

Revista Angolana de Geociências / v. 2 n.º 1 / Julho 2021 / p. 212-221



Artigo original

ISSN:

Determinação de domínios gammaradiométricos como ajuda ao levantamento litológico e na selecção de zonas de concentração de elementos radioactivos, leste de Benguela e oeste do Huambo – sw da Angola.

Determination of gammaradiometric domains as aid to the litological survey and in the selection of zones of concentration of radioactive elements, east of benguela and west of huambo - sw of angola.

Domingos Cordeiro¹, Alcides Pereira²

¹Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto e investigador do Instituto Geológico de Angola. E-mail: cordeiro9elica@gmail.com ²Alcides Pereira, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. E-mail: apereira@ci.uc.pt

CITAR COMO:

Cordeiro, D. e A. Pereira. Determinação de dominios gammaradiometricos como ajuda ao levantamento litológico e na selecção de zonas de concentração de elementos radioactivos, leste de benguela e oeste do huambo – sw da angola. Revista Angolana de Geociências, 2020, 2(1), p. 212-221

INFORMAÇÂO ADICIONAL:

Recebido: 28/11/2020 Aceite: 23/01/2021 *Autor para correspondência: Domingos Cordeiro (e-mail: cordeiro9elica@gmail.com) Licença: CC BY-NC Copyright: Centro de Investigação em Ciências Geológicas Aplicadas Conflito de interesses: Os autores declaram que não há conflitos de interes **Resumo:** Com o processamentos de dados foi possível gerar produtos aerogamaespectrometricos, convertidos em mapas de potássio, tório, Urânio, ternários, razões Th/K, U/K, U/Th e o mapa de factor F, este último, contribuiu no realce e discriminação de aspectos litológicos não detectáveis nem interpretáveis com facilidade nos mapas dos elementos de concentração isoladas de K, Th, U, bastante aplicado em áreas aonde ocorre forte alteração hidrotermal, nas áreas aonde ocorre o processo de intemperismo e lixiviação intenso do potássio, o parâmetro F apresenta geralmente valores bastante baixos, ao contrário com que acontece nas áreas de alteração hidrotermal enriquecidas de potássio e urânio, apresentando valores geralmente altos. Os mapas ternários dos radioelementos RGB e CMY, mapas de potássio, tório e urânio, contagem total foram bastante úteis na identificação dos principais domínios litológicos interpretados, como ilustrado na figura 9. Em que as zonas associadas aos granitos apresentaram valores muito altos de radioactividade e também assinalou-se anomalias com valores altos nas argilas, carbonatitos e grupo Oendolongo, carecendo de levantamentos de litológico e geoquímica para confirmação e obtenção de teores dos radioelementos. Comprovou-se a eficácia da gammaradiometria na identificação dos domínios litológicos e selecção de zonas potenciais de minerais radioactivos, alvos de prospecção, figura 10.

Palavras-chave: Aerogamaespectrometria, domínios e alteração hidrotermal.

ABSTRACT: The data processing from the study area, was possible to generate aerogamaespectrometrics products, converted into maps of potassium, thorium, uranium, ternary maps, ratios of Th / K, U / K, and ration U / Th, the map of factor F contributed in the enhancement and discrimination of geological structures not easily detectable or interpretable in the maps of the isolated concentration K, Th, U, widely applied where there is a strong hydrothermal alteration, in areas where the weathering process and intense potassium leaching occurs, the parameter F generally presents very low values, in contrast to what happens in areas of hydrothermal alteration enriched with potassium and uranium, presenting values generally high. The ternary maps of the radioelements RGB and CMY, maps of potassium, thorium and uranium, total count were very useful to identificate and mapping the main interpreted gamma-spectrometric domains, as illustrated in figure 9. Areas associated with granites presented very high values of radioactivity and were also noted anomalies with high values in clays, carbonatites and Oendolongo group, lacking geological surveys and geochemistry to confirm and obtain levels of radioelements. The efficacy of gamma-radiometric in identification of litological domains and mineral prospecting was proven, prospecting targets, figure 10.

Keywords: Gammaradiometric, domains and hydrothermal alteration.

INTRODUÇÃO

Geologicamente a zona de estudo é caracterizada maioritariamente, por conjuntos de rochas granitóides do proterozóico e carbonatitos do cretácico, segundo Araujo (1992). Foram efectuados poucos estudos avançados e incididos aos elementos radioactivos de potássio, urânio e tório em Angola desde os tempos pré e pós independência, autor como Almeida (1953) concluiu que os minerais radioactivos de Cacuso e Lucala a Quizenga estão associados a pegmatitos quartzo-feldspáticas. O mesmo Eng.º categorizado Almeida (1953) encontrou ocorrências de minerais radioactivos na área de Elege, num filão de quartzo numa área de gnaisse e rochas cristalinas ácidas com abundante feldspato e quartzo e o detector utilizado revelou que a ocorrência tinha radioactividade superior à normal, com isso, a busca de mais informação geológica, geofísica e mineralógica sobre o mapeamento e muito particularmente a prospecção de minerais radioactivos é enorme e bastante pertinente. Recentemente foi realizada o levantamento gammaradiométrico para auxiliar no mapeamento geológica no País.

O método de aerogamaespectrometria surge no intuído deste ser bastante eficaz no auxílio em identificar e/ou diferenciar as diferentes rochas e minerais através da radioactividade natural emitida por eles. A aerogamaespectrometria é bastante aplicada em mapeamentos geológico, prospecção mineral, estudos de solos e ambientais, pelas vantagens económicas que apresenta e cobre vastas áreas em pouco tempo. Por isso, foi aplicado este método aerogamaespectrometrico na área contígua entre as províncias de Benguela e Huambo, zona deste estudo.

OBJECTIVOS

Elaborar o mapa dos domínios gamaespectrométricos interpretados a partir dos dados aerogamaespectrométrico e definir as zonas com potencialidades para a mineralização dos radioelementos (potássio, tório e urânio), alvos de prospecção mineral.

LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se nas províncias de Benguela (Bocoio, Cubal, Ganda e Balombo) e Huambo (Londuimbali, Tchinjenje, Ukuma, Longonjo e Ecunha), ocupa uma área de 6.099,199Km2, as principais vias de acessos terrestres são as



FIGURA 1. Mapa de localização da área de estudo.

estradas nacionais EN100 (Luanda-Benguela) e EN260 (Benguela-Huambo) e para o interior dos municípios existem as estradas secundárias, a figura 1 abaixo representada ilustra a localização da área.

GEOLOGIA DA ÁREA

Geologicamente a área de estudo está inserida numa grande saliência do embasamento denominada de escudo de Angola, formado a semelhança dos escudos de Maiombe, Cassai, Bangweulo e o Horst do Kwanza durante o ciclo do proterozóico tardio, as vezes apresenta-se encoberto por depósitos mais recentes do fanerozóico (Carvalho., 1971).

Aspectos Geomorfológicos

Os estudos realizados por Marques (1977), resume a geomorfologia de Angola em apenas sete (7) unidades (I - Planalto Antigo, II – Cadeia Marginal de Montanhas, III – Zona de transição, IV – Orla meridional da Bacia do Congo, V – Orla Setentrional da Bacia do calahári, VI – Bacia do Zambeze e a Orla Litoral.

Na área de estudo são identificados duas grandes unidades geomorfológicas: primeiro a conhecida por Cadeia Marginal de (Marques, 1977) montanhas incide-se com maior predominância na parte Norte e Leste da área de estudo, caracterizada por relevos de desníveis bastante acentuados, como resultado da movimentação da flexura do flanco atlântico, nela pode-se observar cotas maiores de aproximadamente 2620 metros de altitudes, referir que esta unidade localiza-se em zona instável desde a Gabela, estende-se ao Oeste do Huambo até a Nordeste de Lubango. A segunda zona de Transição resulta do rejogo da flexura continental, modelado a partir da superfície do terciário médio e constitui uma larga faixa quase paralela ao oceano Atlântico desde Cabinda, Zaire, Uíge, N'dalantando, Oeste de Lubango até ao Rio Cunene, representa vários patamares de uma só aplanação, terá sido influenciado pelas grandes oscilações climáticas (Marques, 1977).

Foi usada a imagem de SRTM (Shuttle Radar Topograhy Mission, para uma melhor compreensão do relevo da área de estudo, em que as altitudes variam entre 908 m a 2434 m, como ilustrada na (figura 2).



FIGURA 2. Ilustração da geomorfologia da área de estudo (SRMT).

Aspectos Litológicos

As principais litologias presentes na área de estudo, cartografadas e descritas sequencialmente são:

gAR2: nos granitos biotíticos no escudo de Angola engloba rochas granitóides resultantes de granitização de rochas metamórficas do proterozóico inferior e da profunda remobilização de rochas metamórficas do arcaico. Fazem parte do complexo granitos biotíticos porfiroblásticos apresentam-se em larga escala na parte noroeste do escudo de Angola, tendo sido também identificados alguns pequenos maciços isolados nos escudos do Maiombe e do Cassai. O batólito destes granitos situa-se a Norte do paralelo 13º Latitude sul. Estas rochas, designadas por M. Montenegro de Andrade por granitos "Quibala", exibem uma Textura porfiróide peculiar devido à presença de fenocristais de feldspato potássico com dimensões de 2-3 cm a 4-7 cm segundo H. de Carvalho.

vBPR1: Os doleritos localizam-se essencialmente na parte noroeste da zona de estudo, ocorrendo sob a forma de diques, na maioria dos casos, aparecem em exames, enquanto, os stocks formam fiadas. Os diques estendem-se principalmente, na direcção N-S e NE-SW, sendo porém, assinaladas outras orientações dentro do escudo de Angola. A sua espessura vária de dezenas de metros, em alguns casos a atingir 100 m. Cortam os granitóides do arcaico tardio e do proterozóico precoce, bem como as rochas básicas do complexo do Cunene.

gPR1: Granitos biotíticos porfiroblásticos apresentam-se em larga escala na parte noroeste do escudo de Angola, em pequenos maciços isolados nos escudos do Maiombe e Cassai. Este batólito faz parte dos granitos da Quibala em conjunto com os granitos leucocráticos, resultantes de granitização de rochas proterozóico inferior e da profunda remobilização de rochas da metamórficas e ultrametamórficas do arcaico

LgPR1: Os granitos leucocráticos aparecem, geralmente, em associação aos granitos porfiroblásticos, mostram passagens mútuas graduais. As características específicas destas rochas são a predominância de feldspato potássico sobre a plagioclase e quantidade relativamente pequenas dos minerais máficos e acessórios (magnetite, apatite, ilmenite, esfena, zircão). Carvalho (1971) individualizou os granitos leucocráticos apenas na área central ("granitos leucocráticos de grão fino a médio") e na área sudoeste ("leucogranitos do Sudoeste") do escudo de Angola. Os granitos leucocráticos encontram-se desenvolvidos somente na área dos escudos de Angola e do Maiombe.

grPR1: Os pórfiros graníticos estão largamente cartografadas na zona de estudo, a sua localização corresponde às cotas mais elevadas do terreno. À semelhança dos granitos porfiroblásticos da Quibala, os pórfiros graníticos revelam passagens graduais aos seus granitóides encaixantes do Arcaico Superior. Os pórfiros graníticos apresentam-se, na sua maioria recristalizados, possuindo cerca de 35% das amostras estudadas, uma cristalização característica, própria de rochas de uma natureza profunda (quer dizer, granitos), e só a existência de fenocristais plagioclásicos com dimensões de 1 a 2 cm indica a sua origem porfírica. Às vezes os pórfiros graníticos passam a pórfiros granodioríticos.

Y_aPR1: Os riolitos, dacitos, andesitos e seus tufos localizam-se nas mesmas áreas do escudo de Angola em que ocorrem os pórfiros graníticos. As rochas vulcânicas são normalmente observadas sob a forma de mantos com alternância de riolitos, dacitos de aspecto afírico ou pórfiro. Dadas as reduzidas dimensões dos seus corpos, todas as rochas acima. Referidas estão indicadas na carta com a mesma cor, sendo a variedade petrográfica dominante indicada com índice gráficos correspondentes. As datações existentes de três amostras de riolitos vítreos, colhidas nesta região, variam de 1708 a 2244 M.a. (rocha total, Rb-Sr), (Carvalho., 1971).

PR1on: O grupo Oendolongo é constituído por conglomerados, grés, quartzitos itabiritos; aparecem siltitos e metaxistos, foi individualizado por F. Mota e O'Donnel nos montes de Oendolongo, situados a Sudoeste da cidade do Huambo, no interflúvio dos rios Catumbela e Cunhangâmua. Na base do corte, ocorrem conglomerados basais (de 2 a 30 m), por vezes encobertos por leitos de argilitos. Mais para cima., verificam-se grés quartzitóides ou arcoses (100 – 150 m) grauvaques (ultrapassando 200 m), itaberitos, quartzitos, siltitos e grés. Nos quartzitos e grés assinalam-se conglomerados intraformacionais com calhaus de rochas efusivas. A espessura do Grupo varia de 350 a 1000 m, atingindo o seu máximo nas proximidades da povoação de Chipindo, de idade proterozóico precoce.

O_wk: Carbonatitos, sienitos nefelínicos, ijolitos, piroxenitos são rochas magmáticas de idade cretácica, as rochas intrusivas desta unidade constituem intrusões multifásicas. Geralmente estas rochas (carbonatitos) localizam-se dentro da zona transcontinental de Lucapa, são do tipo brechas carbonatíticas com silicificação intensa. Na área de estudo inclui os carbonatitos de Longonjo, carbonatitos de Coola que dista a 45 Km a norte do Longonjo e o carbonatito de Chanja situada a 12 Km a sul do Bolombo.

QK1: Sienitos, sienitos nefelínicos, shonquinitos, melteijitos, monzonitos, fonólitos situadas na parte norte da zona de estudo, estas rochas alcalinas estão representadas por grandes intrusões multifásicas do cretácico, apresentam-se sob a forma anelar, o diâmetro vai de 10 a mais quilómetros. A figura 3 ilustra as diferentes litologias da área.

edQ: Areias, argilas, cascalhos, alúvio-deluvionares constituem sedimentos, resultantes da alteração intempérica e da desagregação mecânica das rochas, formado de grãos finos, médio e grosso de diversas naturezas, da época geológica recente quarternária.



FIGURA 3. Mapa geológico da área de estudo modificado de (Araujo A. G., 1992)

MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se um portador do tipo Air Tractor AT-502B (ZS-XAS), equipado com a técnica do sistema de aquisição de dados aérea XAGDAS, GPS diferencial, Antena Trimble (C02992), espectrómetro do tipo radiation Solutions 2 RS-500 com cristais de 32L virados abaixo e 8 L virados acima Laser/Radar altímetros MDL IML 500, com espectro de 512 canais, computador Dell-Latitude E6440, oásis montaj e QGIS 2.18.16.

A metodologia geofísica aplicada neste trabalho foi a gamaespectrometria, durante o processamento aplicou--se a interpolação do algoritmo de mínima curvatura e bidireccional, tamanho da malha unitária escolho é ¼ do espaçamento das linhas de vôo e na fase de correcções aplicou-se também a técnica de nivelamento e micronivelamento proposto por MINTY (1997). A interpretação das zonas de concentrações dos radioelementos foi a partir dos mapas de CK, CTh, CU, CT e Ternários. Todos estes mapas contribuíram na geração do mapa dos domínios e estruturas gamaespectrométricos interpretados. Segundo W.M.Telford & Sheriff (1990). O método radioactivo detecta a emissão natural de raios gamma (y) resultante das rochas superficiais. O potássio, tório e urânio constituem os principais contribuintes da radioactividade no ambiente geológico. Possui a desvantagem de ser pouco penetrante em apenas 40 a 50 cm de profundidade.

RESULTADOS

Abaixo, se descreve os resultados do processamento dos dados aerogamaespectrométricos em que se utilizou os filtros de rotinas requeridos neste tipo de processamentos, de igual modo foi utilizado o método de interpolação de mínima curvatura, o tamanho da célula é de 250 que corresponde a um quarto (1/4) do espaçamento entre as linhas de vôo.

Mapa de Potássio

Pode-se observar as zonas com maior e menor concentração do elemento radioactivo potássio. A parte centro norte e centro oeste indicam as zonas com elevadas concentrações do elemento potássio, enquanto que, a parte centro sul e leste da área de estudo indicam baixas concentrações de potássio, ressaltando ainda nestas zonas anomalias isoladas de elevada concentração. Quando comparado com o mapa do SRMT pode-se verificar que há concentrações elevadas de potássio nas zonas planas e vales com direcção NE – SW do referido mapa, isto se verifica pela mobilidade do elemento potássio.

Por outro lado as zonas com elevadas concentrações indicam também fontes significativas em superfície do potássio, como ilustrada na figura 4.



FIGURA 4. Distribuição da concentração do radioelemento potássio (K) e os contornos do relevo topográfico

Mapa de Tório

O radioelemento tório possui fraca mobilidade, isto lhe serve como sua característica diferencial em relação ao K e U, observando o mapa do tório verifica se com muito realce a elevada concentração do Th em zonas com certas elevadas cotas topográficas quando comparado com o SRTM, fazendo que fixe-se em zonas mais altas topograficamente e resistindo ao processo de alterações e intemperismo.

Na parte extrema noroeste da figura 5 abaixo representada, indica valores elevados da concentração de Th, estão indicados na direcção NE – SW e, na parte correspondente a zona sul apresenta uma anomalia significativa de elevada concentração radiactiva. Ainda pode-se observar nesta imagem anomalias de elevada radiactividade isoladas no meio de zonas de baixa radiactividade com predominância na zona extrema SE.



FIGURA 5. Distribuição da concentração do radioelemento tório (Th) e os contornos do relevo topográfico

Mapa de Urânio

O radioelemento urânio possui uma alta mobilidade, o que lhe permite a não resistência aos processos de alterações e intemperismo que ocorrem nas rochas, quando comparado com o SRMT observa-se a existência de concentrações relativas altas de urânio em zonas com relevo suave, vales e rios. Na zona de encostas do rio Cuvômbwa e do rio não permanente da parte do montante da área de estudo verifica-se altas concentrações de urânio na direcção NE – SW e na direcção NW - SE. Na parte inferior do mapa é visível uma anomalia de alta concentrações de urânio, no centro observam-se várias e pequenas aparições de concentrações de urânio, de salientar que nos extremos das partes NW e SE observam-se grandes anomalias bastantes significativas de acordo com a radiactividade alta que apresentam, como ilustrado na figura 6.



FIGURA 6. Distribuição da concentração do radioelemento urânio (U) e os contornos do relevo topográfico

Mapas de Razões Th/K, U/K e U/Th

Na necessidade de melhor identificar e delimitar certos corpos intrusivos de fontes radiométricos diferenciados, houve também a necessidade de gerar mapas de razões dos radioelementos (Ulbrich, 2009). Não para identificar zonas com maiores concentrações de radioelementos mas para a análise proporcional entre os radioelementos e realçar em certa medida as zonas em pode ocorrer determinado processo de enriquecimento e/ou a depleção relacionável espacialmente com a mineralização que se pretende identificar.

Os mapas de razões radioelementos, sobretudo, contribuem no realce e discriminação de estruturas geológicas não detectáveis nem interpretáveis com facilidade nos mapas dos elementos de concentração isoladas de K,Th e U, mesmo no mapa ternário (Carvalho, 1999).

Mapa de Razão Th/K

Como é observável que a maior concentração da razão Th/K está nas zonas com baixa altitude topográfica na zona noroeste (NW) e centro sul (CS); salientando que o radioelemento Th não é tão móvel como o K e o U, interpretando assim possíveis zonas de alteração hidrotermal ou lixiviação do radioelemento K, por outra mostra também a concentração ou depleção de potássio em zonas em que não há ocorrência de enriquecimento de Th, como indica a figura 7.



FIGURA 7. Distribuição da concentração da razão Th/K e os contornos do relevo topográfico

Mapa de Razão U/K

A razão da concentração de U/K, serve para identificar as zonas de maior e menor concentração desta razão e, interpretar as zonas em que há ocorrência de enriquecimento ou mesmo depleção do radioelemento K, em zonas em que não há enriquecimento do radioelemento U.

Uma vez que o radioelemento U e muito móvel, ou seja, não resiste aos processos de intemperismo e alterações, facilitando desta forma na identificação de zonas com processos de concentração não uniforme e, zonas com probabilidades forte de alterações hidrotermais e/ou processos de lixiviação. A zona com maiores concentrações da razão U/K situa-se em áreas com altitudes topográficas baixas quando comparado com SRMT da mesma área, conforme a ilustração da figura 8.



FIGURA 8. Distribuição da concentração da razão U/K e os contornos do relevo topográfico

Mapa de Razão U/Th

A razão U/Th, ilustra as maiores concentrações altas desta razão de forma geral em zonas com altitudes topográficas baixas quando comparado com o SRMT, na parte centro do mapa observa-se baixos valores de radiactividade. O radioelemento U possui maior mobilidade em ambiente superficial, fazendo com que se estude o processo de lixiação a partir desta razão U/Th, figura 9.



FIGURA 9. Distribuição da concentração da razão U/Th e os contornos do relevo topográfico

Mapa do Factor F

Segundo (Inserir autor) parâmetro F é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \times \frac{eU}{eTh}$$

onde: K-potássio; eU-equivalente do U; eTh- equivalente do tório e F-factor de enriquecimento do K e U em relação ao tório.

Confeccionou-se também um mapa do parâmetro F para auxiliar na interpretação e, realçar o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório, bastante aplicado em áreas em que ocorre forte alteração hidrotermal. Enquanto, que em áreas aonde ocorre o processo de intemperismo e lixiviação intenso do potássio, o parâmetro F apresenta geralmente valores bastante baixos, ao contrário com que acontece em áreas de afloramentos rochosos maciços submetidos ao enriquecimento de radioelementos de potássio e urânios, através do processo de alteração hidrotermal apresenta valores geralmente altos, como ilustrada na figura 10.



FIGURA 10. Factor F ilustra o enriquecimento do K e U em relação ao Th e os contornos do relevo topográfico

Mapa de Contagem Total

O mapa de contagem total (CT), dos três (3) radioelementos K, Th e U, permite uma boa análise e interpretação das zonas com maiores concentrações e outras de menores concentrações dos radioelementos aqui abordados. Tornando assim possível a partir da imagem de CT fazer uma interpretação geológico estrutural e definir a delimitação dos domínios e lineamentos gamaespectrométricos.

Este mapa de CT ilustra o relevo gamaespectrométrico, representa também os resultados dos mapas dos radioelementos apresentados anteriormente da zona de estudo.

Pode observar-se que na parte centro, norte e noroeste ocorrem as maiores concentrações dos domínios relativas altas de radioactividades dos três (3) elementos K, Th e U. Enquanto, que, as concentrações dos domínios relativos baixos dos radioelementos encontram-se na parte sul do mapa, com excepção de uma anomalia de alta radiactividade na zona sul. Estas respostas estão relativamente relacionadas aos radioelementos K, Th e U.

Quando comparado cuidadosamente com o mapa do SRMT, verifica-se que as zonas com radioactividade relativamente alta encontram-se em grande parte nas zonas com média altitude topográfica.

No ponto de vista dos alineamentos gamaespetrométricos, ressaltam com maior realce o alineamento na direcção NE – SW e, também, é observável com certa predominância o alineamento na direcção NW- SE, como ilustra a figura 11.



FIGURA 11. Distribuição da concentração total (CT) e os contornos do relevo topográfico

Mapas Ternários (RGB & CMY)

Houve a necessidade da combinação dos três radioelementos (K, Th e U) num único mapa e/ou imagem ternária para facilitar a observação das diferenças nas variações internas das grandes unidades no mapa de contagem total.

Neste trabalho foi gerada o mapa ternário RGB (figura 12), nas composições em que o vermelho, verde e azul constituem as cores primárias e correspondem a K, Th e U respectivamente e, neste mapa ternário a cor esbranquiçada resulta do somatório dos três (3) radioelementos e indica os valores anómalos de maior interesse da radiactividade. Nas zonas escuras correspondem a baixas concentrações do somatório dos três (3) radioelementos.

Cada pixel reproduz uma tonalidade de cor que reflecte os valores relativos de intensidade da radiação gamma formada pelas respostas, neste pixel, pertencentes aos três (3) radioelementos (Ulbrich, 2009), a figura 12 representa o mapa ternário.



FIGURA 12. Distribuição da concentração ternária em RGB dos elementos de K, Th e U.

Produziu-se o segundo mapa ternário CMY, em que o valor atribuído relativos as três (3) cores primárias denominadas de ciano, magenta e amarela, estas cores sofrem subtração fazendo com que as regiões mais saturadas destacam-se pelo baixo realce gamaespectrometria em todos os canais (Ribeiro, 2013) ao passo que as zonas menos saturadas marcam porções mais realçadas na radiação gamma para os três radioelementos. O potássio corresponde a cor ciano (C→K), o tório a magenta (M→Th) e o urânio corresponde a cor amarela (Y→U), como ilustra a figura 13 abaixo representada.



FIGURA 13. Mapa da distribuição da concentração ternária em CMY dos elementos de K, Th e U.

Domínios Gammaradiométricos

Gerou-se um mapa com 38 domínios gammaradiométricos interpretados, como produto de interpretação integrada e/ ou combinada dos mapas ternários, contagem total, mapas de concentração de potássio, tório e urânio, a fim de obter-se um mapa muito próximo do observável no campo durante os trabalhos de levantamentos litológicos.

Em função das respostas gamaespectrométricas das rochas e minerais, ilustradas a partir das cores que reflectem, dividiu--se em cinco classes:

- **1.** Muito baixo: 0 19%
- 2. Baixo: 20- 39%
- 3. Médio: 40 59%
- **4.** Alto: 60 79%
- 5. Muito alto: 80 100%

Os domínios gammaradiométricos foram classificados em função das concentrações de radioactividade de potássio (K), tório (Th) e Urânio (U), conforme ilustrado na figura 14, abaixo representada.



FIGURA 14. Ilustração da integração dos domínios gammaradiométricos interpretados e sobreposto a imagem colour shader SRTM.



FIGURA 15. Representa as zonas potenciais de K, Th e U, alvos de prospecção mineral, os indícios minerais e os carbonatitos de Longonjo, Coola e Chanja.

DISCUSSÕES

O mapa geológico de Angola representada na figura 3 indica as unidades geológicas observadas no campo (Araujo A. G., 1992). As anomalias de valores altos de radiactividade assinaladas na figura 4 correspondem aos granitos leucocráticos, granitos biotíticos porfiroblásticos e sienitos nefelinicos, ou seja, são rochas ígneas acidas à intermediárias favoráveis para a localização do potássio.

Segundo outros autores, os silicatos ricos em potássio como feldspato potássico, a muscovite e a leucite contêm valores entre 10% a 20% (Marques, 1977), as rochas ígneas félsicas a exemplo dos granitóides, sienitóides os seus equivalen-



Zonas Potenciais para Minerais Radioactivos (K, Th e U) As vinte (20) zonas potenciais para minerais radioactivos foram seleccionados em função das suas respostas positivas, de muito alta radioactividade de potássio (K), tório (Th) e urânio (U).

Os valores de elevadas concentrações dos canais de potássio, tório e urânio, de modo geral, estão associados geologicamente aos granitos, carbonatito, argilas e quartzitos, todas as áreas delimitadas serão alvos de prospecção geológica e geoquímica (amostragem) para a confirmação destas áreas de enriquecimento e alterações hidrotermais, a fim de obter teores de cada radioelemento. A figura 15, ilustra os domínios gammaradiométricos da zona de estudo.

cas, como filitos, xistos, gnaisses e rochas sedimentares como folhelhos e argilas, (Shives, 1997) contêm maiores teores de potássio, enquanto nos anfibolitos os teores variam de baixo a moderado. Segundo (Shives, 1997), o potássio apresenta alta mobilidade nas áreas de clima tropical e subtropical em que ocorre o intemperismo e alteração hidrotermal, quando sofre lixiviação é facilmente absorvido pelos argilominerais, como a ilite, montmorilonite.

quartzo--feldspáti-

A figura 5, ilustra anomalias de valores altos de radioactividade de tório e, segundo o apresentado na figura 3 assinalam-se em carbonatitos, sienitos e granitóides e argilas, o que provavelmente deve haver para além das ígneas básicas a ultrabásicas também pegmatitos ricos

em feldspatos que podem albergar o tório. A figura 6 apresenta anomalias de valores altos de radioactividade e quando correlacionado com a figura 3 correspondem aos carbonatitos, granitos leucocráticos, biotíticos porfiroblásticos e nas areias, argilas, cascalhos e aluviodelúvionares, o que significa que entre estas rochas cartografadas no mapa geológico existe boa correlação da informação oriunda da aerogamaespectrometria.

O urânio e o tório são absorvidos em argilas coloidais e óxidos de ferro, (Ribeiro, 2013), durante o processo de intemperismo os minerais que apresentam maiores teores de Th são estáveis e podem acumularem-se nos depósitos de minerais pesados, o tório livre devido a quebra do mineral durante o intemperismo, pode ser retido nos óxidos-hidróxidos de Fe e Ti ou em argilitos. O tório na crusta continental apresenta valores de até 10,5 na parte superior e, na parte inferior a concentração de tório é 1,2 ppm aproximadamente, cuja média é de 5,6ppm, segundo (R. Rudnick, 2004).

As figuras 4, 5 e 6 de potássio, tório e urânio respectivamente exibem as zonas de enriquecimento hidrotermal de cada um deles, assim como as zonas em que ocorreram o processo de intemperismo e lixiviação dos elementos radioactivos, juntamente com as imagens de contagem total e ternários. As figuras 7, 8 e 9 assinalam a proporcionalidade das razões Th/K, U/K e U/ Th que auxiliam na interpretação das zonas em que há ocorrência de enriquecimento ou mesmo depleção dos radioelementos. Segundo Ulbrich (2009) e Neto (2003), durante o processo de intemperismo e alteração hidrotermal o urânio sofre mobilidade, tal como o potássio, enquanto, que o tório é menos móvel geoquimicamente em relação ao K e U.

CONCLUSÕES

O mapa geológico de Angola representada na figura 3 indica as unidades geológicas observadas no campo. As anomalias de valores altos de radiactividade assinaladas na figura 4 correspondem aos granitos leucocráticos, granitos biotíticos porfiroblásticos e sienitos nefelínicos ou seja, são rochas ígneas acidas à intermediárias favoráveis para a localização do potássio.

Segundo outros autores, os silicatos ricos em potássio como feldspato potássico, a muscovite e a leucite contêm valores entre 10% a 20%, as rochas ígneas félsicas a exemplo dos granitóides, sienitóides os seus equivalentes vulcânicos e rochas metamórficas micáceas, feldspáticas e quartzo-feldspáticas, como filitos, xistos, gnaisses e rochas sedimentares como folhelhos e argilas, contêm maiores teores de potássio, enquanto nos anfibolitos os teores variam de baixo a moderado. Segundo, o potássio apresenta alta mobilidade nas áreas de clima tropical e subtropical em que ocorre o intemperismo e alteração hidrotermal, quando sofre lixiviação é facilmente absorvido pelos argilominerais, como a ilite, montmorilonite. A figura 5, ilustra anomalias de valores altos de radioactividade de tório e, segundo o apresentado na figura 3 assinalam-se em carbonatitos, sienitos e granitóides e argilas, o que provavelmente deve haver para além das ígneas básicas a ultrabásicas também pegmatitos ricos em feldspatos que podem albergar o tório. A figura 6 apresenta anomalias de valores altos de radioactividade e quando correlacionado com a figura 3 correspondem aos carbonatitos, granitos leucocráticos, biotíticos porfiroblásticos e nas areias, argilas, cascalhos e aluviodelúvionares, o que significa que entre estas rochas cartografadas no mapa geológico existe boa correlação da informação oriunda da aerogamaespectrometria.

O urânio e o tório são absorvidos em argilas coloidais e óxidos de ferro, durante o processo de intemperismo os minerais que apresentam maiores teores de Th são estáveis e podem acumular-se nos depósitos de minerais pesados, o tório livre devido a quebra do mineral durante o intemperismo, pode ser retido nos óxidos-hidróxidos de Fe e Ti ou em argilitos. O tório na crusta continental apresenta valores de até 10,5 na parte superior e, na parte inferior a concentração de tório é 1,2 ppm aproximadamente, cuja média é de 5,6 ppm, segundo.

As figuras 4, figura 5 e figura 6 de potássio, tório e urânio respectivamente exibem as zonas de enriquecimento hidrotermal de cada um deles, assim como as zonas em que ocorreram o processo de intemperismo e lixiviação dos elementos radioactivos, juntamente com as imagens de contagem total e ternários. As figuras 7, 8 e 9 assinalam a proporcionalidade das razões Th/K, U/K e U/ Th que auxiliam na interpretação das zonas em que há ocorrência de enriquecimento ou mesmo depleção dos radioelementos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, J. (1953). Estudos dos minerais radioactivos de Cacuso, Lucala e Elege.
- [2] ARAÚJO. A. G. (2001). Indice dos recursos minerais de Angola. Angola.
- [3] ARAUJO, A. G. (1992). Notícia Explicativa da Carta Geológica à escala 1:1.1000.000.
- [4] CARVALHO. H. (1971). Noticia Explicativa da folha Geológica de Angola à escala 1:250.000 da folha Sul D - 33/U.
- [5] CITIC-PLANAGEO. (2017). Relatório do levatamento aerogeofísico do bloco CITIC 5 - Norte de Angola.
- [6] NETO, L. F. (2003). Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de Ouro na folha Botuverá,.
- [7] MARQUES. M. M. (1977). Noticia Explicativa da folha geológica de Angola á escala 1:100.000 da folha nº 378 - Chibemba.
- [8] MINTY, B. (1997). Fundamentals of airbone gamma-ray spectrometry AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics.

- [9] P.KEARY, M. I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Lts 3 ed, 281p.
- [10] R. RUDNICK, S. G. (2004). composition of the continental crust in: holland H.D., Turekian N.N.eds. treatics on geochesmistry. Oxford: Elsevier Pergamon.
- [11] R.W.BOYLE. (1982). Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits Amsterdam: Elservier. (developments in Economic Geology. .
- [12] RIBEIRO, M. S. (2013). Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico.
- [13] SHIVES, R. C. (1997). The detection of potassic alteration by Gamma-Ray Spectrometry- Recognetion of alteration related to mineralization: in proceedings of Exploration 97: Fourth decennial conference on mineral exploration.pp. 771-752.
- [14] ULBRICH, F. F. (2009). Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados, I: revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos elementos K,.
- [15] TELFORD, L. G., & SHERIFF, R. (1990). Applied Geophysics. Cambrige University Press 770.1990.

