

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

GRECIELE JOELEN RIBEIRO DE LUNA CAVALCANTE

**METAIS PESADOS, URÂNIO E TÓRIO EM ROCHAS, SOLOS E
PLANTAS DO AGRESTE MERIDIONAL DE PERNAMBUCO**

**RECIFE
2018**

Greciele Joelen Ribeiro de Luna Cavalcante

Licenciada em Geografia

Metais pesados, urânio e tório em rochas, solos e plantas do Agreste Meridional de Pernambuco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Prof. Dra. Caroline Miranda Biondi

Coorientador: Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva

**Recife
2018**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L732p Cavalcante, Greiele Joelen Ribeiro de Luna.
Metais pesados, urânio e tório em rochas, solos e plantas do Agreste Meridional de Pernambuco / Greiele Joelen Ribeiro de Luna Cavalcante. – Recife, 2018.
71 f.: il.

Orientador(a): Caroline Miranda Biondi.
Coorientador(a): Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2018.
Inclui referências e anexo(s).

1. Metais pesados 2. Urânio 3. Solos - Composição 4. Solos – Teor de metal Pesado I. Biondi, Caroline Miranda, orient. II. Silva, Ygor Jacques Agra Bezerra da, coorient. III. Título

CDD 631.4

GRECIELE JOELEN RIBEIRO DE LUNA CAVALCANTE

Metais pesados, urânio e tório em rochas, solos e plantas do Agreste Meridional de Pernambuco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 31 de agosto de 2018.

Profa. Dra. Caroline Miranda Biondi
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dra. Paula Renata Muniz Araújo
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a construção desta pesquisa acreditando no meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me ajudado nesta caminhada.

Ao meu noivo, pelo amor incondicional, companheirismo, amizade, ajuda, respeito, dedicação, confiança, por estar ao meu lado sempre, muito obrigada por tudo meu eterno amor;

À querida Pesquisadora e Professora Caroline Miranda Biondi pela paciência, ajuda, dedicação, sempre disponível para nos atender a qualquer hora, com a mesma educação sem nunca recusar atenção e ser como eu, apaixonada pela geologia, muito obrigada por tudo;

Ao grande pesquisador e Professor Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva pelo ensinamento a mim transmitido e por jamais ter negado qualquer tipo de ajuda e esforço para a realização deste trabalho;

À amiga pesquisadora, e futura Professora, Adriana Alves Batista de Souza, a qual sei que posso contar a qualquer hora, sempre disponível, nunca negando ajuda, material e consultoria;

Às amigas Janyelle de Oliveira Lemos e Stephany Alves Brilhante obrigada pela amizade, carinho, momentos de alegrias, companheirismo e materiais emprestados;

Às estagiárias Ariadny Avelino Farias de Araújo e Alexsandra Lins da Silva por terem me ajudado com as análises sempre com muito empenho e dedicação;

À estagiária Djennyfer Karolaine de Melo Ferreira por todo carinho, dedicação e empenho em querer aprender e realizar todas as análises;

À estagiária Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva pelos ensinamentos, carinho e dedicação no desenvolvimento desta pesquisa;

À mestranda e “minha estagiária” Paula Caroline Ferreira Rodrigues por estar sempre à disposição para ajudar na realização das análises;

Aos mestrandos Marina e Luiz por todo ensinamento e ajuda na realização desta pesquisa.

Aos estagiários Aline, Diogo e Franklone, que apesar de não terem sido meus estagiários sempre estavam dispostos a ajudar;

À Simone Lins, técnica do Laboratório de Química Ambiental de Solo, fica o meu eterno agradecimento pode manter tudo sempre organizado; tornando o laboratório em um ambiente maravilhoso para se trabalhar, onde se é possível fazer as análises da melhor maneira possível, com alto padrão de qualidade. Além de estar sempre aberta para tirar dúvidas e ajudar no que for possível.

À Josângela por nunca deixar faltar material e sempre estar disposta a ajudar na parte administrativa do laboratório e tentar resolver as broncas técnicas junto com a Simone Lins o mais rápido possível e muitas vezes até mesmo consertar os equipamentos.

Ao Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos pela recepção, apoio e amizade (Josângela, Simone, Bruno, Paula, Adriana, Ygor, Diogo, William, Sandra, Aline, Arthur, Luís, Frank, Rayanna e Silvia);

À Professora Áurea Lucina Monteiro pelo incentivo profissional e amizade;

À professora Lucila Éster Borges por sempre estar à disposição para ajudar e emprestar equipamentos que ajudaram na realização desta pesquisa;

Aos pesquisadores da CPRM Ana Cláudia, Carlos Alberto dos Santos por terem acompanhado e ajudado na identificação de alguns pontos de coleta, além do grande ensinamento a respeito da geologia do Estado de Pernambuco;

Ao Pesquisador Felipe da CRPM pela ajuda na disponibilização de alguns mapas da área de coleta, além da ajuda na utilização do aplicativo Avenza;

Aos Doutorandos Fábio Amorim e Jadson Freire da Silva pela elaboração dos mapas da minha área de coleta;

Aos meus amigos Cybelle Fernanda Martins e Fagner Cardoso Farias de Paula por terem me ajudado com o trabalho e sempre estando à disposição para ajudar;

À Professora Valderez da UFPE por possibilitar a utilização do espaço do NNEG-LABISE no departamento de geologia para triturar as amostras de rochas;

À técnica Carina da UFBA que realizou as análises de MEV e EDS;

Aos Pesquisadores da CPRM Genner Alves de Mário e Vanja Coelho Alcântara pela elaboração das laminas petrográficas e sua análise;

À Cuidadora e ao Técnico do Herbário da UFRPE que ajudaram na identificação das amostras de gramíneas e cactáceas;

A todos os professores do Departamento de Solos, pelo conhecimento, respeito e atenção transmitidos durante todo o mestrado;

Ao Pesquisador e Professor Clístenes Araújo do Nascimento por sempre estar à disposição e por emprestar livros que ajudaram no entendimento da Ciência do Solo;

À Pesquisadora e Professora Betânia pela paciência, compreensão e carinho em compreender que nem todos os alunos tinham intimidade com a ciência do solo. Além de tornar a aula mais prazerosa possível.

A todos os funcionários e especialmente a uma funcionária, que além de atenciosa, carinhosa e dedicada é o coração do Departamento de Solos, pois sem ela o que seria dos alunos nos momentos difíceis? “Socorro”, minha amiga;

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do solo da UFRPE por toda a estrutura oferecida;

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), órgão de fomento à pesquisa, pela concessão da bolsa de estudos;

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Metais pesados, urânio e tório em rochas, solos e plantas do Agreste Meridional de Pernambuco

RESUMO

O Agreste Meridional de Pernambuco possui uma diversidade litológica e importância econômica para o Estado, por meio da pecuária leiteira, torna importante o estudo da disponibilidade metais pesados e radionuclídeos. Entretanto, estudos detalhados envolvendo teores totais e disponibilidade ambiental de metais pesados, urânio e tório geologicamente associados aos diversos materiais de origem, ainda não foram realizados. O presente estudo teve por objetivo relacionar os teores de cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb), zinco (Zn), urânio (U) e tório (Th) nos solos com a diversidade litológica do Agreste Meridional de Pernambuco (PE). Para tanto, foram coletadas amostras compostas de solos nas profundidades 0-20 e 20-40 cm em unidades geológicas distintas e determinados os teores totais e ambientalmente disponíveis de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, U e Th. Foram também avaliados os teores desses elementos em gramíneas e cactáceas, além dos teores totais em rochas e a petrografia. Os elevados teores de tório em solos estão associados à presença de monazita, principalmente na constituição mineralógica dos gnaisses, granitos e pegmatitos. Os teores médios ambientalmente de metais pesados, urânio e tório em solos desenvolvidos sobre diferentes materiais de origem do Agreste Meridional de PE seguiram a ordem: $Fe > Mn > Th > Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > U > Cd$. Os teores mais elevados de Cd e Ni foram observados em solos derivados de granitos nos municípios de Águas Belas e Itaíba, respectivamente. Solos originados de gnaiss apresentaram as maiores teores de Cr. Em Itaíba foram detectados os teores mais elevados de Fe e Mn nos solos desenvolvidos de anfíbolito e de Pb nos solos sobre granitos. Solos originados de gnaiss no município de Garanhuns apresentaram as concentrações mais elevadas de Zn. Os teores mais altos de Th foram observados nos solos originados de ortognaiss, no município de Venturosa. A concentração mais elevada de U foi identificada nos solos originados da suíte intrusiva do município de Buíque. Os teores ambientalmente disponíveis de metais pesados, U e Th em solos apresentaram grande variabilidade como consequência da diversidade litológica. Em 84% dos solos foram evidenciados teores ambientalmente disponíveis de Cu acima do valor de referência de qualidade para o Estado de PE. Solos originados de anfíbolito apresentaram teores de Cu e Ni superiores ao valor de prevenção estabelecido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente. Os teores médios de metais absorvidos por gramíneas e cactáceas seguiu a ordem: $Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Th > Ni > Pb$. Exceto pelo Fe, os demais micronutrientes encontram-se em níveis considerados normais para gramíneas forrageiras. Os maiores coeficientes de acumulação biológica foram observados para os micronutrientes, com teores no solo considerado de médio a baixo (Cu, Zn e Ni). Os resultados desta pesquisa demonstram a importância de conhecer a influência dos diferentes contextos geológicos do Agreste Meridional de Pernambuco para compreender a dinâmica de metais pesados, Th e U em solos, gramíneas e cactáceas da região.

Palavras-chave: Material de origem. Disponibilidade ambiental. Metais pesados. Urânio e tório. Bacia leiteira.

Heavy metals, uranium and thorium in rocks, soils and plants of the Southern Agreste of Pernambuco

ABSTRACT

The Southern Agreste of Pernambuco has a lithological diversity and economic importance for the state, through dairy farming, makes it important to study the availability of heavy metals and radionuclides. However, detailed studies involving total contents and environmental availability of heavy metals, uranium and thorium geologically associated with the different materials of origin, have not yet been performed. The objective of this study was to compare cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), lead (Pb), zinc (Zn) uranium (U) and thorium (Th) in the soils with the lithological diversity of the Southern Agreste of Pernambuco (PE). In order to do so, samples composed of soils at depths 0-20 and 20-40 cm were collected in different geological units and the total and environmentally available contents of Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, U and Th. The contents of these elements were also evaluated in grasses and cacti, as well as the total rock content and petrography. The high levels of thorium in soils are associated to the presence of monazite, mainly in the mineralogical constitution of gneisses, granites and pegmatites. The average environmental contents of heavy metals, uranium and thorium in soils developed on different materials of origin of Southern Agreste of PE followed the order: Fe > Mn > Th > Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > U > Cd. higher values of Cd and Ni were observed in soils derived from granites in the municipalities of Águas Belas and Itaíba, respectively. Soils originated from gneiss had the highest levels of Cr. In Itaíba, higher levels of Fe and Mn were detected in the soils developed on amphibolite and Pb soils on granites. Soils originated from gneiss in the municipality of Garanhuns showed the highest concentrations of Zn. The highest levels of Th were observed in the soils originated from orthogneiss, in the municipality of Venturosa. The highest concentration of U was identified in soils originating from the intrusive suite of the municipality of Buíque. The environmental contents of heavy metals, U and Th in soils presented great variability as a consequence of the lithological diversity. In 84% of the soils, there were environmentally available levels of Cu above the quality reference value for the State of PE. Soils originated from amphibolite had Cu and Ni contents higher than the value established by the National Environmental Council. The average content of metals absorbed by grasses and cacti followed the order: Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Th > Ni > Pb. Except for Fe, the other micronutrients are considered normal levels for forage grasses. The highest coefficients of biological accumulation were observed for micronutrients, with soil contents considered medium to low (Cu, Zn and Ni). The results of this research demonstrate the importance of knowing the influence of the different geological contexts of Southern Agreste of Pernambuco to understand the dynamics of heavy metals, Th and U in soils, grasses and cacti of the region.

Keywords: Source material. Environmental availability. Heavy metals. Uranium and thorium. Milk basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Agreste Meridional (Fonte: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2011).	30
Figura 2 - Mapa dos pontos de coletas nos municípios do Agreste Meridional-PE.....	30
Figura 3 - Mapa geológico adaptado da CPRM com os pontos de coletas do Agreste Meridional-PE	30
Figura 4 - Mapas geofísicos de U e Th adaptado da CPRM dos pontos de coletas do Agreste Meridional-PE.	31
Figura 5 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura (SEM) com composição elementar por espectro de raios-X dispersivos de energia (EDS).	39
Figura 6 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura (MEV) com composição elementar por espectro de raios-X dispersivos de energia (EDS).	40
Figura 7 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura (SEM) com composição elementar por espectro de raios-X dispersivos de energia (EDS).	42
Figura 8 - Fatores de enriquecimento de cromo (Cr) e chumbo (Pb) em solos desenvolvidos a partir de gnaiss do Agreste Meridional de Pernambuco em função da precipitação.	44
Figura 9 - Fatores de enriquecimento de cromo (Cr) e chumbo (Pb) em solos formados a partir de granito em função da precipitação.	45
Figura 10 - Fatores de enriquecimento de manganês (Mn), ferro (Fe) e níquel (Ni) em solos formados a partir de gnaiss em função da precipitação.	46
Figura 11 - Fatores de enriquecimento de manganês (Mn), ferro (Fe) e níquel (Ni) em solos formados a partir de granito em função da precipitação.	49
Figura 12 - Fatores de enriquecimento de tório (Th) em solos formados a partir de gnaiss e granito em função da precipitação.	51
Figura 13 - Fatores de enriquecimento de cobre (Cu) em solos formados a partir de gnaiss e granito em função da precipitação.	51
Figura 14 - Lâmina petrográfica do ponto 40, mostrando a grande quantidade de quartzo na amostra.	56
Figura 15 - Boxplot para os teores de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn e Th em gramíneas (n=30). Os quadrados de cor preta indicam os teores médios e os círculos de cor preta referem-se aos valores mínimos e máximos.	60

Figura 16 - Boxplot para os teores de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn e Th em cactáceas (n=4). Os quadrados de cor preta indicam os teores médios e os círculos de cor preta referem-se aos valores mínimos e máximos.	61
Figura 17 - Coeficiente médio de acumulação biológica (CAB) de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn e Th em gramíneas e cactáceas.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Município, localização, unidade geológica, rocha e precipitação dos pontos de coleta do Agreste Meridional do Estado de Pernambuco.	32
Tabela 2 - Recuperação média dos metais, U e Th nos solos certificados utilizados nas análises, valores certificados e recuperados.	36
Tabela 3 - Teores totais de metais pesados, U e Th em solos (20-40 cm) e rochas.	40
Tabela 4 - Composição mineralógica de diferentes materiais de origem do Agreste Meridional de Pernambuco.	41
Tabela 5 - Tabela de fator de enriquecimento para metais pesados, U e Th.	48
Tabela 6 - Teores ambientalmente disponíveis de metais pesados, U e Th nas camadas superficiais e subsuperficial dos solos do Agreste Meridional.....	53
Tabela 7 - Teores de metais pesados, Th e U em gramíneas e cactáceas coletadas nas áreas do Agreste Meridional.	59
Tabela 8 - Coeficiente de acumulação biológica em gramíneas e cactáceas dos municípios do Agreste Meridional.	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Hipótese.....	22
1.2 Objetivo Geral.....	22
1.3 Objetivos Específicos.....	22
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1 Agreste Meridional de Pernambuco.....	23
2.2 Metais pesados nos solos e riscos ambientais.....	24
2.3 Tório e Urânio nos solos.....	25
2.4 Estudos realizados no Agreste Meridional.....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Coleta e preparo das amostras.....	29
3.2 Teores de metais pesados, urânio e tório em solos e rochas.....	33
3.2.1 Teores totais.....	33
3.2.2 Teores ambientalmente disponíveis.....	33
3.3 Teores de metais pesados, tório e urânio na parte aérea das plantas.....	34
3.4 Dosagem.....	34
3.5 Análises microscópicas das rochas.....	34
3.6 Análise Petrográfica.....	35
3.7 Análise dos dados.....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 Recuperação dos metais em materiais de referência certificados.....	36
4.2 Teores totais de metais pesados, U e Th em solos e rochas.....	37
4.3 Fator de enriquecimento.....	43
4.4 Teores ambientalmente disponíveis de metais pesados, urânio e tório.....	51
4.5 Teores de metais, urânio e tório em gramíneas e cactáceas do Agreste Meridional de Pernambuco.....	58
5. CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS.....	64
ANEXO.....	71

1. INTRODUÇÃO

A composição da superfície terrestre muda de acordo com o material geológico que, por sua vez, influencia na distribuição natural de metais pesados e radionuclídeos nos solos. Os metais pesados são incorporados como oligoelementos à rede cristalina dos minerais primários, que se formam durante o resfriamento do magma. Rochas ígneas básica apresentam maiores valores de Cu, Mn, U e Zn em gabros e basaltos, enquanto que Ni e Cr estão mais presentes nos grupos ultramáficos, como periodotito e serpentinito.

Desta forma, o material de origem que sofreu ação dos agentes químico, físico e biológico afeta, juntamente com outros fatores de formação do solo, os teores desses elementos no solo. Nos solos a disponibilidade dos metais dependerá de características como: pH, capacidade de troca catiônica, teor de matéria orgânica, tipo de minerais de argila, bem como, especialmente em solos tropicais, da presença de óxidos de Fe e Mn.

Conhecer o teor de metais pesados no solo é importante para diversas aplicações, como por exemplo: reconhecimento e caracterização geral do solo, identificação de áreas contaminadas e fatores responsáveis pelos altos teores de metais pesados que ajudem no planejamento de estratégias de remediação. Além de ser igualmente importante para comparação da concentração total de metais pesados com quaisquer limites limítrofes e valores padrão determinados pela legislação de vários países que são frequentemente usados para distinguir a contaminação do solo.

Objetivou-se neste trabalho relacionar os teores de cádmio, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo, zinco, urânio e tório nos solos com a diversidade litológica do Agreste Meridional de Pernambuco. Além dos teores ambientalmente disponíveis desses em gramíneas e cactáceas.

1.1 Hipótese

A diversidade geológica do Agreste Meridional de Pernambuco contribui para a ocorrência de diferentes teores e disponibilidades ambientais de cádmio, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco e dos radionuclídeos urânio e tório.

1.2 Objetivo Geral

Relacionar os teores de metais pesados, tório e urânio nos solos com a diversidade litológica do Agreste Meridional de Pernambuco.

1.3 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar a influência do material de origem nos teores totais e ambientalmente disponíveis de metais pesados, urânio e tório nos solos em estudo;
- ✓ Avaliar a relação entre os teores ambientalmente disponíveis para gramíneas e cactáceas com atributos dos solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agreste Meridional de Pernambuco

A mesorregião do Agreste do Estado de Pernambuco possui área territorial de 24.489 km², correspondendo a 1/3 da área total do Estado, e está dividida em Agreste Setentrional, Agreste Central e Agreste Meridional. Segundo dados do IBGE (2010) a região possui 2.302.411 habitantes, 11,2% localizados nas áreas rurais.

O Território do Agreste Meridional está geograficamente localizado nas Mesorregiões do Agreste e do Sertão Pernambucano, sendo uma área intermediária entre a Mata e o Sertão, com uma área total de 13.153 km² e envolve as Microrregiões do Vale do Ipanema, Vale do Ipojuca, Garanhuns e parte da microregião. Segundo o censo de 2010 (IBGE, 2010), o território tem 587.086 habitantes, sendo a população urbana de 329.246 pessoas e 257.840 a população rural. O índice de urbanização é de 56% e o de ruralização é de 44%.

O Agreste Meridional é conhecido como a “bacia leiteira” do Estado de Pernambuco, pois a base econômica é a pecuária leiteira, com a produção de leite e derivados de forma artesanal e industrial, além da diversidade de cultivos de floricultura e oferecendo diversas opções de turismo (BRASIL, 2011).

A área que corresponde ao Agreste Meridional de Pernambuco compreende as unidades geológicas: Complexo Rio Una composto (Neoproterozoico); Suíte Intrusiva Ferreira Costa (Neoproterozoico); Complexo Cabrobó (Mesoproterozoico); Suíte Intrusiva Caetés (Neoproterozoico); Complexo Vila Amaro (Mesoproterozoico Estaniano); Ortognaisse Cachoeira Grande (Paleoproterozoico); Ortognaisse Mucunã (Paleoproterozoico); Formação Tacaratu (Siluro-Devoriano); Suíte Intrusiva Buíque (Neoproterozoico); Complexo Belém do São Francisco (Neoproterozoico); Suíte Intrusiva Itaporanga (Neoproterozoico); Suíte intrusiva Serra da Caatinga Branca (Neoproterozoico); Depósito Colúvio-eluvio (Neógeno); Suíte Intrusiva Serrote dos Macacos (Neoproterozoico) (CPRM, 2015).

O clima da região é do tipo tropical (quente e seco), caracterizado por secas periódicas e temperaturas médias mais elevadas (AW), de acordo com o sistema de classificação de Koppen (CLIMA-DATA.ORG, 2017). A precipitação média anual varia de 549-926 mm, a altitude varia de 381-883m e a temperatura anual varia de 20-35°C. A vegetação é caracterizada por uma zona de transição entre a zona da Mata e o Sertão predominando floresta decídua designada caatinga hipoxerófila.

O clima mais árido favorece o desenvolvimento de solos mais rasos e pedregosos (litólicos), com predomínio das ordens dos Neossolos, Planossolos e Luvisolos. Também se encontram solos mais profundos, Latossolos e Argissolos, mais próximos à Zona da Mata. Outras ordens, a exemplo dos Cambissolos, Vertissolos e Gleissolos ocorrem pontualmente em associação com as principais ordens de ocorrência (EMBRAPA, 2000).

2.2 Metais pesados nos solos e riscos ambientais

Os metais pesados compõem um grupo de metais e metaloides que apresentam densidade elevada ($> 5 \text{ g cm}^{-3}$) e que causam problemas de toxicidade aos seres vivos quando em teores elevados (DUFFUS, 2002). São classificados entre os grupos mais perigosos de poluentes ambientais devido à toxicidade e persistência no ambiente (HARIBALA et al., 2016). Ao contrário dos contaminantes orgânicos, não podem ser degradados e acumulam-se nos tecidos em função do tempo de exposição dos organismos ao metal (bioacumulação), ocorrendo também aumento nos teores do contaminante nos níveis mais elevados da cadeia trófica (biomagnificação).

Apesar de serem associados à toxidez, alguns metais pesados como Cu, Mn, Ni e Zn são essenciais para o desenvolvimento das plantas e nutrição animal sendo classificados como micronutrientes. Todavia, mesmo esses, em concentrações elevadas, podem tornar-se tóxicos para os organismos (MCLAUGHLIN et al., 1999). Elementos como cádmio (Cd) e chumbo (Pb) não têm qualquer função fisiológica conhecida, provocando unicamente danos ao metabolismo animal e/ou vegetal, (COA et al., 2016). Em seres humano, o cádmio pode causar edema pulmonar, destruição das membranas mucosas, vômitos, diarreia e problemas renais em sua forma de cádmio-metalotioneína que é filtrado no glomérulo, e posteriormente reabsorvido no túbulo proximal (GODT et al., 2006). O Pb afeta o desenvolvimento cognitivo das crianças (ER et al., 2013).

Os solos naturalmente possuem ampla variação nos teores totais e disponíveis de metais pesados. A variação nos teores totais decorre de fatores como composição mineralógica do material de origem e intensidade dos processos pedogenéticos (ALLOWAY, 2010). Já as condições geoquímicas do sistema solo interferem na disponibilidade de metais pesados: Em solos ácidos, bem aerados (oxidantes), metais pesados, especialmente Cd e Zn possuem maior mobilidade e estão disponíveis para plantas, enquanto em solos neutros ou alcalinos ambas são reduzidas pela formação de hidróxidos (KABATA-PENDIAS, 2004).

A exposição humana a metais pesados decorre de processos de contaminação antropogênica ou da existência de anomalias geoquímicas, que resultam em teores de metais

superiores à abundância média desses elementos na crosta terrestre (LI et al., 2017; ARAÚJO et al., 2018), e das diferentes rotas de exposição (ingestão, contato dérmico e inalação) a que são submetidos. A ingestão direta ou indireta do solo ou da água contaminados, mediante consumo de produtos contaminados são as rotas mais relevantes na maioria dos casos de exposição humana. Os efeitos deletérios à saúde humana são diversos, variando de dores de cabeça, condições inflamatórias crônicas, aumento do risco de câncer, problemas cardíacos e pulmonares à efeitos teratogênicos (SÁ et al., 2016) e danos ao sistema nervoso central (ELHEL et al., 1995; WALRAVEN et al., 2015).

A ingestão direta de solo contaminado por metais pesados é considerada uma importante rota de exposição, principalmente para crianças e animais que residem em áreas com solos contaminados, e/ou com teores anômalos. Para Parkpian et al. (2003) a ingestão direta de solo pelo gado, durante o pastejo, pode ser a principal via de transferência de metais para o animal, em áreas de pastagem sobre solo contaminado.

2.3 Tório e Urânio nos solos

O urânio (U) e o tório (Th) fazem parte da série dos actinídeos que pertencem ao grupo do radionuclídeos primordiais, pois se originaram durante a formação do universo sendo o ponto de partida das cadeias de desintegração natural. O U é um elemento radioativo que ocorre naturalmente no ambiente, sendo o mais estudado dos actinídeos. Esse elemento é importante entre os radioativos naturais nas rochas devido a sua abundância na crosta terrestre (RUDNICK; GAO, 2004; SIEGEL; BRYAN, 2003).

O U tem a propriedade de associar-se a íons metálicos esses íons são comparáveis em tamanho ao potássio, rubídio e céσιο, que são prontamente adsorvidos pelas argilas e outros minerais (SHEPPARD, 1980). Nas rochas, altos teores de U são encontrados principalmente em granito, fosfato e folhetos orgânico (AYOTTE; FLANAGAN; MORROW, 2007, GASCOYNE, 1992) e também em rochas com cristalização tardia, rochas magmáticas alcalinas e acompanhado por elementos terras raras (UNSCEAR, 2000).

O U existe na natureza, em baixas concentrações, na rocha, no solo, e na água. Unscear (2000) relata concentrações de atividade medianas no solo de 35 Bq / kg para ^{238}U , ou seja, cerca de 2,8 mg kg⁻¹. No solo, o U pode estabelecer interações químicas com espécies inorgânicas e ligantes orgânicos (YANG et al., 2015), associar-se às cargas das superfícies das argilas e as diversas frações minerais, como carbonato, óxidos e hidróxidos de Fe e Mn, além estar de presente na estrutura de minerais primários (ROUT et al., 2016).

Regiões com altos níveis de radioatividade natural ou metais pesados representam um alto risco potencial para os organismos. Em locais contaminados por U, a exposição humana acontece mediante a ingestão de águas superficiais e subterrâneas, ou transferência no sistema solo-planta-animal (NEIVA et al., 2016). A toxicidade desse elemento está relacionada com sua solubilidade. Os rins são os órgãos mais afetados pela presença de U em humanos e outros animais. A acumulação renal acarreta necrose celular e atrofia dos túbulos. Além da nefrotoxicidade, ocorrem diminuição no crescimento, má-formações internas/externas e crescimento ósseo diminuído (EFSA, 2009; BRUGGE; BUCHNER, 2011; KURTTIO et al., 2005).

O Th é um elemento radioativo sólido de ocorrência natural encontrado em teores traço no solo, rochas, água, plantas e animais (HAZEN et al., 2009; DOLEZAL et al., 1968). Este radionuclídeo é usado como combustível em reatores nucleares para produzir isótopos de U fissionáveis. Monoisotópico ^{232}Th , emitindo α - (90%), β - (1%), e γ - (9%) raios com uma meia-vida de $1,4 \times 10^{10}$ anos (Ma et al.; 2016). As atividades médias de ^{232}Th na crosta terrestre são cerca de 25-50 Bq kg⁻¹(UNSCEAR, 2000). Existem formas naturais e artificiais de Th, todas elas radioativas, em geral. O Th natural ocorre como ^{232}Th , ^{230}Th ou ^{228}Th . ^{229}Th e suas filhas não ocorrem na natureza e pertencem à série de decaimento do ^{233}U , criados a partir de ^{232}Th (BODEN et al., 2017).

O Th possui abundância de, aproximadamente, 8,1 mg kg⁻¹, na crosta terrestre (TUTSON;GORDEN, 2017), sendo comumente encontrado nos minerais tório-fosfato a monazita (QUEIROZ et al., 2017). Elemento de baixa ocorrência em rochas ígneas máficas (basaltos), com teor médio de 1 mg kg⁻¹; nas variedades ácidas ocorrem em teores de até 5 mg kg⁻¹. Em rochas sedimentares, como arenitos e calcário, contêm cerca de 2 mg kg⁻¹ (PAPADOPOULOS et al., 2017). O intervalo de concentração típico de Th nos solos é de 2-12 mg kg⁻¹ com um valor médio de 6 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2000).

O Th tem a capacidade de formar complexos metálicos com substâncias orgânicas como ácido cítrico, ácido oxálico e acetil acetona, tornando-se mais móvel, o que pode elevar o potencial de lixiviação deste. Em solução, é rapidamente adsorvido ou precipitado, por causa do potencial iônico muito alto do íon tetravalente (SHEPPARD, 1980)

A toxicidade química dos actinídeos pode ser semelhante à dos metais pesados, no entanto, uma atividade ionizante associada à decomposição radioativa pode resultar em efeitos tóxicos adicionais em uma planta. Os efeitos podem ser significativos quando a concentração de radionuclídeos excede os níveis micromolares na biomassa. Nesse caso, as maiores concentrações de Th podem afetar certos processos bioquímicos e fisiológicos nas plantas

(SHTANGEEVA et al., 2005). Zoriy et al. (2010), encontraram concentrações médias de ^{232}Th nas folhas, hastes e raízes das amostras de plantas de Kurchatov: de 0,111 a 0,298 $\mu\text{g} / \text{g}$, de 0,037 a 0,128 $\mu\text{g} \text{g}^{-1}$ e de 0,103 a 0,360 $\mu\text{g} \text{g}^{-1}$, respectivamente. As médias foram bastante semelhantes entre concentrações de ^{232}Th e ^{238}U em folhas, hastes e raízes foram encontrados: 2,8, 3,4 e 2,4 $\mu\text{g} \text{g}^{-1}$, respectivamente.

Uma vez que o Th está naturalmente presente no ambiente, as pessoas são expostas a pequenas quantidades no ar, alimentos e água. No entanto, pessoas que vivem perto de áreas de mineração ou de certas instalações industriais podem ter uma maior exposição. Se inalado como poeira, o Th pode permanecer nos pulmões por longos períodos, dependendo da forma química e, se ingerido, é expelido pelas fezes e urina (EPA, 2017).

2.4 Estudos realizados no Agreste Meridional

Os municípios de Pedra e Venturosa estão inseridos na bacia leiteira do Estado de Pernambuco, microrregião formada por 20 municípios, com economia concentrada na pecuária leiteira, com a produção de leite e derivados de forma artesanal e industrial (BRASIL, 2011). A bacia leiteira tem uma área de 13.153 km^2 e é responsável por cerca de 73% da produção de leite do Estado de Pernambuco (SILVA et al., 2010), totalizando 36.390.000 litros de leite em 2006, segundo dados do último censo agropecuário (IBGE, 2006).

A antiga Empresa Nuclear Brasileira (NUCREBRÁS), em parceria com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), desenvolveu na década de 1970 um projeto de reconhecimento radiológico no Agreste do Estado de Pernambuco. Esse estudo resultou na identificação de depósitos de U em rocha urano-fosfática em áreas dos municípios de Pedra e Venturosa, com teores de até 22.000 $\text{mg} \text{kg}^{-1}$ de U registrados em rocha (COSTA et al., 1976). Esta ocorrência, a sudoeste do município de Venturosa, é considerada anômala, uma vez que a distribuição média em rochas da crosta é de 2,8 $\text{mg} \text{kg}^{-1}$ (SMEDLEY et al., 2006).

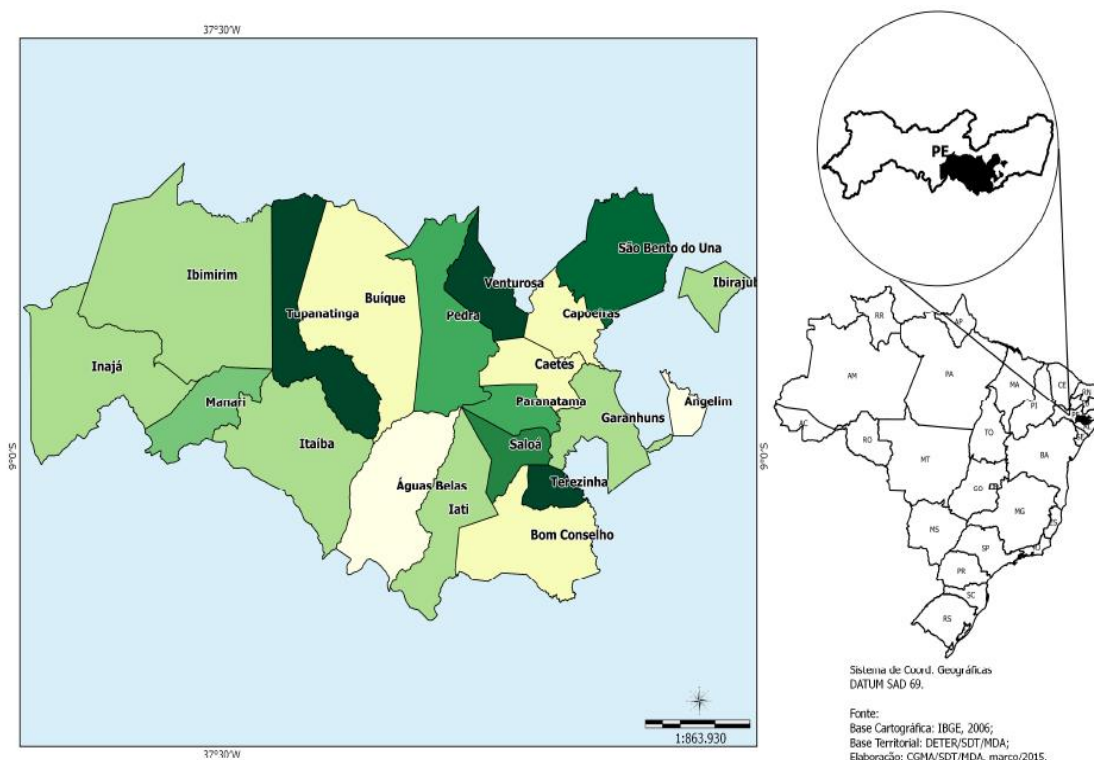


Figura 1 - Agreste Meridional (Fonte: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2011)

A produção de leite e derivados em áreas de anomalias geoquímicas representam uma potencial via de exposição para humanos. A chamada “Bacia Leiteira” do Estado de Pernambuco, com áreas de anomalias radioativas (COSTA et al., 1976), tornou-se objeto de pesquisas para verificação do risco à saúde, e potencial de exposição, para moradores e mercado consumidor dos produtos. Esses estudos, realizados nos municípios de Pedra e Venturosa, foram direcionados a análise de radionuclídeos e Pb, como elemento presente na série de decaimento do ^{238}U (JÚNIOR et al., 2006). Estudos realizados nas fazendas produtoras de leite nos municípios de Pedra e Venturosa encontraram elevadas concentrações de elementos radioativos em amostras de rochas e solo (SANTOS et al., 2006). Porém, Silva et al. (2006) indicaram que a exposição não era suficiente para elevar o risco de desenvolvimento de carcinoma no crânio e sarcoma ósseo.

Pesquisa realizada com objetivo de avaliar o risco de intoxicação das vacas leiteiras analisou os teores de Pb estável em amostras de forragem cultivadas em fazendas da região, que variaram entre 5 a 344 mg kg^{-1} . Com base nesses resultados, a simulação realizada pelos autores estimou ingestão diária de até 1,7 g de Pb, indicando um alto risco de contaminação para vacas leiteiras (SILVA et al., 2011). Nessa região houve relatos de problemas de saúde nos bovinos, com sintomas correspondentes aos de intoxicação por Pb. Em pesquisa realizada

com amostras de leite, queijo e soro do leite, produzidos em áreas próximas a anomalia geoquímica, verificou-se concentrações de Pb no leite acima do permitido pelo Ministério da Saúde do Brasil, em 60% das fazendas estudadas. Estudo mais recente realizado na cidade de Pedra, em área destinada a agricultura e pecuária, reportou teores de Ba no solo mais elevados que o permitido para áreas agrícolas, apresentando risco toxicológicos, para a população (BEZERRA et al., 2014).

Apesar dos estudos realizados, observa-se que não existe uma abordagem ampla que contemple a diversidade litológica do agreste meridional, relacionando-a com a disponibilidade metais pesados, U e Th associados à esta ocorrência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta e preparo das amostras

A pesquisa foi realizada no Agreste Meridional do Estado, com ênfase a municípios pertencentes à bacia leiteira (Figura 2). As bases para seleção dos locais de amostragem foram os mapas geológicos da folha Garanhuns (1:250.000) (CPRM, 2015), com o objetivo de representar a diversidade litológica; para anomalias de U e Th da região foram utilizados os mapas geofísicos (1:250.000) de U e Th (CPRM, 2015). Foram selecionados 45 pontos de coleta. Os locais foram georreferenciados por meio do Global Positioning System (GPS) (Tabela 1). Em cada ponto de coleta foram coletadas três amostras simples, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, para formar uma composta. Também foram coletadas amostras de gramíneas e cactáceas, além de amostras frescas do afloramento rochoso, nos mesmos pontos.

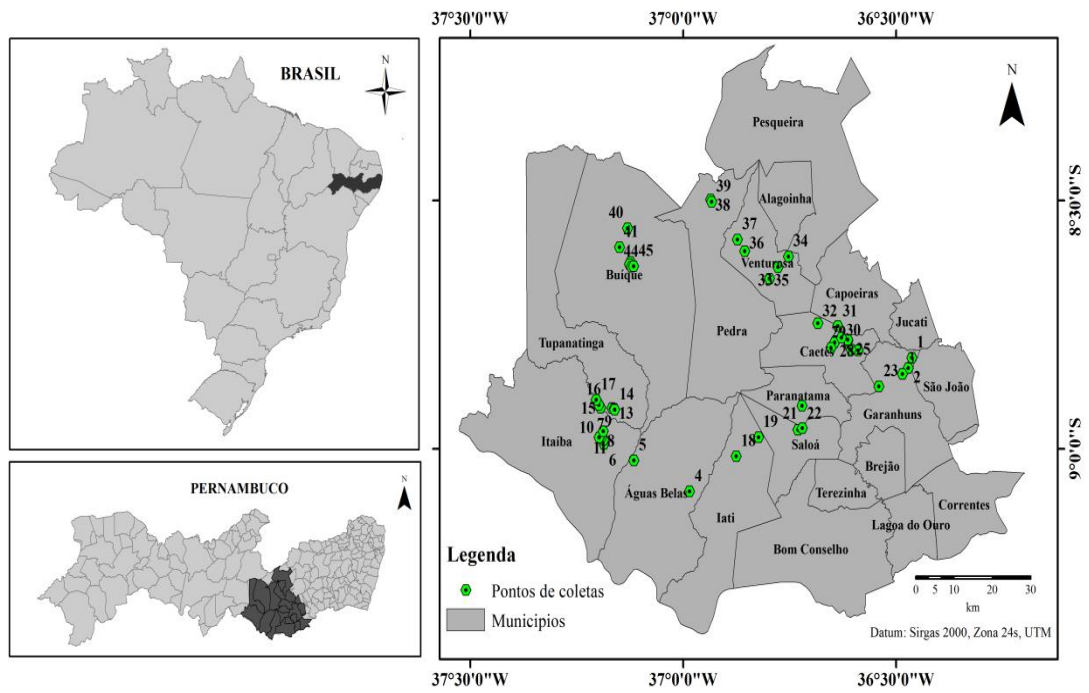


Figura 2 - Mapa dos pontos de coletas nos municípios do Agreste Meridional-PE

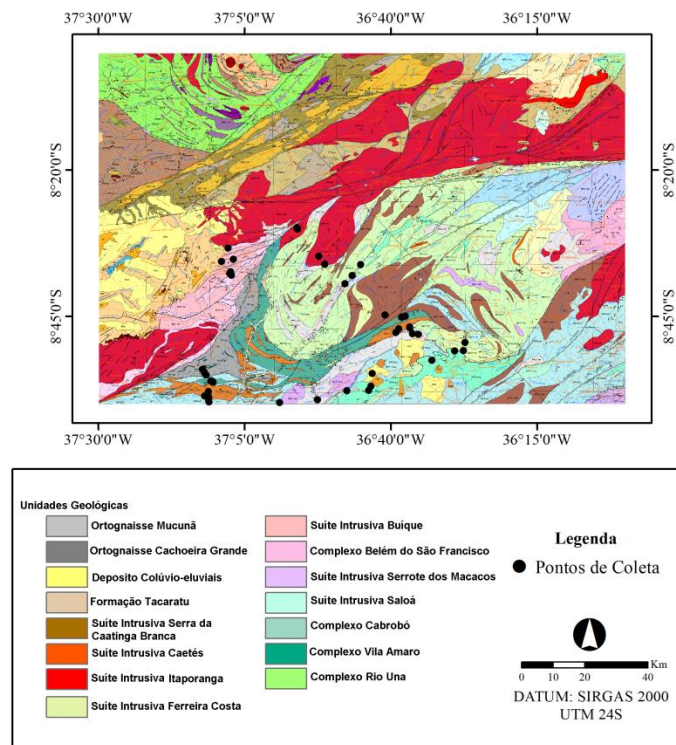


Figura 3 - Mapa geológico adaptado da CPRM com os pontos de coletas do Agreste Meridional-PE

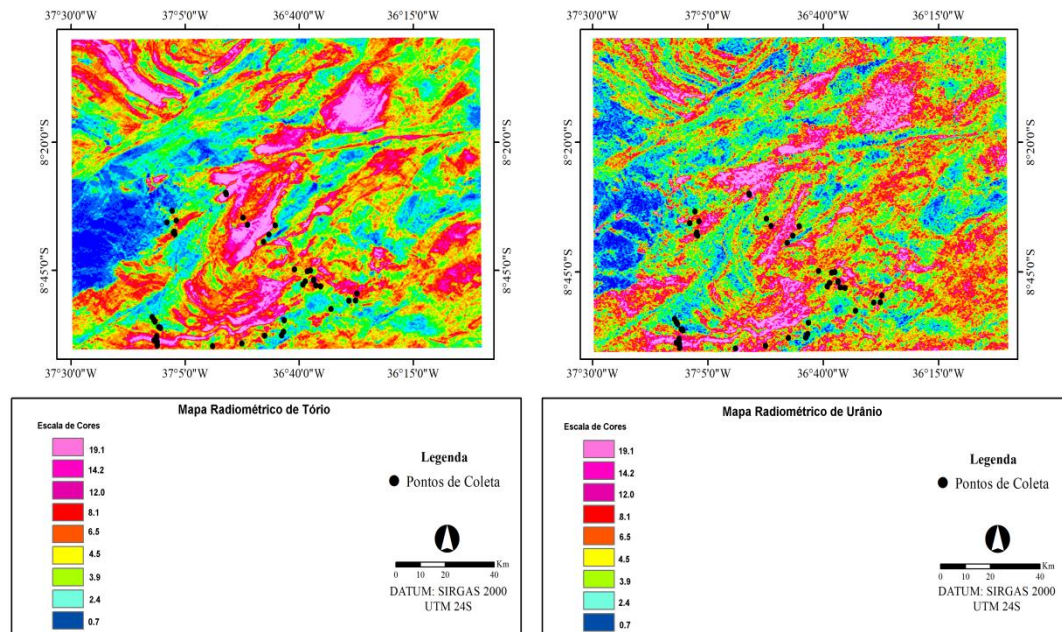


Figura 4 - Mapas geofísicos de U e Th adaptado da CPRM dos pontos de coletas do Agreste Meridional-PE.

As amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de aço inoxidável de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras de rochas foram lavadas, secas ao ar e fragmentadas; uma parte foi reservada para realização da análise petrográfica, na CPRM, e a outra parte foi triturada (reduzida a fragmentos de tamanho de brita) e, posteriormente, pulverizada, em moinho de disco (laboratório da UFPE). As amostras vegetais (gramíneas e cactáceas) foram lavadas e foi utilizada para fins de análise. A parte aérea foi seca em estufa a 65° C e moída em moinho do tipo Willey. Todas as amostras foram armazenadas para posterior análise.

Tabela 1 - Município, localização, unidade geológica, rocha e precipitação dos pontos de coleta do Agreste Meridional do Estado de Pernambuco

Ponto	Municípios	Coordernadas S/W	Unidade Geologica (a)	Rocha	Precipitação Média anual
1	Garanhuns	S8°49'31,7"/W36°27'21,1"	Complexo Rio Una	Xisto	873 mm
2	Garanhuns	S8°50'52,7"/W36°27'37,8"	Suíte Intrusiva Ferreira Costa	Gnaiss	873 mm
3	Garanhuns	S8°50'57,4"/W36°29'05,9"	Complexo Cabrobó	Gnaiss	873 mm
4	Águas Belas	S9°05'08,7"/W36°59'05,2"	Suíte Intrusiva Serrote dos Macacos	Granito	647 mm
5	Águas Belas	S8°59'40,7"/W37°11'08,6"	Complexo Cabrobó	Granito	647 mm
6	Itaíba	S8°59'26,0"/W37°11'08,8"	Complexo Cabrobó	Granito	672 mm
7	Itaíba	S8°58'54,8"/W37°11'10,5"	Suíte Intrusiva Caetés	Gnaiss	672 mm
8	Itaíba	S8°58'29,5"/W37°11'24,8"	Suíte Intrusiva Caetés	Gnaiss	672 mm
9	Itaíba	S8°58'38,5"/W37°11'47,5"	Suíte Intrusiva Caetés	Granito	672 mm
10	Itaíba	S8°58'38,3"/W37°11'50,6"	Suíte Intrusiva Caetés	Gnaiss	672 mm
11	Itaíba	S8°57'53,8"/W37°11'15,1"	Suíte Intrusiva Caetés	Granito	672 mm
12	Tupanatinga	S8°56'05,2"/W37°10'47,5"	Complexo Vila Amaro	Pegmatito	808 mm
13	Tupanatinga	S8°56'09,9"/W37°10'30,9"	Complexo Vila Amaro	Granito	808 mm
14	Tupanatinga	S8°56'17,7"/W37°10'26,6"	Complexo Vila Amaro	Gnaiss	808 mm
15	Itaíba	S8°55'03,0"/W37°11'37,4"	Ortognaisse Cachoeira Grande	Granito	672 mm
16	Itaíba	S8°54'41,3"/W37°11'52,9"	Ortognaisse Cachoeira Grande	Anfibolito	672 mm
17	Itaíba	S8°54'06,0"/W37°12'14,7"	Ortognaisse Cachoeira Grande	Gnaiss	672 mm
18	Iati	S9°00'52,9"/W36°52'30,7"	Complexo Cabrobó	Granito	616 mm
19	Iati	S8°57'45,2"/W36°47'33,7"	Complexo Cabrobó	Granito	616 mm
20	Saloá	S8°57'42,3"/W36°43'48,9"	Complexo Cabrobó	Gnaiss	856 mm
21	Saloá	S8°56'58,4"/W36°43'25,0"	Complexo Cabrobó	Gnaiss	856 mm
22	Paranatama	S8°54'47,7"/W36°43'14,7"	Deposito Colúvio-eluvio	Arenito	839 mm
23	Garanhuns	S8°52'31,9"/W36°33'00,2"	Complexo Cabrobó	Gnaiss	873 mm
24	Caetés	S8°48'08,4"/W36°35'19,6"	Ortognaisse Mucunã	Gnaiss	755 mm
25	Caetés	S8°48'00,4"/W36°36'20,2"	Ortognaisse Mucunã	Gnaiss	755 mm
26	Caetés	S8°46'59,3"/W36°36'49,3"	Suíte Intrusiva Ferreira Costa	Gnaiss	755 mm
27	Caetés	S8°46'49,9"/W36°36'48,2"	Suíte Intrusiva Ferreira Costa	Granito	755 mm
28	Caetés	S8°47'10,2"/W36°38'39,3"	Suíte Intrusiva Caetés	Gnaiss	755 mm
29	Caetés	S8°47'48,7"/W36°39'09,5"	Suíte Intrusiva Caetés	Gnaiss	755 mm
30	Caetés	S8°45'02,9"/W36°37'32,1"	Complexo Vila Amaro	Granito	755 mm
31	Caetés	S8°45'10,8"/W36°38'12,0"	Complexo Vila Amaro	Granito	755 mm
32	Caetés	S8°44'50,1"/W36°41'02,0"	Suíte Intrusiva Serra da Caatinga Branca	Granito	755 mm
33	Venturosa	S8°38'04,4"/W36°46'38,2"	Complexo Rio Una	Gnaiss	549 mm
34	Venturosa	S8°36'13,4"/W36°45'13,3"	Complexo Rio Una	Gnaiss	549 mm
35	Venturosa	S8°39'27,1"/W36°47'50,6"	Ortognaisse Mucunã	Gnaiss	549 mm
36	Venturosa	S8°36'09,5"/W36°51'20,5"	Suíte Intrusiva Itaporanga	Gnaiss	549 mm
37	Venturosa	S8°34'45,2"/W36°52'20,5"	Suíte Intrusiva Itaporanga	Granito	549 mm

					Continuação Tabela 1	
38	Pedra	S8°29'53,8"/W36°56'06,9"	Suíte Intrusiva Itaporanga	Granito	608 mm	
39	Pedra	S8°30'10,6"/W36°55'59,9"	Suíte Intrusiva Itaporanga	Granito	608 mm	
40	Buíque	S8°33'23,1"/W37°07'50,6"	Formação Tacaratu	Arenito	926 mm	
41	Buíque	S8°35'39,5"/W37°08'58,6"	Formação Tacaratu	Arenito	926 mm	
42	Buíque	S8°37'27,3"/W37°07'24,7"	Suíte Intrusiva Buíque	Granito	926 mm	
43	Buíque	S8°37'42,4"/W37°07'34,1"	Suíte Intrusiva Buíque	Gnaiss	926 mm	
44	Buíque	S8°38'01,8"/W37°07'17,2"	Complexo Belém do São Francisco	Gnaiss	926 mm	
45	Buíque	S8°37'57,8"/W37°06'58,2"	Complexo Belém do São Francisco	Gnaiss	926 mm	

(a) CPRM (2015)

3.2 Teores de metais pesados, urânio e tório em solos e rochas

3.2.1 Teores totais

Foram utilizadas amostras coletadas de solos na profundidade de 20-40 cm para evitar influência das possíveis atividades antrópicas na superfície e amostras fresca de rocha. Pesou-se 0,5g das amostras, previamente maceradas e passadas em peneira de aço inoxidável com malha de abertura de 200 mesh, que foram transferidas para béquer de teflon, com posterior adição de 5 ml de ácido fluorídrico concentrado. O conjunto foi mantido em repouso, (por 16 horas), e posteriormente foram adicionados 5 ml de ácido nítrico, e a solução foi colocada em chapa aquecedora a temperatura de 250°C.

Após o resfriamento, foram adicionados 5 ml de ácido nítrico e 3ml de ácido perclórico, o béquer foi tampado com vidro relógio e colocado na chapa aquecedora. O resíduo da digestão foi dissolvido com 5 ml de ácido clorídrico e 5ml de água ultrapura e os extratos foram transferido para balões volumétricos certificados de 25 ml e o volume completado com água ultrapura. As análises foram realizadas em duplicatas. Para o controle de qualidade das análises foram utilizadas amostras de solo certificado *2709a San Joaquin Soil (Moderately elevated trace element concentrations)* com concentrações conhecidas de todos os elementos.

3.2.2 Teores ambientalmente disponíveis

Para extração dos teores ambientalmente disponíveis dos elementos estudados foi utilizado o método 3051A (USEPA, 1998) para as amostras de solo profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Subamostras de TFSA foram maceradas em almofariz de ágata, até que todo material macerado pudesse atravessar peneira de malha de abertura de 0,3 mm (ABNT nº 50). Foram

pesados 0,5g de solo pulverizados e transferidos para tubos de teflon e acrescentados 9 ml de ácido nítrico (HNO₃) e 3 ml de ácido clorídrico (HCl).

As amostras foram mantidas em sistema fechado de forno de micro-ondas Mars Xpress, durante 30 minutos para atingir 175° C. Após o resfriamento os extratos foram vertidos para balões volumétricos certificados (NBR ISO/IEC) 25 ml e o volume completado com água ultrapura, e filtrados em papel de filtragem lenta (Macherey Nagel).

Para o controle de qualidade da análise foram utilizadas amostras de solos certificadas pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST)-2709a *San Joaquin Soil (Moderately elevated trace element concentrations)* que apresentam valores certificados de metais pesados. Todas as digestões foram realizadas em duplicatas.

3.3 Teores de metais pesados, tório e urânio na parte aérea das plantas

Foram separadas as partes aéreas das plantas, posteriormente lavadas, secas em estufa a 65° C e trituradas em moinho tipo Willey. Pesou-se 0,5g do material moído que foi transferido para tubos de teflon, adicionou-se 6 ml de ácido nítrico e 2 ml de peróxido de hidrogênio. O conjunto foi mantido em pré-digestão (overnight). Posteriormente as amostras foram colocadas em micro-ondas Mars Xpress durante 30 minutos até atingir 175°C. Após o resfriamento, as amostras foram vertidas para balões volumétricos certificados (NBR ISO/IEC) de 25 ml e o volume completado com água ultrapura. Os extratos foram filtrados em papel de filtragem lenta (Macherey Nagel).

Para o controle de qualidade da análise foram utilizadas em cada bateria uma amostra de *Spinach 1570a Standard Reference Material*, certificado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) que possuem teores certificados de metais pesados.

3.4 Dosagem

Os teores de metais pesados, U e Th nos extratos provenientes das digestões total e ambientalmente disponível foram dosados em Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

3.5 Análises microscópicas das rochas

Foram selecionadas as rochas com maiores teores de metais, U e Th obtidos a partir da digestão total. Amostras de rocha fresca foram revestidas com uma camada de carbono de 20 nm (modelo Q150R - Quorum Technologies) e os minerais identificados por microscopia eletrônica de varredura (TESCAN, VEGA-3 LMU) a uma tensão de aceleração de 15 kV.

Amostras das mesmas rochas também foram submetidas à identificação e semiquantificação de minerais, por meio da espectrometria por energia dispersiva de Raios X (EDS, Oxford Instrument, modelo: 51-AD0007) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV-EDS).

3.6 Análise Petrográfica

Foram selecionadas as rochas com maiores teores de metais, U e Th obtidos a partir da digestão total. As amostras de rochas foram analisadas através de seções delgadas (MURPHY, 1986). Para análise petrográfica as amostras já identificadas foram cortadas em fatias planas aproximadamente de 47x25x30mm e posteriormente aquecidas a 60°C em uma chapa. As fatias das amostras aquecidas foram impregnadas a uma mistura de resina (Araldite® e endurecedor) e acetona e será colocado sobre as lâminas de vidro e pressionado com um bastão de madeira para expulsar as bolhas de ar. A secagem do material se dará ao ar livre.

O conjunto de lâminas/amostras foram preparadas na cortadas/desbastadora adiamantada, onde em cada etapa de desbaste houveram a lavagem da lâmina com detergente e álcool. No desbaste final do conjunto lâmina/amostra na politriz giratória, utilizando abrasivos de 320, 600, 800 micra e, se necessário, 1200 micra atingindo a espessura final da rocha (colada na lamina) de 30 micra (o mesmo que 0,03mm). As lâminas foram analisadas com o uso do microscópio petrográfico.

3.7 Análise dos dados

Os resultados obtidos foram submetidos à estatística descritiva (média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão), foi utilizado análises estatísticas foram realizadas utilizando o software STATISTICA (versão 10).

Os fatores de enriquecimento (FE) dos metais pesados, U e Th (M) foram avaliados utilizando o Ti como elemento de referência, e aplicando a equação abaixo (BLASER et al., 2000):

$$FE = \frac{\left(\frac{S}{\overline{Tis}}\right)}{\left(\frac{R}{\overline{Tir}}\right)}$$

FE= Fator de enriquecimento

S- Teor total de metal pesado, Th ou U no solo

R- Teor total de metal pesado, Th ou U na rocha

Tis= Teor total de Titânio no solo

Tir= Teor total de Titânio na rocha

Para avaliar o potencial de acumulação de metais pesados, Th e U em gramíneas e cactáceas foi calculado o coeficiente de acumulação biológica (CAB), para cada área, conforme equação abaixo:

$$CAB = \frac{\text{Metais pesados, Th e U (folhas)}}{\text{Metais pesados, Th e U (solo)}}$$

Os metais pesados, Th e U (folhas), são o teor médio metais pesados, U e Th, nas folhas de planta (mg kg^{-1}), o teor médio de metais pesados, Th e U (mg kg^{-1}) encontrado nos solos avaliados, considerando a profundidade de 0 a 20 cm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Recuperação dos metais em materiais de referência certificados

As amostras de Nist têm seus teores certificados baseado em métodos de determinação do teor total através da digestão contendo ácido fluorídrico para decomposição dos silicatos do solo ou mediante utilização de métodos não destrutivos. De forma geral, as taxas de recuperação foram satisfatórias para todos os metais (Tabela 2).

Tabela 2 - Recuperação média dos metais, U e Th nos solos certificados utilizados nas análises, valores certificados e recuperados

Metal	Valor Determinado	Valor Certificado (média NIST)	Recuperação (determinado)
	mg kg^{-1}		%
Cd	0,3	0,4	75
Cr	54,15	53	102
Cu	27,05	27	100
Fe	28840	24000	120
Mn	362,05	420	86
Ni	47,05	66	71
Pb	7,3	9,2	79
Zn	54,05	79	68
U	0,55	*	*
Th	5,8	*	*

* Não existia valor certificado no Nist

4.2 Teores totais de metais pesados, U e Th em solos e rochas

Cádmio (Cd)

Em Água Belas foi observado o maior teor de Cd ($0,20 \text{ mg kg}^{-1}$) no solo desenvolvido a partir de granito da suíte intrusiva Serrote dos Macacos (ponto 4). No ponto 42 obtivemos $0,20 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo e $0,10 \text{ mg kg}^{-1}$ em granito, valor comum em rocha metamórfica ($0,1-10 \text{ mg kg}^{-1}$), segundo Kabata-pendias e Pendias (2001). De modo geral, os valores variaram de $0,03$ a $0,45 \text{ mg kg}^{-1}$.

Cromo (Cr)

Os teores de Cr no solo situaram-se entre $240,28$ a $88,68 \text{ mg kg}^{-1}$ nos solos, sendo o maior valor encontrado em rocha gnaisse do complexo Cabrobó, $240,28 \text{ mg kg}^{-1}$ (ponto 3) (tabela 3). Dentre os materiais de origem avaliados, o maior teor foi observado em anfibolito, com teor de $307,45 \text{ mg kg}^{-1}$. Outro material de origem que se destacou enquadrou-se foi o gnaisse da Suíte Intrusiva Ferreira Costa, localizado em Garanhuns, com teor de $188,40 \text{ mg kg}^{-1}$.

O solo oriundo de xisto, coletado em Garanhuns, apresentou teores elevados de Cr no solo ($155,38 \text{ mg kg}^{-1}$) em decorrência, provavelmente, da presença do mineral de Chronferita (Figura 5).

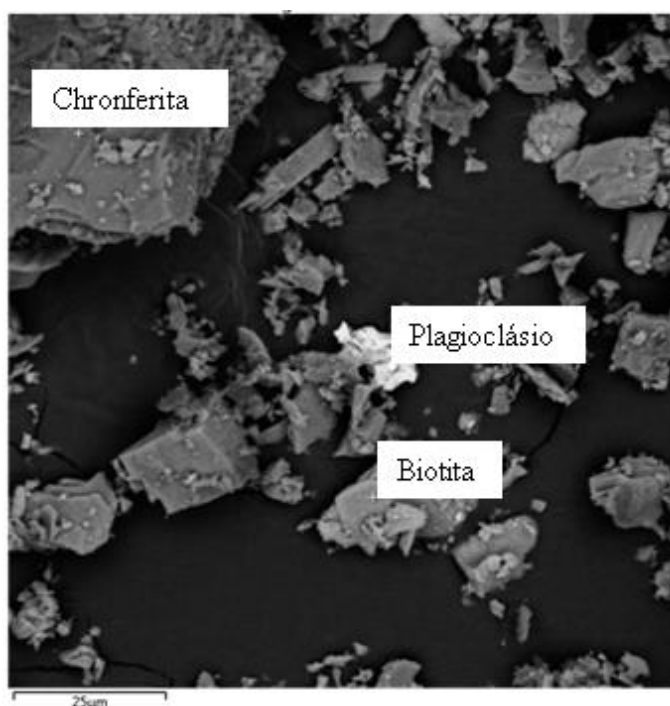


Figura 5 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura (SEM) com composição elementar por espectro de raios-X dispersivos de energia (EDS)

Tabela 3 - Teores totais de metais pesados, U e Th em solos (20-40 cm) e rochas

Pontos	Matriz	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	U	Th
1	Solo	0,05	155,38	8,20	6222,50	69,63	5,18	29,48	13,80	1,23	52,00
	Xisto	0,25	39,20	85,45	9922,50	89,33	4,98	31,10	25,13	<LD	11,93
2	Solo	0,03	174,30	6,65	11660,00	87,78	10,63	11,83	52,93	1,60	16,03
	Gnaisse	<LD	188,40	25,80	42202,50	710,00	41,40	14,25	92,03	<LD	6,30
3	Solo	<LD	240,28	10,08	17020,00	50,30	13,45	8,00	23,25	1,03	9,10
	Gnaisse	0,05	128,10	7,45	3055,50	29,05	5,15	14,68	5,73	0,05	0,40
5	Solo	<LD	134,48	18,20	13705,00	228,68	8,90	30,80	27,35	0,65	17,10
	Granito	0,05	37,45	12,73	10765,00	119,53	2,50	34,48	42,55	1,45	9,23
6	Solo	0,03	122,95	22,18	13655,00	192,18	8,63	29,35	32,50	1,15	26,40
	Granito	0,40	29,78	20,00	13880,00	103,58	6,13	31,65	34,63	<LD	19,15
7	Solo	<LD	117,28	17,80	6642,50	62,38	4,03	33,95	13,85	2,73	35,95
	Gnaisse	0,10	26,23	11,25	12832,50	112,35	3,40	29,45	29,93	<LD	25,55
8	Solo	0,00	118,10	21,98	13647,50	186,65	8,43	28,48	30,30	3,70	71,20
	Gnaisse	<LD	35,70	37,88	19052,50	97,63	7,43	23,88	55,23	<LD	84,05
9	Solo	0,05	122,90	11,40	4302,00	50,80	3,95	32,80	10,03	2,53	42,93
	Granito	<LD	95,23	27,30	12950,00	122,15	7,45	24,95	42,43	1,80	15,40
11	Solo	0,10	135,08	17,80	4800,75	49,20	4,55	37,90	13,00	1,03	26,63
	Granito	0,20	31,30	30,15	14995,00	83,38	5,58	20,60	51,53	<LD	27,63
12	Solo	<LD	88,68	21,95	15660,00	305,23	11,60	15,43	33,05	<LD	13,63
	Pegmatito	<LD	16,28	10,58	1876,00	62,23	1,65	30,78	8,80	3,40	1,18
13	Solo	0,05	126,90	19,73	10852,50	128,35	6,25	25,63	21,13	<LD	21,28
	Granito	<LD	18,78	6,53	3518,00	332,10	1,35	19,65	6,83	<LD	1,65
14	Solo	0,03	98,88	15,25	14737,50	227,93	8,85	22,93	28,90	0,50	10,80
	Gnaisse	<LD	51,28	16,18	17975,00	237,83	12,38	8,68	42,00	<LD	5,78
15	Solo	0,03	131,55	28,35	23350,00	339,98	22,68	15,93	41,63	<LD	13,43
	Granito	0,03	32,65	13,50	14392,50	110,95	4,33	21,70	45,10	<LD	43,20
16	Solo	<LD	143,43	79,88	53575,00	2692,00	45,78	6,75	60,37	<LD	6,53
	Anfibolito	<LD	307,45	83,80	51425,00	815,50	125,53	1,73	36,50	0,05	1,40
17	Solo	<LD	170,73	29,75	25807,50	372,03	17,75	13,98	46,85	<LD	7,78
	Gnaisse	<LD	72,30	12,60	18355,00	344,68	16,45	4,73	32,80	2,10	7,98
18	Solo	0,05	184,53	20,63	13552,50	81,40	10,00	28,58	21,33	1,83	10,28
	Granito	0,08	32,90	22,88	12882,50	112,05	4,45	22,10	50,50	0,40	23,35
24	Solo	<LD	122,95	19,98	8000,00	77,73	5,13	38,18	13,93	1,18	51,28
	Gnaisse	<LD	52,98	15,98	22417,50	183,33	5,93	26,90	48,75	4,60	87,25
25	Solo	0,03	180,45	21,43	9317,50	96,60	7,13	18,35	21,05	1,93	18,48
	Gnaisse	0,03	95,63	28,83	9100,00	84,75	4,00	23,40	21,00	0,98	6,83
26	Solo	<LD	177,98	11,00	5309,75	44,05	5,98	7,23	7,65	0,85	8,00
	Gnaisse	<LD	24,70	49,35	11830,00	139,18	5,03	24,58	25,98	1,48	20,20
27	Solo	<LD	166,38	3,18	6390,00	46,23	6,50	8,85	13,70	0,95	10,00
	Granito	<LD	32,90	14,95	6465,00	82,45	3,40	15,53	16,88	2,83	6,25
28	Solo	<LD	156,95	4,95	3414,75	27,85	4,50	12,55	6,00	0,63	4,30

Continuação Tabela 3											
	Gnaisse	<LD	24,43	14,25	7625,00	92,93	2,85	15,40	21,00	0,58	10,35
30	Solo	<LD	119,08	12,23	5084,25	63,38	3,85	17,90	10,08	1,43	17,28
	Granito	0,03	57,20	11,25	4531,75	60,05	3,93	10,05	26,65	0,03	0,58
32	Solo	0,08	95,33	14,70	32705,00	427,05	13,13	7,58	46,68	0,98	5,83
	Granito	0,05	74,95	10,98	4759,75	88,18	3,40	15,78	18,48	0,15	9,05
34	Solo	<LD	110,45	15,08	22355,00	338,45	6,38	6,13	37,93	0,28	18,73
	Gnaisse	0,10	26,58	13,90	5007,50	178,18	2,18	26,33	14,05	1,68	5,15
35	Solo	<LD	151,65	12,78	6812,50	70,58	5,00	26,53	23,38	<LD	89,90
	Gnaisse	0,13	35,75	32,90	20996,00	383,10	5,90	20,55	38,98	<LD	2,45
36	Solo	0,05	186,98	7,20	6212,50	64,63	6,30	19,10	14,35	<LD	30,30
	Gnaisse	0,05	71,95	42,73	40792,50	734,75	24,70	9,75	77,15	<LD	14,55
37	Solo	<LD	153,40	12,43	34575,00	33,05	7,05	9,18	12,58	3,03	5,13
	Granito	<LD	72,53	20,48	28797,50	536,73	20,98	12,08	60,40	<LD	17,28
38	Solo	<LD	174,33	8,13	17157,50	26,53	8,18	11,03	15,28	2,03	7,15
	Granito	0,10	34,93	12,60	14875,00	172,73	3,13	17,43	40,40	<LD	26,45
40	Solo	0,18	101,33	17,80	12515,00	178,68	8,88	23,43	25,93	5,20	20,40
	Arenito	<LD	63,63	12,65	12755,00	81,10	3,75	10,80	27,83	0,38	3,38
42	Solo	0,20	120,78	7,63	14780,00	212,05	8,28	21,55	22,40	2,90	18,45
	Granito	0,10	71,20	11,60	9247,50	61,55	3,80	14,40	16,45	<LD	0,75
43	Solo	<LD	93,80	2,95	10455,00	96,15	3,58	9,58	17,05	8,88	23,40
	Gnaisse	0,45	46,38	14,78	8920,00	158,95	3,85	27,43	32,18	<LD	8,78

Ferro (Fe) e Manganês (Mn)

Os maiores teores totais de Fe e Mn foram de 53.575,00 mg kg⁻¹ e 2.692,00 mg kg⁻¹, observados nos solos derivados de anfibolito situado no município de Itaíba (ponto 16) (Tabela 3); Essa amostra apresentou cristais de piroxênio e dois tipos de anfibólio. O piroxênio sofre alteração para hornblenda, um tipo de anfibólio; o segundo tipo ocorre sem derivar de alteração: pertence à série tremolita-actinolita (a coloração clara sugere que seja actinolita). Os piroxênios se encontram em diferentes estágios de alteração: alguns ainda mantêm a clivagem dos piroxênios originais, em outros já não é mais verificada, enquanto, nas estruturas mais alteradas, já se observa a clivagem dos anfibólios. A presença anterior de allanita é atribuída aos vazios observados no anfibólio, em lâmina, resultantes de emissão radioativa. A composição mineralógica consistiu em: tremolita-actinolita (65%) > clinopiroxênio (12%) > microclina (11%) > plagioclásio (6%) > Epidoto (4%) (Tabela 4).

Este anfibolito possui foliação bem definida, contendo níveis enriquecidos em lamelas de biotita. Mediante a observação de imagens em MEV foi possível à identificação de minerais

contendo elevados teores destes elementos (Mn-20,34%, Fe-5,63%) (Figura 6). Os teores totais na rocha foram de 51.425,00 mg kg⁻¹ de Fe e 815,50 mg kg⁻¹ de Mn. Para os dois elementos percebe-se a manutenção no sistema durante o processo de gênese do solo. A actinolita é um mineral do grupo dos anfibólios que contribuiu para a introdução de Fe na rocha.

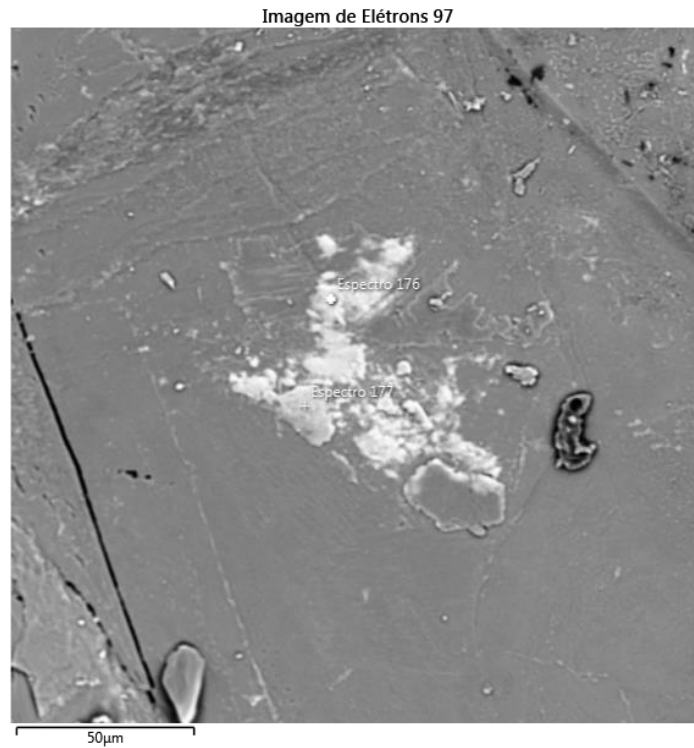


Figura 6 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura (MEV) com composição elementar por espectro de raios-X dispersivos de energia (EDS)

Tabela 4 - Composição mineralógica de diferentes materiais de origem do Agreste Meridional de Pernambuco

Minerais	Xisto	Gnaisse	Gnaisse	Gnaisse	Pegmatito	Anfibolito	Granito	Arenito
	Garanhuns	Itaíba	Caetés	Caetés	Tupanatinga	Itaíba	Pedra	Buíque
	----- % -----							
Microclina	62	42	60	35	77	11	40	Nd
Quartzo	17	22	14	10	9	Nd	24	84
Plagioclásio	10	11	10	2	11	6	17	Nd
Biotita	8	15	8	15	3	Nd	10	10
Epidoto	3	6	1	5	nd	4	2	Nd
Clorita	<1	nd	nd	Nd	nd	Nd	1	Nd
Apatita	Nd	3	nd	3	nd	Nd	1	Nd
Minerais								
Opacos	Nd	1	2	Nd	1	2	5	5
Tremolita-actinolita	Nd	nd	nd	Nd	nd	65	nd	Nd
Clinopiroxênio	Nd	nd	nd	Nd	nd	12	nd	Nd
Muscovita	Nd	nd	5	Nd	nd	Nd	nd	1
Ortoclásio	Nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	Nd
Turmalina	Nd	nd	nd	Nd	nd	Nd	nd	<<1

Níquel (Ni)

O valor de Ni foi maior no solo do município de Itaíba com teor de 45,78 mg kg⁻¹ na rocha, com 125,53 mg kg⁻¹, do tipo anfibolito foi identificado no município de Itaíba no Ortognaisse Cachoeira Grande. Os valores situaram-se de 45,78 a 3,58 mg kg⁻¹ no solo, sendo superior aos teores indicados Vendrame et al. (2007).

Chumbo (Pb)

O valor médio de Pb nos solo foi de 19,90 mg kg⁻¹ e os valores máximos e mínimos foram de 38,18 e 6,13 mg kg⁻¹. De modo geral, 74,2% das amostras apresentaram valores acima de 10 mg kg⁻¹ nos solos. Os teores nos solos foram considerados superiores aos teores médio (18 mg kg⁻¹) e máximo (30,5 mg kg⁻¹) relatados por Pierangeli et al. (2001) que verificaram o teor de Pb em amostras de 17 latossolos do Cerrado localizado na região Sul e Sudeste do Brasil e superior ao valor médio em solo relatado por Alloway (1990).

Os maiores valores de Pb foram observados em solos desenvolvidos a partir de granito e gnaisse com 37,90 e 38,18 mg kg⁻¹, respectivamente (pontos 11 e 24), provavelmente devido a substituição Si e Al por Pb na composição de feldspatos. Também foram observadas nos

pontos 6,7 e 9 localizados no município de Itaíba, na suíte intrusiva Caetés teores elevados de Pb em solos e rochas.

Zinco (Zn)

O valor de Zn foi maior em solo desenvolvido a partir de gnaiss, pertencente a suíte intrusiva Ferreira Costa, presente no município de Garanhuns com teores totais de 52,93 mg kg⁻¹ no solo e 92,03 mg kg⁻¹ na rocha. Cerca de 61% das amostras de solo tiveram teores de Zn acima de 20 mg kg⁻¹. A presença de minerais máficos nesta unidade geológica contribuiu para o teor elevado de Zn no gnaiss, uma vez que, segundo Kabata-pendias e Pendias (2001), são encontrados teores de Zn entre 40-100 mg kg⁻¹ em granitos e basaltos.

Urânio (U) e Tório (Th)

De maneira geral, os elevados teores de Th estão associados à presença de monazita nas rochas (Figura 7), fosfato de terras raras com até 20% de Th (DANA, 1870) mais comum em granitos, gnaiss, pegmatitos e rochas sedimentares com contribuição de sedimentos destas.

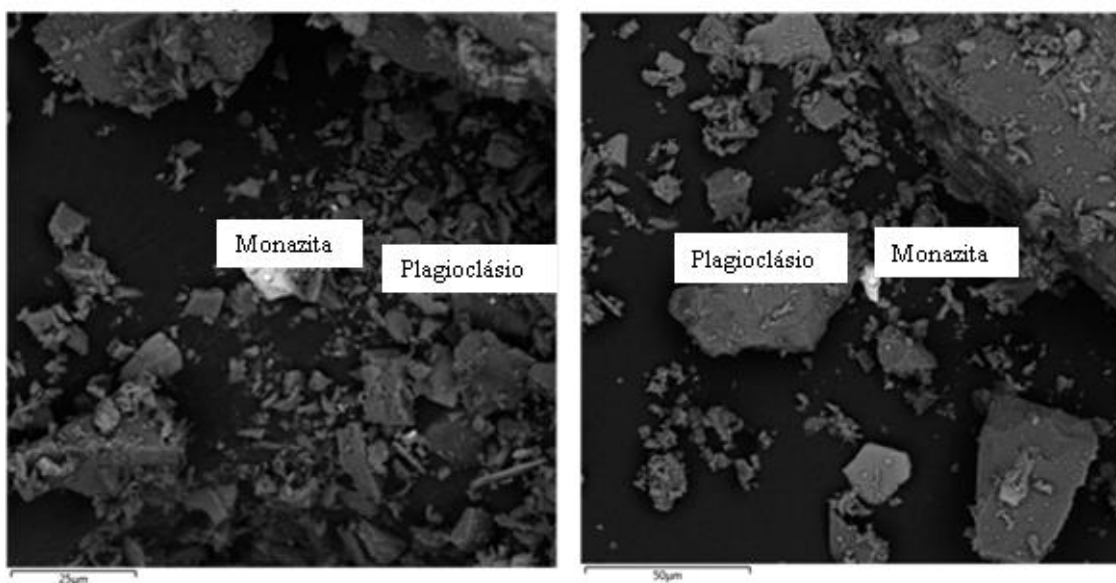


Figura 7 - Imagem de microscópio eletrônico de varredura (SEM) com composição elementar por espectro de raios-X dispersivos de energia (EDS)

Os teores de U e Th variaram nos diversos materiais de origem do Agreste Meridional de Pernambuco. Os valores de U acima de 1 mg kg⁻¹ corresponderam a 54 % das amostras de solo, a 25% dos solos estudados. Apresentaram teores superiores a 2 mg kg⁻¹ para Th, cerca de 70% dos solos apresentaram valores de Th, acima de 10 mg kg⁻¹ e 16% acima de 40 mg kg⁻¹.

Os valores de U e Th foram superiores aos indicados por Perez et al. (1998), que analisaram os teores de U e Th em dois horizontes diagnósticos de quinze solos brasileiros. Os autores observaram valores de 0,003 a 2,298 mg kg⁻¹ para U e 0,071 a 42,090 mg kg⁻¹ para Th e que os maiores valores deste estavam associados a rochas metamórficas e os menores teores estavam relacionados à sedimentos e rochas ígneas. Os teores mais elevados de U foram associados à solos derivados de basalto, ao passo que os menores valores estão relacionados a rochas sedimentares e ígneas.

No estudo foi observado teor mais elevado de Th no solo do município de Venturosa, na unidade geológica Ortognaisse Mucunã (ponto 35) com 89,90 mg kg⁻¹. No município de Itaíba, na suíte intrusiva Caetés, os valores de Th no solo foram de 71,20 mg kg⁻¹ e 84,05 mg kg⁻¹ no material de origem granito (ponto 8). Isso é reflexo da composição química das rochas da suíte intrusiva Caetés que apresenta minerais claros, sendo rocha ácida. Segundo Kabatapendias e Pendias (2001), rochas ácidas apresentam valores de 10-23 mg kg⁻¹ de Th e 2,5-60 mg kg⁻¹ de U. Segundo o estudo de Perez et al. (1998), Th foi maior em rochas metamórficas.

O maior teor de U em rocha foi verificado em granito na suíte intrusiva Caetés, no município de Itaíba, com teor de 1,18 mg kg⁻¹ e no solo de 4,60 mg kg⁻¹ (ponto 24), sendo maior que os teores apresentados por Marques et al. (2004) para solos do Cerrado. Segundo Kabatapendias e Pendias (2001), o teor de U em granito varia de 2,5 a 6,0 mg kg⁻¹, estando o valor dentro do que vem sendo abordado na literatura. O maior teor de U no solo (8,88 mg kg⁻¹) foi encontrado sobre a suíte intrusiva Buíque, no município de Buíque, contudo o teor na rocha ficou abaixo do limite de detecção.

Na formação Tacaratu, município de Buíque, foi encontrado no solo teor de U de 5,2 mg kg⁻¹ no solo e de 0,38 mg kg⁻¹ em arenito. Esse teor no solo é reflexo da acumulação deste elemento no solo, pois o U tem tendência de acumular-se em sedimentos.

4.3 Fator de enriquecimento

Os solos derivados de granitos e gnaisses apresentaram padrões de enriquecimento semelhantes para Cr e Pb. Estes foram os elementos que apresentaram, em média, os maiores fatores de enriquecimentos (Figuras 8 e 9).

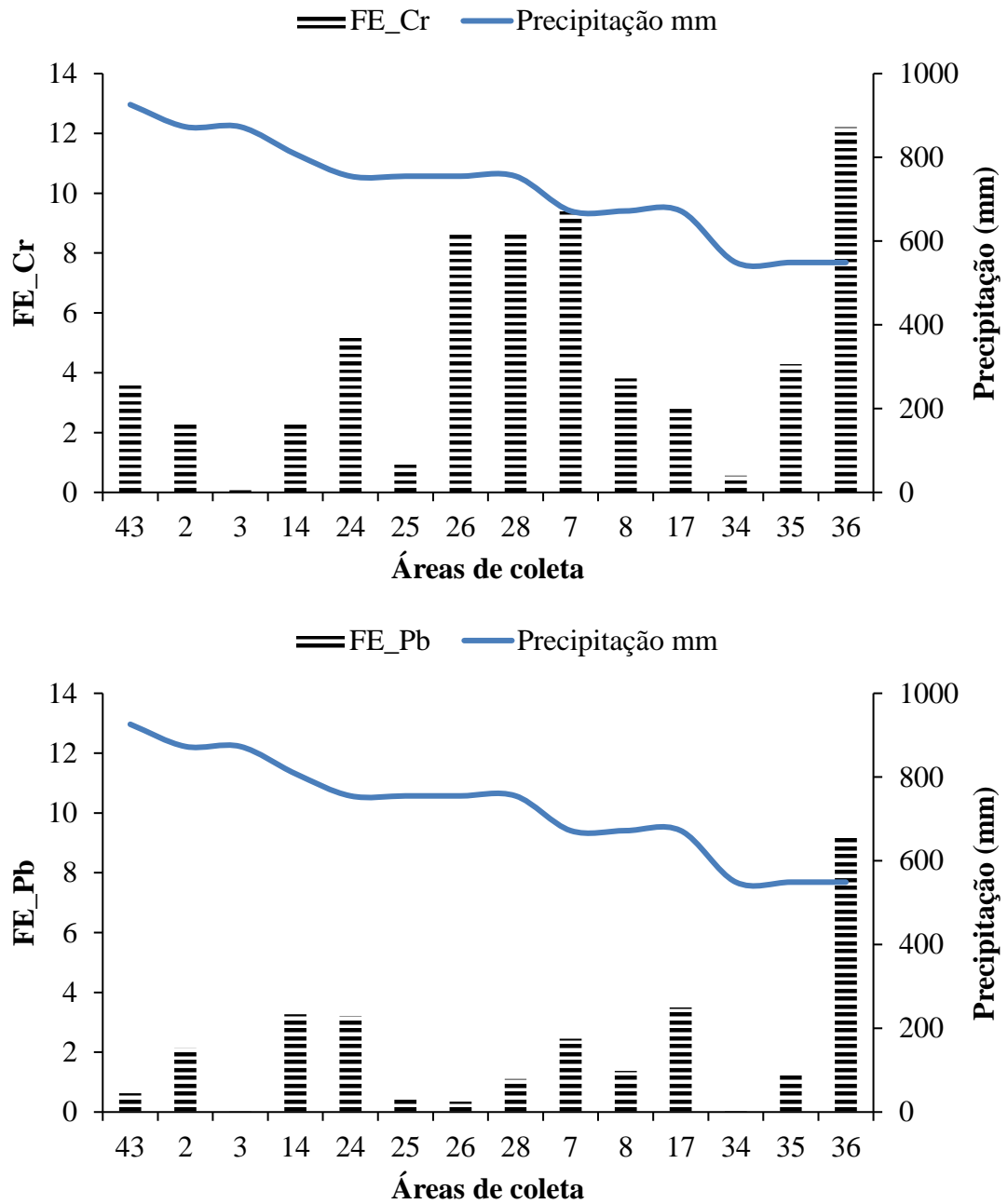


Figura 8 - Fatores de enriquecimento de cromo (Cr) e chumbo (Pb) em solos desenvolvidos a partir de gnaiss do Agreste Meridional de Pernambuco em função da precipitação

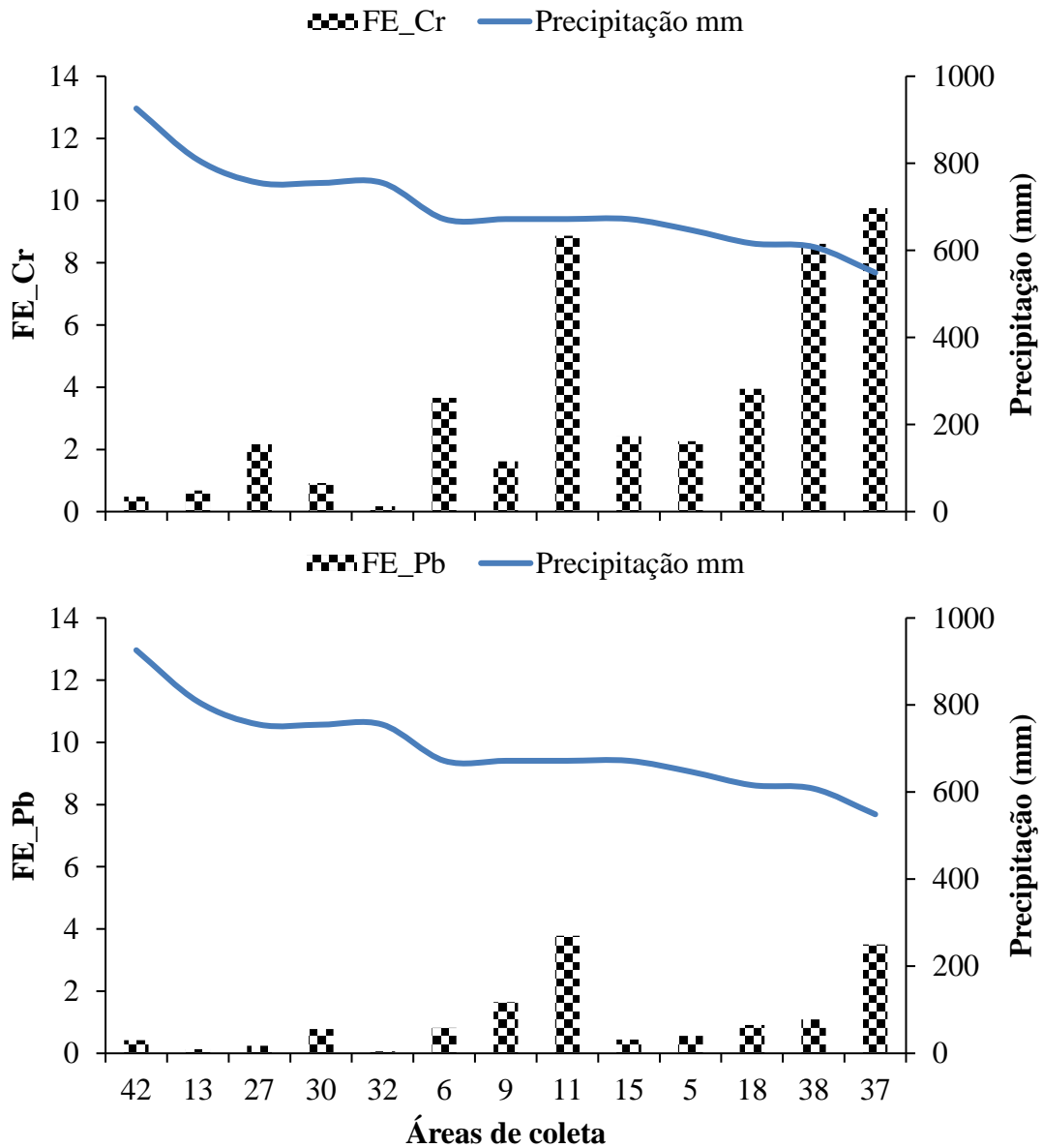


Figura 9 - Fatores de enriquecimento de cromo (Cr) e chumbo (Pb) em solos formados a partir de granito em função da precipitação.

Considerando de forma isolada as climossequências de granito e gnaiss, materiais de origem com maior representação nessa amostragem, é possível verificar os menores teores destes metais padrão na distribuição dos demais elementos estudados que apresentação relação com a condições climática (Figuras 10 e 11).

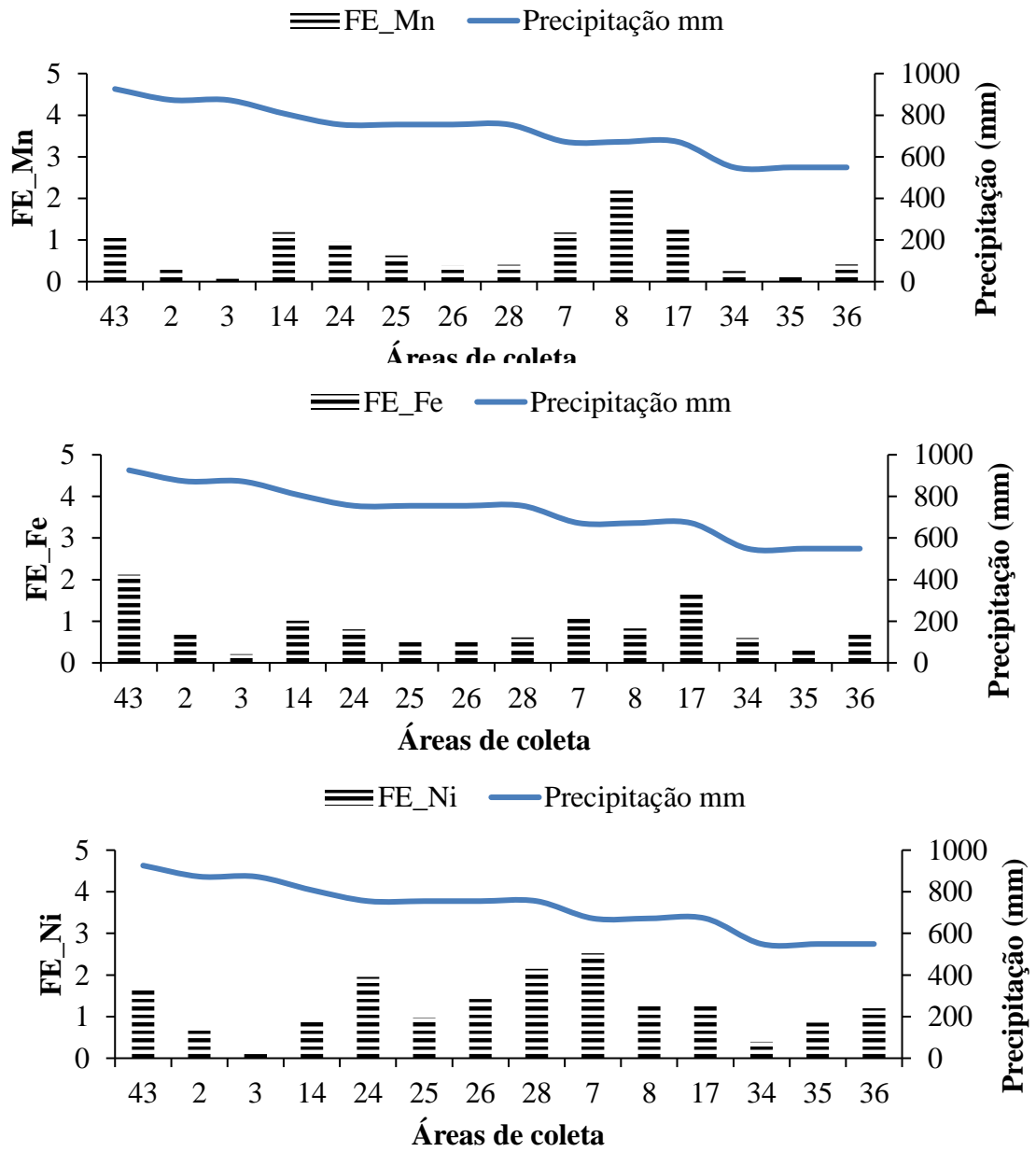


Figura 10 - Fatores de enriquecimento de manganês (Mn), ferro (Fe) e níquel (Ni) em solos formados a partir de gnaiss em função da precipitação

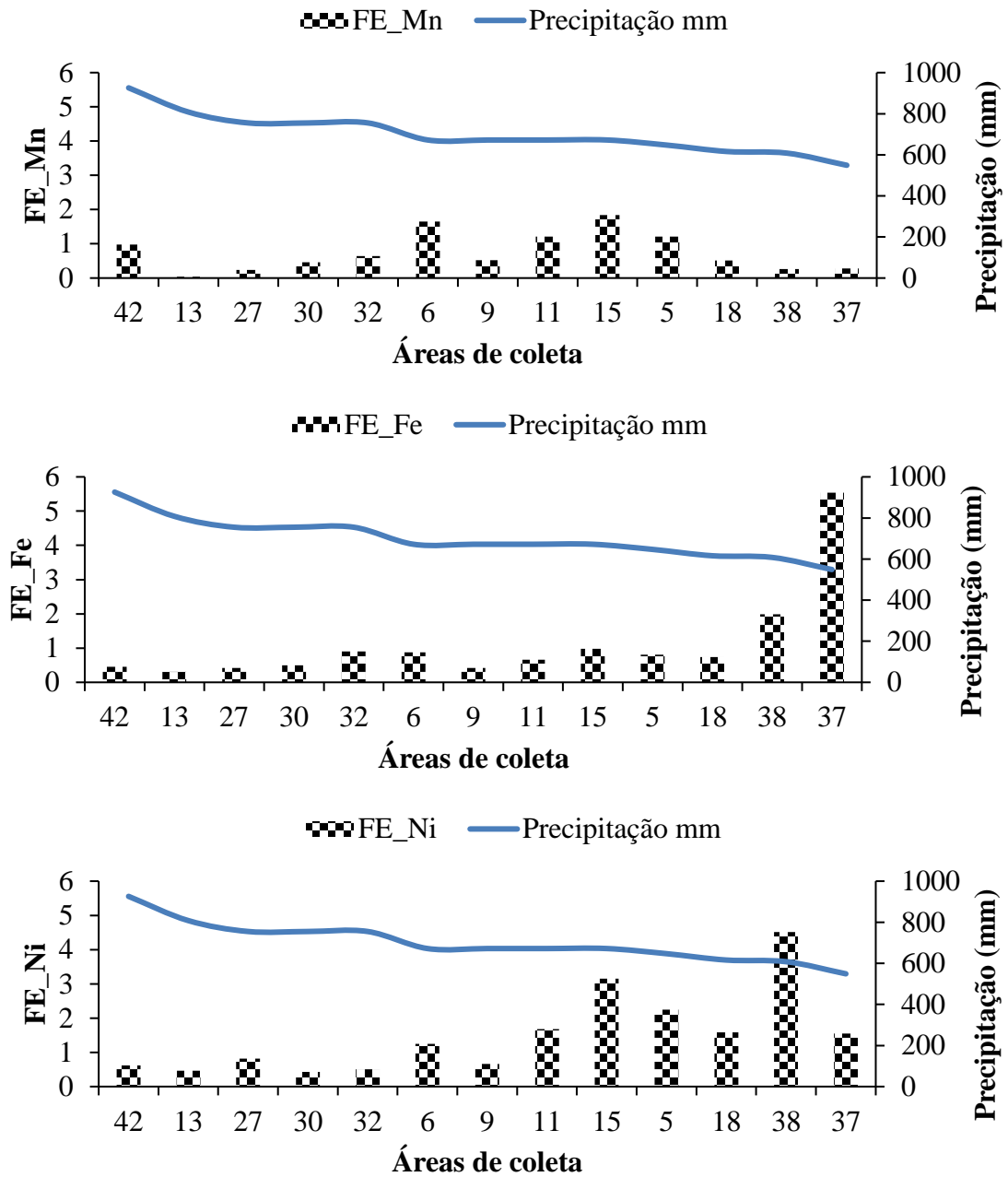


Figura 11 - Fatores de enriquecimento de manganês (Mn), ferro (Fe) e níquel (Ni) em solos formados a partir de granito em função da precipitação

Os elementos Cd, Fe, Zn e U sofreram, de modo predominante, o processo de depleção nos solos estudados, indicando um maior padrão de remoção do sistema, comparado aos demais metais pesados (Tabela 5).

Tabela 5 - Tabela de fator de enriquecimento para metais pesados, U e Th

Pontos	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	U	Th
1	0,15	2,96	0,07	0,47	0,58	0,78	0,71	0,41	0,00	3,25
2	0,00	2,38	0,66	0,71	0,32	0,66	2,13	1,48	0,00	6,53
3	0,00	0,07	0,05	0,21	0,07	0,10	0,02	0,15	0,77	0,86
5	0,00	2,27	0,90	0,80	1,21	2,25	0,56	0,41	0,28	1,17
6	0,06	3,66	0,98	0,87	1,65	1,25	0,82	0,83	0,00	1,22
7	0,00	9,51	3,37	1,10	1,18	2,52	2,45	0,98	0,00	2,99
8	0,00	3,81	0,67	0,82	2,20	1,31	1,37	0,63	0,00	0,97
9	0,00	1,62	0,52	0,42	0,52	0,66	1,65	0,30	1,76	3,49
11	1,03	8,87	1,21	0,66	1,21	1,68	3,78	0,52	0,00	1,98
12	0,00	0,44	0,17	0,67	0,40	0,57	0,04	0,30	0,00	0,94
13	0,00	0,68	0,30	0,31	0,04	0,46	0,13	0,31	0,00	1,29
14	0,00	2,39	1,17	1,01	1,19	0,88	3,27	0,85	0,00	2,31
15	0,60	2,42	1,26	0,98	1,84	3,15	0,44	0,56	0,00	0,19
16	0,00	0,21	0,44	0,48	1,51	0,17	1,79	0,76	0,00	2,14
17	0,00	2,79	2,79	1,66	1,28	1,28	3,50	1,69	0,00	1,15
18	0,47	3,95	0,63	0,74	0,51	1,58	0,91	0,30	3,21	0,31
24	0,00	5,25	2,83	0,81	0,96	1,96	3,21	0,65	0,58	1,33
25	0,55	1,04	0,41	0,56	0,63	0,98	0,43	0,55	1,08	1,49
26	0,00	8,61	0,27	0,54	0,38	1,42	0,35	0,35	0,69	0,47
27	0,00	2,16	0,09	0,42	0,24	0,82	0,24	0,35	0,14	0,68
28	0,00	8,74	0,47	0,61	0,41	2,15	1,11	0,39	1,48	0,57
30	0,00	0,92	0,48	0,49	0,47	0,43	0,79	0,17	25,13	13,24
32	0,20	0,17	0,18	0,91	0,64	0,51	0,06	0,33	0,86	0,08
34	0,00	0,56	0,15	0,60	0,25	0,39	0,03	0,36	0,02	0,49
35	0,00	4,29	0,39	0,33	0,19	0,86	1,31	0,61	0,00	37,12
36	4,70	12,21	0,79	0,72	0,41	1,20	9,20	0,87	0,00	9,78
37	0,00	9,76	2,80	5,54	0,28	1,55	3,51	0,96	0,00	1,37
38	0,00	8,61	1,11	1,99	0,27	4,51	1,09	0,65	0,00	0,47
40	0,00	0,90	0,80	0,56	1,25	1,34	1,23	0,53	7,84	3,42
42	0,57	0,48	0,19	0,45	0,97	0,62	0,42	0,38	0,00	6,95
43	0,00	3,66	0,36	2,12	1,09	1,68	0,63	0,96	0,00	4,83

Os fatores de enriquecimento de Th indicam que 65% dos solos apresentaram enriquecimento, em função da tendência deste elemento conservar-se no solo. O enriquecimento de Th nos solos decresceu na seguinte ordem, considerando o material de origem formador: Gnaisse > Granito > Arenito > Xisto (Figura 12).

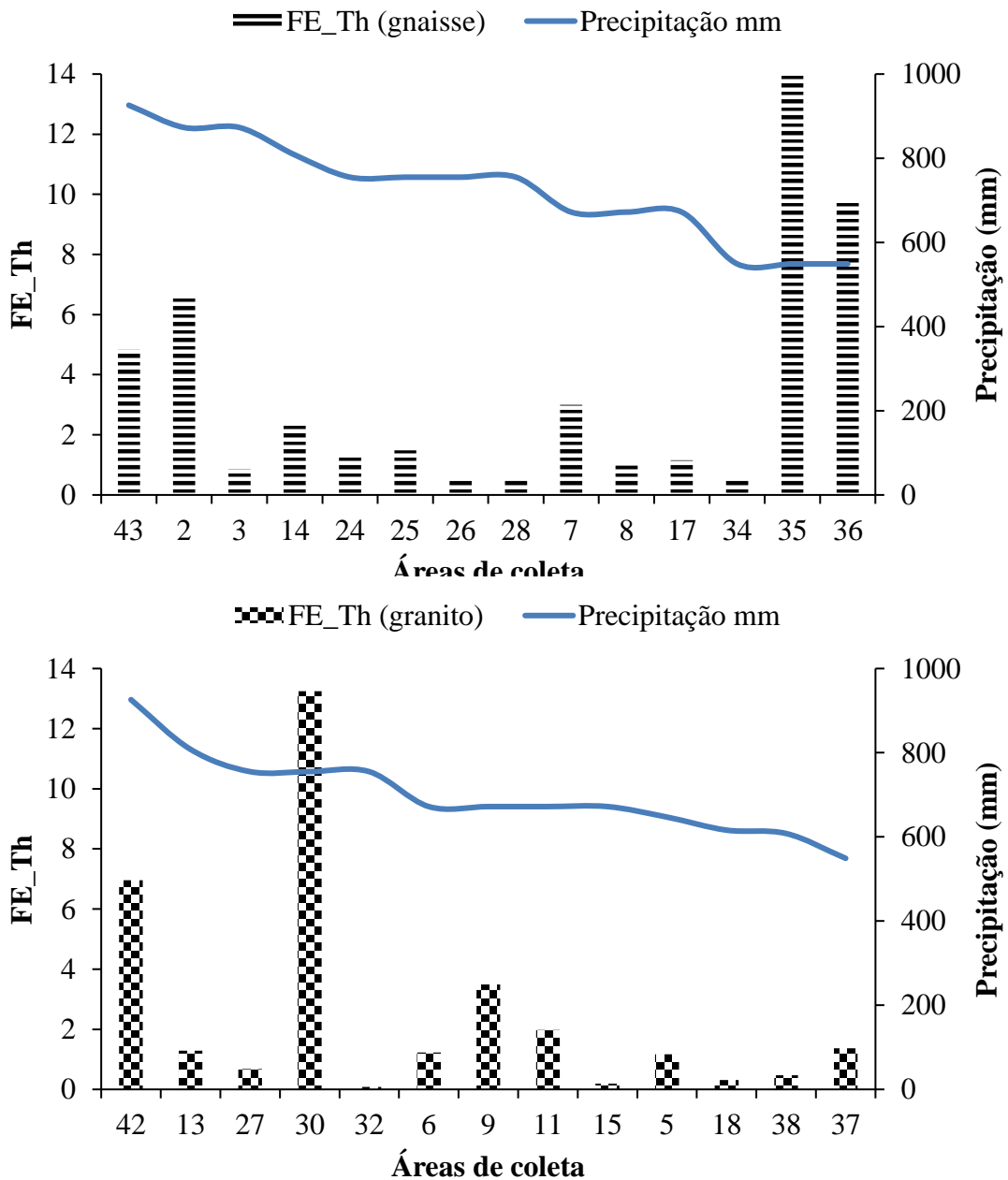


Figura 12 - Fatores de enriquecimento de tório (Th) em solos formados a partir de gnaiss e granito em função da precipitação

O enriquecimento para U foi observado 93% das amostras nos solos desenvolvidos de gnaisse e granitos. O solo originado de xisto apresentou depleção para todos os elementos, exceto para o Cr e Th. O solo originado de pegmatito (ponto 18) apresentou o menor fator de enriquecimento para todos os elementos avaliados (Tabela 4).

Os solos graníticos de Venturosa apresentaram os maiores enriquecimentos de Fe e o segundo maior valor para Cr e Cu (Figura 13). Isto ocorreu em decorrência do clima local de estepe Bsh que apresenta baixa precipitação impedindo que os metais pesados sejam lixiviados. Os maiores enriquecimentos de Ni também foram observados nesses três locais, porém, a concentração mais elevada foi encontrada em Pedra (ponto 38). Este fato foi devido à baixa precipitação na área, em torno de 608 mm, associado ao material de origem. Já em Itaíba, a baixa precipitação ajudou no acúmulo de metais pesados, com precipitação média de 672 mm.

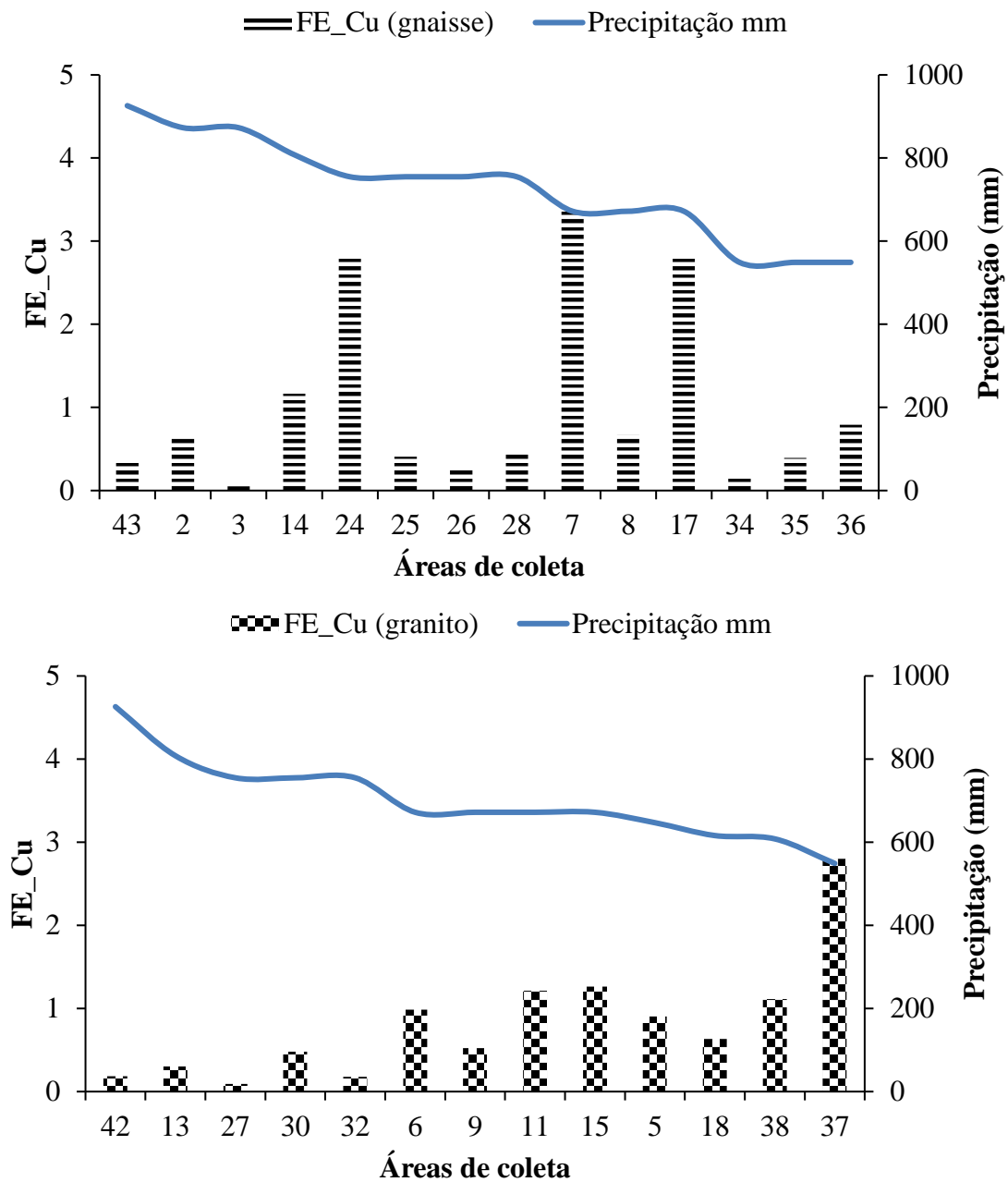


Figura 13 - Fatores de enriquecimento de cobre (Cu) em solos formados a partir de gnaiss e granito em função da precipitação

4.4 Teores ambientalmente disponíveis de metais pesados, urânio e tório

Os teores naturais dos metais pesados, Th e U encontrados nos solos do Agreste Meridional (Tabela 6), apresentaram grande variabilidade como consequência da diversidade litológica, o que influencia não apenas os teores totais mas também os teores ambientalmente disponíveis. A média dos metais pesados, Th e U ambientalmente disponíveis seguiram a seguinte ordem decrescente: Fe>Mn>Th>Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>U>Cd.

Cádmio (Cd)

Os resultados indicam que das 90 camadas estudadas, cerca de 51% dos solos da camada de 0-20 cm e 62% da camada de 20-40 cm apresentaram teores de Cd abaixo do limite de detecção. Os teores médios de Cd nas camadas 0-20 e 20-40 cm foram de $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$, variando entre $0,03$ e $0,10 \text{ mg kg}^{-1}$. Os maiores teores de Cd foram verificados em solos derivados de gnaiss da suíte intrusiva Caetés, município de mesmo nome (pontos 28 e 29) ambos com teor de $0,10 \text{ mg kg}^{-1}$, inferior ao teor máximo observado por Preston et al. (2014) de até $0,20 \text{ mg kg}^{-1}$ em solos do Rio Grande do Norte. Esses valores encontram-se abaixo do limite de prevenção definido pelo CONAMA (2009), que é de $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$. Baixos teores de Cd também foram observados em solos da Paraíba (JÚNIOR et al., 2016), São Paulo (CETESB, 2005).

Cromo (Cr)

Os teores ambientalmente disponíveis de Cr variaram de $2,13$ a $63,60 \text{ mg kg}^{-1}$ (tabela 6), sendo o maior valor observado para Cr em anfibólito (ponto 16), na unidade geológica Ortognaisse Cachoeira, no município de Itaíba. Os teores médios de Cr foram de $11,19$ e $13,09 \text{ mg kg}^{-1}$, para as camadas 0-20 e 20-40 cm, respectivamente. Os teores foram menores que os observados por Biondi et al. (2011), em solos do agreste de Pernambuco, com valores médios de $40,02 \text{ mg kg}^{-1}$ em superfície e $28,74 \text{ mg kg}^{-1}$ em subsuperfície. Os teores foram também inferiores aos observados em solos de Fernando de Noronha e do estado da Paraíba, com teores máximos de $237,70$ e $266,08 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente (FABRICIO NETA et al., 2012; JÚNIOR et al., 2016). Os resultados refletem a baixa presença de minerais máficos nos materiais de origem do agreste meridional, com predomínio de granito e ortognaisse, cujos protólitos são, predominantemente, rochas ígneas félsicas. Segundo Kabata-Pendias (2011), valores mais expressivos desse elemento são encontrados em rochas máficas e nos sedimentos argilosos, podendo em rochas ultramáficas atingir mais de 3000 mg kg^{-1} de Cr. Neste estudo, o material de origem com maior teor de Cr foi o anfibólito, com $307,45 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 3).

Tabela 6 - Teores ambientalmente disponíveis de metais pesados, U e Th nas camadas superficiais e subsuperficial dos solos do Agreste Meridional

Pontos	Prof. cm	Material Origem	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	U	Th
1	0-20	Xisto	0,03	3,45	8,25	3819,00	39,83	2,28	5,10	10,48	0,05	39,03
	20-40		<LD	3,65	7,35	3467,00	25,23	2,33	4,78	7,80	0,35	39,35
2	0-20	Gnaisse	0,03	8,88	3,90	5965,00	39,65	4,58	3,35	8,98	0,60	8,80
	20-40		0,05	13,40	4,70	9185,00	41,70	6,63	3,70	15,33	0,55	9,58
3	0-20	Gnaisse	<LD	11,95	6,83	10617,50	29,50	3,68	8,28	8,63	0,55	9,53
	20-40		<LD	17,88	8,15	12395,00	25,28	5,88	8,25	7,70	0,65	8,68
4	0-20	Granito	<LD	35,63	6,10	13427,50	530,25	29,95	15,30	21,53	<LD	17,33
	20-40		<LD	34,88	5,88	13272,50	514,25	28,60	15,50	18,43	<LD	15,10
5	0-20	Granito	<LD	9,40	6,43	10537,50	148,78	5,03	4,23	15,63	<LD	14,43
	20-40		<LD	9,53	6,75	11042,50	141,90	5,23	4,45	16,85	<LD	17,03
6	0-20	Granito	<LD	11,53	6,30	11055,00	95,90	6,13	4,98	15,05	0,23	14,35
	20-40		<LD	11,35	5,30	10045,00	73,40	6,15	3,58	14,53	0,18	14,20
7	0-20	Gnaisse	<LD	2,25	3,25	4287,00	49,28	1,60	3,23	8,33	1,65	32,03
	20-30		<LD	2,85	3,03	4292,50	31,20	2,08	3,40	8,23	1,48	27,00
8	0-20	Gnaisse	<LD	5,30	9,05	7287,50	134,35	3,30	4,53	14,28	1,28	37,15
	20-40		<LD	6,35	10,73	8872,50	142,35	3,85	5,03	16,63	1,50	35,95
9	0-20	Granito	<LD	2,13	2,78	2641,00	42,90	1,48	3,23	6,98	1,10	30,80
	20-40		<LD	2,25	3,10	2491,00	26,85	1,55	3,23	5,93	1,23	30,78
10	0-20	Gnaisse	<LD	4,20	3,63	3578,00	65,65	2,28	4,05	7,23	1,95	30,05
	20-40		<LD	4,95	4,13	4207,50	60,40	2,48	4,45	7,45	1,90	29,35
11	0-20	Granito	<LD	2,83	4,78	3040,75	45,68	1,85	5,13	7,60	0,70	26,58
	20-40		<LD	2,38	3,33	2391,50	18,45	1,63	4,48	6,18	0,43	19,55
12	0-20	Pegmatito	<LD	8,30	5,85	6865,50	113,78	4,33	4,43	10,53	<LD	9,30
	20-40		<LD	15,48	8,75	12182,50	208,05	7,43	4,15	16,48	<LD	8,38
13	0-20	Granito	<LD	6,53	7,85	9847,50	104,78	3,30	4,13	14,18	<LD	21,03
	20-40		<LD	6,78	10,03	9542,50	85,68	3,38	4,30	14,60	<LD	18,85
14	0-20	Gnaisse	<LD	8,93	5,13	11445,00	150,33	5,25	3,78	20,43	0,15	8,98
	20-30		<LD	10,80	5,80	13205,00	181,95	6,13	4,15	18,65	0,25	9,40
15	0-20	Granito	<LD	25,58	15,68	20102,50	283,28	14,98	3,88	24,25	<LD	10,55
	20-30		<LD	25,95	15,25	21212,50	279,85	15,13	4,15	25,30	<LD	11,30
16	0-20	Anfibolito	<LD	62,35	65,25	43025,00	1715,50	34,05	3,75	43,55	<LD	5,15
	20-30		<LD	63,60	70,98	43645,00	1525,50	34,28	3,80	41,25	<LD	4,93
17	0-20	Gnaisse	<LD	20,68	11,38	20557,50	254,83	11,13	3,80	28,45	<LD	6,45
	20-30		<LD	22,78	13,28	22910,00	304,70	12,75	4,40	31,48	<LD	7,03
18	0-20	Granito	0,05	6,05	8,20	8005,00	82,85	3,40	6,23	17,60	0,15	21,60
	20-40		0,05	6,55	9,70	8302,50	86,65	3,48	5,65	16,28	0,13	27,85
19	0-20	Granito	<LD	9,00	12,18	7492,50	72,73	4,05	7,90	13,50	0,33	15,05
	20-40		<LD	12,10	4,73	10110,00	46,10	4,85	7,25	11,70	0,68	8,25

Continuação Tabela 6												
20	0-20	Gnaisse	<LD	22,85	11,90	22762,50	25,80	4,78	13,35	10,00	1,28	10,03
	20-40		<LD	27,50	12,85	23510,00	27,50	5,83	15,13	10,05	1,75	9,93
21	0-20	Gnaisse	<LD	15,43	10,18	11932,50	17,73	4,20	9,45	7,48	1,20	8,28
	20-40		<LD	13,43	10,33	14270,00	17,43	2,68	9,58	6,70	0,65	10,15
22	0-20	Arenito	0,05	2,40	1,80	1625,75	11,75	1,40	2,83	4,03	0,60	4,78
	20-40		0,05	3,18	7,00	1978,50	10,63	1,70	2,98	5,23	0,13	3,48
23	0-20	Gnaisse	<LD	7,85	9,20	9537,50	14,30	2,00	4,53	6,53	0,23	6,25
	20-40		<LD	8,30	1,85	10155,00	13,50	2,00	4,55	5,45	0,38	6,95
24	0-20	Gnaisse	0,05	2,33	3,13	2569,75	31,30	1,58	4,43	7,03	0,35	54,88
	20-40		<LD	3,20	12,88	3506,25	30,13	2,05	5,00	7,90	0,23	51,08
25	0-20	Gnaisse	0,05	2,23	8,83	1840,50	16,83	1,48	4,70	6,28	0,53	15,83
	20-40		0,05	2,68	10,33	1521,50	9,78	1,68	5,00	5,58	0,60	10,20
26	0-20	Gnaisse	<LD	4,40	9,23	6067,50	45,28	2,68	5,28	9,13	0,05	40,13
	20-40		<LD	4,40	13,13	6240,00	37,45	2,70	5,18	8,85	<LD	39,05
27	0-20	Granito	0,05	6,88	12,95	6562,50	50,15	3,05	4,10	12,48	0,30	13,08
	20-40		0,05	11,85	10,80	6960,00	46,00	5,25	4,75	12,10	0,65	13,93
28	0-20	Gnaisse	0,05	7,00	5,85	2371,25	19,03	3,45	3,85	6,60	0,68	10,60
	20-40		0,10	5,65	10,78	2392,50	14,10	2,60	4,78	6,55	0,58	11,33
29	0-20	Gnaisse	0,10	3,08	6,90	1458,25	23,45	1,50	2,88	8,15	0,38	5,40
	20-40		0,05	3,95	10,00	1867,50	14,80	1,70	3,45	6,53	0,23	5,78
30	0-20	Gnaisse	0,05	4,83	10,70	3182,75	19,88	1,93	5,63	7,80	0,30	8,20
	20-40		0,05	5,50	7,13	3409,00	17,90	2,15	6,88	7,25	0,28	9,03
31	0-20	Gnaisse	0,05	4,08	7,30	3400,75	19,00	2,18	5,38	7,05	0,28	18,88
	20-40		0,05	5,15	11,05	3559,50	19,25	2,65	5,80	7,60	0,40	20,28
32	0-20	Granito	0,05	2,63	10,08	2664,25	26,58	1,65	4,48	7,45	0,33	14,03
	20-40		0,05	3,65	13,70	2933,50	25,13	2,13	5,98	7,85	0,55	16,28
33	0-20	Gnaisse	0,05	10,40	9,98	8347,50	228,83	6,58	5,68	14,60	0,18	7,43
	20-30		0,05	12,50	6,83	9010,00	223,83	7,20	6,18	13,45	<LD	7,83
34	0-20	Gnaisse	0,05	13,83	19,33	9755,00	249,80	7,03	9,03	17,43	<LD	5,85
	20-30		0,05	12,45	11,65	8670,00	195,98	6,25	5,93	14,95	0,10	5,68
35	0-20	Gnaisse	0,05	18,48	29,95	35855,00	423,08	10,98	4,80	42,70	<LD	5,63
	20-40		0,05	16,70	22,73	34912,50	413,35	11,03	4,60	40,05	<LD	6,80
36	0-20	Gnaisse	<LD	25,68	15,58	19565,00	259,70	13,53	5,35	27,70	<LD	18,45
	20-40		<LD	35,28	15,33	25747,50	415,13	18,33	12,70	31,93	<LD	18,45
37	0-20	Granito	<LD	6,35	7,30	21117,50	177,00	3,63	4,95	27,30	<LD	25,35
	20-40		<LD	8,85	12,58	22382,50	192,75	5,03	4,80	30,65	<LD	29,10
38	0-20	Granito	0,05	2,45	7,28	3162,25	27,53	1,68	9,45	9,65	<LD	69,55
	20-40		<LD	3,88	15,40	6827,50	30,48	2,20	12,15	16,48	<LD	92,23
39	0-20	Granito	0,05	4,95	13,30	5427,50	58,55	2,60	7,95	19,78	<LD	30,00
	20-40		0,05	6,18	13,40	5510,00	53,28	2,75	8,03	18,50	<LD	27,00
40	0-20	Arenito	0,05	21,93	17,95	47337,50	48,48	4,30	11,73	13,40	<LD	3,85
	20-40		0,03	21,43	15,95	47192,50	35,28	3,65	9,03	11,18	0,50	3,63

Continuação Tabela 6												
41	0-20	Arenito	0,05	6,70	10,38	7087,50	10,15	2,10	8,25	9,48	0,10	4,30
	20-40		0,03	14,33	14,90	20952,50	22,95	3,55	12,43	12,25	0,13	5,53
42	0-20	Granito	0,05	4,93	13,00	1828,75	48,80	2,65	5,00	7,30	0,38	8,55
	20-40		0,05	6,40	14,00	1997,25	34,18	3,48	7,30	9,58	0,23	7,00
43	0-20	Gnaisse	0,03	19,95	13,93	15670,00	267,98	6,15	17,40	24,10	1,10	19,33
	20-30		<LD	34,95	24,25	28677,50	250,15	16,38	7,85	34,18	0,65	9,55
44	0-20	Gnaisse	<LD	25,43	18,90	18832,50	281,58	8,05	18,70	28,90	0,80	22,05
	20-40		<LD	33,90	22,13	30707,50	233,25	16,93	6,98	27,68	1,23	16,23
45	0-20	Gnaisse	<LD	11,43	18,83	19055,00	338,88	6,18	11,63	25,63	<LD	19,08
	20-40		<LD	10,20	18,78	16945,00	283,73	5,85	10,88	24,23	0,13	17,03
0-20 cm												
Média			0,05	11,19	11,03	10946,96	149,80	5,55	6,44	14,78	0,59	17,95
Mediana			0,05	7,00	9,05	7492,50	50,15	3,45	4,98	10,53	0,38	14,35
Mínimo			0,03	2,13	1,80	1458,25	10,15	1,40	2,83	4,03	0,05	3,85
Máximo			0,10	62,35	65,25	47337,50	1715,50	34,05	18,70	43,55	1,95	69,55
Desvio Padrão			0,01	11,22	9,89	10460,32	267,95	6,59	3,81	9,37	0,49	13,94
20-40 cm												
Média			0,05	13,09	12,01	12546,83	144,16	6,48	6,37	15,19	0,60	17,69
Mediana			0,05	9,53	10,73	9185,00	46,00	3,65	5,00	12,25	0,50	11,33
Mínimo			0,03	2,25	1,85	1521,50	9,78	1,55	2,98	5,23	0,10	3,48
Máximo			0,10	63,60	70,98	47192,50	1525,50	34,28	15,50	41,25	1,90	92,23
Desvio Padrão			0,02	12,26	10,41	11183,07	245,69	6,98	3,15	9,65	0,50	15,84
VP			1,3	75	60	*	*	30	75	300	X	X
VI (Agrícola)			3	150	200	*	*	60	180	400	X	X

VP- Concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções.
VI- Concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

*Não existe um valor definido pelo CONAMA (2009). **Elemento não está presente na tabela do CONAMA (2009).

Cobre (Cu)

Cerca de 84% dos solos estudados na profundidade de 0-20 cm estavam acima dos Valores de Referência de Qualidade (VRQ) para o Estado de Pernambuco (5 mg kg^{-1}). A média dos teores naturais de Cu foi $11,0 \text{ mg kg}^{-1}$ na camada superficial e $12,0 \text{ mg kg}^{-1}$ para a camada subsuperficial, sendo superior aos reportados por Júnior et al. (2016) para o Agreste da Paraíba ($9,81 \text{ mg kg}^{-1}$). Esses resultados refletem a maior quantidade desse metal nos materiais de origem dos solos do Agreste Meridional.

O maior teor de Cu foi identificado em solos oriundos de anfíbolito, na formação Ortognaisse Cachoeira Grande, no município de Itaíba com $70,98 \text{ mg kg}^{-1}$ (ponto 16), o teor ultrapassou o valor de prevenção (60 mg kg^{-1}), indicado pelo CONAMA (2009), porém não

alcançou os valores de investigação (200 mg kg^{-1}). Esse valor foi superior ao observado em solos contendo anomalias geoquímicas, da Bacia Cabo (ARAÚJO et al., 2018), cujo maior teor foi de 53,7 em mg kg^{-1} , em solo derivado de rocha máfica.

Ferro (Fe) e Manganês (Mn)

Os valores de Fe variaram de 1.458,25 a 47.337,50 mg kg^{-1} , na camada de 0-20, e de 1.521,50 a 47.192,50 mg kg^{-1} , na camada de 20-40 cm, com valor médio de 10.946,96 mg kg^{-1} e 12.546,83 mg kg^{-1} , respectivamente. O maior teor de Fe foi identificado na unidade geológica da formação Tacaratu, município de Buíque, com 47.338 mg kg^{-1} (ponto 40). O arenito apresentou coloração geral avermelhada, com pontos de cor cinza e tamanho médio; a granulação varia de média a fina misturado de forma a manter aspecto homogêneo. Observou-se que a amostra é levemente porosa e não apresenta magnetismo. A rocha sedimentar é composta predominantemente por quartzo, tanto na forma de grãos maiores, como na forma de sílica microcristalina, situada entre os grãos de quartzo. Ainda nesses espaços ocorre material semelhante à biotita, porém ainda mal formado. Observou-se que fraturas cortam a amostra. A composição mineralógica verificada foi: quartzo (84%) > biotita (10%) > minerais opacos (5%) > muscovita (Aprox. 1%) > turmalina (<<1%), (Tabela 3), onde podemos observar no corte da lâmina petrográfica a presença de quartzo (Figura 13).

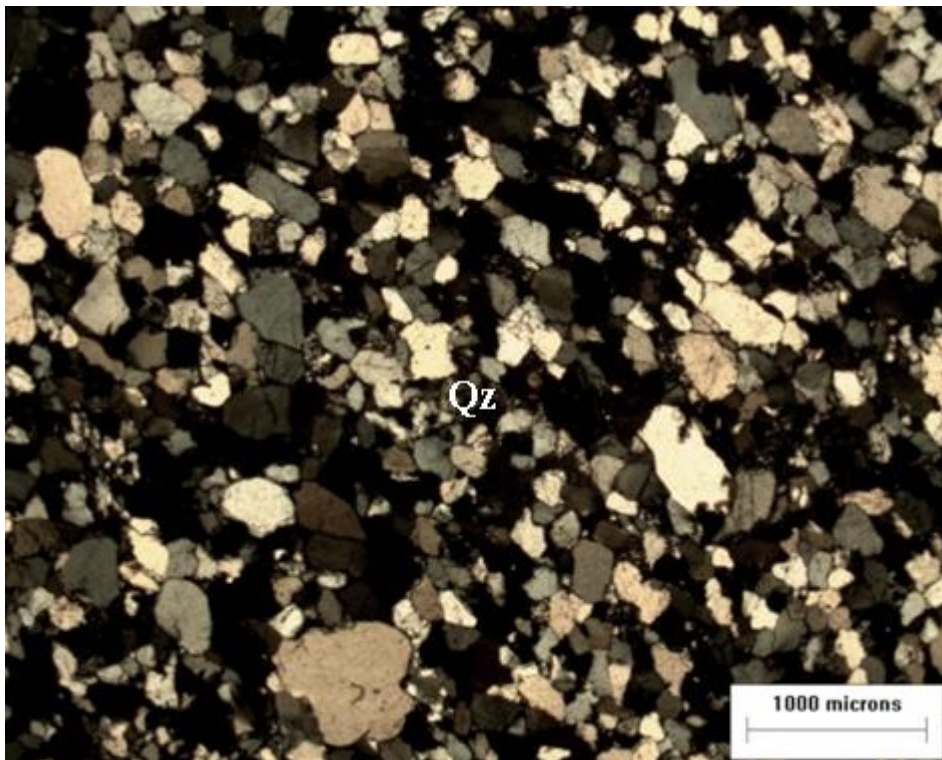


Figura 14 - Lâmina petrográfica do ponto 40, mostrando a grande quantidade de quartzo na amostra

Os teores de Mn variaram de 10,15 a 1715,50 mg kg⁻¹ na camada superficial e 9,78-1525,50 mg kg⁻¹ na camada subsuperficial, respectivamente, com teores médios de 149,80 mg kg⁻¹ e 144,16 mg kg⁻¹, sendo inferior aos valores reportados por Júnior et al. (2016) para os solos do Agreste de Paraíba, com média de 268,33 mg kg⁻¹. O maior teor foi identificado em solo formado a partir de anfíbolito, (ponto 16), com 1715,50 mg kg⁻¹ na camada de 0 a 20 cm e 1525,50 mg kg⁻¹ para a camada de 20 a 30 cm.

Níquel (Ni)

Os teores de Ni variaram de 1,40 a 34,05 mg kg⁻¹, com média de 5,55 mg kg⁻¹ para camada superficial e 6,48 mg kg⁻¹ para a camada subsuperficial, sendo inferior aos valores reportados por Júnior et al. (2016), com média de 12,07 mg kg⁻¹, para o Agreste do Estado da Paraíba. Os baixos teores de Ni são reflexos do material de origem, composto essencialmente por rochas ígneas ácidas, além de rochas resultantes do metamorfismo dessa ou de rochas sedimentares.

O maior valor foi encontrado na unidade geológica Ortognaisse Cachoeira Grande (ponto 36) com teores de 34,05 e 34,28 mg kg⁻¹ no município de Itaíba (ponto 16) para as profundidades 0-20 cm e 20-30 cm, teor superior ao valor de prevenção (30 mg kg⁻¹) para Ni, indicado pelo CONAMA (2009), ficando abaixo dos valores de investigação (60 mg kg⁻¹) no cenário agrícola, o mais restritivo devido ao risco de entrada do metal na cadeia trófica. Outro local em que também foi observado teor próximo ao valor de prevenção foi no solo derivado da Suíte intrusiva Serrote dos Macacos, (ponto 4) com teor de 30,0 mg kg⁻¹ na camada superficial.

Chumbo (Pb)

Os teores de Pb variaram de 2,83 a 18,70 mg kg⁻¹ para a profundidade de 0-20 cm e 2,98- 15,50 mg kg⁻¹ para a profundidade de 20-40 cm. O teor médio natural de Pb no solo em área de pastagem, na camada superficial foi, de 6,44 mg kg⁻¹. Cerca de 9% dos solos da camada de 0-20 cm apresentaram valores acima do VRQ de Pernambuco (13 mg kg⁻¹). Nas amostras coletadas (pontos 43 e 44) ambas oriundas de gnaiss, foram observados os maiores teores de Pb com 17,40 mg kg⁻¹ e 18,70 mg kg⁻¹, respectivamente, nas camadas de 0-20 cm e 7, 85 mg kg⁻¹ e 6, 98 mg kg⁻¹ nas camadas de 20-40 cm. Já na amostra da unidade geológica Complexo do Cabrobó, observou-se (ponto 20) valores de 13,35 mg kg⁻¹ para a profundidade de 0-20 cm e 15,13 mg kg⁻¹ na camada de 20-40 cm sendo maior que o VRQ para solos de Pernambuco (13 mg kg⁻¹). Porém, esses valores estão muito abaixo do observado em solos de Pernambuco

derivados de rochas básicas e sedimentos argilosos, com teores de até 72.07 mg kg⁻¹ no horizonte superficial (ARAÚJO et al., 2018); e aos valores observados na Nova Zelândia para teor background geoquímico e solo sob pastagem nativa, cujos valores foram de 9,5 mg kg⁻¹ e 10,6 mg kg⁻¹, respectivamente (MARTIN et al., 2017). Segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001) rochas ácidas podem apresentar teores Pb variando de 15 a 40 mg kg⁻¹.

Zinco (Zn)

Os teores naturais de Zn na camada superficial variaram de 4,03 a 43,55 mg kg⁻¹, com média de 14,98 mg kg⁻¹. Os baixos teores desse elemento no solo resultam da predominância do material de origem ser de rochas ácidas, uma vez que os maiores teores de Zn ocorrem em associação com o Fe (ACOSTA et al., 2011).

Urânio (U) e Tório (Th)

Os teores ambientalmente disponíveis de Th na camada superficial foram de 3,85 a 69,55 mg kg⁻¹ e na camada subsuperficial de 3,48 a 92,23 mg kg⁻¹, com teores médios de 17,95 mg kg⁻¹ e 17,69 mg kg⁻¹ respectivamente. Os valores foram superiores aos verificados em solos de referência da China e dos EUA, com máximas de 27 mg kg⁻¹ e de 12,4 mg kg⁻¹, respectivamente (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

Os valores de U variaram de 0,05 a 1,95 mg kg⁻¹ e 0,10 a 1,90 mg kg⁻¹, nas camadas superficial e subsuperficial, respectivamente, com médias de 0,59 mg kg⁻¹ e 0,58 mg kg⁻¹. Esses teores foram maiores que os de U verificados por Perez et al. (1998) para solos brasileiros, cujos valores variaram de 0,001 a 2,298 mg kg⁻¹.

4.5 Teores de metais, urânio e tório em gramíneas e cactáceas do Agreste Meridional de Pernambuco

Observou-se que os teores médios destes elementos absorvidos por gramíneas e cactáceas seguiram a seguinte ordem: Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Th>Ni>Pb (Tabela 7), tendência semelhante a verificada por Bahatti et al. (2018), Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Cd. Dentre os elementos estudados, os micronutrientes se destacaram pelos maiores teores no tecido vegetal. Ao observarmos os teores no tecido vegetal (Tabela 6), verifica-se que, com exceção do Fe, o Cu, Mn e Zn encontram-se em níveis considerados adequados para gramíneas forrageiras em solos sem adubação (MARTINEZ et al., 1999).

Os valores de Fe variaram de 2305,25 a 40,35 mg kg⁻¹ e Mn 396,80 a 23,00 mg kg⁻¹, com médias de Fe e Mn de 607,9 e 90,0 mg kg⁻¹. Esses foram teores inferiores aos registrados por Bahatti et al. (2018), que analisaram metais pesados em forrageiras no noroeste da Índia. Já teores de Zn na planta variaram de 92,3 a 8,6 mg kg⁻¹ no solo 43,55 a 4,03 mg kg⁻¹ para profundidade de 0-20 cm e 41,25 a 5,23 mg kg⁻¹ para 20-40 cm. Os valores de Cu nas gramíneas e cactáceas do Agreste meridional de Pernambuco variaram de 2,15 a 12,98 mg kg⁻¹ e os de Ni variaram de 0,18 a 4,48 mg kg⁻¹, com média de 1,00 mg kg⁻¹. Este teores foram inferiores ao de Chary et al. (2008) que variaram de 10,7 a 18,3 mg kg⁻¹.

Tabela 7 - Teores de metais pesados, Th e U em gramíneas e cactáceas coletadas nas áreas do Agreste Meridional

Pontos	Matriz		Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Th
	Rocha	Planta								
1	Xisto	Gramínea	1,73	9,73	397,10	43,68	0,88	0,23	25,33	0,95
3	Gnaisse	Gramínea	1,88	7,53	930,00	107,53	1,13	0,55	25,45	0,85
4	Granito	Gramínea	0,75	4,03	238,05	23,00	0,18	0,23	18,78	0,53
5	Granito	Cactácea	0,55	9,23	63,70	396,80	2,05	0,13	30,80	0,18
6	Granito	Cactácea	0,30	3,13	53,15	225,83	0,30	0,08	15,73	0,15
7	Gnaisse	Cactácea	0,50	2,28	77,05	242,85	0,25	0,13	13,20	0,33
8	Gnaisse	Gramínea	1,13	10,85	642,75	158,03	0,58	0,25	33,68	1,05
9	Granito	Gramínea	0,83	4,38	310,08	44,48	0,38	0,13	35,28	0,93
10	Gnaisse	Gramínea	1,60	9,03	725,25	132,08	0,80	0,63	24,78	3,60
13	Granito	Gramínea	0,30	2,15	40,35	423,48	0,38	0,10	31,00	0,20
15	Granito	Cactácea	2,03	5,85	1257,75	38,88	1,08	0,28	18,40	1,10
16	Anfibolito	Gramínea	2,08	8,53	778,00	66,68	1,85	0,05	19,03	0,18
18	Granito	Gramínea	1,05	5,90	261,08	30,45	0,60	0,10	25,95	0,18
20	Gnaisse	Gramínea	0,78	8,40	307,38	42,65	0,35	0,20	92,28	0,15
21	Gnaisse	Gramínea	2,30	9,95	1737,00	63,48	0,73	1,40	23,18	1,23
22	Arenito	Gramínea	2,08	12,50	620,25	148,08	4,48	0,60	28,45	0,58
24	Gnaisse	Gramínea	1,00	6,38	419,90	46,30	0,55	0,25	37,23	2,15
25	Gnaisse	Gramínea	0,83	6,10	278,15	48,98	0,35	0,58	43,45	0,73
26	Gnaisse	Gramínea	1,28	9,48	547,25	72,45	0,70	0,40	21,85	1,90
27	Granito	Gramínea	2,83	11,75	2305,25	149,98	1,73	0,90	32,83	3,15
28	Gnaisse	Gramínea	2,85	5,58	686,00	35,88	1,45	0,35	21,70	0,28
31	Gnaisse	Gramínea	1,33	6,93	248,85	53,88	0,85	0,40	42,63	0,28
32	Granito	Gramínea	1,53	7,45	419,08	69,10	0,95	0,28	28,53	0,50
33	Gnaisse	Gramínea	1,03	7,33	565,60	63,25	1,15	0,20	28,43	0,33
34	Gnaisse	Gramínea	1,15	5,80	453,73	51,08	0,70	0,30	30,68	0,33
36	Gnaisse	Gramínea	1,15	6,50	477,90	38,85	0,70	0,18	17,35	0,55
37	Granito	Gramínea	1,05	3,30	360,08	77,40	0,50	0,13	34,98	0,50
38	Granito	Gramínea	1,05	2,75	830,25	39,28	0,43	1,13	27,00	5,28
39	Granito	Gramínea	1,30	7,15	495,93	31,55	0,68	0,55	45,73	1,08
40	Arenito	Gramínea	1,13	7,40	588,75	23,35	0,60	1,60	46,20	0,25
42	Granito	Gramínea	1,75	8,85	1049,00	86,00	1,03	0,85	30,18	0,75
44	Gnaisse	Gramínea	4,03	12,98	1749,00	205,93	2,93	0,78	37,25	1,00
45	Gnaisse	Gramínea	1,88	8,93	1220,75	65,23	1,15	0,90	24,73	2,40
Média			1,42	7,21	640,44	101,41	0,98	0,45	30,67	1,02
Mediana			1,15	7,33	495,93	63,48	0,70	0,28	28,45	0,58
Mínimo			0,30	2,15	40,35	23,00	0,18	0,05	13,20	0,15
Máximo			4,03	12,98	2305,25	423,48	4,48	1,60	92,28	5,28
Desvio Padrão			0,80	2,86	522,50	98,89	0,86	0,39	13,96	1,15

Os teores de Cr em gramíneas variaram de 0,30 a 4,03 mg kg⁻¹ com média de 1,35 mg kg⁻¹. A grande variação reflete a variação dos teores nos solos estudados (Tabela 5) e a diversidade nos materiais de origem (TAHIR et al., 2017). Cerca de 33% das plantas coletadas no Agreste Meridional apresentaram teores acima de 1,6 mg kg⁻¹ de Cr, considerado, segundo Tahir et al. (2017), o limite tolerável de Cr para a dieta do gado, acima do qual se verifica interferência na capacidade reprodutiva dos ruminantes.

Os teores de Pb em gramíneas variaram de 0,05 a 1,60 mg kg⁻¹, onde o valor máximo foi inferior ao mencionado por Inácio et al. (2014), que estudaram a acumulação de metais pesados em forragens provenientes de área industrial, reportando teores de até 850 mg kg⁻¹. Todos os valores foram muito inferiores ao limite de Pb em forragens, sendo assim, considerado seguro para consumo animal, que é de 30 mg kg⁻¹ (TAHIR et al., 2017).

Os teores de Th nas gramíneas e cactáceas variaram de 0,15 a 5,28 mg kg⁻¹, com média de 0,95 mg kg⁻¹ e cerca de 33% apresentaram teores acima de 1,00 mg kg⁻¹. O maior teor (5,28 mg kg⁻¹) foi verificado na (Suíte Intrusiva Itaporanga), no município de Pedra, onde temos o material de origem o granito. Nessa área foram observados teores ambientalmente disponíveis de 69,55 mg kg⁻¹ e 92,2 mg kg⁻¹ para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente (Tabela 6).

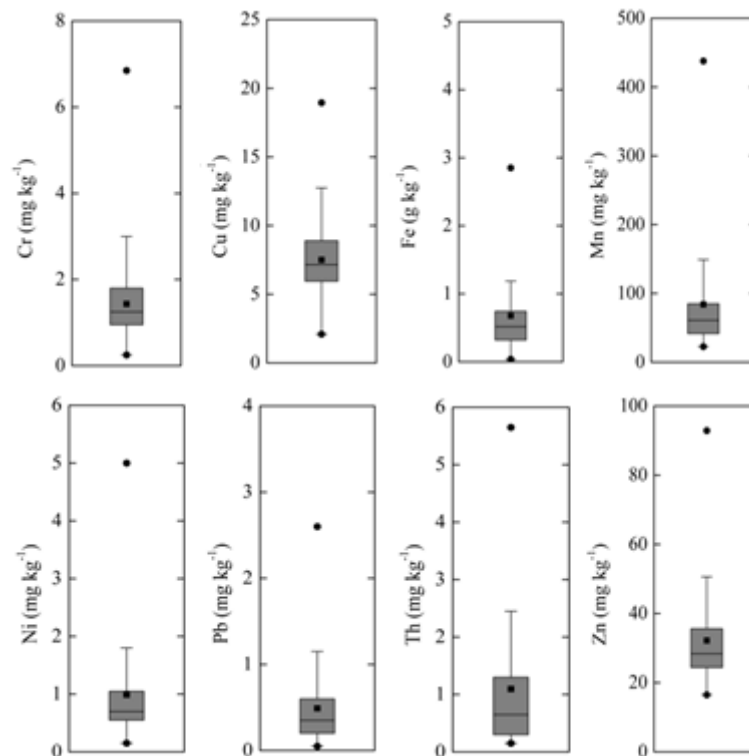


Figura 15 - Boxplot para os teores de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn e Th em gramíneas (n=30). Os quadrados de cor preta indicam os teores médios e os círculos de cor preta referem-se aos valores mínimos e máximos

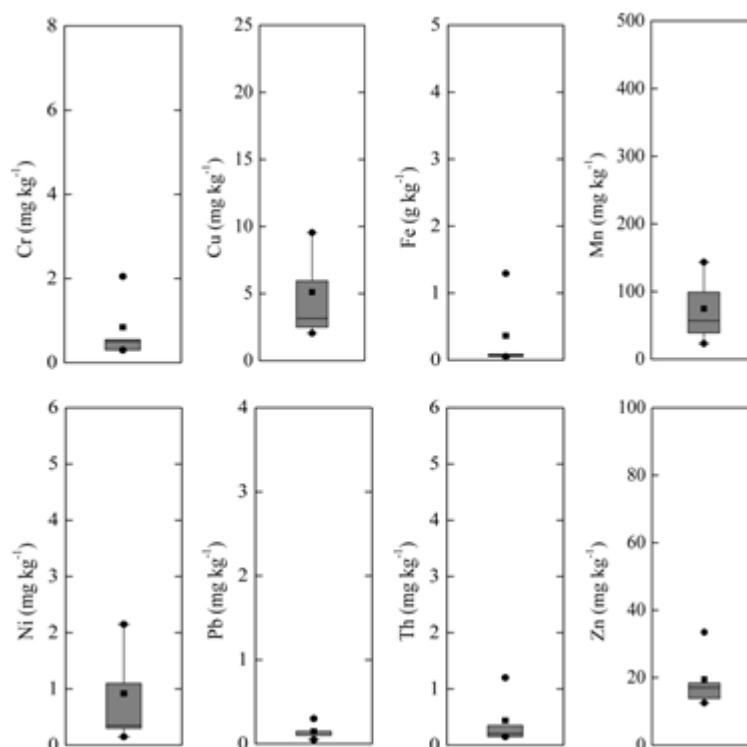


Figura 16 - Boxplot para os teores de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn e Th em cactáceas (n=4). Os quadrados de cor preta indicam os teores médios e os círculos de cor preta referem-se aos valores mínimos e máximos

Gramíneas e cactáceas forrageiras são importantes vias de transferência de elementos para a cadeia trófica e a magnitude desse processo pode ser expressa pelo coeficiente de acumulação biológica (CAB), definido como a razão entre o teor do elemento no tecido vegetal e o teor do elemento no solo. Neste estudo, os CABs foram calculados (Tabela 7) e os valores médios expressos na Figura 16, exceto para o Cd e U, cujos teores na planta estiveram abaixo do limite de detecção.

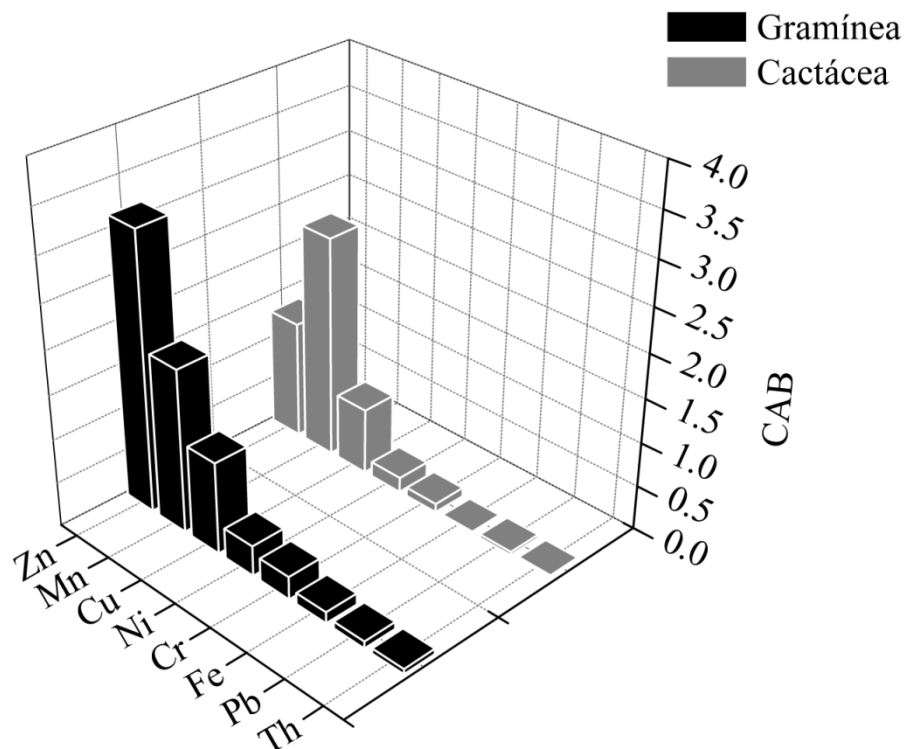


Figura 17 - Coeficiente médio de acumulação biológica (CAB) de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn e Th em gramíneas e cactáceas

De acordo com o CAB calculado, abaixo de 1,00 em todas as áreas para Cr, Pb e Th, observa-se a limitada capacidade de transferência desses elementos para o sistema via pastejo. Verifica-se que os maiores CABs foram verificados para micronutrientes com teores no solo considerado de médio a baixo (Cu, Zn e Ni), sendo apenas um indicativo da eficiência de aquisição de micronutrientes para as plantas. O solo formado sob arenito no município de Paramatama (ponto 22) destacou-se pelos elevados CABs com os maiores coeficientes para Cu, Mn e Ni e o segundo lugar na acumulação relativa de Zn com os valores de 6,94; 12,60; 3,20 e 7,07 mg kg^{-1} , respectivamente. Verifica-se que Cu, Mn e Zn no tecido vegetal encontram-se em níveis considerados normais para gramíneas forrageiras (MARTINEZ et al., 1999) com teores de 12,50; 148,08 e 28,45 mg kg^{-1} (ponto 22), respectivamente, estando os coeficientes apenas refletindo os baixos teores dos elementos observados no solo formado a partir de arenito.

Já para elementos essenciais com teores elevados em solos, e para elementos não essenciais como Cr, Pb e Th, observou-se CABs abaixo de 1,00 em todas as áreas (Tabela 7), indicando a limitada capacidade de transferência destes elementos para a cadeia trófica via pastejo.

Tabela 8 - Coeficiente de acumulação biológica em gramíneas e cactáceas dos municípios do Agreste Meridional

Pontos	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Th
1	0,50	1,18	0,10	1,10	0,38	0,04	2,42	0,02
3	0,16	1,10	0,09	3,64	0,31	0,07	2,95	0,09
4	0,02	0,66	0,02	0,04	0,01	0,01	0,87	0,03
5	0,06	1,44	0,01	2,67	0,41	0,03	1,97	0,01
6	0,03	0,50	0,00	2,35	0,05	0,02	1,04	0,01
7	0,22	0,70	0,02	4,93	0,16	0,04	1,59	0,01
8	0,21	1,20	0,09	1,18	0,17	0,06	2,36	0,03
9	0,39	1,58	0,12	1,04	0,25	0,04	5,06	0,03
10	0,38	2,49	0,20	2,01	0,35	0,15	3,43	0,12
13	0,05	0,27	0,00	4,04	0,11	0,02	2,19	0,01
15	0,08	0,37	0,06	0,14	0,07	0,07	0,76	0,10
16	0,03	0,13	0,02	0,04	0,05	0,01	0,44	0,03
18	0,17	0,72	0,03	0,37	0,18	0,02	1,47	0,01
20	0,03	0,71	0,01	1,65	0,07	0,01	9,23	0,01
21	0,15	0,98	0,15	3,58	0,17	0,15	3,10	0,15
22	0,86	6,94	0,38	12,60	3,20	0,21	7,07	0,12
24	0,43	2,04	0,16	1,48	0,35	0,06	5,30	0,04
25	0,37	0,69	0,15	2,91	0,24	0,12	6,92	0,05
26	0,29	1,03	0,09	1,60	0,26	0,08	2,39	0,05
27	0,41	0,91	0,35	2,99	0,57	0,22	2,63	0,24
28	0,41	0,95	0,29	1,89	0,42	0,09	3,29	0,03
31	0,33	0,95	0,07	2,84	0,39	0,07	6,05	0,01
32	0,58	0,74	0,16	2,60	0,58	0,06	3,83	0,04
33	0,10	0,73	0,07	0,28	0,17	0,04	1,95	0,04
34	0,08	0,30	0,05	0,20	0,10	0,03	1,76	0,06
36	0,04	0,42	0,02	0,15	0,05	0,03	0,63	0,03
37	0,17	0,45	0,02	0,44	0,14	0,03	1,28	0,02
38	0,43	0,38	0,26	1,43	0,25	0,12	2,80	0,08
39	0,26	0,54	0,09	0,54	0,26	0,07	2,31	0,04
40	0,05	0,41	0,01	0,48	0,14	0,14	3,45	0,06
42	0,36	0,68	0,57	1,76	0,39	0,17	4,13	0,09
44	0,16	0,69	0,09	0,73	0,36	0,04	1,29	0,05
45	0,16	0,47	0,06	0,19	0,19	0,08	0,96	0,13

5. CONCLUSÕES

- A variação dos teores de metais pesados nos solos refletiu a diversidade litológica da região. Foram verificados teores superiores aos valores de prevenção da resolução 420 (CONAMA 2009) para Cu e Ni, no solo formado a partir de anfibólito;
- Os elevados teores de Th em solo formados a partir de granito e gnaisses estão associados à presença do mineral de monazita;
- Em parte das áreas estudadas o cromo representa risco de intoxicação, por estar acima do limite tolerável para a dieta do gado. Os outros elementos apresentam-se em teores considerados normais em todas as amostras estudadas.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J.A.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; FAZ, A.; AROCENA, J. Accumulations of Major and Trace Elements in Particle size Fractions of Soils on Eight Different Parent Materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 161, p. 30-42, 2011.
- ALVAREZ V, H. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais**. Viçosa, p.30-35, 1999.
- ALMEIDA, B, G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, p. 104,2008.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. Ed.Blackier Academic & Professional. John Wiley Sons, Inc., New York, p. 1-39, 1990.
- ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: Alloway, B.J. (Ed.), **Heavy Metals in Soils**. Johns Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 29–39, 1995.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy Metals in Soil**, Springer: United Kingdom, 2010.
- ALLOWAY, B. J. “Introduction,” **Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. **Environmental Pollution**, England, p. 3-9, 2013.
- ARAÚJO, P. R. M.; BIONDI, C. M.; SILVA, F. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOUZA-JÚNIOR, V. S. Geochemical soil anomalies: Assessment of risk to human health and implications for environmental monitoring. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v.190, p 325-335, 2018.
- AYOTTE, J.D.; FLANAGAN, S.M.; MORROW, W.S. Occurrence of Uranium and 222Radon in Glacial and Bedrock Aquifers in the Northern United States, 1993-2003, 2007.

BIONDI, C.M.; NASCIMENTO, C. W. A.; NETA, A.B.F.; RIBEIRO, M.R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em Solos de Referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1057-1066, 2011.

BLASER, P.; ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; SHOTYK, W. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 249, p. 257–280, 2000.

BRASIL. 2011. Ministério do desenvolvimento. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável do Agreste Meridional de Pernambuco**.

BRUGGE, D.; BUCHNER, V. Health effects of uranium: new research findings. **Reviews on Environmental Health**, Berlin, v. 26, p. 231-249, 2011.

BEZERRA, J.D.; AMARAL, R. S.; JÚNIOR, J.A.S.; GENEZINI, F.A.; MENEZES, R. S. C.; OLIVEIRA, I. A. Characterization of Heavy Metals in a Uranium Ore Region of the State of Pernambuco, Brazil. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, New York v.92, p.270-273, 2014.

BHATTIA, S. S.; KUMARA, V.; SAMBYALB, V.; SINGHC, J.; NAGPALA A. K. Comparative analysis of tissue compartmentalized heavy metal uptake by common forage crop: A field experiment. **Catena**, Amsterdam, v.160, p.185–193, 2018.

BODEN, S.; VINTS, K.; CAGNO, S.; MAERTENS, D.; KAREN VAN HECKE, K.; CARDINAEELS, T. Thorium-229 Quantified in Historical Thorium-228 Capsules. **Applied Radiation and Isotopes**, England, v. 120, p. 40-44, 2017.

CETESB-COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. DECISÃO DA DIRETORIA Nº 195/2005. VALORES ORIENTADORES PARA SOLOS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. P.4, 2005.

CHARYA, N. S.; KAMALAA, C.T.; D. RAJ, S. S. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, England,v.69, p. 513–524, 2008.

COSTA A.C; PEDROSA I.L.; MENDES V.A. **Projeto Agreste de Pernambuco**. Convênio DNPM/CPRM, 1976.

COA, S.; DUAN, X., ZHAO,X.; CHEN,Y.; WANG, B.; SUN,C.; ZHENG, B.;WEI, F. Health Risks of Children's Cumulative and Aggregative Exposure to Metals and Metalloids in a Typical Urban Environment in China. **Chemosphere**, England,v.15, p. 147-404, 2016.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de Dezembro de 2009. "Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividade antrópicas.", Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf>> Acessado em: 20 de jul. de 2017.

CPRM. 2009. Projetos Aerogeofísicos Paraíba - Rio Grande do Norte e Pernambuco - Paraíba: mapa radiométrico da razão tório/potássio. Escala 1:250.000 (Folha SC.24-X-D-VI Garanhuns).

DOLEZAL, J.; POVONDRA, C.; SULCEK, Z. Decomposition Techniques in Inorganic Analysis. **Iliffe**, London, p.224, 1968.

DUFFUS, J. "Heavy Metals" – A meaningless term? **Pure and Applied Chemistry**, Philadelphia, v.74, 793–807, 2002.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Ed.2,1997. 212p.

EMBRAPA. **Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco**. Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa Nº 11, 2000.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Revista e Ampliada, 2018.

ELHEL, M.A.; CALDWEL, D.T.; HIRPASSA, W.D. Lead in Inner-city Soil and its Possible Contribution to Children's Blood Lead. **Journal Archives of Environmental Health: An International Journal**, London, v.50, p.165-9, 1995.

EFSA (European Food Safety Authority) Uranium in Foods tuffs, in Particular Mineral Water. **Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain**, New York, v. 1018, p. 1–59, 2009.

ER, C.; SENKAL, B.F.; YAMAN, M. Determination of Lead in Milk and Yoghurt Samples by Solid Phase Extraction Using a Novel Aminothioazole Polymeric Resin. **Food Chemistry**, England, v.137, p.55-61, 2013.

FABRICIO NETA, A. de B. Teores naturais de metais pesados em solos da ilha de Fernando de Noronha. 2012. 49f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciências do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife/PE.

GASCOYNE, M. Paleoclimate determination from cave calcite deposits. **Quaternary Science Reviews**, England, v. 11, p. 609-632, 1992.

GODT, J.; SCHEIDIG, F.; GROSSE-SIESTRUP, C.; ESCHE, V.; BRANDENBURG, P.; REICH, A.; GRONEBERG, D.A. The Toxicity of Cadmium and Resulting Hazards for Human Health. **Journal of Occupation Medicine and Toxicology**, London, p.1-22, 2006.

HARIBALA, HU, B.; WANG, C.; GERILEMANDAHU.; XIAOXU.; SHUAIZHANG.; BAO,S.; YUHONGLI. Assessment of Radioactive Materials and Heavy Metals in the Surface Soil Around Uranium Mining Area of Tongliao, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, San Diego v.130, p.185-192, 2016.

HAZEN, R.M.; EWING, R.C.; SVERJENSKY, D.A. Evolution of uranium and thorium minerals. **American Mineralogist**, Chantilly, v.94, p.1293-1311, 2009.

IBGE (2006) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. disponível em:<
<http://cidades.ibge.gov.br/>> Acessado em: 11 de Nov. de 2016.

IBGE (2010) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. disponível em:<
<https://censo2010.ibge.gov.br/>> Acessado em: 09 de Jul. de 2017.

INÁCIO, M.; NEVES, O.; PEREIRA, V.; SILVA, E. F.; VEIGA, N. Acumulação de metais pesados em forragens e produtos agrícolas em Podzóis de um local industrial Português. **Comunicações Geológicas**, São Paulo, v.101, Especial II, 1019-1022, 2014.

JÚNIOR, J.A.S.; CARDOSO, J. J. R. F.; SILVA, C. M.; SILVEIRA, S. V.; AMARAL, R. S. Determination of Radionuclides in the Environment Using Gamma-spectrometry. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Hungary, v. 269, p.451-455, 2006.

JÚNIOR, A. B. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M.; SOUZA, A. P.; BARROS, F. M. R. Background and Reference Values of Metals in Soils from Paraíba State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 40, 2016.

KABATA-PENDIAS, H. Trace elements in soil and plants Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, FL (2000)

KABATA-PENDIAS, A. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue. **Geoderma**, Amsterdam, v. 122, p. 143-149, 2004.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3.ed. Boca Raton, CRC Press, p. 413, 2001.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in Soils and plants**. Taylor and Francis Group, p .505, 2011.

KURTTIO, P.; KOMULAINEN, H.; LEINO, A.; SALONEN, L.; AUVINEN, A.; SAHA, H. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. **Environmental Health Perspectives**, USA, v.11, p.68-72, 2005.

LI, T.; WAN, Y.; BEN, Y. Relative importance of different exposure routes of heavy metals for humans living near a municipal solid waste incinerator. **Environmental Pollution**, England, v.226, p. 385-393, 2017.

NEIVA, A.M.R.; ANTUNES, I.M.H.R.; CARVALHO, P.C.S.; SANTOS, A.C.T. Santos. Uranium and Arsenic Contamination in the Former Mondego Sul Uranium Mine Area, Central Portugal. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v.162, p.1-15, 2016.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R.B. Diagnose foliar. In: **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais**. Viçosa, p.127-151, 1999.

MARTIN, A.P.; TURNBULL, R.E.; RISSMANN, C.W.; RIEGER, P. Heavy Metal and Metalloid Concentrations in Soil under Pasture of Southern New Zealand. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v.11, p.18-27, 2017.

MCLAUGHLIN, M.J.; PARKER, D.R.; CLARKE, J.M. Metals and Micronutrients -food Safety Issues. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, p.143-163, 1999.

PARKPIAN P.; LEONG S.T.; LAORTANAKUL P.; THUNTHAISONG N. Regional monitoring of lead and cadmium contamination in a tropical grazing land site, Thailand. **Environmental Monitoring and Assessment**, Netherlands, v.85, p.157-173, 2003.

PAPADOPOULOS, A.; ALTUNKAYNAK, Ş.; KORONEOS, A.; ÜNAL, A.; KAMACI, Ö. Geochemistry of uranium and thorium and natural radioactivity levels of the western Anatolian plutons, Turkey. **Mineralogy and Petrology**, Austria, v.111, p.677-691, 2017.

PAYE H. DE S.; MELLO, J. W. V.; ABRAHÃO, W. A. P.; FILHO, E. I. F.; DIAS, L. C. P.; CASTRO, M. L. O.; MELO, S. B.; FRANÇA, M. M. Valores de Referência de Qualidade para Retais Pesados em Solos no estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira em Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.2041-2051, 2010.

PÈREZ, D. V.; SALDANHA, M. F. C.; MOREIRA, J. C.; VAITSMAN, D. S. Concentração Total de Urânio e Tório em Alguns Solos Brasileiros. **Pesquisas agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.8, p.1417-1423, 1998.

PESSOA, P.M.A.; DUDA, G.P; BARROS, R.B.; FREIRE, M.B.G.S.; NASCIMENTO, C.W.A.; CORREA, M.M. Frações de Carbono Orgânico de um Latossolo Húmico sob Diferentes Usos no Agreste Brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 97-104, 2012.

PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, L. R.; LIMA, J. M. Teor Total e Capacidade Máxima de Adsorção de Chumbo em Latossolos Brasileiros. **Revista Brasileira em Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.279-288, 2001.

PRESTON W.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M.; JUNIOR, V. S.S.; SILVA, W. R.; FERREIRA, H. A. Valores de Referência de Qualidade para Metais Pesados em Solos do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira em Ciência do Solo** Viçosa, v.38, p.1028-1037, 2014.

QUEIROZ, M. T. A.; SABARÁ, M. G.; QUEIROZ, C. A. LEÃO, M. M. D.; AMORIM, C. C.; LIMA, L. R. P. Estudo sobre os teores de Tório, Urânio e Potássio nas águas superficiais e sedimento marginal do Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.22, n.2, p.371-380, 2017.

ROUT, S.; KUMAR, A.; RAVI, P.M.; TRIPATHI, R.M. Understanding the Solid Phase Chemical Fractionation of Uranium in Soil and Effect of Ageing. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 317, p. 457-465, 2016.

RUDNICK, R.L.; GAO S. Composition of the continental crust. **Geochemistry et Cosmochimica Acta**, USA, v.3, p.1-64, 2004.

SÁ, I.; SEMEDO, M.; CUNHA, M.E. Kidney Cancer. Heavy Metals as a Risk Factor **Biomedical Journal**, Netherlands, v. 1, p. 25-28, 2016.

SANTOS, J.A.; CARDOSO, J. J. R. F.; SILVA, C. M.; SILVEIRA, S. V.; AMARAL, R. S. Determination of Radionuclides in the Environment Using Gamma-spectrometry. **Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Netherlands, v. 269, p.451-455, 2006.

SANTOS, C. A.; ACCIOLY, A. C. A.; MENDES, V. A.; LINS, C. A C.; OLIVEIRA, R. G.; SILVA, R. C.; JACQUES, A. P. R. 2015. Projeto de Integração Folha Garanhuns: Carta Geológica. Escala 1:250.000 (Folha SC.24-X-B Garanhuns). Brasília, CPRM.

SHEPPARD , M. I. The Environmental Behaviour of Uranium and Thorium. **Whiteshell Nuclear Research Establishment**, New York, v.12, p. 45, 1980.

SHTANGEEVA, I.; AYRAULT, S.; JAIN, J. Thorium uptake by wheat at different stages of plant growth. **Journal of Environmental Radioactivity**, England, v. 81, p. 283-293, 2005.

SILVA, G.F.; SANTOS, D.; SILVA, A.P.; SOUZA, J.M. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n.3, p. 25-35, 2015.

SILVA, Y.J.A.B.; NASCIMENTO, C.W.A.; BIONDI, C.M.; STRAATEN, P.V.; JUNIOR, V.S.S.; FERREIRA, T.O. Weathering rates and carbon storage along a climosequence of soils developed from contrasting granites in northeast Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 286, p. 1-12, 2016.

SILVA, C.M.; AMARAL, R. S.; AMARAL, A.; JÚNIOR, J.S.A.; SANTOS, D. C.; LIMA, L.E.; SILVEIRA, S.V. 226Ra in Milk of the Dairy Cattle from the Rural Region of Pernambuco, Brazil. **Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Netherlands,v. 270, p.237-241, 2006.

SILVA, C. M.; AMARAL, R. S.; TABOSA, J. N.; JÚNIOR, J. A. S.; MENEZES, R. S. C.; FARIAS, E. E. G.; FILHO, C. A. S.; RIBEIRO, F. C. A. Lead Poisoning Risk for Dairy Cows in the Semi-Arid Region of Pernambuco, Brazil. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v. 86, p. 199-202, 2011.

SILVA, C. M.; ALCOFORADO, E.S.; AMARAL, R.S.; JÚNIOR, J.A.S.; MENEZES, R.S.C.; BEZERRA, J.D.; SANTOS, D.C.; LIMA, L.E.; FILHO, C.A.S.; HONORATO, E.V.; RIBEIRO, F.C.A.; TABOSA, J.N. Stable Lead in Milk and Derivates. **Food Analytical Methods**, New York, v.3, p. 85-89, 2010.

SIEGEL, M.D.; BRYAN, C.R. Environmental geochemistry of radioactive contamination. **Treatise on Geochemistry**, New Mexico, v.9, p.205-262, 2003.

SILVA, A.C.; TORRADO, P.V.; ABREU JÚNIOR, J.S. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. **Revista da Universidade de Alfenas**, Belo Horizonte, v.5, p.21-26, 1999.

SMEDLEY, P.L.; SMITH, B. C.; Abesser, D. Lapworth. **Uranium Occurrence and Behaviour in British Groundwater**. British Geological Survey, 2006.

TAHIR, M.; ABBAS, M. I. M.; TAHIR, M.A.; NAZIR, ARIF.; IQBAL, D. N.; KANWAL, Q.; HASSAN, FAIZA.; YOUNAS, U. Comparative study of heavy metals distribution in soil, forage, blood and milk. **Acta Ecologica Sinica**, Amsterdam, v.37, p. 207–212, 2017.

TUTSON, C.D.; GORDEN, A.E.V. Thorium Coordination: A Comprehensive Review Based on Coordination Number. **Coordination Chemistry Reviews**, Netherlands, v. 333, p. 27-43, 2017.

UNSCEAR **.Sources and Effects of Ionizing Radiation**. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 2000.

UNSCEAR, **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources (2000).

United States Environmental Protection Agency | US EPA <https://www.epa.gov/>, 2017.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). Method 3051a- Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soil and Oils, 1998.

VEGA, F.A. COVELO, E.F.; ANDRADE, M. L. Effects of sewage sludge and barley straw treatment on the sorption and retention of Cu, Cd and Pb by coppermine Anthropogenic Regosols. **Journal of Hazardous Materials**, Netherlands, v.169, p. 36–45, 2009.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de Cobre, Ferro, Manganês e Zinco em Solos sob Pastagens na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.42, n.6, p.859-864, 2007.

WALRAVEN, N.; BAKKER, M.; VAN, B.J.H.; KLAVER, G.T.; MIDDELBURG, J.J.; DAVIES, G.R. Factors Controlling the Oral Bioaccessibility of Anthropogenic Pb in Polluted Soils. **Science of the Total Environment**, Netherlands, v. 506-507, p.149-163, 2015

WERLE, R.; GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2297-2305, 2008.

YANG, W.; PARKER, T.G.; SUN, Z. Structural Chemistry of Uranium Phosphonates **Coordination Chemistry Reviews**, Lausana, v.303, p. 86-109, 2015.

ANEXO

