicamente representados pela magnetita. Sua resposta irá depender de diversos fatores, os quais são determinados pelo tempo geológico, onde a concentração de magnetita pode alterar devido o metamorfismo e erosão no tempo. Sendo assim, quando as rochas cristalinas estão aflorantes, suas assinaturas magnéticas podem ser interpretadas, desenho o relevo (MORAES, 2007).

Os dados aerogeofísicos de magnetometria, na escala 1: 100.000 foram obtidos de forma gratuita pelo GEOBANK (http://geobank.cprm.gov.br/), plataforma da CPRM, assim como diversos dados georreferenciados, como gamaespectrometria. Estes dados já se encontram processados na plataforma, não sendo necessária sua manipulação. No entanto, com auxílio do software *ArcGIS versão 10.1* foi possível realizar cortes do *shapefile* e georreferenciamento, sendo utilizado o mapa de amplitude de sinal analítico - ASA.

Pesquisa de Campo

Durante a pesquisa de campo ocorreu a coleta de dados que consistiu em amostragem de rocha e informações de afloramentos, sendo necessário a realização de 8 dias de pesquisa de campo. Durante a expedição, o trabalho consistiu em marcar pontos de afloramentos, fotografá-los, tirar medidas estruturais e descrevê-los da forma mais detalhada possível. E por fim, após a integração de todos os dados de pesquisa pré-campo, pesquisa de campo e pós-campo confeccionou-se um mapa geológico com o auxílio do *software ArcGis versão 10.1*.

3. RESULTADOS

3.1. Imagem Anáglifo

Atualmente, vários profissionais adotam na pesquisa o método de interpretação por imagens anáglifo para visualização em 3D (Dantas, 2015). Alguns trabalhos criticam seu uso devido à perda de qualidade, mas com o desenvolvimento das imagens orbitais, seu uso como método de interpretação de dados está mais aperfeiçoado e a diferença é ínfima. O seu manuseio e interpretação diretamente no computador diminui a quantidade de erros, quando comparado às fotografias aéreas, as quais necessitam de uma série de processos dispendiosos. E assim, os vetores são construídos de forma informatizada, permitindo o desenvolvimento do trabalho de laboratório (ROSA et al., 2014).

A partir da imagem anáglifo foi possível interpretar a geomorfologia da área de estudo, que é formada basicamente pelos Tabuleiros Costeiros e o Pediplano Sertanejo. Os Tabuleiros Costeiros estendem-se pelos estados de Alagoas, Sergipe e Bahia, localmente estão dissecados e formando colinas convexas, onde os topos coincidem com o Grupo Barreiras e os modelados de dissecação atingem o embasamento ou a Bacia Sergipe-Alagoas. O Pediplano Sertanejo compreende os relevos residuais que compõem blocos isolados, representados por relevos dissecados em formas convexas correspondentes às intrusões graníticas (Projeto RADAMBRASIL, 1983).

Através da sua interpretação foram divididas 5 zonas geomorfológicas principais (Figura 4), resumidas no quadro 1. A primeira compreende as regiões de altitudes intermediárias e com resposta da drenagem dendrítica, às vezes anastomosada. A região 2, possui um tipo de drenagem similar à número 1, porém mais baixa topograficamente, o que a caracterizou como uma região geomorfológica distinta. A região 3, compreende as menores altitudes da área em estudo e a drenagem se mostra do tipo retilíneo-dendrítica. A zona 4 são os mais altos topográficos da região e corresponde ao Grupo Barreiras, o qual se mostra bastante dissecado e é onde se concentram as principais plantações. E a região 5 é caracterizada pela unidade geomorfológica fluvio-lagunar, com maior quantidade de vegetação nativa.



Figura 4: Imagem anáglifo formada através da junção de banda de imagem Landsat 8 e dados TOPODATA, através de processamento no software ERDAS. 1: Tabuleiro costeiro dissecado, 2: Pediplano Sertanejo com drenagem anastomosada, 3: Pediplano Sertanejo com drenagem retangular-dendrítica, 4: Tabuleiro costeiro, 5: Depósito Flúvio-Lagunar. *Para melhor visualização da imagem, aconselha-se a utilização de óculos 3D.

Quadro 1 - Associação das diferentes unidades geomorfológicas, interpretadas em imagem anáglifo e com a geologia.

| | | 0 / |
|--------|--|--------------------------|
| | | |
| ÍNDICE | GEOMORFOLOGIA | GEOLOGIA |
| 1 | Tabuleiro Costeiro dissecado | Domínio Macururé |
| 2 | Pediplano Sertanejo com drenagem anastamosada | Corpo gabroico-granítico |
| 3 | Pediplano Sertanejo com drenagem retangular- dendrítica | Corpo gabroico-granítico |
| 4 | Tabuleiro Costeiro | Grupo Barreiras |

ISSN 2318-2962

Os dados *TOPODATA* também serviram para confecção de modelo 3D da região, em *software surfer* (Figura 5), o qual permitiu o aprimoramento da análise e melhor visualização espacial. A região em verde mais a norte possui menores altitudes, em comparação a região em azul, que está a sul. Porém, um pouco mais a norte as regiões em amarelo escuro atingem altitudes maiores, mas mesmo assim, não alcançam as altitudes da parte sul. Com isso, se pode observar o quão o relevo é controlado pelas unidades geológicas, as quais respondem com padrões geomorfológicos e hidrológicos específicos.



Figura 5 - Imagem tridimensional da área de estudo confeccionada no *software Surfer*, através de um grid formado pelos dados xyz de *TOPODATA*.

O tipo de relevo está diretamente associado ao tipo de drenagem, a qual pode auxiliar em algumas interpretações geológicas. Na região estudada o tipo dendrítico é predominante, o que sugere a presença de rochas sedimentares com atitude horizontal ou ainda, rochas ígneas, maciços, rochas metamórficas ou depósitos inconsolidados e pode variar entre o pinado e anastomótico. No entanto, observa-se também o padrão retangular-dendrítico que ocorre em áreas homogêneas, cortadas por sistemas de falhas intercruzadas. O padrão dendrítico é implantado em corpos de rochas, isolados pelas fraturas e o retangular nos planos de menor resistência (COELHO, 2008). No caso da região específica, esse padrão retangular-dendrítico é correlacionado à falha secundária denominada de falha São Miguel do Aleixo (BRITTO, 2012).

3.2. Magnetometria

Na região foi utilizado o dado de Amplitude de Sinal Analítico – ASA, obtida na plataforma GEOBANK da CPRM (Figura 6).



Figura 6 - Imagem magnetométrica de Amplitude de Sinal Analítico - ASA com destaque para área de estudo. As cores indicam o nível Tesla que aumenta de intensidade do tom azul para o tom rosa. Isso indica uma resposta maior dos elementos U, Th e Pb. Observa-se um lineamento entre anomalias na direção NW-SE e outro perpendicular, de direção SW-NE, com descontinuidades (Modificado do GEOBANK, 2016).

Neste é possível observar anomalias de altos valores Tesla que corroboram a direção NW-SE indicada no mapa geológico de Santos et al. (1998), mas é possível identificar um único corpo contínuo e não dois corpos como proposto pelo autor. Uma questão interessante é o lineamento perpendicular a este, de direção SW-NE, entre anomalias, separadas pelo Grupo Barreiras. Este dado indica que provavelmente, em algum momento, ocorreu reativação da falha principal, o que provocou o encadeamento de falhamentos em direções perpendiculares. Isso também condiz com a teoria de Britto (2012) sobre a geração desse corpo por uma bacia de *pull-apart*, onde essas falhas de direção SW-NE condizem com o processo.

3.3. Dados de Campo

Os dados de campo do Projeto Corpo Capela (PCC) foram essenciais para corroborar informações interpretadas via satélite, apesar de toda análise realizada em escritório, o campo continua sendo precioso para um estudo de excelência.

Domínio Macururé

As rochas do Domínio Macururé são representadas localmente por micaxistos e cornubianitos. Os micaxistos, observados a norte e a sul do Rio Japaratuba, apresentam arcabouço arenítico, coloração cinza claro, textura lepidoblástica, granulação fina, com cristais de biotita e muscovita estirados e orientados, outros minerais constituintes são quartzo, muscovita, granada, plagioclásio, minerais máficos. Enquanto o cornubianito possui composição quartzo feldspática, sendo o protólito sedimentar (rochas quartzo-areníticas). Essas rochas correspondem às mais antigas da região, de idade paleoproterozóica apresentam estrutura maciça, encontram-se cisalhadas e ocorrem na forma de xenólitos no CGG ou apresentam contatos difusos com o corpo, com orientação preferencial NW-SE, às vezes N-S, e são associadas ao metamorfismo de contato que ocorre na região. A granulação é muito fina, apresenta textura sacaróide, composta por quartzo, feldspato, plagioclásio e biotita (Figuras 7A e 7B). Elas também são as mais deformadas da área de estudo e podem estar cisalhadas, ou dobradas, com mergulho entre 20° e 45°, (Fig. 7C) e por vezes, com presença de *boudins* (Figura. 7D).



Figura 7: Imagens representativas de afloramentos do Domínio Macururé na área de estudo. A: Xenólitos de xistos do Domínio Macururé, indicado pelas setas vermelhas, de tamanho centimétrico, com contatos retos e rotacionados, englobados pelo granodiorito com granada (ponto PCC-76). B: Xenólitos de xistos orientados NW-SE, indicado pelas setas vermelhas, com alongamento no eixo y e encurtamento no eixo x. O xenólito que está na parte superior da foto se encontra fraturado (ponto PCC-77). C: Dobras compostas por quartzo, redobradas em cornubianito, marcado por veios de quartzo, com plano axial NW-SE (ponto PCC-77). D: *Boudins*, indicado pela seta vermelha, formados por veios de quartzo, deslocados no sentido NW-SE em cornubianito (ponto PCC-140). *Corpo Gabróico-Granítico*

As litologias do CGG consistem em um variado conjunto de rochas ígneas, que devido à ação dos diferentes processos ígneos modificadores de rochas, formaram distintas litologias, representadas por gabros, granodioritos e tonalitos. O corpo encontra-se nas regiões mais baixas da área de estudo e apresenta uma geomorfologia bem característica, onde na paisagem a forma que predomina são colinas suavizadas e drenagens retilíneas-dendríticas com direção preferencial SW-NE.

Gabros

Os gabros constituem a grande maioria dos afloramentos da região e são responsáveis pelo maior volume do corpo, ocorrendo na forma de blocos, lajedos ou paredões.

O gabro *stricto sensu* é encontrado em toda a região, porém na parte centro-sul são mais frenquentes, e não apresentam indício de qualquer contaminação. Em sua maioria ocorrem em

afloramentos em forma de blocos. Esse gabro é uma rocha melanocrática, holocristalina, com granulação média, cristais subédricos, equigranular, formado por piroxênio, plagioclásio e biotita e apresenta magnetismo (Figura 8).



Figura 8 - Exemplo de amostra do gabro *stricto sensu* no ponto PCC-91, composto por piroxênio, plagioclásio e biotita.

Os gabros também podem apresentar xenólitos de rochas do Domínio Macururé, podendo representar até 30% da rocha, ocorrendo de forma disseminada em diferentes proporções, por processo de assimilação, o que gera uma composição final distinta à rocha. (Fig. 9).



Figura 9 - Afloramentos representativos da área de estudo. A: Afloramento do ponto PCC-63 com proporções entre gabro e rocha híbrida (granodiorito com granada), com xenólitos de rochas do Domínio Macururé (indicados pelas setas em vermelho). B: Afloramento do ponto PCC-79 com xenólitos de rochas do Domínio Macururé indicados pelas setas vermelhas. C: Contato difuso entre o gabro e a rocha híbrida no ponto PCC-136, com concentrações de granada (indicado pela ponta do grafite do lápis), cristais de anfibólio e gradação de diferentes proporções de assimilação das rochas do Domínio Macururé, com sigmoide (indicado pela seta vermelha).

Associada às rochas gabróicas, também ocorrem níveis com bolsões de piroxênio que se apresentam de forma holocristalina, com granulação muito grossa, inequigranular, com cristais euédricos de piroxênio de até 3 cm e concentrações de biotita, formadas essencialmente por plagioclásio e piroxênio (Figura 10).



Figura 10: Amostra representativa de bolsão de piroxênio com megacristais (ponto PCC-138).

Granodioritos

Os granodioritos compreendem as rochas híbridas da região. Há os granodioritos com granada, que mostram relações de contato reto ou difuso com as rochas gabróicas e as rochas do Domínio Macururé. Esses granodioritos com presença de granada possuem xenólitos das rochas desses dois domínios, onde apresentam diferentes proporções de assimilação e evidências de fluxo magmático difuso em direções distintas, nunca antes identificados na literatura dessa região (Figura 11). Esse tipo de granodioritos são rochas de coloração acinzentada, fanerítica, equigranular, com granulação média, formadas por quartzo, plagioclásio, K-feldspato, biotita, por vezes granada e piroxênio (Figura 12).

O granodiorito também ocorre sem granada, os quais apresentam coloração acinzentada, são isotrópicos ou foliados, holocristalinos, fanerítios, de granulação fina a média, com cristais anédricos de quartzo e subédricos de plagioclásio e biotita. Também afloram granitos e granodioritos isotrópicos, de coloração clara, equigranulares, com granulação média, formados por quartzo, plagioclásio, K-feldspato e biotita (Figura 13).



Figura 11: Afloramentos representativos da área de estudo. A: Xenólitos gabróicos (ponto PCC-127), com contatos retos com granodiorito, em processo de assimilação do gabro (setas vermelhas). B: Xenólito métrico de cumulato de piroxênio (ponto PCC-35), com contato reto com granodiorito. Nas três setas à esquerda da foto, observa-se o fluxo magmático da mistura dos magmas que também compreende processo de assimilação do gabro e dos micaxistos do Domínio Macururé.



Figura 12 - Contato reto entre granodiorito rico em granada e o xenólito de cumulato de piroxênio, com granulação grossa, no canto superior esquerdo (ponto PCC-35). Observa-se uma enclave de cristal de quartzo no canto inferior esquerdo.



Figura 13: Amostra representativa de granodiorito (parte inferior da amostra) em contato com granito (ponto PCC-138).

Leucotonalito

Estas rochas ocorrem com menos frequência na região de estudo e afloram na forma de blocos soltos e lajedos, em uma pedreira localizada próximo ao Rio Japaratuba no baixo topográfico. As rochas leucotonalíticas são observadas cortando as rochas cornubianíticas do Domínio Macururé (Figura 14A), ou como xenólitos no gabro (Figura 14B). O leucotonalito é holocristalino, isotrópico, leucocrático, fanerítico, equigranular, possui granulação média, constituído por plagioclásio, quartzo, muscovita e biotita (Figura 15A e 15B).



Figura 14: Afloramentos representativos da área de estudo. A: Contato difuso entre o leucotonalito e o cornubianito (ponto PCC-136). B: Xenólito com contatos retos de leucotonalito imerso no gabro (ponto PCC-136).



Figura 15: Amostras representativas da área de estudo. A: Tonalito intemperizado (ponto PCC-56), de coloração esbranquiçada, granulometria média, composto por plagioclásio, quartzo, mica. B: Leucotonalito holocristalino, com granulometria média, equigranular, constituído por cristais anédricos à subédricos de quartzo, plagioclásio, muscovita e biotita.

3.4. Dados Estruturais

No trabalho de campo foram coletados dados estruturais, como medidas de cisalhamento, foliação, fraturas, falhas, veios e de fluxo magmático, representadas nos diagramas de rosetas (Figura 16). A direção da maioria das estruturas concorda com as direções preferenciais NW-SE da

Faixa de Dobramentos Sergipana. A exceção das direções de fluxo magmático, que como havia sido supracitado, compreendem as primeiras informações obtidas na literatura, sendo que suas direções são bastante variáveis (NW-SE, NE-SW, E-O).



Figura 16: Diagramas de rosetas obtidos no *software GEOrient*, onde observa-se cisalhamento e foliação, com direção preferencial NW-SE, falhas de direção NE-SW, assim como fraturas, veios e fluxo magmático nas direções NW-SE, NE-SW e E-O.

Após integração dos dados, um mapa preliminar foi elaborado. Com o objetivo de melhor visualizar os resultados, os dados interpretados na imagem anáglifo, de magnetometria, as medidas estruturais, os pontos com as respectivas litologias e a drenagem foram sobrepostos (Figura 17).

O mapa preliminar foi utilizado como base para confeccionar o mapa geológico na escala 1: 30.000. Esse mapa produzido por meio dos dados integrados de geoprocessamento, sensoriamento remoto e pesquisa de campo em uma escala de semi-detalhe, apresenta algumas diferenças em relação aos mapeamentos anteriores realizados pela CPRM (1998) e Britto (2012) (Figura 18). As principais discrepâncias em relação aos mapeamentos anteriores compreendem os novos limites litológicos adicionados ao corpo gabróico-granítico e as estruturas interpretadas por sensoriamento remoto e em pesquisas de campo. É importante ressaltar que neste mapeamento, as interpretações buscam sempre a melhor integração entre os diferentes dados, mas aqueles obtidos em campo foram sempre priorizados. Quando houve divergências, os afloramentos constituíram os dados principais e os limites litológicos foram respeitados.







Figura 18: Mapa com a comparação dos limites geológicos entre mapeamentos anteriores (linha vermelha) e mapeamento realizado neste trabalho.

Evolução Geotectônica

Em concordância com os dados obtidos, um modelo geotectônico foi elaborado para região, com base em Oliveira (2010) e Dantas (2015) (Fig. 19). Neste esquema, ocorreu primeiro a sedimentação do Domínio Macururé em uma margem passiva, em 715-640 Ma. Posteriormente, os sedimentos já litificados são comprimidos pelo esforço entre o Bloco Pernambuco-Alagoas (PEAL) e o Cráton São Francisco (CSF). Um choque ocorreu entre o Domínio Macururé e um arco magmático, devido à subducção, e surgiram os primeiros dobramentos (evento D1) e a temperatura de fusão diminuiu, o que permitiu a fusão da crosta, onde se formaram intrusões de corpos ígneos em 630-617 Ma.

A Placa San Franciscana continuou a subductar e os esforços compressivos aumentaram na região, gerando uma intensa deformação (eventos D2+D3). Este fato contribuiu para o surgimento de falhas de empurrão, entre as quais a Falha de São Miguel do Aleixo, que possui as falhas secundárias Capela e Dores. Após ou no final da fase de tectonismo, magmas gabróicos e graníticos ascenderam e assimilaram rochas do Domínio Macururé em diferentes proporções. O magma gabróico assimilou primeiro os tonalitos a duas micas e formou os magmas híbridos da área de estudo, que também incorporaram as rochas do Domínio Macururé. Nessa época, outros magmas graníticos intrudiram as rochas da região, aproveitando a zona da Falha Capela, cortando a sequência de rochas anterior.



Figura 19 - Modelo geotectônico para formação do corpo gabróico-granítico. PEAL (Bloco Pernambuco-Alagoas), CSF (Cráton São Francisco), ZCMJ (Zona de Cisalhamento Belo Monte – Jeremoabo), FC (Falha Capela), FD (Falha Dores), ZCSMA (Zona de Cisalhamento São Miguel do Aleixo) (Adaptado de OLIVEIRA, 2010; DANTAS, 2015).

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A área de estudo foi dividida entre os sedimentos do Grupo Barreiras, as rochas metamórficas do Domínio Macururé e as rochas ígneas do corpo gabróico-granítico (CGG) de acordo com autores anteriores Santos et al. (1998), Britto (2012) e Santos (2014). O Domínio Macururé foi subdividido em duas unidades na área de estudo, uma formada pelos micaxistos e a outra pelos cornubianitos. O CGG foi subdividido em três unidades, a unidade gabróica e as unidades graníticas 1 e 2, que são representadas na escala do mapeamento deste trabalho.

Segundo as diretrizes do projeto RadamBrasil (2013), as informações da geomorfologia trazem respostas para a geologia. Na região predomina o relevo acidentado com diversas colinas. A sul, ao longo do Grupo Barreiras, a topografia é mais alta e em geral mais aplainada e apresenta várias grotas devido à dissecação dessa unidade geológica. Já a norte, após o Rio Japaratuba, ocorre o aumento das altitudes, mas ainda sim, menor que o nível de altitude do Grupo Barreiras. O relevo com dissecação abrupta é bem característico nessa região, onde afloram as rochas do Domínio Macururé. E no centro da área de estudo, ocorre o predomínio de colinas aplainadas, com solo bastante intemperizado, e é onde o CGG ocorre. O Rio Japaratuba funciona como um divisor de litologias apenas na parte nordeste, mas não em todo o percurso, e é nele que se instala a zona de cisalhamento, também citado por Britto (2012) e Menezes (2017) e ocorrem os afloramentos de cornubianitos. Estas rochas são as únicas rochas que apresentam deformação de cisalhamento. Os gabros compreendem a maioria dos afloramentos e não apresentam deformação no estado sólido; no entanto, os cristais e xenólitos estão orientados pelo fluxo magmático.

A unidade gabróica apresenta uma variação na mineralogia da rocha. O gabro *stricto sensu* ao se misturar com o leucotonalito forma o granodiorito ou o tonalito híbrido, sem granada, conforme a concentração de K-feldspato. Quando estes assimilam rochas do Domínio Macururé ou o gabro na sua composição, a granada aparece na mineralogia, podendo alcançar tamanhos centimétricos. Este fato evidencia as quantidades distintas em que o gabro assimila do Domínio Macururé e a alta temperatura do processo. Com a associação dos micaxistos ocorre o aumento da concentração de muscovita na rocha.

A unidade granítica apenas ocorre na borda norte do corpo gabróico-granítico, próximo à zona de cisalhamento. As rochas graníticas são divididas em unidades 1 e 2. A unidade 1 é composta por leucotonalitos caracterizados pela presença da muscovita e flogopita. O leucotonalito se apresenta em forma de xenólito no gabro, evidenciando ser mais antiga que o gabro e, provavelmente, o volume de magma não foi tão grande em comparação ao do gabro. A unidade 2 intrudiu posteriormente o gabro e esta compreende uma variedade de rochas granodioríticas e

tonalíticas, as quais representam processos de assimilação crustal e cristalização fracionada, que geraram uma grande variedade de rochas no CGG.

De acordo com as diretrizes observadas nos trabalhos de Britto (2012) e Santos (2014) e as observações deste trabalho, as relações de mistura entre os magmas gabróicos e graníticos indicam que os granodioritos ou tonalitos seriam o produto dessa relação, de acordo com a proporção misturada. Esta mistura é evidenciada em campo por fluxos magmáticos, contatos difusos e diversidade litológica. As rochas que não possuem granada surgiram posteriormente, de acordo com as relações de corte em campo. No entanto, todas as rochas do CGG são tardi-tectônicas, considerando que não se observa deformação no estado sólido nessas rochas. Esta informação, relacionada com a constatação de que os cristais de piroxênio não sofreram metamorfismo, indicam que o CGG, provavelmente, cristalizou em baixa profundidade, porque os piroxênios precisariam de alta temperatura para fundir. Os bolsões com megacristais de piroxênio demonstram, talvez, que essa região representasse a base de uma câmara magmática.

Estruturalmente, a falha secundária à Falha de São Miguel do Aleixo, a qual havia sido descrita por Britto (2012), foi redefinida e denominada como Falha Capela (FC). Dados espaciais e de campo mostram que existe um *trend* SW-NE, interpretado como falhas transcorrentes sinistrais. Estas falhas cortam o CGG e também a FC, que apresenta um rejeito considerável. A falha é observada em imagem de magnetometria na área de estudo e na imagem de satélite, ao observar o curso do Rio Japaratuba. Essa falha provavelmente facilitou a intrusão do CGG na região por meio de reativação da mesma no período tardi-tectônico.

5. CONCLUSÕES

- (1) O mapeamento geológico com uso de tecnologias como imagens de satélite, imagem anáglífo, dados *TOPODATA* e dados de magnetometria, se mostrou bastante eficiente. A integração dos diferentes tipos de dados constituiu uma importante ferramenta para o mapeamento, especialmente em regiões onde o intemperismo afeta os afloramentos.
- (2) Os dados de campo se mostram indispensáveis, porque advêm destes as principais interpretações, sejam elas por afloramentos, descrição de rochas, geomorfologia ou medição de estruturas. Assim, cada tipo de informação permite um resultado diferente e o conjunto potencializa a interpretação da geologia. E foi essa integração que permitiu a construção de um mapa geológico de semi-detalhe do corpo gabroico-granítico na Faixa de Dobramentos Sergipana.

- (3) O mapa de semi-detalhe permitiu a visualização de maior diversidade das rochas da região, além de novas estruturas.
- (4) A grande quantidade de granada indica uma alta temperatura e associação das rochas do Domínio Macururé.
- (5) No âmbito geotectônico entende-se que as rochas do Domínio Macururé foram intrudidas por diferentes pulsos magmáticos, sendo estes básicos e ácidos.
- (6) As relações de corte e de fluxo magmático entre as rochas gabróicas, granodioriticas e tonaliticas indicam que seus magmas sofreram processo de mistura.
- (7) Evidências de campo, demonstrado por fraturas, evidenciam tectonismo tardio.
- (8) Para melhor compreensão, é necessária a continuação do estudo, através de microscopia, geoquímica e mais dados de campo. Esses novos dados poderão contribuir para melhores resultados e para uma melhor evolução do conhecimento geológico da região.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, C. E. G; WEINBERG, R. F; CORDANI, U.G. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two-stage Neoproterozoic collision process. **Terra Nova**, Natal, v. 26, n. 2, p. 157-168, 2013.

BARBOSA, I. O; PIRES, A. C. B; LACERDA, M. P. C; CARMELO, A. C. Geology, airborne geophysics, geomorphology and soils in the individualization of the Niquelândia mafic-ultramafic complex, Goiás State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 31, n.3, p. 463-481, 2013.

BRITO NEVES, B.B; SIAL, A.N; ALBUQUERQUE, J.P.T. Vergência centrífuga residual no Sistema de Dobramentos Sergipano. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.7, p.102-114, 1977.

BRITTO, E. S. **Mapeamento dos corpos gabroicos da região sul da folha de Gracho Cardoso**, 2012, 58f. Monografia (graduação em geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2012.

CARRINO, T. A; SOUZA FILHO, C. R; LEITE, E. P. Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo. v. 25, n. 3, p. 307-320, 2007.

COELHO, F. P. Integração de dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos na prospecção de água no semi-árido Sergipano. 2008, 182f. Monografia (Dissertação de Mestrado). Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2008.

CONCEIÇÃO, J. A; ROSA, M. L. S; CONCEIÇÃO, H. Sienogranitos leucocráticos do Domínio Macururé, Sistema Orogênico Sergipano, Nordeste do Brasil: Stock Glória Sul. **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo. v.46, n.1, 2016.

DANTAS, T. V. P. **Mapeamento Geológico/ Geomorfológico com o uso de geotecnologias do Domínio Vaza Barris, Faixa de Dobramento Sergipana.** 2015. 128 f. Monografia (dissertação de mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2015.

DAVISON, I; SANTOS, R. A. Tectonic Evolution of the Serpipano Fold Belt, NE, Brazil, during the Brasiliano Orogeny. **Precambrian Research**, v.45, p:319-342. 1989.

D'EL-REY SILVA, L.J.H. Tectonic evolution of the Sergipano Belt, NE Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 25, n.1, p. 315-332, 1995.

GEOBANK. **Projeto Aerogeofísico**. Disponível em: http://geobank.cprm.gov.br/. Acesso em: 20/09/2016.

HUMPHREY, F.L; ALLARD, G.O. The Proprid geosyncline, anewly recognised tectonic element in the Brazilian shield. **In Internacional geological congress**, 1968., Prague, v.4, p. 123-139.

INPE. *TOPODATA*: Banco de dados geomorfométricos do Brasil. 2016. Disponível em: <<u>http://www.dsr.inpe.br/topodata</u>> Acesso em: 18/05/2017

LIMA, M. M. C; SILVA, T. R; FERREIRA, V. P; Silva, J. M. R. Metasedimentary rocks of the northern portion of the Macururé Domain, Sergipano Belt, Northeastern Brazil: Geochemical characterization of their protoliths and tectonic implications. **Estudos Geológicos**, UFPE, Recife, v. 24, n.2, p. 89-107, 2014.

LISBOA, V. A. C; SIMÕES, C. B. S; RIOS, D. C; CONCEIÇÃO, H. Potencial ornamental do Maciço Glória Norte, Domínio Macururé, Sistema Orogênico Sergipano. Geologia USP, Série Científica, São Paulo. v. 16, n. 3, p. 143-151, 2016.

MARTINI, P. R. Imagens para mapeamento geológico e levantamento de recursos minerais: resumos para uso dos centros de atendimento a usuários- ATUS do INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. v.8984, n.62, p. 3B5-3B12. 2002.

MENEZES, L. S. Aerofotogrametria com drone aplicada em mapeamento geológico obtido por sensoriamento remote em escala de detalhe (1:800), afloramento do Domínio Macururé, Município de Capela-SE. 2017. 49 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 2017.

MORAES, L. G. Processamento, interpretação e integração dos dados aerogeofísicos do projeto Rio do Sangue – MT, aplicados ao mapeamento geológico e à prospecção mineral. 2007. Monografia (dissertação de mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

NEVES, S. P; SILVA, J. M. R; BRUGUIER, O. The transition zone between the Pernambucolagoas Domain and the Sergipano Belt (Borborema Province, NE Brazil): Geochronological constraints on the ages of deposition, tectonic setting and metamorphism of metasedimentary rocks. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 72, p. 266-278, 2016. OLIVEIRA, E. P; WINDLEY, B. F; ARAÚJO, M. N. C. The Neoproterozoic Sergipano orogenic belt, NE Brazil: A complete plate tectonic cycle in western Gondwana. **Precambrian Research**, v. 181, p. 64-84, 2010.

PEREIRA, S. F; CONCEIÇÃO, J. A; ROSA, M. L. S; CONCEIÇÃO, H. Stock de Dentro, Domínio Macururé, Sistema Orogênico Sergipano: Geologia, Petrografia e Geoquímica. Scientia Plena, São Cristovão, v. 13, n.2, p. 1-4, 2017.

PROJETO RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Uso Potencial da Terra. Folhas SC 24/25 Aracaju/Recife. **IBGE**, v.30, p. 379-443, 1983.

ROSA, L. R. J; LIMA, S. S; ALMEIDA, J. A. P. Utilização do anáglifo combinando imagens Landsat 8 e dados SRTM para interpretação da geologia e geomorfologia. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. **Anais**. 2014, p. 1341.

SANTOS, L. O. Estudo Petrográfico e Geoquímico dos Corpos Gabroicos-Graníticos de Capela e Dores, Domínio Macururé, Cinturão Sergipano. 2014. 72p. Monografia (Trabalho de Conclusão em Geologia), Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2014.

SANTOS, L. R. **Petrologia do Stock Canindé Velho, sistema orogênico sergipano, NE Brasil**. 2016. 146f. Dissertação (Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2016.

SANTOS, R.A; MARTINS, A.A.M., NEVES, J.P., LEAL, R.A. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Sergipe. **CPRM/Codise**, Aracaju, p.107, 1998.

SILVA, J. M. R. Evolução tectono-metamórfica de uma parte da faixa sul-alagoana, sistema sergipano-nordeste do Brasil, 1992. Monografia (Tese de doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SILVA FILHO, A. F; GUIMARÃES, I. P; SANTOS, L; ARMSTRONG, R; SCHUMUS, W. R. V. Geochemistry, U e Pb geochronology, Sm e Nd and O isotopes of ca.50 Ma long Ediacaran High-K Syn-Collisional Magmatism in the Pernambuco Alagoas Domain, Borborema Province, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 68, p 134-154, 2016.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS; SEPLANTEC; GOVERNO DO ESTADO DE SERGIPE. Sergipe: Atlas Digital sobre Recursos Hídricos. 2013. Disponível em: <<u>http://www.seplantec-srh.se.gov.br/</u>>. Acesso em 20/09/2017.

Trabalho enviado em 17/03/2018 Trabalho aceito em 07/04/2018