

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FÍSICA

KARUANE SCHECHTEL KODUM

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DA CAVERNA ABRIGO DA AREIA SOLTA – GO –
BR POR TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA E SIMULAÇÃO DE PARÂMETROS DE
INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO

PONTA GROSSA
2021

KARUANE SCHECHTEL KODUM

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DA CAVERNA ABRIGO DA AREIA SOLTA – GO –
BR POR TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA E SIMULAÇÃO DE PARÂMETROS DE
INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, no Programa de Pós-Graduação em Ciências, área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA
2021

K76 Kodum, Karuane Schechtel
Caracterização de solos da caverna Abrigo da Areia Solta - GO - BR por
técnica de espectroscopia e simulação de parâmetros de interação da radiação /
Karuane Schechtel Kodum. Ponta Grossa, 2021.
94 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab.
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

1. Serra dourada. 2. XCOM. 3. Neossolo Litólico. 4. Coeficiente de
atenuação. 5. XRF. I. Saab, Sérgio da Costa. II. Pires, Luiz Fernando. III.
Universidade Estadual de Ponta Grossa. Física. IV.T.

CDD: 530.1

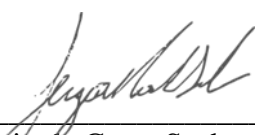
TERMO DE APROVAÇÃO

KARUANE SCHECHTEL KODUM

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DA CAVERNA ABRIGO DA AREIA SOLTA GO-BR
POR TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA E SIMULAÇÃO DE PARÂMETROS DE
INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO.

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção no grau de Mestre no Programa de PósGraduação em Ciências – Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

Orientador:



Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab – UEPG – Presidente



Prof. Dr. André Maurício Brinatti – UEPG – Titular



Profª. Drª. Vladia Correchel – UFG – Titular

Ponta Grossa, 10 de setembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Ganapati, pela força e discernimento.

Agradeço aos meus pais, Giane Schechtel Kodum e Marcos Geraldo Kodum, por acreditarem no meu potencial, por sempre me incentivarem nos estudos e por todo amor que recebi!

Agradeço a Ana Carolina Braga Kodum e Victor Schechtel Kodum, por todo carinho e ajuda neste e em outros períodos!

Todo meu carinho e agradecimento a Maria Elisabete Wogeneack Simionato e Giovani Carlos Simionato, por sempre me acolherem e estarem sempre comigo!

Agradeço ao Murilo Simionato pela companhia, amor, respeito, carinho e paciência, pelas idas ao laboratório comigo nas manhãs e por sempre tentar me ajudar no possível e impossível.

Agradeço aos meus professores desde os que me ensinaram o quanto é um mais um até os que me formaram e lecionaram durante a graduação e pós-graduação. Em especial ao professor Adriano Mendes que sempre acreditou no meu potencial e que me inspira muito como profissional, e aos professores Dr. André Mauricio Brinatti, Dr. Luiz Fernando Pires e Dr. Sérgio da Costa Saab, por me encatarem e me ensinarem como é lindo esse mundo do estudo de solos!

Todo meu respeito e admiração ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab, por estar comigo sempre com paciência e serenidade, ao Prof. Dr. André Mauricio Brinatti por ter dado inicio comigo nessa jornada e ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Fernando Pires por ter me dado todo auxílio e conhecimento no desenvolvimento deste trabalho.

Toda a minha gratidão às professoras Dra. Vladia Correchel e Dra. Renata Santos Momoli e ao Pequi Espeleogrupo pelo fornecimento das amostras e por me dar a oportunidade de estudar um lugar tão lindo e valioso!

Agradeço aos meus colegas do grupo FASCA.

Agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

“Enxergando Deus em tudo, tudo fica mais bonito.”

Mistério das Estrelas – 3030

RESUMO

Os solos são componentes essenciais para o ecossistema, cada um carregando características intrínsecas que os diferenciam entre si. Por conta de ser um recurso lentamente renovável são criados parques de preservação, como por exemplo o Parque Estadual da Serra Dourada – GO – BR, com o incentivo da preservação do ecossistema local. Os granitos que constituem a Serra Dourada são característicos de processos pós-orogênicos, estando intrusos no grupo Araxá, e pouco se sabe das características dos solos que constituem esta região. O grupo FASCA-UEPG, em conjunto com o grupo Pequi Espelogrupo da UFG, se propuseram em estudar amostras de solos de oito regiões distintas coletadas no Parque Estadual da Serra Dourada. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo na caverna Abrigo da Areia Solta, com amostras das zonas de entrada, meio e lateral da caverna, onde foram aplicadas técnicas de: análise textural, picnometria à gás hélio, fluorescência de raios X por energia dispersiva e simulação da interação da radiação; com o intuito da caracterização e possível distinção física e elementar entre as 3 amostras. Foi possível notar, visualmente, quantidades distintas de matéria orgânica entre as amostras de solo das zonas de coleta influenciando nos valores da densidade de partículas entre elas; todas as amostras foram classificadas com a textura de Areia, com pequenas variações nas composições químicas de uma para outra. Ao analisar os parâmetros de interação da radiação, foram medidos o coeficiente de atenuação de massa total e parciais, seções de choque atômica, eletrônica e molecular, número atômico efetivo e a densidade eletrônica, notando a distinção das amostras apenas nos três últimos parâmetros citados. Além disso, pode ser visto, a partir do número atômico efetivo e da densidade eletrônica, a influência do elemento césio nos solos mesmo quando presente em baixas quantidades. As técnicas validaram a pré-descrição do solo, onde era visto sendo um Neossolo Litólico com possível material de origem sendo Quartzitos e/ou Quatzo-xisto.

Palavras chave: Serra Dourada, Araxá, XCOM, Neossolo Litólico, Coeficiente de atenuação.

ABSTRACT

Soils are essential components in the ecosystem, there are different types of soils and each type presents intrinsic characteristics. Since it is a slowly-renewable resource, preservation parks are created as the Parque Estadual da Serra Dourada (Golden Mountain State Park), for example, which incentivizes the preservation of the local ecosystem. The granites found in Serra Dourada are characteristic of post-orogenic processes, they are included in the Araxá group, however, little is known regarding the characteristics of the soils in that region. The FASCA-UEPG group (Physics applied to soils and environmental sciences group of the State University of Ponta Grossa) in a partnership with the Pequi Espelogrupo of UFG (Federal University of Goiás) proposed the study of soil samples from eight distinct points collected from the Parque Estadual da Serra Dourada. This work developed a study on the cave Abrigo da Areia Solta (Loose Sand Shelter), at three distinct points, where the following techniques were applied: textural analysis, helium pycnometry, energy dispersive X-ray fluorescence and radiation interaction simulation aiming at the characterization and possible physical and elemental distinction between the three points. Distinct amounts of organic matter were visually observed at the three points that influenced the particle density values between them; the three points were classified as sandy texture, with small variations in their chemical composition. When analyzing the radiation interaction parameters, the following measurements were carried out: total and partial mass attenuation coefficients, atomic, electronic and molecular shock sections, effective atomic number, and electronic density, differences were found between the points only in the three parameters listed. In addition, the effective atomic number and the electronic density revealed the influence of the cesium element in the soils even when small amounts were observed. The techniques employed validated the soil previous description, which had been classified as a Litholic Soil with quartzite and/or quartz/shale original material.

Keywords: Serra Dourada, Araxá, XCOM, Litholic Soil, Attenuation Coefficient.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2. 1 - Esquema das demandas atuais dos solos, segundo as necessidades humanas (à esquerda) e conservação dos ecossistemas (à direita).....20
- Figura 2. 2 - Sistema trifásico do solo, com as respectivas porcentagens de possíveis preenchimentos do espaço poroso e da composição de sólidos do solo.23
- Figura 2. 3 - Evolução da formação e maturidade do solo.....23
- Figura 2. 4 - Esquema de um perfil de solo com os principais horizontes e sub-horizontes.24
- Figura 2. 5 - Localização do Parque Estadual da Serra Dourada.26
- Figura 3. 1 - Triângulo textural (Sociedade Brasileira de Ciência dos Solos), solo com textura franco arenosa.33
- Figura 3. 2 - Esquema do funcionamento do equipamento Multipiquinômetro MVP – D160 – E. Após zerada a pressão interna, com abertura da válvula de escape, o gás hélio 1) entra pelo equipamento, passando pela 2) válvula de escape (agora fechada) a partir da abertura da 3) válvula de entrada de gás, com a válvula de seleção inicialmente sendo 4) direcionada para o 5) volume de referência (V_R), neste ponto é marcada a primeira pressão (P_1). Logo após a medida, a válvula de seleção então é 6) direcionada para o porta amostra (V_C), onde então é feita a segunda leitura de pressão (P_2). Em seguida o equipamento tem novamente sua pressão zerada a partir da 7) válvula de saída de gás.....34
- Figura 3. 3 - Processo de formação dos raios X característicos. Onde se inicia com a emissão de raios X primários (1), seguindo da ejeção do elétron da sua camada criando um buraco (2), onde então um elétron de maior energia transita até a vacância emitindo os raios X característicos (3). A energia emitida do raio X característico irá depender dos níveis eletrônicos para os quais o elétron irá transitar, como demonstrado no quadro à direita.36
- Figura 3. 4 - Contribuição dos efeitos parciais no μ/ρ em função da energia (E) para o aço.39
- Figura 4. 1 - Localização de coleta do Abrigo Areia Solta no: A) Estado de Goiás – Brasil (1:500 km); B) Parque Estadual da Serra Dourada (1:2 km).....41

Figura 4. 2 – Interior da caverna Abrigo da Areia Solta com a indicação aproximada das zonas de coleta das amostras de solos.....	42
Figura 4. 3 - Croqui do Abrigo da Areia Solta com suas respectivas zonas de coleta e amostras coletadas.....	42
Figura 4. 4 - A) Cascalhos na parte superior da tamiz; B) Terra fina antes de ser levada ao processo de secagem.....	43
Figura 4. 5 - Multipiquinômetro MVP – D160 – E com cilindro de gás hélio vinculado.....	44
Figura 4. 6 - A) Amostras de 80 g de TFSA da amostra de solo C; B) Porta amostra do equipamento, de tamanho large; C) Equipamento utilizado para análise, demarcando pressão interna de 17 psi.....	45
Figura 4. 8 - A) Suspensão da amostra de solo C; B) Béquer de vidro com a suspensão; C) Ultrassom.	46
Figura 4. 9 - A) Processo de tamisação e lavagem do solo; B) Fração areia.	46
Figura 4. 10 - A) Provetas após o término da lavagem da areia e preenchidas até 1 L e proveta do branco; B) Agitação da solução; C) Coleta da fração argila por meio de um suporte adaptado para a pipeta; D) Altura da coleta da alíquota de 1/20 da solução; E) Placa de petri com a fração argila.....	48
Figura 4. 11 - Equipamento EDX – 720, da marca Shimadzu, local onde ficam localizados os porta amostras.	49
Figura 4. 12 - A) TFSA antes e depois de ser macerada; B) Porta amostra do equipamento preenchido com a TFSA macerada.	49
Figura 4. 13 - Interface inicial do programa XCOM (Versão 1.5).....	51
Figura 4. 14 - Interface secundária do programa XCOM para inserção dos dados.....	51
Figura 4. 15 – Fluxograma da metodologia utilizada partindo da região de coleta, separação e localização das zonas e técnicas de caracterização utilizadas com suas respectivas quantidades de repetições.	52
Figura 5. 1 - Diminuição da presença de matéria orgânica em A, B e C, respectivamente, com C apresentando sedimentos maiores que 2 <i>mm</i>	53
Figura 5. 2 - Com o aumento da matéria orgânica (percebido visualmente) no solo nota-se a diminuição da densidade de partículas.....	55
Figura 5. 3 - Com o aumento da matéria orgânica no solo nota-se a diminuição na densidade de partícula e da fração areia, ao mesmo tempo em que há o aumento das frações argila e silte.....	56

Figura 5. 4 - Diagrama textural adotado pelo SBCS (2018), com a indicação da textura encontrada para cada uma das zonas de coleta.	56
Figura 5. 5 - Frações areia de A, B e C.	57
Figura 5. 6 - Fração areia de C, apresentando pequenos pontos de luz.....	57
Figura 5. 7 - Exemplo de como os dados são exportados do XCOM e quais colunas foram utilizadas para a análise dos dados da interação da radiação com A, B e C.	60
Figura 5. 8 - Coeficiente de atenuação de massa total de A, B e C.....	60
Figura 5. 9 - Contribuição dos efeitos parciais em função da energia.	61
Figura 5. 10 - Correlação entre o coeficiente de atenuação de massa de A, B e C e o elemento Si, ou Quartzo (SiO_2), onde: a) μ/ρ total, b) Coerente, c) Incoerente e d) fotoelétrico.	62
Figura 5. 11 - Correlação entre o coeficiente de atenuação total e os elementos a) Fe, b) Al, c) K, d) S, e) Cu, f) Cs e g) Ti.	63
Figura 5. 12 - Correlação entre o coeficiente de atenuação dos solos e da Muscovita, onde temos os valores de μ/ρ a) total, b) coerente, c) incoerente e d) fotoelétrico....	64
Figura 5. 13 – Variação do coeficiente de atenuação total com a energia.	65
Figura 5. 14 – Variação das seções de choque molecular, atômica e eletrônica em função da energia.	66
Figura 5. 15 - Correlação entre a seção de choque molecular e peso molecular.....	67
Figura 5. 16 - Correlação entre a seção de choque atômica e o número de fórmula.....	68
Figura 5. 17 - Número atômico efetivo e densidade eletrônica.....	68
Figura 5. 18 - Correlação de Z_{eff} e $M/\sum_i n_i$	69
Figura 5. 19 - Correlação entre Z_{eff} e $M/\sum_i n_i$ nas faixas de energia 0,04 a 0,356 MeV	69
Figura 5. 20 - Coeficiente de atenuação total do Cs, com o círculo em vermelho indicando o efeito da borda K.	70
Figura 5. 21 - Contribuição da concentração de Cs no valor total da σ_F em função da energia.	71
Figura 5. 22 - Correlação N_{el} e $\sum_i n_i/M$	72
Figura 5. 23 - Correlação entre os valores da N_{el} e $\sum_i n_i/M$ para baixas e altas energias....	73
Figura 5. 24 - Correlação entre Z_{eff} e concentração de Si + Al.	74
Figura 5. 25 - Correlação entre N_{el} e a concentração de Si + Al.	74

Figura 5. 26 - Contribuição das concentrações de Si + Al no valor total da σ_E em função da energia.	75
Figura 5. 27 - Correlação entre Z_{eff} e a concentração de Fe + Ti.	76
Figura 5. 28 - Correlação entre N_{el} e concentração Fe + Ti.	76
Figura 5. 29 - Contribuição das concentrações de Fe + Ti no valor total da σ_E em função da energia.	77
Figura 5. 30 – Gráficos do (a) coeficiente de atenuação total de massa, (b) seção de choque molecular, (c) seção de choque atômica e (d) seção de choque eletrônica em função da energia e sem a concentração do elemento Cs.	78
Figura 5. 31 - Comparação dos gráficos do Z_{eff} e N_{el} a) e b) com Cs; e c) e d) sem Cs.	79
Figura 5. 32 - Contribuição dos efeitos parciais no valor de coeficiente de massa total, sem o Cs.	79
Figura 5. 33 - Número atômico efetivo e densidade eletrônica sem o efeito da borda próxima e borda K do Cs.	80
Figura 5. 34 - Contribuição das concentrações de Si + Al no valor da seção de choque eletrônica, sem o Cs.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Seleção de minerais encontrados nos solos, listados em ordem de aumento da resistência ao intemperismo, sob condições prevalecentes em regiões temperadas úmidas.....	22
Tabela 2. 2 - Frações granulométricas definidas pelos sistemas de classificação dos Departamentos de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS) e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).....	28
Tabela 5. 1 - Valor médio da densidade de partícula das amostras do solo A, B e C.	54
Tabela 5. 2 - Média das porcentagens das frações areia, argila e silte encontradas para A, B e C, com seus respectivos tempos de sedimentação.....	55
Tabela 5. 3 - Média dos elementos encontrados nas amostras A, B e C através da técnica de XRF-EDX.	58
Tabela 5. 4 – Valores médios dos elementos em comum de A, B e C.....	59
Tabela 5. 5 - Valores obtidos para M e $\sum_i n_i$ para as zonas de coleta do solo A, B e C.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental
BR	Brasil
EDX	Espectroscopia por Dispersão de Energia
ETR	Elementos Terras Raras
FASCA	Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais
GO	Goiás
ISSS	Sociedade Internacional de Ciência do Solo
SBCS	Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
SDD	Silicon Drift Detector
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
TFSE	Terra Fina Seca em Estufa
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFG	Universidade Federal de Goiás
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
XRF	Fluorescência de Raios X
WDX	Espectroscopia por comprimento de onda

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, C	Pontos de coleta dos Solos
$A_{i,j}$	Massa atômica
c	Velocidade da luz no vácuo
D_p	Diâmetro da partícula
E	Energia
$e\%$	Porcentagem que a molécula representa no material
f_i	Abundância fracional
g	Aceleração da gravidade local
Ga	Bilhões de anos
h	Altura de sedimentação
h	Constante de Planck
I	Intensidade da radiação transmitida
I_0	Intensidade da radiação incidente
$K\alpha$	Possível linha de transição do elétron na Fluorescência de raios X
M	Peso molecular
$m_{areia,silte,argila}$	Massa das frações do solo
$m_{dispersante}$	Massa do dispersante
m_p	Massa da amostra
m_s	Massa do solo seco
N_A	Número de Avogadro
N_{el}	Densidade eletrônica
$n_{i,j}$	Número de unidades de fórmula
$P_{1,2}$	Pressões medidas na picnometria a gás

t	Tempo de sedimentação
$T_{\% \text{ areia, silte, argila}}$	Porcentagem das frações presentes no solo
V_C	Volume do porta amostra
V_p	Volume de partículas
V_R	Volume de referência
x	Espessura do material absorvedor
W_i	Fração peso para compostos e misturas
Z	Número atômico
Z_{eff}	Número atômico Efetivo
η	Viscosidade do Fluido
λ	Comprimento de onda dos raios X característicos
μ	Coefficiente de atenuação linear
$\frac{\mu}{\rho}$	Coefficiente de atenuação de massa
$\frac{\mu}{\rho} C, IC, PE, PP$	Contribuições dos efeitos: Coerente, Incoerente, Fotoelétrico e Produção de Pares no coeficiente de atenuação de massa
ν	Frequência de vibração
ρ	Densidade do material absorvedor
ρ_L	Densidade do Fluido
ρ_p	Densidade de partícula
$\sigma_{C, IC, PE, PP}$	Seções de choque dos efeitos: Coerente, Incoerente, Fotoelétrico e Produção de Pares
$\sigma_{M, A, E}$	Seções de choque das interações: molecular, atômica e eletrônica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 SOLOS.....	21
2.2 PARQUE ESTADUAL DA SERRA DOURADA	25
2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	27
2.3.1 Textura do Solo	27
2.3.2 Densidade de partícula	28
2.3.3 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X	29
2.3.4 Interação da radiação com a matéria	29
3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	31
3.1 ANÁLISE TEXTURAL	31
3.2 DENSIDADE DE PARTÍCULAS	33
3.3 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	34
3.4 PARÂMETROS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....	36
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 SOLOS.....	41
4.2 TERRA FINA SECA AO AR	43
4.3 DENSIDADE DE PARTÍCULAS	43
4.4 ANÁLISE TEXTURAL	45
4.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA.....	48
4.6 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 TERRA FINA SECA AO AR	53
5.2 DENSIDADE DE PARTÍCULA	54
5.3 ANÁLISE TEXTURAL	55
5.4 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA.....	57
5.5 PARÂMETROS DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO	59
5.5.1 Coeficiente de atenuação de massa	60
5.5.2 Seções de choque, número atômico efetivo e densidade eletrônica	65
6 CONCLUSÃO.....	82
7 TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE – TABELAS DE COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA E SUAS CONTRIBUIÇÕES.....	90

ANEXO A - ETIMOLOGIA DOS TERMOS USADOS NO 1º NÍVEL CATEGÓRICO DO SIBCS, E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS.....	92
ANEXO B - DIÂMETRO E TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO PARA AS FRAÇÕES DO SOLO.....	93
ANEXO C - FICHA DE DESCRIÇÃO DA REGIÃO V6 DO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DOURADA - GO - BR	94

1 INTRODUÇÃO

O solo está presente em nosso dia a dia e pode receber significados distintos, com cada um em acordo com a forma como a pessoa aprendeu a olhá-lo, entendê-lo ou manipulá-lo. Mesmo com o termo solo derivando de diversos conceitos, todos eles chegam à um consenso: sua importância para a sociedade.

Kämpf e Curi (2012) trazem o termo solo como uma referência à parte superior da crosta terrestre, mais precisamente à porção superior do regolito, ou seja, material solto, resultante de intemperismos físicos e químicos sofridos pela rocha matriz. A rocha matriz basicamente pode ser uma rocha do tipo: ígnea, sedimentar ou metamórfica; e cada uma delas pode ter um tempo de exposição diferente aos fatores de: temperatura, relevo, clima e biota; com isso podem sofrer diferentes processos pedogenéticos resultando na formação de diferentes tipos de solos.

Com essa diversidade de solos procura-se agrupá-los a partir de suas características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e biológicas. Nos dias de hoje existem diferentes sistemas de classificação, um deles sendo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

No sistema brasileiro os solos são separados em primeiro nível em 13 classes (ou ordens) e em segundo nível por subordens. Neste trabalho será abordado estudo de técnicas aplicadas em amostras de solo pré-classificadas como sendo, no sistema brasileiro, um Neossolo Litólico, com sua classe (Neossolo) e subordem (Litólico) indicando ser um solo em início de formação e com a ausência de diferenciação das camadas que o formam.

Uma das formas de classificar e caracterizar o solo é por meio de análises como: análise textural, espectrometria de fluorescência de raios X, interações de radiação com a matéria, densidade de partícula, entre outros. A partir da densidade de partícula é possível supor quais minerais são predominantes; enquanto a análise textural nos mostra qual fração granulométrica (areia, silte ou argila) é mais frequente no solo. A espectrometria de fluorescência de raios X nos dá conhecimento sobre a composição química presente no solo e a partir dela podemos tanto gerar suposições sobre quais minerais podem o compor assim como desenvolver estudo das propriedades de como a radiação interage com aquele tipo de solo. A interação da radiação, assim como seus parâmetros: número atômico efetivo, densidade eletrônica e seções de choque, podem além de caracterizar o solo a partir das interações (CESAREO *et al.*; APPOLONI; RIOS, 1994; MEDHAT *et al.*, 2014) nos fornecer dados como curvas de retenção da água, densidade e porosidade do solo (MEDHAT, 2012a; COSTA *et al.*, 2013; PIRES *et al.*, 2009).

O solo é um recurso natural lentamente renovável, e a interferência humana pode modificar rapidamente suas propriedades (KÄMPF; CURTI, 2012). Para muitos locais de grande

valor de conhecimento geológico, geomorfológico e de interesse de cunho científico e de conservação, são criados parques nacionais em busca da conservação do ecossistema local. Um exemplo de parque de conservação é o Parque Estadual da Serra Dourada – GO – BR.

A Serra Dourada possui grande importância para o conhecimento do desenvolvimento da geomorfologia do Brasil, compondo o grupo da orogênese Araxá com suas intrusões de corpos graníticos pós orogênicos, muitas vezes chamados de Granitos Serra Dourada (TAKEHARA, 2015). O depósito destes granitos, como encontrado em Takehara (2015), muitas vezes são buscados para a mineralização de minerais como: cassiterita, pedras semipreciosas (esmeralda, amazonita e berilo) e minerais de ETR (Elementos Terras Raras). Além da mineralização, a Serra Dourada passou por um período sendo degradada através da prática de garimpo e atividades agrícolas (LIMA, 2004), e no ano de 2018 o Parque Estadual teve sua área reduzida a partir de um acordo firmado entre ambientalistas e produtores rurais.

Atendendo a escassa quantidade de estudos sobre os solos pertencentes ao Parque Estadual da Serra Dourada nos dias de hoje, Momoli *et al.* (2021) traz em seu trabalho descrições sobre dados físicos e morfológicos de solos do parque, agregando auxílio do planejamento de manejo sustentável *in loco*, tendo em conta que há uma vasta multiplicidade de trabalhos sobre a área apenas direcionados à geomorfologia e geologia local, como em Simões (1984), Danni *et al.* (1973) e Marini *et al.* (1977). Em vista disso, o grupo de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA) em conjunto com o grupo de espeleologia Pequi Espeleogrupo da Universidade Federal de Goiás (UFG) iniciou o estudo e a caracterização de solos de oito regiões do Parque Estadual da Serra Dourada.

A partir disso, o problema levantado nesta pesquisa voltou-se à caracterização de solos de três zonas distintas – região de entrada, meio e lateral – do interior da caverna Abrigo da Areia Solta – GO – BR, por meio de processos de caracterização laboratoriais de: análise textural a partir do método da pipeta, picnometria a gás He e espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia; e análises computacionais – via plataforma online XCOM – da interação da radiação com os solos, analisando parâmetros como: coeficiente de atenuação de massa total e parciais, seções de choque atômica, eletrônica e molecular, número atômico efetivo e densidade eletrônica.

Levantando como hipóteses: a possível distinção das amostras das três zonas de coleta a partir das suas caracterizações; a presença de elementos químicos que podem ser encontrados em minerais (*e.g.* quartzo e muscovita) que compõe a região de estudo; e que por meio da caracterização das amostras sejam vistas as características que as descrevem sendo um Neossolo Litólico (*e.g.* textura arenosa e grande quantidade de silício em sua composição).

Tendo em vista a escassa quantidade de estudos voltados aos solos da área do Parque Estadual da Serra Dourada, assim como também o pouco que se é encontrado atualmente na literatura sobre Neossolos Litólicos com altos índices de silício e baixos índices de ferro e titânio, a desenvoltura da caracterização dos solos coletados neste estudo mostra-se de grande valor de cunho científico, com as amostras sendo provenientes de uma área de preservação ambiental podendo servir como referência para outros estudos de solos de mesma classificação e que sofreram alguma alteração por meio de atividades humanas. Tanto a análise química, a partir da espectroscopia de fluorescência de raios X, como de parâmetros de interação da radiação com a matéria por meio de simulações computacionais podem ser empregadas para a caracterização assim como para a diferenciação de solos, onde essas diferenciações muitas vezes não conseguem ser vistas em técnicas como da análise textural, por exemplo.

Este trabalho tem como objetivos gerais:

- Caracterização dos solos das amostras da região da caverna Abrigo da Areia Solta, do Parque Estadual da Serra Dourada – Mossâmedes – GO – BR;
- Gerar novos conhecimentos sobre o ecossistema visando sua preservação.

e objetivos específicos:

- Caracterização das amostras de solos das três zonas de coleta por meio de técnicas físicas de:
 - Análise granulométrica pelo método da pipeta;
 - Densidade de partículas pelo método de picnometria a gás He;
- Caracterização por meio de técnicas químicas de:
 - Espectroscopia de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia;
 - Parâmetros de interação da radiação com a matéria.
- Analisar possíveis diferenças entre as amostras coletadas;
- Comparar a pré-descrição dos solos, e os dados obtidos através da literatura, com os resultados das técnicas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Assim como Hillel (1998), este capítulo será introduzido com o seguinte questionamento: O que significa o termo solo?

O termo solo pode assumir diversos tipos de significados, cada um deles com o seu valor para os que o definem. Os autores Lal e Shukla (2004) em seus estudos, trazem o solo como sendo a camada da crosta terrestre que sustenta toda a vida na Terra, Kirkham (2005) descreve a importância do estudo das relações do solo com as plantas e mecânica da água no solo; Ferreira (2010) traz o solo com um significado para o ponto de vista da Física do Solo: um sistema trifásico muito heterogêneo; Olson (1981) traz os solos, juntamente com a água, como sendo a base para a civilização, constituindo os mais importantes recursos para a sociedade; Lepsch (2010) discute a importância do solo para legisladores, como sinônimo de “solo pátrio”, e para artistas e filósofos onde podem vê-lo muitas vezes como uma beleza ou forças místicas relacionadas à vida. Além disso o solo pode ser visto a partir de suas demandas, sejam elas por meio de necessidades humanas ou da preservação dos ecossistemas, como pode ser visto na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Esquema das demandas atuais dos solos, segundo as necessidades humanas (à esquerda) e conservação dos ecossistemas (à direita).



Fonte: Lepsch (2010).

Nota-se que podemos encontrar vários exemplos na literatura para a definição do termo solo, porém há uma convergência em seus significados: A importância do estudo e conservação do solo para a sociedade.

2.1 SOLOS

Segundo Brady e Weil (2013) um solo é resultado de processos sintetizadores tanto construtivos como destrutivos. A pedogênese depende de cinco fatores principais: clima, biota (incluindo os seres humanos), relevo, tempo e material de origem; e se inicia através da degradação de rochas afloradas através de processos de intemperismo químico e físico. Com o desgaste da rocha são formados pequenos detritos, estes chamados de regolitos, que podem ficar *in loco* (saprolitos) ou que podem ser transportados - através de águas correntes ou correntes de vento, por exemplo - e serem depositados a uma certa distância da sua rocha matriz. Durante a formação do solo, alguns minerais podem resistir às mudanças (*e.g.* química) e podem reter em si a característica original do material de origem, sendo classificados como minerais primários (*e.g.* quartzo), enquanto outros minerais, como feldspatos ou micas, são mais reativos se decompondo gradualmente e se reconstituindo em diferentes formas (*e.g.* argilominerais) (HILLEL, 1998) dessa forma, chamados de minerais secundários, alguns exemplos de minerais primários e secundários podem ser vistos na Tabela 2.1.

O material de origem é a matéria-prima a partir da qual os solos se desenvolvem, podendo ser de natureza mineral (rochas ou sedimentos) ou orgânica (resíduos vegetais) (LIMA; LIMA, 2007). Em geral, as rochas do planeta Terra são classificadas em três grandes grupos: rochas ígneas, sedimentares e metamórficas; sendo separadas de acordo com o processo que as deu origem (MENEZES, 2014).

As rochas ígneas são aquelas formadas a partir do magma fundido, sendo composta por minerais primários, como por exemplo o granito e o basalto. As rochas sedimentares são produto da meteorização, erosão, transporte e posterior acumulação dos detritos provenientes de rochas preexistentes (REVOLLO, 2015), por exemplo as areias de quartzo, oriundas do intemperismo do granito, podem vir a se transformar em uma massa sólida chamada arenito (BRADY; WEIL, 2013). E por fim, as rochas metamórficas são aquelas que se originam a partir de rochas previamente existentes que sofreram grandes variações de pressão e temperatura ocasionadas pelo movimento das placas continentais da Terra, neste caso rochas como o granito podem ser transformadas em gnaisse e rochas sedimentares podem ser transformadas em ardósias e até mesmo em filito ou xisto, normalmente apresentando mica.

Tabela 2. 1 - Seleção de minerais encontrados nos solos, listados em ordem de aumento da resistência ao intemperismo, sob condições prevalentes em regiões temperadas úmidas.

Minerais primários		Minerais secundários		
		Gipsita	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Menos resistente ↑ ↓ Mais resistente
		Calcita ^a	CaCO ₃	
		Dolomita ^a	CaCO ₃ · MgCO ₃	
Olivina	Mg,FeSiO ₄			
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈			
Augita ^b	Ca ₂ (Al,Fe) ₄ (Mg,Fe) ₄ Si ₆ O ₂₄			
Hornblenda ^b	Ca ₂ Al ₂ Mg ₂ Fe ₃ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂			
Albita	NaAlSi ₃ O ₈			
Biotita	KAl(Mg,Fe) ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂			
Ortoclásio	KAlSi ₃ O ₈			
Microclina	KAlSi ₃ O ₈			
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂			
Quartzo	SiO ₂	Argilominerais	Aluminossilicatos	
		Gibbsita	Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O	
		Hematita	Fe ₂ O ₃	
		Goetita	FeOOH	

^a Em pradarias semiáridas, a dolomita e a calcita são mais resistentes ao intemperismo do que o mostrado na tabela, por causa das baixas taxas de intemperismo ácido.

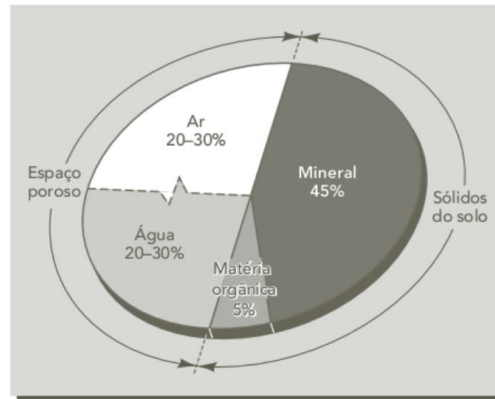
^b A fórmula apresentada é aproximada, porque o mineral é muito variável em sua composição.

Fonte: Brady e Weil (2013).

Vale ressaltar que um mesmo tipo de rocha pode originar diferentes tipos de solo, levando em consideração os outros quatro fatores relevantes da pedogênese. Com ação contínua dos processos físicos, químicos e biológicos, há o acúmulo dos regolitos formando camadas acima da rocha não alterada. Estas camadas são chamadas de horizontes. Os horizontes do solo são formados basicamente por sólidos e poros, que são compostos por quatro componentes principais: água, ar, materiais orgânicos e partículas minerais. Estes quatro componentes compõem o que se conhece na literatura como o sistema trifásico, onde é visto na Figura 2.2 o solo sendo constituído basicamente por água, gás e sólidos (HILLEL, 1998).

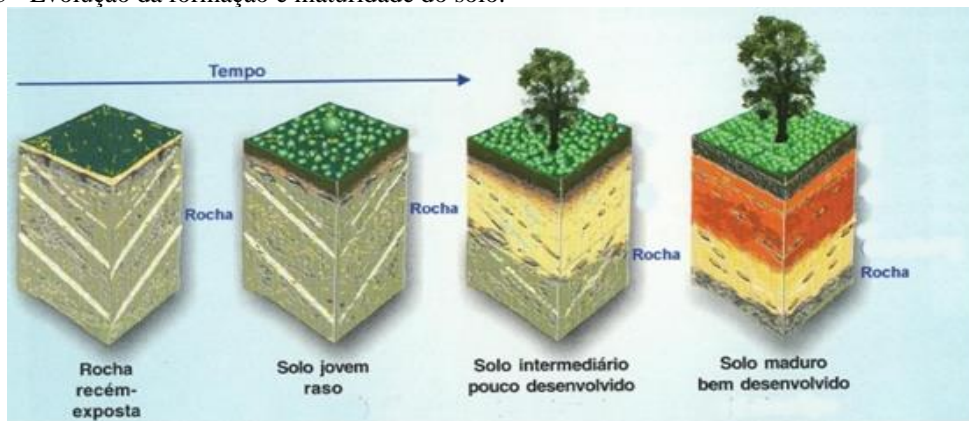
Cada tipo de solo é formado por um conjunto diferente de camadas, que são pouco ou nada afetados pelos processos pedogenéticos, mantendo em maior ou menor proporção as características do material de origem (EMBRAPA, 2018). Os solos que apresentam uma menor quantidade de horizontes são considerados solos jovens, de outra forma os solos com maior maturidade, que possuem uma maior quantidade de camadas, são chamados de solos velhos, podendo ser visto a demonstração dessa relação de evolução e formação do solo na Figura 2.3.

Figura 2. 2 - Sistema trifásico do solo, com as respectivas porcentagens de possíveis preenchimentos do espaço poroso e da composição de sólidos do solo.



Fonte: Brady e Weil (2013).

Figura 2. 3 - Evolução da formação e maturidade do solo.



Fonte: Adaptado de Braz (2019).

Quando é realizado um corte vertical em uma área do solo, este corte é chamado de perfil. O perfil de um solo completo, e bem desenvolvido, possui ao menos cinco tipos de horizontes, comumente chamados de horizontes principais, que no Brasil são designados a partir do esquema sugerido por Dokuchaev e são identificados pelas letras maiúsculas: O, A, E, B e C (LEPSCH, 2010; RIBEIRO *et al.*, 2012), com cada horizonte tendo características intrínsecas conforme esquematizado na Figura 2.4.

Figura 2. 4 - Esquema de um perfil de solo com os principais horizontes e sub-horizontes.



Fonte: Lepsch (2010).

A partir dos horizontes, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018) traz como primeiro nível de classificação dos solos, contemplando 13 classes¹, separadas por critérios como: presença ou ausência de atributos e horizontes diagnósticos A e B ou propriedades que podem ser identificadas em trabalhos de campo (*e.g.* cor e textura), mostrando diferenças no tipo e grau de desenvolvimento de um conjunto de processos pedogenéticos (ANJOS *et al.*, 2012). Como por exemplo, solos que são poucos evoluídos e sem horizonte B definido são nomeados como Neossolos.

Segundo Embrapa (2018, p. 96), o conceito de Neossolos é descrito como sendo:

[...] solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso que não apresenta alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem (como maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica), seja em razão da influência dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos.

Segundo a classificação, segundo SiBCS (2018), o segundo nível categórico possui cerca de 43 classes, sendo separados com base: se houve outros processos atuando juntamente ou influenciando na separação dos solos no primeiro nível de classificação (*e.g.* Cambissolos Húmicos), se há a ausência de diferenciação de horizontes diagnósticos subsuperficiais (*e.g.* Neossolos Litólicos), se envolvem atributos em sua formação que são importantes para o desenvolvimento da fauna, contendo grande número de características acessórias (*e.g.*

¹ Primeiro nível de classificação das 13 classes de solos, segundo SiBCS (2018), e suas respectivas características está presente no ANEXO A.

Gleissolos Tiomórficos) ou se ressaltam atributos diferenciais que representam variações que sejam importantes nas classes do primeiro nível de classificação (*e.g.* Planossolo Nátrico) (ANJOS *et al.*, 2012; EMBRAPA, 2018).

Todas essas classes e níveis, caracterizadas a partir de seus horizontes e atributos, formam um conjunto de solos ainda maior: a pedosfera. A pedosfera, com seu entrelace com a biosfera, atmosfera e litosfera, funciona como uma espécie de alicerce da vida dos ecossistemas terrestres (LEPSCH, 2010). No entanto, muitas vezes não se é dado o devido valor a esta camada externa do nosso planeta, assim como Breemen e Buurman (2003, p. 3) comentam:

Os solos levam décadas a milênios para se formar. Nós pisamos neles e geralmente não vemos seu interior, por isso tendemos a considerá-los garantidos. Mas o uso impróprio e abusivo agrícola, limpeza e recuperação descuidada de terras, erosão induzida pelo homem, salinização e acidificação, desertificação, poluição do ar e da água e apropriação de terras para habitação, indústria e transporte agora destroem os solos mais rapidamente do que se formam.

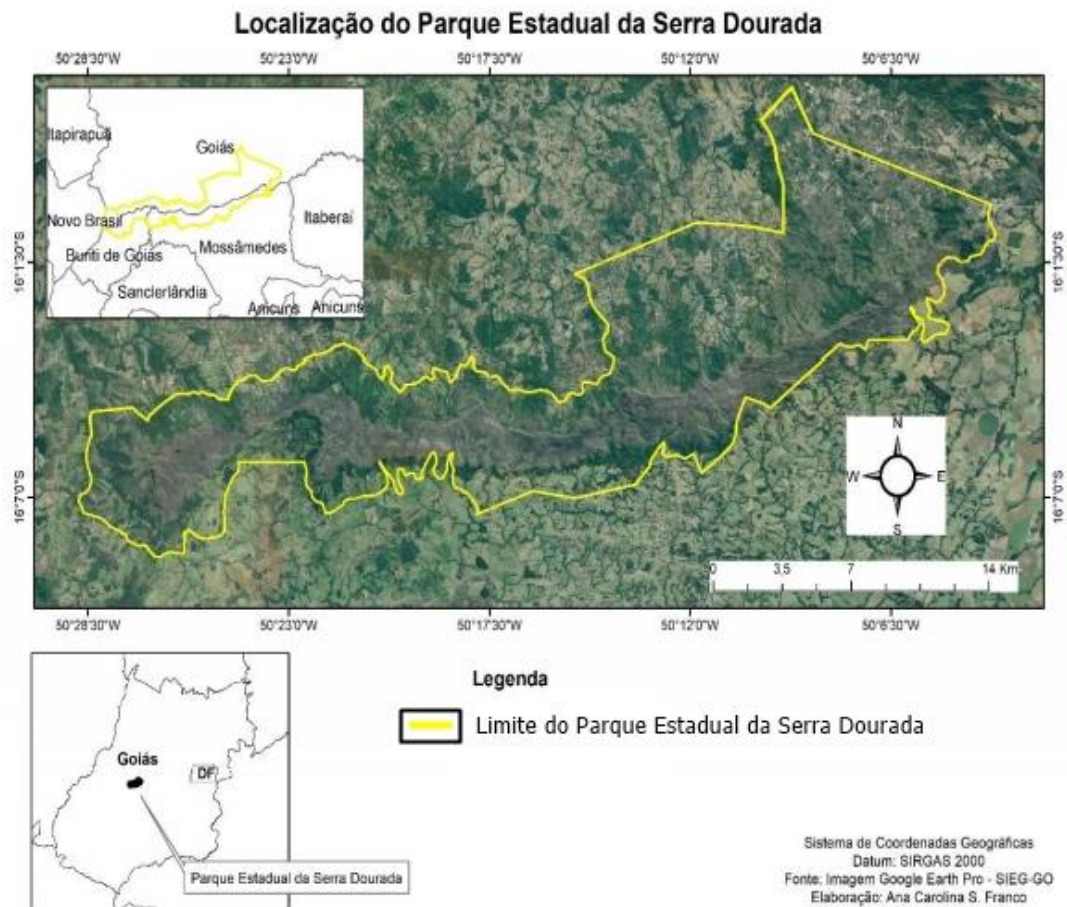
Não só a pedosfera mas sim todas as outras esferas do ecossistema podem ser prejudicadas por seu uso impróprio e abusivo. Com a proposta de proteção de ecossistemas locais são criados os Parques Estaduais, destinados basicamente para a proteção, preservação e utilização de estudos científicos; como exemplo o Parque Estadual da Serra Dourada.

2.2 PARQUE ESTADUAL DA SERRA DOURADA

A Serra Dourada abrange os municípios de Goiás, Mossâmedes e Buriti, do estado de Goiás – BR, com sua área indicada na Figura 2.5. A primeira proposta de criação do seu Parque Estadual foi realizada em 1998, tendo como base a proteção da geodiversidade local, com a instituição da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra Dourada. Em 2000, a APA da Serra Dourada teve sua área ampliada e em 2001 foi criada a lei que muda o nome da APA da Serra Dourada para APA Dr. Sullivan Silvestre (PINTO FILHO, 2014). Em 5 de junho de 2003 foi criado o decreto nº 5768 de criação do Parque Estadual da Serra Dourada, onde pode ser encontrado que:

Art. 2º O Parque ora criado destina-se a preservar as nascentes, os mananciais, a flora, a fauna, as belezas cênicas, bem como a controlar a ocupação do solo da região, podendo conciliar a proteção da fauna, da flora e das belezas naturais com a utilização para fins científicos, econômicos, técnicos e sociais.

Figura 2. 5 - Localização do Parque Estadual da Serra Dourada.



Fonte: Adaptado de Vieira e Carneiro (2020).

A Serra Dourada tem grande importância para o entendimento da geomorfologia brasileira, tendo em vista que a Zona Interna da Faixa Brasília é constituída pelas rochas dos grupos Araxá, Serra da Mesa e Serra Dourada (NAVARRO *et al.*, 2013). A Faixa Brasília foi formada no período do neoproterozóico (1 Ga - 540 Ma), durante o Ciclo Brasileiro, quando houve a última orogênese brasileira significativa (UHLEIN *et al.*, 2012). Esta faixa está subdividida em Zonas: Cratônica, Externa e Interna; onde são subdivididas em grupos, separados a partir de características litológicas. O Grupo Araxá é constituído basicamente por micaxistos e quartzitos, com a intrusão de corpos granito-gnáissico (*e.g.* Serra Dourada) (SIMÕES, 1984; NASCIMENTO, 1991).

Grande parte dos trabalhos encontrados, nos dias de hoje, na literatura sobre o Parque Estadual de Serra Dourada são focados na geologia local, tendo pouco estudo sobre os solos da região. Simões (1984) traz um estudo sobre a geologia do Grupo Araxá na região do município de Mossâmedes onde cita trabalhos, como de Leinz e Leonardos (1936), feitos sobre as rochas região da Serra Dourada, onde são discutidas as presenças de quartzitos micáceos e xistos e suas

ligações com os grupos litológicos. Marini *et al.* (1977) traz as rochas graníticas, que constituem a massa principal da Serra Dourada, sendo constituídas predominantemente pela microlina seguido de quartzo e oligoclásio (An 25%). Danni *et al.* (1973) discutem uma síntese da geologia da extremidade sudoeste da região da Serra Dourada, descrevendo o local com presença de minerais como micaxistos e quartzitos por exemplo. Lima (2004) traz os solos que se desenvolvem na região da serra sendo predominantemente Litólico, com elevados minerais primários, seguido de Cambissolos. Enquanto em Momoli *et al.* (2021), pode ser encontrado o estudo de oito pontos de coleta distintos de solos do interior do parque, onde são descritos como sendo pertencentes às classes dos Cambissolos, Neossolos Litólico e Regolítico.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Para a classificação e caracterização dos solos de regiões, como por exemplo da Serra Dourada, podem ser utilizadas técnicas laboratoriais para o estudo das propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos seus horizontes. As propriedades do solo influenciam profundamente não apenas o modo como ele funciona em um ecossistema, como também a melhor forma de manejá-lo (BRADY; WEIL, 2013).

2.3.1 Textura do Solo

Como visto na Seção 2.1 o solo possui sua parte sólida constituída basicamente por minerais e matéria orgânica. A parte orgânica é formada pelo acúmulo de resíduos animais e vegetais, enquanto a parte mineral é constituída por partículas - resultantes do intemperismo do material de origem do solo – que possuem diversas formas, arranjos e composições (FERREIRA, 2010). O conjunto destas partículas, também conhecidos como frações granulométricas do solo, dá origem à textura do solo.

A textura do solo representa, basicamente, a relação entre as proporções das três principais frações com diâmetro médio menor que 2 mm: areia, silte e argila; e está estritamente ligada à composição mineralógica do solo. A textura constitui-se numa das características físicas mais estáveis do solo, pois demora um longo período de tempo para sofrer alguma alteração, fazendo com que seja considerada um elemento de grande importância na descrição, identificação e classificação de um solo (FERREIRA, 2010; BRADY; WEIL, 2013; TAVARES FILHO, 2016).

Atualmente existem vários sistemas de classificação com diferentes escalas de tamanho de partículas, cada uma com seus critérios para a separação das frações. As escalas usualmente adotadas no Brasil são: do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), da Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS) e da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), esta última sendo uma adaptação das duas escalas anteriores (Tabela 2.2). Acima de 2 mm são considerados os fragmentos grosseiros (*e.g.* cascalhos, calhaus e matações) e todas as frações abaixo deste diâmetro são considerados constituintes da terra fina.

Tabela 2. 2 - Frações granulométricas definidas pelos sistemas de classificação dos Departamentos de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSS) e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).

Frações	Sistemas		
	USDA	ISSS	SBCS
	Ø (mm)		
Areia muito grossa	2 - 1	-	-
Areia grossa	1 - 0,5	2 - 0,2	2 - 0,2
Areia média	0,5 - 0,25	-	-
Areia fina	0,25 - 0,10	0,2 - 0,02	0,2 - 0,05
Areia muito fina	0,10 - 0,05	-	-
Silte	0,05 - 0,002	0,02 - 0,002	0,05 - 0,002
Argila	< 0,002	< 0,002	< 0,002

Fonte: Ferreira (2010).

A textura dos solos pode variar de acordo com sua profundidade. No entanto, ao analisar os solos jovens (Neossolos) é visto a predominância da textura arenosa em sua caracterização, tendo em vista a grande concentração de minerais primários, como o Quartzo. Em Yanaguisawa (2019) pode ser visto a variação da classe textural em função dos horizontes de um Neossolo Flúvico variando em Areia Franca, Franco Arenosa e Areia com o percentual de argila variando de 26 a 0,56%; em Medeiros *et al.* (2013) a variação da textura de um Neossolo Litólico, coletado em diferentes profundidades, com uma variação na textura de Areia franca a Franco arenoso; e em Diniz *et al.* (2007) foi visto um Neossolo Quartzarênico, em uma profundidade de 20 cm com uma textura Franco Arenosa.

2.3.2 Densidade de partícula

Além da classificação textural depender da densidade de partículas (ρ_p) de um solo, segundo Vianna *et al.* (2017) a ρ_p reflete a densidade média das partículas minerais e orgânicas presentes no solo, fazendo com que seja um indicativo da predominância de algum mineral primário (*e.g.* quartzo), argilomineral ou de matéria orgânica. Dessa forma, a partir dos resultados da densidade das partículas de um solo, é possível supor quais minerais podem estar

presentes nele (TAVARES FILHO, 2016), como por exemplo, em solos minerais temos a variação da ρ_p entre 2,60 a 2,75 g/cm^3 (por consequência da predominância de minerais como quartzo, mica, etc.) e em solos com alto conteúdo de matéria orgânica podemos encontrar a ρ_p em torno de 0,9 a 1,4 g/cm^3 (BRADY; WEIL, 2013).

Assim como na textura de solos jovens há a predominância da fração granulométrica da areia, sua densidade de partícula terá uma grande contribuição dos minerais primários, como pode ser visto em Medeiros *et al.* (2013) com o Neossolo Litólico tendo sua ρ_p variando entre 2,42 a 2,80 g/cm^3 ; ou em Yanaguisawa (2019) com o Neossolo Flúvico com sua ρ_p variando entre 2,49 a 2,64 g/cm^3 e em Santos *et al.* (2012) com Neossolos Regolíticos com a ρ_p variando entre 2,61 a 2,92 g/cm^3 .

2.3.3 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X

Assim como é possível supor os minerais que compõe o solo ou se há uma quantidade significativa de matéria orgânica pelo valor da ρ_p , podemos também levantar estas suposições a partir de análises elementares.

A Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (XRF) é uma técnica multielementar, não destrutiva, capaz de realizar a análise e as determinações quantitativa e qualitativa da concentração de elementos em uma ampla variedade de tipos de materiais (DIAS *et al.*, 2017) e vem sendo amplamente empregada na caracterização de solos em estudos de: caracterização de possíveis elementos químicos encontrados nos solos – utilizada como técnica auxiliar a caracterização mineralógica –, distinção da presença de elementos químicos em solos submetidos em sistemas de manejo (WASTOWSKI *et al.*, 2010; PRANDEL *et al.*, 2014; YANAGUISAWA, 2019), entre outros.

Em solos tropicais, segundo Kämpf *et al.* (2012), a composição química é constituída basicamente por óxidos de silício, alumínio, ferro e titânio, em conjunto com elementos característicos de seus minerais sejam eles primários ou secundários. Em solos com texturas mais arenosas espera-se uma maior concentração de silício e alumínio, enquanto em solos mais desenvolvidos um aumento na concentração de ferro e titânio.

2.3.4 Interação da radiação com a matéria

Com o auxílio de técnicas analíticas, como a XRF, podemos obter a composição elementar e caracterizar parâmetros físicos a partir da forma como a radiação irá interagir com

a matéria, a partir desta interação é possível realizar medidas de propriedades como de densidade de partícula e porosidade do solo (COSTA *et al.*, 2013), por exemplo. Além disso, as diferenças nas composições químicas de um solo podem afetar a forma como a radiação irá interagir com o meio, fazendo com que os parâmetros de interação também sejam por si só um modo de caracterizar os solos (NELSON; REILLY, 1991; PIRES *et al.*, 2015).

O estudo dos parâmetros da interação da radiação com a matéria é um método não destrutivo que vem sendo de grande interesse científico, tecnológico e educacional (MANOHARA; HANAGODIMATH, 2007), vários cientistas estão tentando entender as várias interações da radiação em materiais compostos como: ossos, plásticos, ligas, solo e água; sendo essenciais para áreas científicas como física nuclear, física das radiações, dosimetria, biológica, agrícola, ambiental e industrial (BHANDAL; SINGH, 1993).

Na literatura podem ser encontrados estudos de parâmetros de interação da radiação (*e.g.* coeficiente de atenuação de massa e número atômico efetivo) tanto em solos quanto em minerais naturais. As análises destes parâmetros podem ser desenvolvidas de diversas formas, como por exemplo via: aparatos experimentais, onde são utilizadas fontes radioativas (*e.g.* ^{241}Am e ^{137}Cs) (ALAM *et al.*, 2001; HAN *et al.*, 2009); e de simulações computacionais (UN; SAHIN, 2012), neste caso sendo necessário o conhecimento prévio da composição química das amostras analisadas, ou a partir do método de Monte Carlo (TARIM *et al.*, 2013), por exemplo. Em Costa *et al.* (2014) e Medhat *et al.* (2014), pode ser visto que os resultados obtidos por meio de simulações através do programa XCOM ou do código GEANT4 possuem uma boa correlação com os resultados obtidos via aparatos experimentais, mostrando que as simulações dos parâmetros sejam alternativas práticas, viáveis e seguras para a análise e obtenção de dados da interação da radiação com a matéria.

Comumente são analisados e comparados valores como os de coeficiente de atenuação de massa e número atômico efetivo de solos com diferentes composições, em uma determinada faixa de energia, onde são vistos que amostras que possuem predominantemente elementos com alto valor de número atômico (*e.g.* ferro e titânio) portam paralelamente parâmetros de interação com valores mais altos (CESAREO *et al.*, 1994; MEDHAT *et al.*, 2014). Com isso, são vistos que solos descritos com textura arenosa, ou seja, que dispõe predominantemente do elemento silício (com número atômico baixo) revelam a tendência de possuírem valores mais baixos de coeficientes de atenuação de massa quando comparado a solos com textura argilosa – onde comumente são encontrados óxidos de titânio e ferro em uma maior quantidade.

3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Para encontrar a textura do solo, sua densidade de partícula, composição química e os seus parâmetros de interação existem diferentes meios e técnicas.

3.1 ANÁLISE TEXTURAL

A textura do solo pode ser determinada por meio de duas maneiras distintas: análise qualitativa ou do teste de laboratório. Por meio da análise qualitativa, a textura é feita pela sensibilidade do tato, por exemplo: solos com sensações mais ásperas denotam possuir uma maior quantidade de areia, enquanto os com sensações mais pegajosas tendem a ser mais argilosos; por se tratar de algo que depende apenas da sensibilidade ao toque, o teste de campo resulta em conclusões mais subjetivas e expostas a uma maior probabilidade de erros. O teste em laboratório busca encontrar a distribuição quantitativa das partículas da terra fina, podendo afirmar, com uma menor exposição ao erro, se o solo possui, por exemplo, uma característica mais arenosa ou argilosa. Este teste de laboratório é conhecido como análise textural.

A análise textural, ou granulométrica, pode ser dividida basicamente em três processos: pré-tratamento, dispersão e separação das frações do solo. O pré-tratamento tem por finalidade a remoção de agentes cimentantes (*e.g.* matéria orgânica) que podem afetar na fase de dispersão e estabilização do solo. A dispersão visa a destruição dos agregados (TAVARES FILHO, 2016), que pode ser feita de maneira mecânica por meio da agitação, química a partir de dispersantes (*e.g.* hidróxido de sódio) ou a partir das duas formas combinadas. A fase final, de separação das frações, é feita a partir de processos de tamisação e sedimentação.

A fração de maior diâmetro da terra fina, areia, é separada através de uma tamiz, enquanto as frações menores, silte e argila, são separadas através do processo de sedimentação. A sedimentação é baseada na Lei de Stokes, onde Tavares Filho (2016) nos traz que [...] a velocidade de queda (sedimentação) de um material sólido em um líquido ocorre de acordo com seu diâmetro (esférico) e a viscosidade do líquido p.(28).

Para fazer uso da Lei de Stokes partimos das seguintes considerações (FERREIRA, 2010; TAVARES FILHO 2016):

- as partículas são consideradas esféricas;
- todas as partículas apresentam a mesma densidade;
- a queda das partículas dentro da proveta deve ocorrer de forma independente, sem interação entre elas;

- não pode existir gradiente de temperatura dentro da proveta para não afetar, assim, a viscosidade e a densidade do líquido;
- as partículas são suficientemente grandes para não serem afetadas pelos movimentos térmicos das moléculas do fluido.

Fazendo uso destas aproximações na Lei de Stokes, podemos escrever o tempo de sedimentação da partícula da seguinte forma:

$$t = 18 \frac{h\eta}{gD_p^2(\rho_p - \rho_L)} \quad (3.1)$$

onde t (s) e h (cm) são o tempo e altura de sedimentação, g é a aceleração da gravidade local ($= 978 \text{ cm/s}^2$), D_p é o diâmetro máximo da partícula da qual se deseja conhecer o tempo de sedimentação², ρ_p é a densidade de partícula, η e ρ_L são a viscosidade e a densidade do fluido (*e.g.* água destilada), respectivamente.

A análise granulométrica pode ser efetuada por meio de duas formas: método da pipeta e método do hidrômetro. No método da pipeta é retirada uma alíquota da suspensão, onde espera-se que haja apenas a fração argila, a partir de uma profundidade e tempo pré-determinados. No método do hidrômetro é relacionado a densidade do líquido, tempo de leitura e temperatura à fração que está em suspensão (silte e argila) (EMBRAPA, 1997).

Após a obtenção das frações, ou de uma alíquota delas, é possível realizar a classificação textural do solo a partir de 13 classes. A classificação é feita por meio da porcentagem de cada fração granulométrica do solo e identificadas no triângulo textural. Como, por exemplo, na Figura 3.1 temos a classificação de um solo que apresenta 60% de areia, 30% de silte e 10% de argila, sendo então classificado como um solo com textura Franco Arenosa.

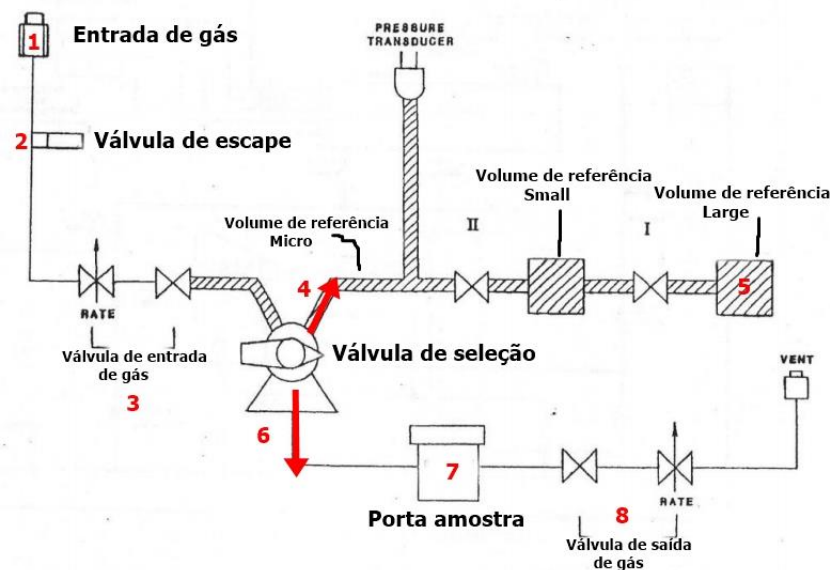
² Ao fim do trabalho, no anexo B, temos a apresentação dos valores aproximados das partículas.

assim penetrar mais facilmente nos poros das amostras. A partir de considerações feitas na Equação de Clapeyron para encontrar o V_p , chegamos que o cálculo para a densidade de partícula será dado por:

$$\rho_p \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{m_p}{V_C - V_R \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right)} \quad (3.3)$$

onde $V_C \cong 149,4 \text{ cm}^3$ é o volume do porta amostra e $V_R \cong 89 \text{ cm}^3$ é o volume de referência (ambos sendo valores de calibração do equipamento) e m_p é a massa da amostra. O esquema de funcionamento do equipamento Multipiquinômetro e leitura das pressões pode ser visto na Figura 3.2.

Figura 3. 2 - Esquema do funcionamento do equipamento Multipiquinômetro MVP – D160 – E. Após zerada a pressão interna, com abertura da válvula de escape, o gás hélio 1) entra pelo equipamento, passando pela 2) válvula de escape (agora fechada) a partir da abertura da 3) válvula de entrada de gás, com a válvula de seleção inicialmente sendo 4) direcionada para o 5) volume de referência (V_R), neste ponto é marcada a primeira pressão (P_1). Logo após a medida, a válvula de seleção então é 6) direcionada para o porta amostra (V_C), onde então é feita a segunda leitura de pressão (P_2). Em seguida o equipamento tem novamente sua pressão zerada a partir da 7) válvula de saída de gás.



Fonte: Adaptado de Quantachrome Instruments (2009).

3.3 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A técnica de Espectroscopia de Fluorescência de Raios X é baseada na medida das intensidades de raios X característicos emitidos pelos elementos químicos que compõe a amostra, quando devidamente excitada (NASCIMENTO FILHO, 1999) por raios X com quantidades de energias apropriadas (ARAÚJO, 2018). Os raios X característicos são formados

por meio da transição dos elétrons orbitais de átomos no material alvo entre estados de energia associados com a ionização das camadas atômicas internas (GRIEKEN; MARKOWICZ, 2002).

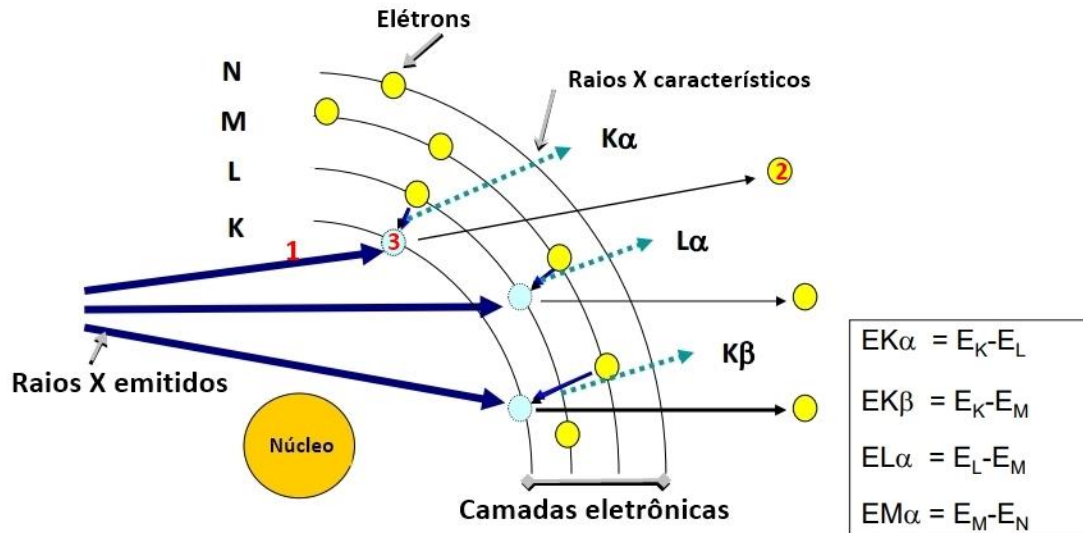
O processo da emissão dos raios X característicos inicia-se a partir da produção dos raios X em um tubo de vácuo (*e.g.* diodo), com um filamento metálico (*e.g.* cátodo) que quando aquecido emite elétrons termiônicos que são acelerados a partir de uma alta diferença de potencial e que ao se chocar no alvo (*e.g.* ânodo), também metálico, são desacelerados, emitindo assim os raios X (ALMEIDA, 2015). Uma vez que o feixe de raios X emitido possui uma energia muito alta, ao incidir sobre uma amostra provoca a excitação dos elétrons de seus átomos, atingindo diretamente os de níveis de maior energia que ao serem excitados são completamente arrancados do interior de seus átomos, deixando em seu lugar um buraco (vacância). Como pode ser visto na Figura 3.3, em busca de suprir esta vacância, os elétrons presentes nas camadas superiores transitam e ocupam o buraco, este trânsito resulta na emissão de raios X característicos, de energia característica, cujo valor depende da diferença da energia de ligação do elétron nos dois níveis quânticos (LOPES, 1993; NASCIMENTO FILHO, 1999). Esta energia está relacionada com o comprimento de onda emitida (SERWAY *et al.*, 2005):

$$E = hv = h\frac{c}{\lambda} \quad (3.4)$$

onde E (eV) e λ (nm) são respectivamente os valores da energia e do comprimento de onda dos raios X característicos, h a constante de Planck ($eV \cdot s$), v a frequência de vibração ($1/s$) e c a velocidade da luz no vácuo (m/s^2).

Cada elemento pode ser identificado por meio da fluorescência dos raios X característicos por consequência de conterem orbitais eletrônicos de energia característica, fazendo com que a transição realizada por um elétron de uma camada externa, para ocupar a vacância do elétron ejetado, será representativo de cada elemento. Os raios X característicos são nomeados a partir da camada para onde o elétron transita, seguido de uma letra grega que indica por quantos orbitais o elétron decaiu (CULLITY, 1978), por exemplo: a transição K_α indica que o elétron estava no orbital L e passou para o orbital K; a transição K_β indica que o elétron passou de M para K; L_α indica a transição de M para L; mais exemplos de transições podem ser vistas na Figura 3.3.

Figura 3. 3 - Processo de formação dos raios X característicos. Onde se inicia com a emissão de raios X primários (1), seguindo da ejeção do elétron da sua camada criando um buraco (2), onde então um elétron de maior energia transita até a vacância emitindo os raios X característicos (3). A energia emitida do raio X característico irá depender dos níveis eletrônicos para os quais o elétron irá transitar, como demonstrado no quadro à direita.



Fonte: Adaptado Rigaku, 2014.

Há duas formas de se analisar os raios X característicos: através da XRF por dispersão de comprimento de onda (WDX) ou por dispersão de energia (EDX). Na WDX-XRF usam-se cristais que difratam os raios X característicos a partir de seus comprimentos de onda, obedecendo a Lei de Bragg, permitindo analisar a composição química dos materiais (SANTOS *et al.*, 2013). Equanto, na EDX-XRF, o feixe dos raios X característicos é direcionado a um detector de estado sólido que produz uma distribuição contínua de sinais de tensões proporcionais às energias dos fótons detectados (PRANDEL, 2015).

3.4 PARÂMETROS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Um dos parâmetros mais importantes para o estudo da interação da radiação com a matéria é o coeficiente de atenuação.

Quando fótons de raios X ou gama interagem com um material de espessura x (cm), eles são transmitidos seguindo a Lei de Beer-Lambert (KAPLAN, 1977):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.5)$$

onde I_0 e I são as intensidades do feixe de radiação incidente e transmitida pelo material, respectivamente. O parâmetro μ é o coeficiente de atenuação linear (1/cm), que mede a

probabilidade de um fóton ser atenuado por unidade de comprimento (PIRES, 2018); rearranjando a Eq. (3.5) temos que:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right). \quad (3.6)$$

Devido a dependência de μ com a densidade do material absorvedor (ρ em g/cm^3), seus valores não costumam ser tabelados (NELSON; REILLY, 1991), materiais de mesma composição, mas em diferentes estados irão apresentar diferentes valores de μ , por exemplo: o valor de μ para a água líquida e gelo serão diferentes. Para evitar essa dependência temos o coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) (SILVA, 2012):

$$\frac{\mu}{\rho} (cm^2/g) = \frac{1}{\rho x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right). \quad (3.7)$$

Para materiais multi-elementares assume-se a contribuição do valor do μ/ρ de cada elemento que constitui o material (PIRES, 2018):

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i W_i \quad (3.8)$$

onde $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ representa o coeficiente de atenuação de massa do i -ésimo termo. Para compostos e misturas, a fração peso W_i do i -ésimo termo é escrita como sendo:

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum_j n_j A_j} \quad (3.9)$$

onde A_i é a massa atômica do i -ésimo elemento (g/mol), n_i o número de unidades de fórmula e $\sum_j n_j A_j$ é a soma da massa atômica e número de fórmula dos elementos do material. Por exemplo, o quartzo (ou óxido de silício, SiO_2) possui um número de fórmula igual a três – um átomo de silício e dois de oxigênio.

O valor do μ/ρ total é resultante da contribuição dos diferentes efeitos parciais de interação quando fótons interagem com um determinado material:

$$\frac{\mu}{\rho} (C,IC,PE,PP) = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_C + \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{IC} + \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{PE} + \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{PP} \quad (3.10)$$

onde C, IC, PE e PP indicam, respectivamente, os μ/ρ referentes aos efeitos: espalhamento coerente (Rayleigh), espalhamento incoerente (Compton), efeito fotoelétrico e produção de

pares. Cada efeito parcial pode ser escrito em termos das suas seções de choque (cm^2) (ATTIX, 1986; KAPLAN, 1997):

$$\frac{\mu}{\rho} (IC,PE,PP) = \frac{N_A}{A} \sigma_{(IC,PE,PP)} \quad (3.11)$$

$$\frac{\mu}{\rho(C)} \propto \frac{Z}{(h\nu)^2} \quad (3.12)$$

onde N_A é o número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23} \text{ 1/mol}$), A é massa atômica, σ_{IC} , σ_{PE} e σ_{PP} são as seções de choque para cada efeito e Z é o número atômico. Com isso podemos também escrever μ/ρ total em termos das seções de choque (MOREIRA; APPOLONI, 2006):

$$\frac{\mu}{\rho_{(total)}} = \frac{N_A}{A} \sigma_{total} \quad (3.13)$$

onde σ_{total} é a soma das contribuições das seções de choque parciais.

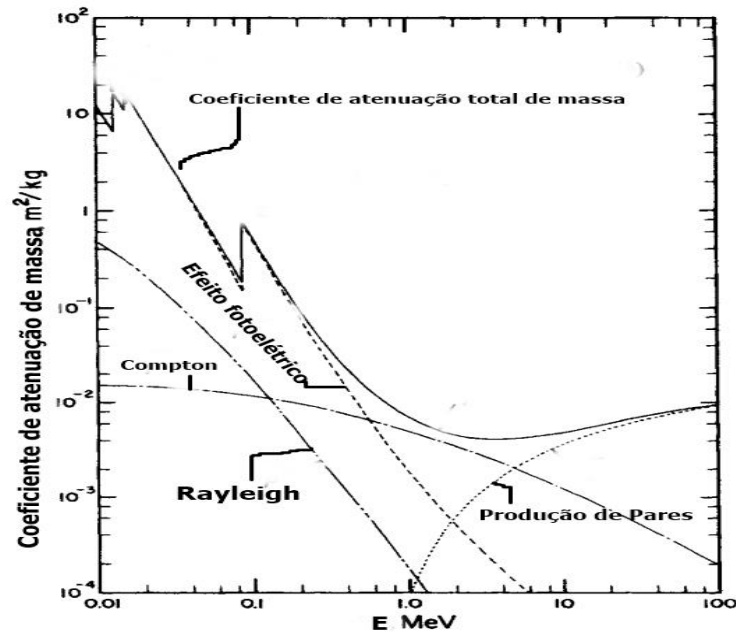
As seções de choque são dependentes dos valores de Z e da energia do fóton incidente (Quadro 3.1), conseqüentemente a probabilidade de ocorrência de cada efeito também será dependente destes mesmos valores. O efeito Rayleigh e o efeito fotoelétrico são predominantes para faixas de baixas energias, o efeito incoerente têm predominância nas faixas intermediárias e a produção de pares para a faixa de altas energias (Figura 3.4), tendo em vista que para a ocorrência da produção de pares é necessário que o fóton tenha no mínimo $1,022 \text{ MeV}$ de energia (YOSHIMURA, 2009; ATTIX, 1986; KAPLAN, 1997).

Quadro 3. 1 - Dependência dos processos de interação da radiação com a matéria em função do número atômico (Z) e da energia do fóton (E) incidente.

Processo de interação	Dependência de Z	Região de energia dominante
Espalhamento Coerente	$Z^2 - 3$	$< 30 \text{ keV}$
Efeito Fotoelétrico	Z^{4-5}	$< 30 \text{ keV}$
Espalhamento Incoerente	Linear	$150 \text{ keV} < E < 3 \text{ MeV}$
Produção de pares:		
Núcleo	Z^2	$> 50 \text{ MeV}$
Campo elétrico	Linear	

Fonte: Adaptado de Appoloni e Rios (1994).

Figura 3. 4 - Contribuição dos efeitos parciais no μ/ρ em função da energia (E) para o aço.



Fonte: Adaptado de Attix (1986).

A importância de cada um destes processos possui dependência direta com o número atômico do absorvedor (KAPLAN, 1977; NELSON; REILLY 1991), no entanto, como o solo se trata de um meio heterogêneo, não podemos considerar um único número atômico em todo processo de interação, com isso é utilizado o chamado número atômico efetivo (Z_{eff}). O Z_{eff} é um parâmetro que varia com a energia do fóton dependendo dos processos de interação envolvidos, estando estritamente relacionado à densidade eletrônica (N_{el}) (MANOHARA *et al.*, 2008).

Durante o processo de interação da radiação com a matéria o fóton pode interagir de três formas principais com o material, sendo estas interações chamadas seções de choque: molecular (σ_m), atômica (σ_a) e eletrônica (σ_e)³. A interação do fóton em nível molecular é dada por (PIRES, 2018):

$$\sigma_m (b/molécula) = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{M}{N_A} \right) \quad (3.14)$$

onde M (g/mol) é a soma dos pesos moleculares da mistura e pode ser calculado a partir do número de unidades de fórmula e suas respectivas massas atômicas:

$$M = \sum_i n_i A_i. \quad (3.15)$$

³ 1 b (barn) = 10^{-24} cm^2 .

A interação do fóton em nível atômico é escrita em função da seção de choque molecular e da soma do número de unidades de fórmula da mistura ($\sum_i n_i$):

$$\sigma_a(b/\text{átomo}) = \sigma_m \left(\frac{1}{\sum_i n_i} \right) \quad . \quad (3.16)$$

E por fim, a interação em nível eletrônico é dada por:

$$\sigma_e(b/\text{elétron}) = \frac{1}{N_A} \left(\sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \right) \quad (3.17)$$

onde Z_i é o número atômico do i -ésimo elemento da mistura e f_i é a sua abundância fracional na molécula, e pode ser calculada a partir de:

$$f_i = \frac{n_i}{\sum_j n_j} \quad (3.18)$$

onde $\sum_j n_j$ é o número total de átomos na fórmula. A abundância fracional do elemento em uma molécula pode também ser calculada a partir de:

$$f_i = \left(\frac{n A}{M} e\% \right)_i \quad (3.19)$$

onde $e\%$ é a porcentagem que a molécula representa no material e n é o número de átomos que o elemento possui na molécula. Por exemplo, considerando um solo que contenha 90% de SiO_2 ($e\%$) e queremos saber a abundância fracional do silício (Si) no solo: primeiramente calculamos o peso molecular do SiO_2 ($M = 60,0838 \text{ g/mol}$), e sabendo que a massa atômica (A) do silício é igual a $28,085 \text{ g/mol}$, obtemos a abundância fracional do silício no solo sendo igual a aproximadamente 0,42.

Tendo conhecimento das seções de choque é possível encontrar o número atômico efetivo do material para uma determinada faixa de energia (MEDHAT, 2012):

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad . \quad (3.20)$$

A densidade eletrônica N_{el} (número de elétrons por unidade de massa, com unidade de medida de $\text{elétrons} \times 10^{24}/\text{g}$) de um material pode ser escrita em função do Z_{eff} :

$$N_{el} = \frac{(\mu/\rho)}{\sigma_e} = \left(\frac{Z_{eff}}{M} \right) N_A \sum_i n_i \quad . \quad (3.21)$$

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a caracterização e estudo das propriedades das amostras de solo da região do Parque Estadual da Serra Dourada foram utilizadas análises físicas, elementar e de simulações de interação da radiação com a matéria. Este capítulo segue de modo sequencial a explicação da metodologia de cada técnica utilizada neste trabalho para o estudo de amostras de solos do interior da caverna Abrigo da Areia Solta.

4.1 SOLOS

No interior de uma caverna do tipo abrigo, chamada Abrigo da Areia Solta (também conhecida como Gruta da Coruja), localizada no Parque Estadual da Serra Dourada – Mossâmedes – GO – BR (com coordenadas 16°04'56.3" S, 50°11'17.9" W, indicado na Figura 4.1), com as imagens locais presentes na Figura 4.2, foram pré-classificadas⁴, pelo grupo de espeleologia Pequi Espeleogruppo da Universidade Federal de Goiás (UFG), amostras coletadas em zonas específicas de maneira pontual e superficial (com 0-5 cm de profundidade, horizonte A) das regiões de entrada, centro e lateral da caverna. Neste trabalho estas zonas de coleta serão chamadas de A, B e C respectivamente, como indicado na Figura 4.3. A amostra A indicava presença de matéria orgânica, enquanto a C indicava ser um arenito erodido.

Figura 4. 1 - Localização de coleta do Abrigo Areia Solta no: A) Estado de Goiás – Brasil (1:500 km); B) Parque Estadual da Serra Dourada (1:2 km).



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021).

⁴ A ficha de pré-descrição das zonas de coleta do solo pode ser vista ao final deste trabalho no ANEXO C.

Figura 4. 2 – Interior da caverna Abrigo da Areia Solta com a indicação aproximada das zonas de coleta das amostras de solos.



Fonte: Arquivo pessoal de Vladia Correchel.

Figura 4. 3 - Croqui do Abrigo da Areia Solta com suas respectivas zonas de coleta e amostras coletadas.



Fonte: Adaptado do arquivo pessoal de Renata Santos Momoli.

Com o Abrigo da Areia Solta integrando a formação geológica do Grupo Araxá, o Pequii Espeleogrupo considerou a provável classificação do solo sendo um Neossolo Litólico, com material de origem Quartzito ou Quartzo-Xisto.

4.2 TERRA FINA SECA AO AR

A primeira etapa de análise e caracterização das amostras procedeu-se via fragmentação manual dos solos, por meio do processo de tamisação, separando os cascalhos da terra fina (a partir da escala Atterberg).

O processo foi realizado no laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), onde foi utilizada uma peneira com malha de abertura de 2 mm, da marca Bertel. Cada uma das amostras foi tamisada integralmente, até que restassem apenas cascalhos, folhas e sementes na parte superior da peneira, como pode ser visto na Figura 4.4a. Logo após, a terra fina foi colocada em placas de petri (Figura 4.4b) e levada para a secagem em estufa (da marca Nova Etica) com circulação forçada de ar, por 48 h a 40°C, evitando a queima e a modificação das propriedades físicas e químicas dos minerais (YNAGUISAWA, 2019), sendo então atribuída agora a nomenclatura de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Figura 4. 4 - A) Cascalhos na parte superior da tamiz; B) Terra fina antes de ser levada ao processo de secagem.



Fonte: A autora.

4.3 DENSIDADE DE PARTÍCULAS

Com a obtenção da TFSA foi possível dar início às medidas de ρ_p . A ρ_p foi obtida através da técnica de picnometria a gás, fazendo uso de um cilindro de gás Hélio com seu registro regulador vinculado a um Multipicnômetro MVP – D160 – E, da marca Quantachrome

Instruments, localizado no laboratório de Caracterização Físico-Química do Grupo de Pesquisa em Materiais Estruturais e Funcionais da UEPG (Figura 4.5).

Figura 4. 5 - Multipiquinômetro MVP – D160 – E com cilindro de gás hélio vinculado.

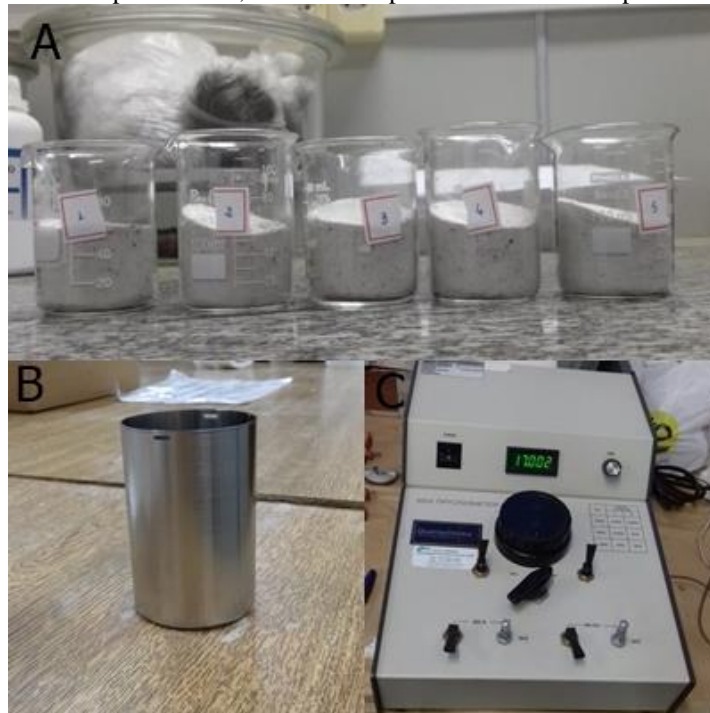


Fonte: Yanaguisawa (2019).

Antecedendo a realização da medida da ρ_p , houve a separação, limpeza e nomenclatura de 5 béqueres para cada uma das três amostras de solo analisadas, totalizando 15 béqueres. Foram adicionados cerca de 80 g de TFSA em cada um dos béqueres, como mostrado na Figura 4.6a. Em cada ciclo de análise a quantidade presente em um béquer era transferida para o porta amostra do equipamento (tendo sido utilizado o tamanho *large*) (Figura 4.6b) e, por conseguinte, inserido no Multipiquinômetro.

Previamente a câmara de gás do equipamento foi esvaziada, de modo com que se zerasse a pressão interna e, em seguida, o Multipiquinômetro foi ligado e o registro do cilindro de gás aberto, até que alcançasse aproximadamente 20 *psi*. Por continuidade, a válvula de entrada de gás interna do equipamento foi aberta para que se chegasse a uma pressão num valor maior ou igual de 17 *psi* (P_1) (Figura 4.6c), logo após esta pressão foi direcionada para a câmara onde estava presente o porta amostra (P_2), notando-se assim uma variação de pressão. Foram realizadas 8 leituras de pressão para cada ciclo de análise, obedecendo um tempo de leitura de aproximadamente 2 *min* para que houvesse uma melhor estabilização do gás.

Figura 4. 6 - A) Amostras de 80g de TFSA da amostra de solo C; B) Porta amostra do equipamento, de tamanho *large*; C) Equipamento utilizado para análise, demarcando pressão interna de 17 psi.



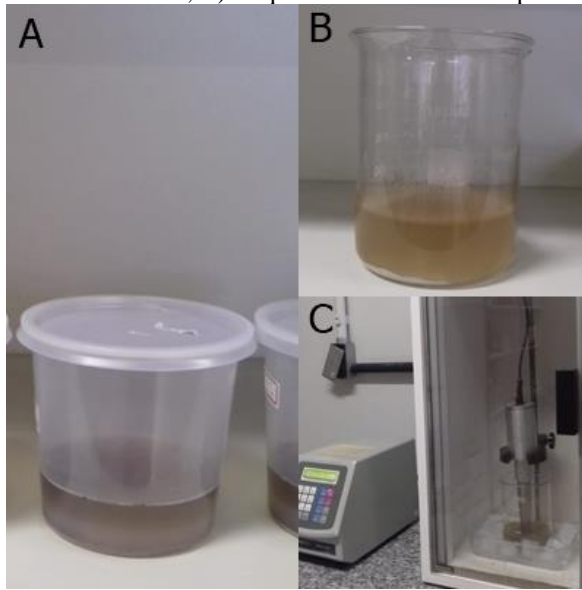
Fonte: A autora.

4.4 ANÁLISE TEXTURAL

Em sequência ao fracionamento físico realizado com a tamiz de 2 mm, a TFSA pode ser separada nas três principais frações do solo: areia, silte e argila (na escala Atterberg).

Nesta etapa, também realizada no laboratório do FASCA-UEPG, a análise foi feita em quadruplicata para A, B e C. As amostras foram previamente separadas através da mistura de: 20 g de TFSA para 10 mL de hidróxido de sódio (*NaOH*) e 100 mL de água destilada, em um pote plástico (Figura 4.8a). Após cerca de 12 h em repouso, a suspensão foi transferida a um béquer de vidro e, em seguida, foi adicionada água destilada até que se completassem 300 mL (Figura 4.8b). O béquer então foi levado até o ultrassom (Vibra-Cell, da marca Sonic), em banho de gelo, por 5 min em uma amplitude de 25% (Figura 4.8c).

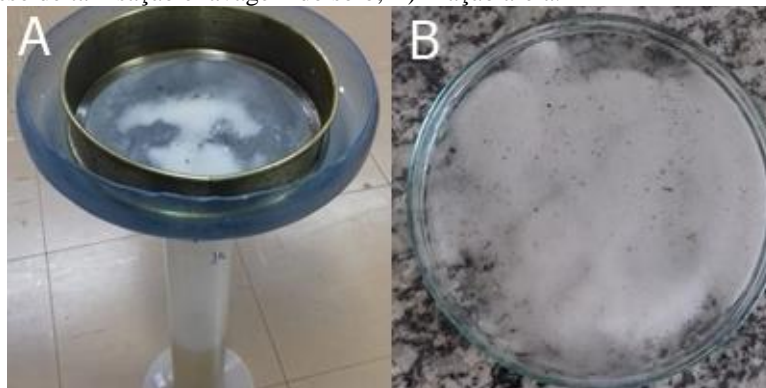
Figura 4. 7 - A) Suspensão da amostra de solo C; B) Béquer de vidro com a suspensão; C) Ultrassom.



Fonte: A autora.

Tendo finalizado o processo no ultrassom, a suspensão foi transferida para uma proveta, passando primeiramente por uma tamiz de $53 \mu\text{m}$ (marca Bertel), como indicado na Figura 4.9a. Com ajuda de um pulverizador, preenchido com água destilada, foi realizado o processo de lavagem de todo material que ficou retido na peneira, tendo como limite de volume máximo de água utilizada na lavagem de 1 L. Para o auxílio da lavagem da fração areia, foi utilizado a tamiz no interior de um funil de modo com que houvesse uma maior precisão no volume máximo de água utilizada, assim como também uma redução da perda de material da fração argila e silte. Todo material retido, considerado como sendo a fração areia, foi transferido para uma placa de petri (de massa conhecida) (Figura 4.9b) e levado à estufa a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ para a secagem, por aproximadamente 48 h.

Figura 4. 8 - A) Processo de tamisação e lavagem do solo; B) Fração areia.



Fonte: A autora.

Se a lavagem da fração areia não completasse 1 L na proveta, então era adicionada a quantidade suficiente de água destilada para que se alcançasse este volume. A partir deste momento, a solução passou a possuir apenas a fração silte e argila.

O fracionamento das frações silte e argila é feito através do processo de sedimentação, com o tempo sendo calculado a partir da Eq. (3.1), onde no cálculo foram feitas as seguintes considerações:

- $h = 1,6 \text{ cm}$;
- $g = 978 \text{ cm/s}^2$;
- $D_p = 2 \times 10^{-3} \text{ cm}$;
- ρ_p obtida a partir da análise descrita anteriormente;
- $\eta = 8,94 \times 10^{-4} \text{ g/cm s}$;
- $\rho_L = 1 \text{ g/cm}^3$;

onde η e ρ_L foram obtidos a partir da temperatura no momento inicial e final da análise.

Por conta de ter sido utilizado, como floculante, a solução de *NaOH* (1 mol/L) na suspensão foi necessário considerar a existência do branco. Em uma proveta foi inserido 10 mL de *NaOH* e então foi preenchida com água destilada até alcançar o volume de 1 L (Figura 4.10a). O tempo de sedimentação do branco equivale ao da fração silte que está sedimentando no mesmo instante.

A partir do fim da agitação da solução da proveta (Figura 4.10b), o tempo de sedimentação começou a ser cronometrado e quando chegou ao fim, com a ajuda de uma pipeta, foi retirada a solução equivalente a uma alíquota de 1/20 da suspensão (Figura 4.10c,d) e colocada em uma placa de petri, de massa conhecida (Figura 4.10e), sendo então levada à estufa para a secagem. Esta fração coletada é denominada como fração argila do solo.

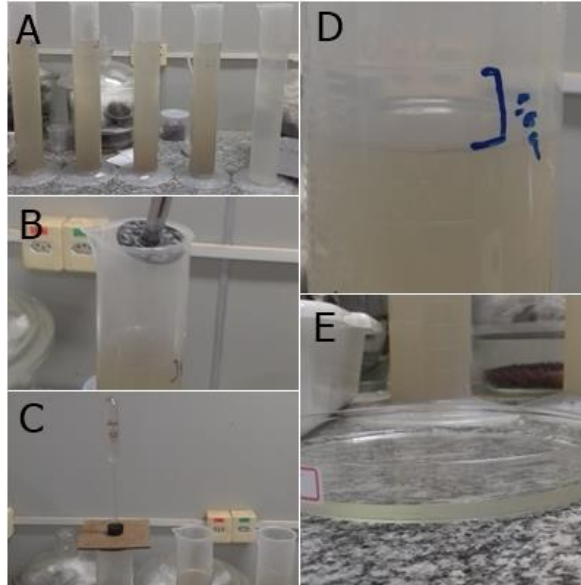
Após a secagem, as massas (m , em g) das frações areia, argila e dispersante (branco) foram medidas, para que fosse possível calcular a porcentagem de cada fração presente no solo ($T\%$). Para este cálculo foi utilizado (DONAGEMMA *et al.*, 2017):

$$T_{\% \text{ areia}} = m_{\text{areia}} \cdot 5 \quad (4.2)$$

$$T_{\% \text{ argila}} = (m_{\text{argila+dispersante}} - m_{\text{dispersante}})100 \quad (4.3)$$

$$T_{\% \text{ silte}} = (100 - T_{\% \text{ areia}} - T_{\% \text{ argila}}) \quad (4.4)$$

Figura 4. 9 - A) Provetas após o término da lavagem da areia e preenchidas até 1 L e proveta do branco; B) Agitação da solução; C) Coleta da fração argila por meio de um suporte adaptado para a pipeta; D) Altura da coleta da alíquota de 1/20 da solução; E) Placa de petri com a fração argila.



Fonte: A autora.

4.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA

Visando determinar os elementos que compunham as amostras de solo foi feita a análise elementar por meio da técnica de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (EDX-XRF), realizada no laboratório de Física Computacional do grupo FASCA-UEPG. O equipamento utilizado para a realização das medidas foi o Espectrômetro de Raios X por Dispersão de energia (EDX – 720) da marca Shimadzu (Figura 4.11).

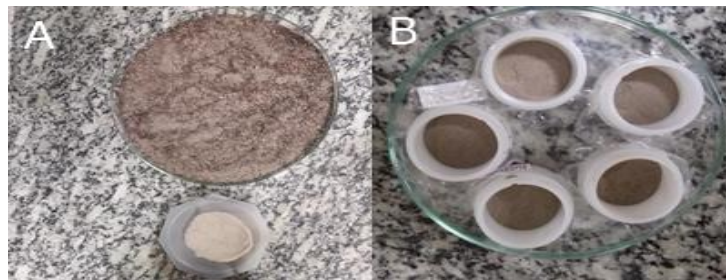
Para o preparo das amostras, previamente uma quantidade de aproximadamente 2 g de TFSA foi macerada em almofariz com pistilo de ágata e tamisada em uma peneira de malha de 45 μm (Figura 4.12a), da marca Bertel, e em seguida foi colocada em porta amostras de modo que cobrisse todo o fundo dos mesmos (Figura 4.12b). Esta análise foi realizada em quintuplicata para cada uma das zonas de coleta das amostras.

Figura 4. 10 - Equipamento EDX – 720, da marca Shimadzu, local onde ficam localizados os porta amostras.



Fonte: A autora.

Figura 4. 11 - A) TFSA antes e depois de ser macerada; B) Porta amostra do equipamento preenchido com a TFSA macerada.



Fonte: A autora.

O equipamento foi ajustado para operar na faixa de energia que compreende os elementos sódio a escândio (Na - Sc), com tensão de 15 *kV*, e de titânio a urânio (Ti - U), com tensão de 50 *kV*. As análises de cada amostra foram feitas de maneira semiquantitativa com tempos de medida de 100 segundos em cada faixa de energia, no modo ar.

Os elementos que foram detectados em apenas uma das cinco amostras de cada zona, ou que apresentaram um valor no fator de 10^{-3} , foram descartados através da distribuição de frequência, onde o peso da porcentagem do elemento descartado foi distribuído, de maneira ponderada, entre os elementos que continuaram sendo considerados:

$$\text{distribuição de frequência} = \frac{\text{elemento não descartado}}{1 - \sum \text{elementos descartados}} \quad . \quad (4.5)$$

Por exemplo, tendo um material sendo composto com 95% de silício, 3% de ferro, 1% de enxofre e 1% de cálcio; ao descartarmos o enxofre e cálcio a composição passará a ser aproximadamente 97% de silício e 3% de ferro.

4.6 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA



A partir do conhecimento da composição química das amostras, obtidas através da técnica de EDX-XRF, foi possível realizar o cálculo dos valores de coeficiente de atenuação de massa dos solos a partir do código computacional XCOM (Versão 1.5) (BERGER, 2010). O programa fornece dados sobre alguns dos processos de interação da radiação com a matéria (espalhamento incoerente, coerente, efeito fotoelétrico e produção de pares), em uma faixa de energia de 1 *keV* a 100 *GeV*, para elementos, misturas ou compostos que possuam número atômico variando de 1 a 100.

Para o uso da interface XCOM, primeiramente deve-se selecionar qual é o tipo de material que se pretende analisar (e.g. elemento, mistura ou composto), quais as faixas de energia e quais as energias adicionais (Figura 4.13). Após estas informações iniciais, deve-se inserir as fórmulas (ou elementos) seguidos de suas porcentagens (soma igual a 1). A opção de escolha da faixa de energia e a saída dos resultados em forma gráfica (Figura 4.14).

Neste estudo, o cálculo dos valores de μ/ρ foram feitos a partir da seleção do material do tipo mistura, em uma faixa de energia de 1×10^{-3} a 2 *MeV*, destacando quatro faixas de energias específicas (adicionadas manualmente), sendo elas: ^{241}Am (59,54 *keV*), ^{133}Ba (356 *keV*), ^{137}Cs (661,6 *keV*) e ^{60}Co (1330 *keV*). As energias selecionadas devem-se ao seu uso frequente em estudos da interação da radiação em solos (FERRAZ; MANSELL, 1979; VAZ et al., 1999).

Para a determinação de μ/ρ das amostras de solos, foram utilizados apenas os elementos que A, B e C apresentaram em comum, tendo sido realizado a análise de μ/ρ para cada uma das cinco medidas da EDX-XRF de cada amostra e suas médias.

Figura 4. 12 - Interface inicial do programa XCOM (Versão 1.5).

Element/Compound/Mixture Selection

In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:


[Help](#)

Identify material by:

Element
 Compound
 Mixture

Method of entering additional energies: (optional)

Enter additional energies by hand
 Additional energies from file (*Note: Your browser must be file-upload compatible*)



Fonte: Adaptado de NIST (2021).

Figura 4. 13 - Interface secundária do programa XCOM para inserção dos dados.

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:

H2O 0.9
NaCl 0.1

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

Dados da quantidade percentual de cada elemento ou composto

Optional output title:

<p>Graph options:</p> <p> <input checked="" type="checkbox"/> Total Attenuation with Coherent Scattering <input type="checkbox"/> Total Attenuation without Coherent Scattering <input type="checkbox"/> Coherent Scattering <input type="checkbox"/> Incoherent Scattering <input type="checkbox"/> Photoelectric Absorption <input type="checkbox"/> Pair Production in Nuclear Field <input type="checkbox"/> Pair Production in Electron Field <input type="checkbox"/> None </p>	<p>Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)</p> <p>Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <p>Faixas de energias específicas (opcional) <input checked="" type="checkbox"/> Include the standard grid</p> </div> <p>Energy Range:</p> <p>Minimum: <input style="width: 50px;" type="text" value="0.001"/> MeV</p> <p>Maximum: <input style="width: 50px;" type="text" value="100000"/> MeV</p>
---	--

Fonte: Adaptado de NIST (2021).

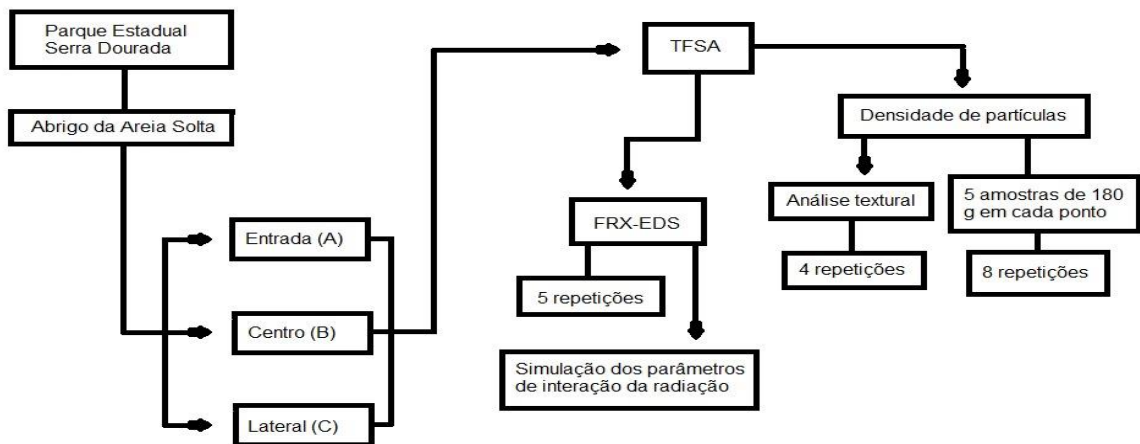
Sabendo agora o valor do μ/ρ das amostras de solo e de cada um dos elementos presentes nas amostras (estes também obtidos via XCOM, sendo utilizado a mesma faixa de energia e

energias específicas que foram utilizadas para as amostras de solo), foi possível realizar o cálculo dos valores das seções de choque atômica, molecular e eletrônica de cada um dos solos, a partir das Eqs. (3.14), (3.16) e (3.17), tendo sido preliminarmente efetuado o cálculo dos valores: do peso molecular dos elementos para cada uma das amostras e da abundância fracional – Eqs. (3.15) e (3.19). Nesta etapa foram pré-selecionados os coeficientes de atenuação de massa total (com efeito coerente) no intervalo de energia de 10 a 100 *keV* acrescentando as energias específicas das fontes escolhidas.

Ao possuir os valores das seções de choque de cada uma das amostras foi possível suceder o cálculo do número atômico efetivo e da densidade eletrônica a partir das Eqs. (3.20) e (3.21).

A partir do apresentado neste capítulo, temos na Figura 4.15 a representação, de maneira resumida, da metodologia utilizada neste trabalho com as técnicas desenvolvidas seguidas do número de repetições efetuadas em cada análise.

Figura 4. 14 – Fluxograma da metodologia utilizada partindo da região de coleta, separação e localização das zonas e técnicas de caracterização utilizadas com suas respectivas quantidades de repetições.



Fonte: A autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

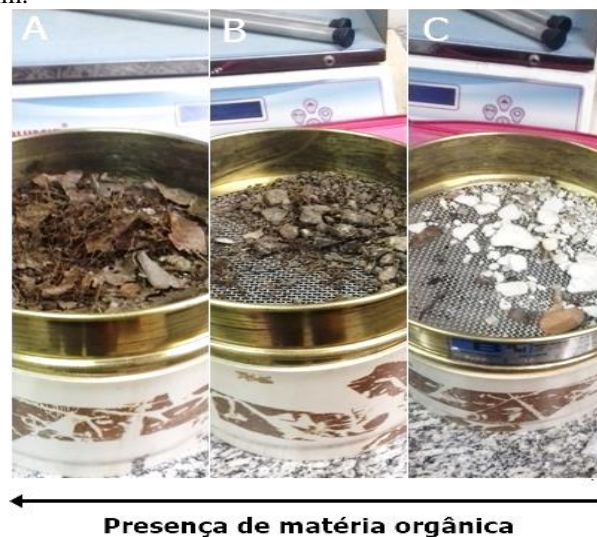
Neste capítulo serão apresentadas as discussões e suposições, embasadas no que foi apresentado no Capítulo 2, sobre os resultados das técnicas descritas no Capítulo 3 e 4.

As fórmulas empíricas, com estequiometria ideais, dos minerais utilizadas neste capítulo foram retiradas do site Webmineral (2021).

5.1 TERRA FINA SECA AO AR

Durante a separação da terra fina de A, B e C, foi possível notar visualmente a presença de uma grande quantidade de matéria orgânica em A, encontrando diversos tipos de sementes e pequenos galhos, reduzindo-se em B e tornando-se mínima em C, como pode ser visto na Figura 5.1. Ao ser tamisada a amostra de solo C restaram acima da peneira sedimentos maiores que 2 mm, mas que puderam ser desagregados facilmente, manualmente, de modo que passassem por completo pela peneira.

Figura 5. 1 - Diminuição da presença de matéria orgânica em A, B e C, respectivamente, com C apresentando sedimentos maiores que 2mm.



Fonte: A autora.

A maior presença de matéria orgânica em A e B pode ser explicada por conta de serem zonas que estão com um maior tempo de contato com a intempérie natural, ou seja, por serem regiões de entrada (A) e meio (B) da caverna estão mais expostos fazendo com que folhas, e outros tipos de materiais orgânicos, sejam depositados mais facilmente na região. Por sua vez, a zona de coleta C, descrita inicialmente como um arenito erodido, se desprendeu recentemente da sua rocha mãe, tendo uma relação de tempo menor com o restante da região.

Mesmo com as amostras de solo sendo tamisadas em 2 mm, alguns pequenos galhos continuaram presentes na TFSA, com isso, quando utilizada, eram retirados a maior quantidade possível destes galhos, com ajuda de uma pinça, para que não prejudicasse as análises conseguintes.

5.2 DENSIDADE DE PARTÍCULA

Após as amostras passarem pelo processo de TFSA, parte delas foram encaminhadas para análise de densidade de partícula, como descrito no Capítulo 4. Em seguida, após serem realizadas as 8 leituras para cada uma das 5 amostras de A, B e C, foi calculado as médias das 8 repetições. Posteriormente, foram calculadas as médias para as 5 amostras, de cada uma das zonas de coleta, e seus respectivos desvios padrão. O resultado desta média final pode ser visto na Tabela 5.1, onde é possível notar uma diminuição dos valores da ρ_p de C para A.

Tabela 5. 1 - Valor médio da densidade de partícula das amostras do solo A, B e C.

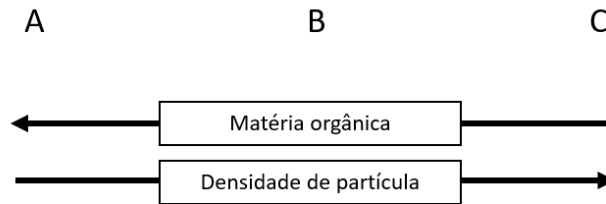
Amostras de solo	ρ_p (g/cm^3)
A	2,51 (0,02)
B	2,56 (0,01)
C	2,62 (0,03)

Fonte: A autora.

Notas: Os valores entre parênteses estão representando o desvio padrão da média.
Quantidade de leituras feitas para cada zona de coleta: 40

Tendo em vista que há uma indicação que C erodiu recentemente da sua rocha matriz quando foi coletado, sua composição mineralógica deverá estar mais próxima do seu material de origem. Como visto no Capítulo 2, há uma relação entre a densidade de partícula do solo com seu mineral predominante, e tendo conhecimento que o material de origem do solo é formado basicamente por Quartzitos e/ou Quartzitos Xistosos, é possível notar a proximidade das ρ_p - principalmente de C ($2,62 g/cm^3$) - com o valor da massa específica do Quartzo ($2,65 g/cm^3$). As zonas de coleta A e B apresentaram uma maior quantidade de matéria orgânica, em relação a C, tendo sua ρ_p reduzida com o aumento da matéria orgânica nas amostras do solo (Figura 5.2).

Figura 5. 2 - Com o aumento da matéria orgânica (percebido visualmente) no solo nota-se a diminuição da densidade de partículas.



Fonte: A autora

5.3 ANÁLISE TEXTURAL

Com o valor das ρ_p foi possível calcular os tempos de sedimentação da fração silte, a partir das considerações feitas nos Capítulos 2 - 4, para A, B e C. Nota-se, por meio dos dados expostos da Tabela 5.2, que quanto maior for a densidade de partícula do solo menor será o tempo de sedimentação. Com a finalização do processo de secagem das frações areia, argila e branco e a partir das Eq. (4.2), (4.3) e (4.4) foram calculadas as texturas de cada uma das zonas de coleta da caverna (Tabela 5.2).

A partir da Tabela 5.2 é possível observar a diminuição da fração areia e o aumento das frações argila e silte da amostra da zona de coleta C para A. Conforme foi discutido na secção anterior, C possui uma alta proximidade com o mineral Quartzo e, sabendo que a areia está estritamente ligada a este material, a fração com maior porcentagem para C é a da fração areia, sucedendo sua diminuição para B e A respectivamente. Paralelamente, a amostra C indica o valor do seu desvio padrão da média sendo igual ao valor da sua média calculada, podendo assumir assim a inexistência da fração argila em C.

Tabela 5. 2 - Média das porcentagens das frações areia, argila e silte encontradas para A, B e C, com seus respectivos tempos de sedimentação.

Amostras de solo	Frações granulométricas			<i>t</i> (min)
	Areia	Silte	Argila	
A	87,8 (0,6)	6,6 (0,5)	5,6 (0,6)	73
B	89,4 (0,3)	6,0 (0,9)	4,6 (0,7)	70
C	95,0 (0,5)	4,8 (0,5)	0,2 (0,2)	68

Fonte: A autora.

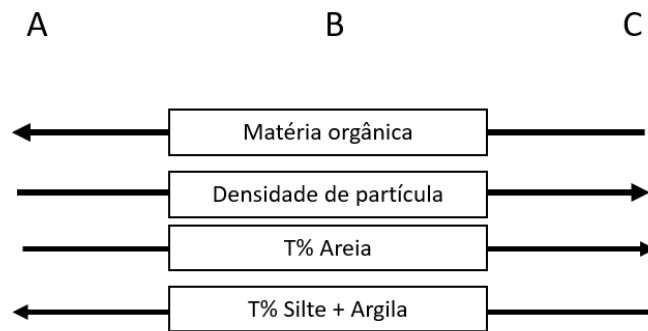
Notas: Os valores entre parênteses estão representando o desvio padrão da média.
Quantidade de leituras feitas para cada zona de coleta: 3

Segundo Kämpf e Curi (2012), o intemperismo físico associado ao químico auxilia no desenvolvimento mineralógico do solo, fazendo com que haja uma diminuição da fração areia e um aumento da fração argila (fração considerada a mais rica mineralogicamente por conta da

presença do desenvolvimento de minerais secundários). Com base nisso, e tendo em vista a coleta da erosão do arenito em C e que A e B apresentam um maior período de exposição sob ações de intemperismo biológico, podemos notar uma maior quantidade da fração argila nas regiões de entrada e meio da caverna (Figura 5.3).

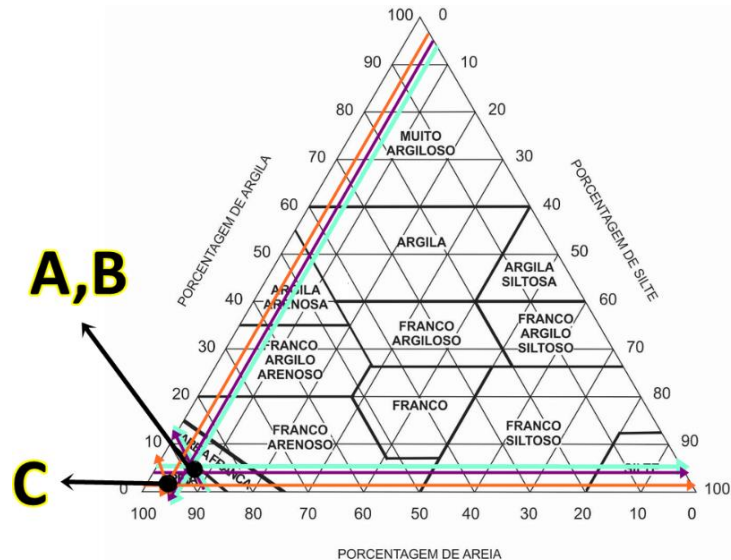
Através do diagrama textural, e das porcentagens das frações obtidas na análise granulométrica, foram obtidas as texturas de A, B e C sendo: Areia, indicado na Figura 5.4.

Figura 5.3 - Com o aumento da matéria orgânica no solo nota-se a diminuição na densidade de partícula e da fração areia, ao mesmo tempo em que há o aumento das frações argila e silte.



Fonte: A autora.

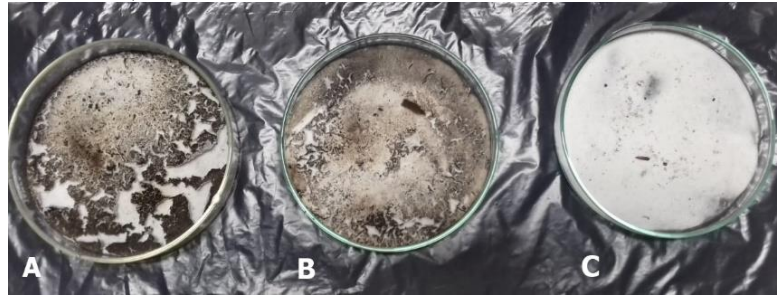
Figura 5.4 - Diagrama textural adotado pelo SBCS (2018), com a indicação da textura encontrada para cada uma das zonas de coleta.



Fonte: Adaptado de Tavares Filho (2016).

Visualmente, na Figura 5.5, é possível notar que mesmo após a: tamisação das amostras em TFSA, retirada dos resquícios de galhos e feita a separação das frações; ainda há a presença de matéria orgânica nas amostras, sendo C o que apresenta menor quantidade.

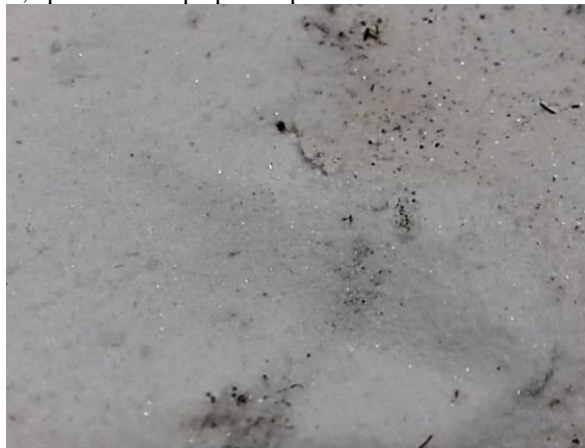
Figura 5. 5 - Frações areia de A, B e C.



Fonte: A autora.

Observando com mais precisão a fração areia de C, percebeu-se que quando movimentada a placa de petri onde estava contida a fração, pequenos pontos de luz (Figura 5.6). Essa característica levou à hipótese da possibilidade da existência de minerais do grupo mica nas amostras de solo, considerando que a bibliografia mostra que há a predominância de micaxistos nos solos da região do grupo Araxá, especificamente na Serra Dourada.

Figura 5. 6 - Fração areia de C, apresentando pequenos pontos de luz.



Fonte: A autora.

5.4 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA

A partir da análise elementar, feita através da técnica de EDX-XRF, foram obtidos valores qualitativos dos elementos que constituem a TFSA de A, B e C. Deste modo, quando forem citados possíveis minerais presentes nestas amostras será apenas por meio de hipóteses levantadas a partir de dados encontrados na literatura que corroboram com os elementos encontrados nas amostras de solo.

Os elementos obtidos na técnica de XRF-EDX estão expostos na Tabela 5.3.

Tabela 5. 3 - Média dos elementos encontrados nas amostras A, B e C através da técnica de XRF-EDX.

Elementos (w%)	Amostras de solo		
	A	B	C
Si	90,3 (2,4)	87,6 (0,8)	92,8 (2,2)
Al	5,3 (3,0)	8,8 (1,1)	3,9 (2,7)
K	2,0 (0,4)	1,7 (0,1)	1,4 (0,2)
S	1,0 (0,6)	0,6 (0,5)	1,0 (0,5)
Fe	0,8 (0,1)	0,7 (0,0)	0,6 (0,1)
Ti	0,3 (0,1)	0,2 (0,1)	0,1 (0,0)
Cs	0,1 (0,0)	0,1 (0,0)	0,2 (0,0)
Ca	0,03 (0,03)	0,01 (0,03)	-
Au	0,01 (0,01)	0,01 (0,01)	-
Cu	0,07 (0,12)	0,01 (0,01)	0,01 (0,01)
Ba	0,1 (0,2)	0,1 (0,2)	-
Zn	0,01 (0,01)	0,002 (0,005)	-
Ge	0,01 (0,01)	-	0,01 (0,01)
Sm	-	0,003 (0,006)	-
Ta	-	-	0,02 (0,02)

Fonte: A autora.

Notas: Os valores entre parênteses estão representando o desvio padrão da média.

Quantidade de leituras feitas para cada zona de coleta: 5

Os valores da Tabela 5.3 foram encontrados por meio da média dos elementos identificados nas 5 repetições de cada uma das amostras após o preparo, como descrito no Capítulo 4. Elementos como cálcio (Ca), ouro (Au), cobre (Cu), bário (Ba), zinco (Zn), germânio (Ge) e samário (Sm), mesmo tendo sido encontrados com uma fração peso baixa e desvio padrão da média acima ou igual ao valor da média calculada, foram considerados nesta secção visando a discussão dos minerais que podem ser encontrados na região de coleta das amostras de solo.

Tanto A, B e C possuem os elementos: silício (Si), alumínio (Al), potássio (K), enxofre (S), ferro (Fe), titânio (Ti), Cs e Cu. Apenas A e B possuem: Ca, Au, Ba e Zn. Apenas A e C possuem o elemento Ge, apenas C possui o elemento Ta e apenas B possui o elemento Sm. Elementos como: níquel (Ni), vanádio (V), prata (Ag) e mercúrio (Hg) foram também encontrados, mas foram descartados através da distribuição de frequência.

Observando A, B e C, os elementos Cu, Ba, Zn e Sm possuem um desvio padrão maior do que a média, isso se deve ao fato de que esses elementos não foram encontrados nas 5 medidas, fazendo com que se resulte em uma média calculada menor que seu desvio padrão.

De acordo com Suguio (2003), a muscovita - $(KAl_2Si_3AlO_{10})(OH, F)_2$ - e a biotita - $K(Mg, Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ - sob condições oxidantes, como clima muito úmido e quente, convertem-se em minerais secundários cauliníticos (mineral da argila do tipo 1:1) e “limonita” (óxido de ferro). O mineral muscovita pode também se converter para argilominerais 2:1 (e.g. illita - $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$ - e sericita - $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$

- , esta última dando o aspecto brilhante às rochas metamórficas) e estar ligada a elementos como por exemplo: Fe, Ca e Cs. A partir destas informações podemos fazer uma analogia dos elementos que aparecem com uma maior porcentagem (Si, Al e K) ao seu material de origem e o aumento do Fe ao início da conversão dos minerais primários em minerais secundários além do aparecimento dos elementos Cs e Ca durante a análise. Elementos como flúor (F), presente na muscovita, não são identificados na técnica de EDX-XRF, tendo em vista que o equipamento realiza a varredura a partir do sódio (Na).

Na região de Mossâmedes são encontradas diversas ocorrências de minerais, como ouro, esfarelita, gondito, molibdenita e calcopirita, sendo esta última observada com maior frequência (SIMÕES, 1984). A esfarelita ((*Zn, Fe*)S) e a calcopirita (*CuFeS₂*) são dois dos possíveis minerais encontrados nas amostras de solo, com a esfarelita ocorrendo apenas em A e B. Além dos sulfetos, como a ilmenita (óxido natural de ferro e titânio), o rutilo (*TiO₂*) também podem ser encontrados com facilidade.

5.5 PARÂMETROS DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO

Para o estudo da interação da radiação foram utilizados apenas os elementos que as amostras de A, B e C apresentaram em comum (Tabela 5.4) na técnica de EDX-XRF, de modo que fosse possível analisar, a partir dos parâmetros da interação da radiação, a possível diferenciação entre as três zonas de coleta a partir da diferença entre a quantidade destes elementos.

Tabela 5. 4 – Valores médios dos elementos em comum de A, B e C.

Elementos (w%)	Amostras de solo		
	A	B	C
Si	90,3 (2,4)	87,6 (0,8)	92,8 (2,2)
Al	5,3 (3,0)	8,8 (1,1)	3,9 (2,7)
K	2,0 (0,4)	1,7 (0,1)	1,4 (0,2)
S	1,0 (0,6)	0,6 (0,5)	1,0 (0,5)
Fe	0,8 (0,1)	0,7 (0,0)	0,6 (0,1)
Ti	0,3 (0,1)	0,2 (0,1)	0,1 (0,0)
Cs	0,1 (0,0)	0,1 (0,0)	0,2 (0,0)
Cu	0,07 (0,12)	0,01 (0,01)	0,01 (0,01)

Fonte: A autora

Notas: Os valores entre parênteses estão representando o desvio padrão da média.

Número de repetições para A, B e C: 5

Na faixa de energia escolhida não houve a contribuição da interação de produção de pares, apenas dos efeitos: fotoelétrico, espalhamento incoerente e coerente; por consequência que para a ocorrência do efeito de produção de pares seja necessária uma energia de fóton

incidente no mínimo de 1,022 MeV (YOSHIMURA, 2009). Para o coeficiente de atenuação total foram selecionados os dados com espalhamento coerente (Figura 5.7), por conta da sua abrangência a todos os efeitos parciais de interação.

Para os valores calculados, como por exemplo: coeficiente de atenuação de massa total e parciais, número atômico efetivo de densidade eletrônica efetiva; foram encontrados valores do desvio padrão da média com ordem de 10^{-3} , sendo então descartados nas apresentações das medidas durante a discussão.

Figura 5. 7 - Exemplo de como os dados são exportados do XCOM e quais colunas foram utilizadas para a análise dos dados da interação da radiação com A, B e C.

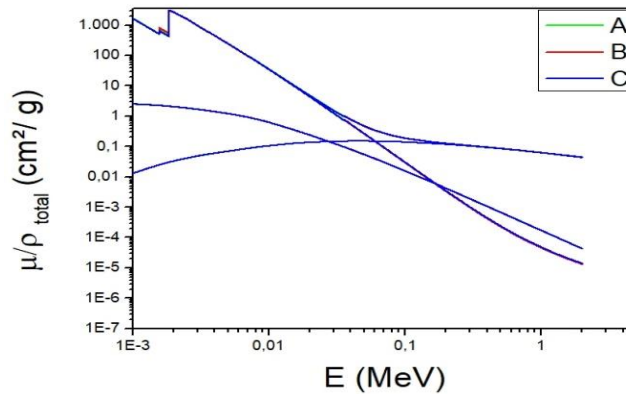
Edge	Photon	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
	Energy	Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
	1.00E-03	2.56E+00	1.31E-02	1.66E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.66E+03	6.66E+03
	1.03E-03	2.54E+00	1.38E-02	1.53E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.53E+03	5.53E+03
	1.07E-03	2.52E+00	1.45E-02	1.41E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.41E+03	4.41E+03
55 M ₂	1.07E-03	2.52E+00	1.45E-02	1.41E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.41E+03	4.41E+03
	1.08E-03	2.52E+00	1.48E-02	1.35E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.6E+03	3.5E+03

Fonte: Adaptado de NIST (2021).

5.5.1 Coeficiente de atenuação de massa

Ao ser feita tanto a análise gráfica (Figura 5.8) quanto dos valores do μ/ρ total e dos efeitos de interação⁵, foi possível notar uma sobreposição dos dados não sendo observando diferenças relevantes entre A, B e C.

Figura 5. 8 - Coeficiente de atenuação de massa total de A, B e C.



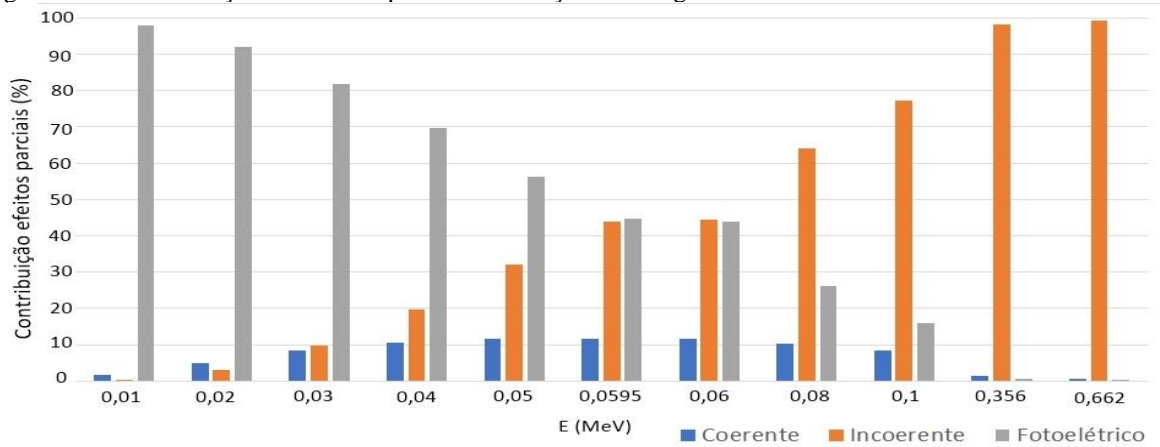
Fonte: A autora.

⁵ Tabela completa com os valores presente no Apêndice – Tabela A.1.

Na Figura 5.9, assim como no Apêndice – Tabela A.2, podemos notar que as maiores porcentagens de contribuições são referentes aos efeitos de espalhamento incoerente e efeito fotoelétrico, o efeito fotoelétrico dominante de 0,01 a 0,05 MeV.

Os domínios de cada efeito podem ser discutidos a partir da sua dependência com E e Z, tendo em vista que o fotoelétrico e o coerente possuem uma dependência inversamente proporcional à energia de aproximadamente E^3 e E^2 respectivamente (ATTIX, 1986; KAPLAN, 1977). Quanto maior a energia do fóton incidente, comparada à energia de ligação dos elétrons do átomo, menor a probabilidade de desencadear o efeito fotoelétrico (YOSHIMURA, 2009), com sua contribuição decrescendo rapidamente com o aumento da energia. Em baixas energias no efeito fotoelétrico é preponderante sua dependência com Z^4 e quando a energia começa a aumentar a contribuição do efeito fotoelétrico começa a diminuir, com o espalhamento coerente apresentando uma diminuição mais suave e assim aumentando sua contribuição em relação aos outros efeitos. Com os efeitos fotoelétrico e espalhamento coerente decrescendo cada vez mais, os valores de Z passam a diminuir sua contribuição nos valores de μ/ρ total fazendo com que o espalhamento incoerente tenha sua maior contribuição com o aumento da energia.

Figura 5.9 - Contribuição dos efeitos parciais em função da energia.



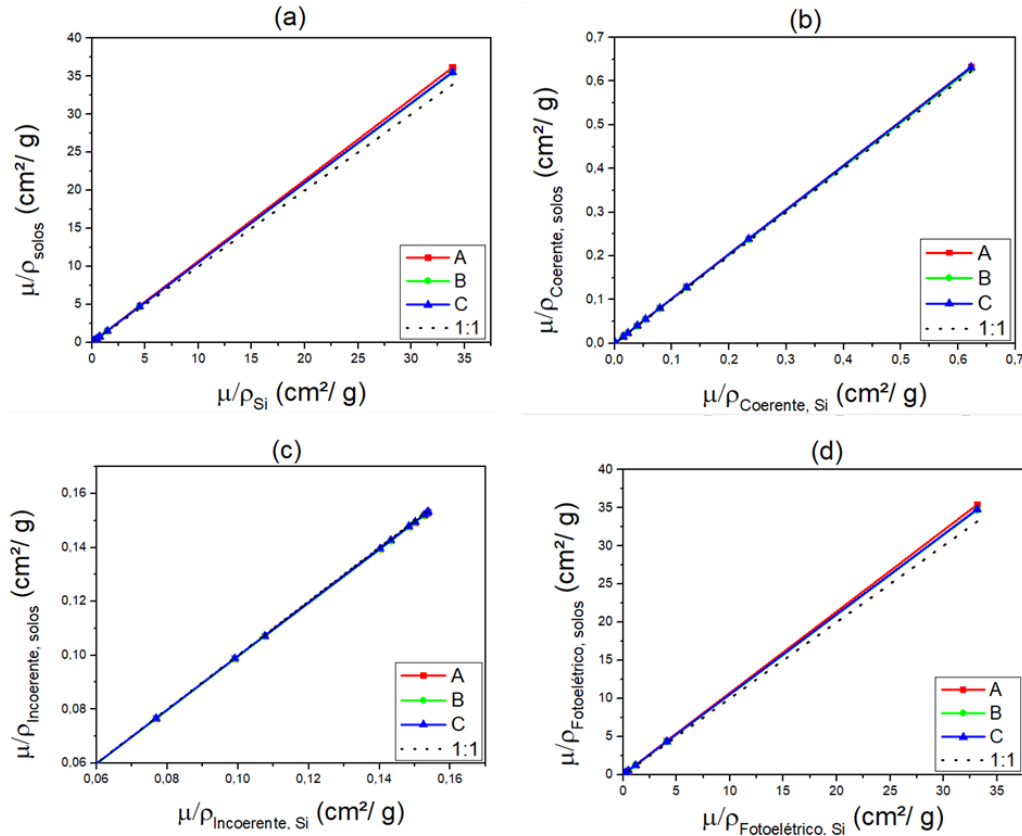
Fonte: A autora.

Sabendo da dependência dos valores de μ/ρ com Z, foi possível realizar correlações dos valores para A, B e C com os dos elementos encontrados na EDX-XRF (Figura 5.10 – 5.12).

Ao observar a Figura 5.10 podemos notar uma sobreposição da reta 1:1 do Si às retas dos solos para os valores de μ/ρ para os efeitos de espalhamento coerente e incoerente, tendo para os valores de μ/ρ total e para o efeito fotoelétrico um pequeno desvio em relação a reta de ajuste. A consequência desta separação pode ser vista a partir da forte dependência dos valores

de μ/ρ , para o efeito fotoelétrico, aos números atômicos da composição dos solos. Ao fazer a soma da porcentagem peso dos elementos com maiores Z (Fe, Ti, Cs e Cu) obtemos os valores de 1,34%, 1,08% e 0,92% para A, B e C respectivamente, nos mostrando que por mais que as amostras apresentem pequenas quantidades percentuais de elementos com Z alto ainda assim influenciarão o modo como a radiação irá interagir com o solo. Além disso, vemos uma forte contribuição do efeito fotoelétrico no valor do μ/ρ total, em relação aos efeitos de espalhamento – estes mostrando ser menos sensíveis à pequenas quantidades de elementos com maiores valores de Z.

Figura 5. 10 - Correlação entre o coeficiente de atenuação de massa de A, B e C e o elemento Si, ou Quartzo (SiO_2), onde: a) μ/ρ total, b) Coerente, c) Incoerente e d) fotoelétrico.



Fonte: A autora.

A conexão com o Si pode ser vista também nos resultados obtidos na EDX-XRF, análise textural e ρ_p . Este elemento ao ser correlacionado pode também ser tratado neste caso, por suposição, como sendo o mineral quartzo (SiO_2) por conta do material de origem das zonas de coleta serem provenientes de quartzitos.

Ao traçarmos as retas 1:1 referentes ao restante dos elementos que compõe os solos (Figura 5.11), neste caso agora considerando apenas os valores de μ/ρ total, podemos observar um maior distanciamento da reta de ajuste para os elementos com maior valor de Z e uma

aproximação para os elementos com um valor de Z próximo ao do Si (S e Al), com o K ($Z = 19$) tendo um distanciamento intermediário. Para elementos como S e Al podemos notar novamente o distanciamento da reta de A, como o ocorrido para o Si, e para K um leve distanciamento (quando comparado ao S e Al). Para os elementos com maiores valores de Z podemos observar uma sobreposição das retas dos solos.

Como visto a suposta correlação dos solos com o seu material de origem quartzito, podemos também supor sua relação com a muscovita, ao saber que o solo também pode ser formado através de quartzitos muscovíticos. Para esta correlação foram utilizadas as proporções da muscovita sendo: 47% Si, 40% Al, 12% K e 1% F; tendo os elementos hidrogênio (H) e oxigênio (O) com suas porcentagens rearranjadas a partir da distribuição de frequência.

Ao analisar a correlação da muscovita com os solos (Figura 5.12) podemos notar a sobreposição das retas A, B e C para os efeitos de espalhamento, um distanciamento de A no efeito fotoelétrico e no valor de μ/ρ total e uma aproximação da reta 1:1 em todos os efeitos, com a reta de ajuste relacionada ao mineral muscovita sendo observada mais próxima às retas dos solos em comparação a relacionada ao quartzo.

Figura 5. 11 - Correlação entre o coeficiente de atenuação total e os elementos a) Fe, b) Al, c) K, d) S, e) Cu, f) Cs e g) Ti.

(continua)

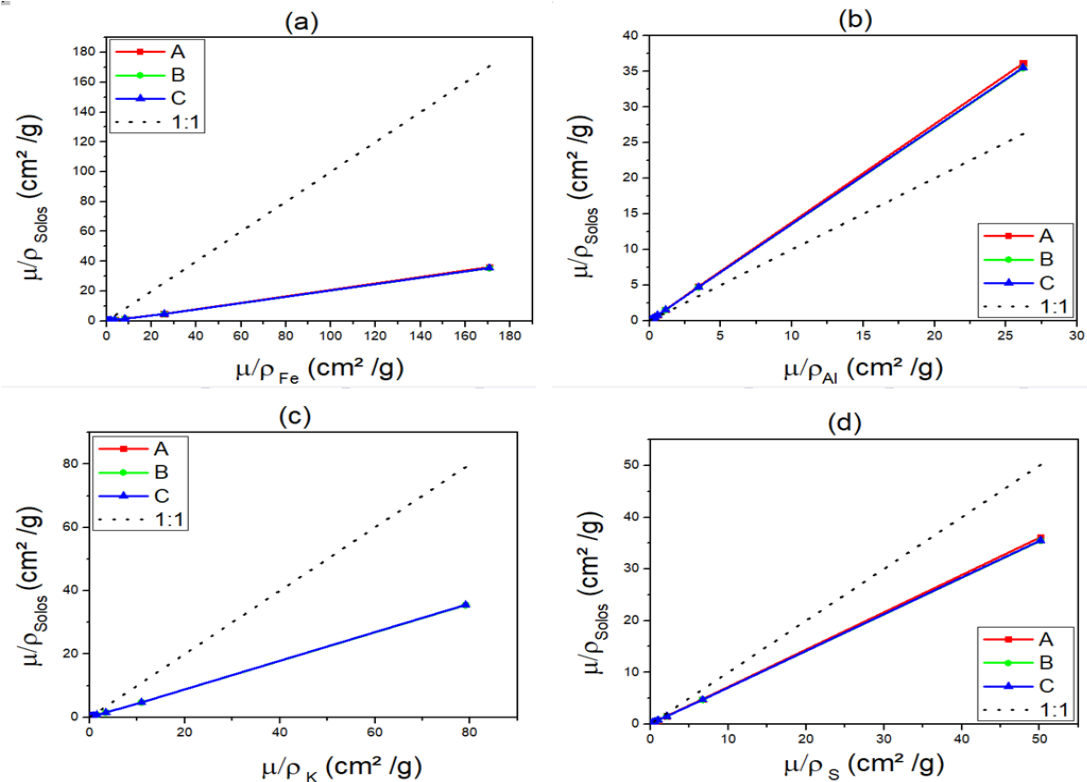
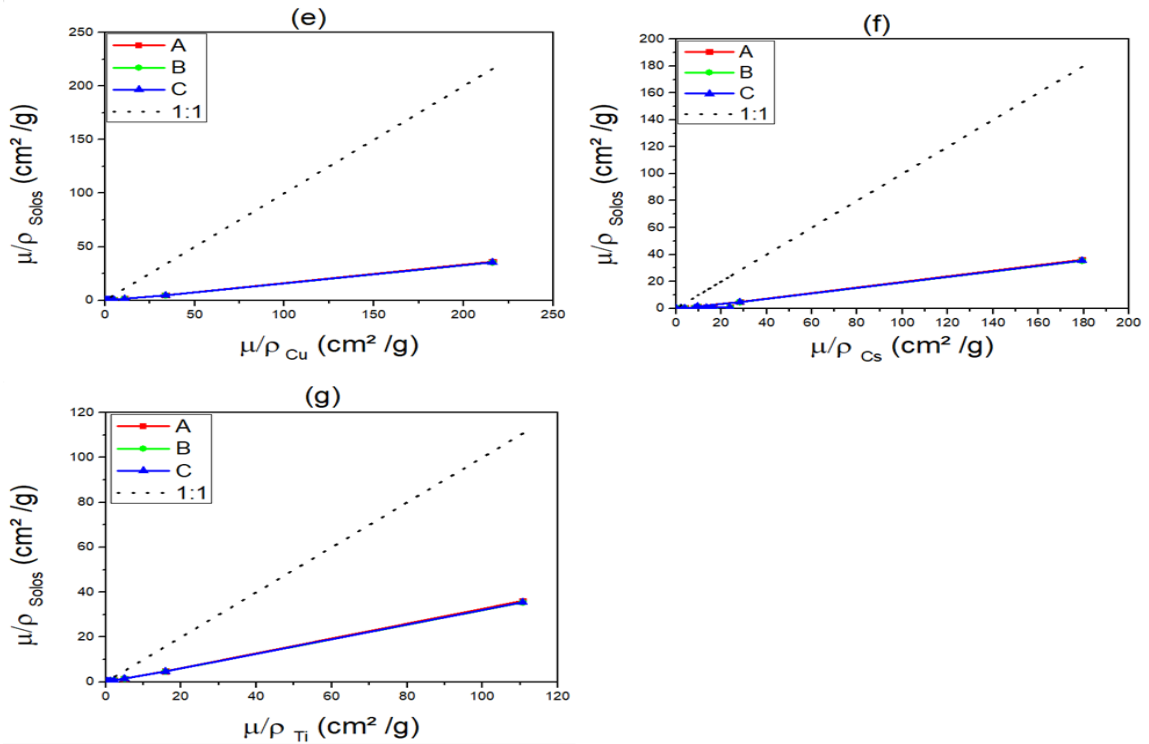


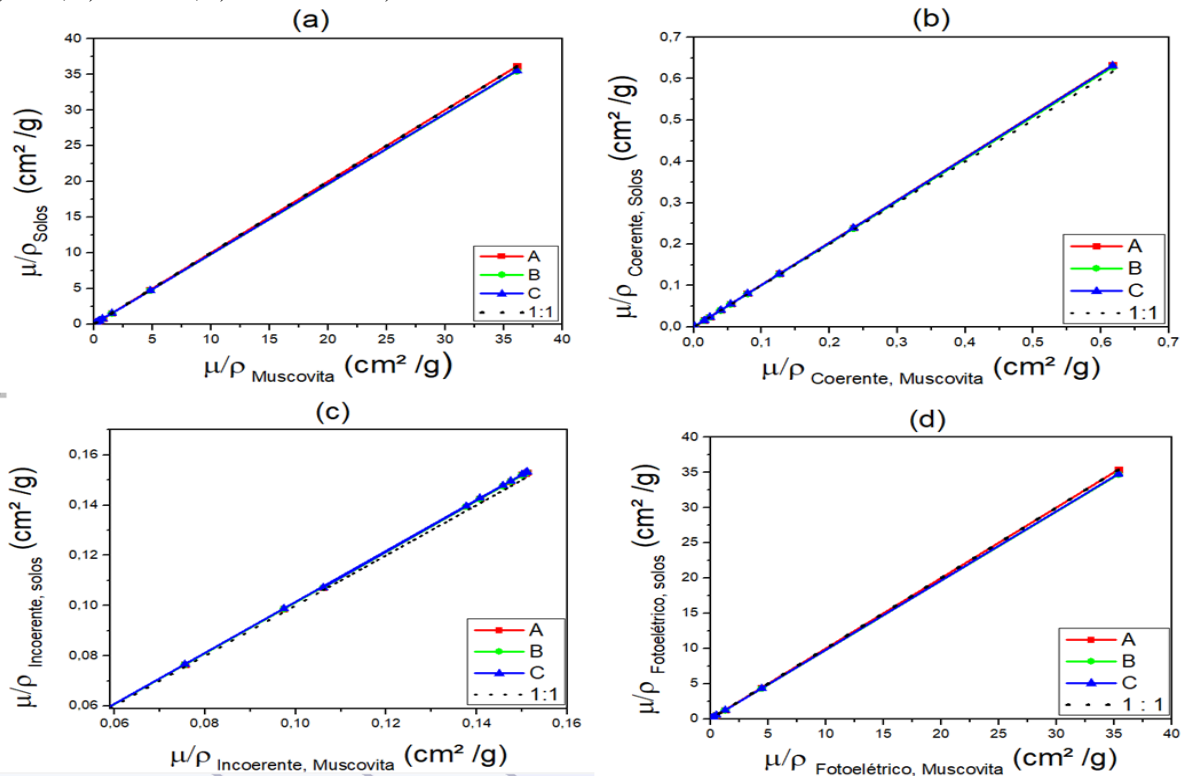
Figura 5. 12 - Correlação entre o coeficiente de atenuação total e os elementos a) Fe, b) Al, c) K, d) S, e) Cu, f) Cs e g) Ti.

(conclusão)



Fonte: A autora.

Figura 5. 13 - Correlação entre o coeficiente de atenuação dos solos e da Muscovita, onde temos os valores de μ/ρ a) total, b) coerente, c) incoerente e d) fotoelétrico.



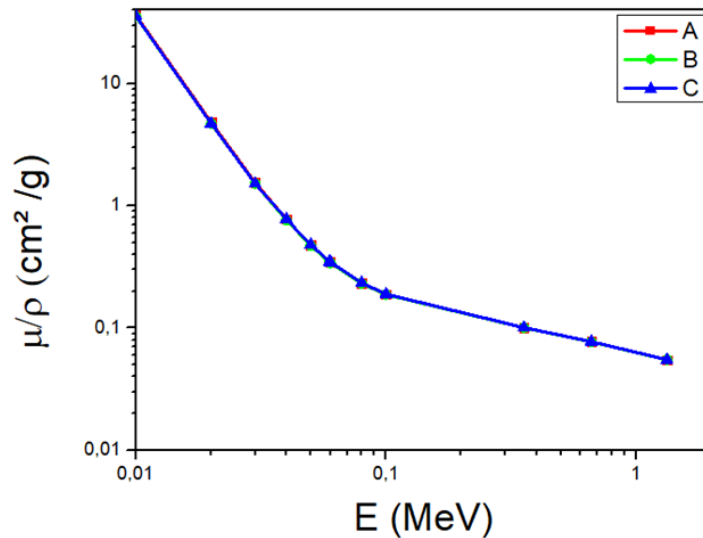
Fonte: A autora

5.5.2 Seções de choque, número atômico efetivo e densidade eletrônica

Para o cálculo das seções de choque, Z_{eff} e N_{el} foram selecionadas 12 faixas de energia específicas, com seus respectivos valores de μ/ρ total⁶. Estas faixas foram selecionadas com o intuito do estudo do intervalo de $10 \times 10^{-3} \text{ MeV}$ e das faixas energia específicas.

Os gráficos dos valores de μ/ρ total em função das faixas de energia selecionadas (Figura 5.13) mostram o decaimento dos valores de μ/ρ com o aumento da energia. Isto ocorre devido a forte contribuição do efeito fotoelétrico no valor do coeficiente de atenuação total e sua dependência com Z e E dos elementos constituintes do solo.

Figura 5. 14 – Variação do coeficiente de atenuação total com a energia.



Fonte: A autora.

A partir dos valores de μ/ρ e dos valores de M , $\sum_i n_i$ (Tabela 5.5) e f_i foram obtidos os gráficos das seções de choque molecular, atômica e eletrônica (Figura 5.14). Neste caso, como foram obtidas as porcentagens dos elementos a partir da EDX-XRF a abundância fracional é equivalente à porcentagem apresentada do elemento em cada amostra de solo.

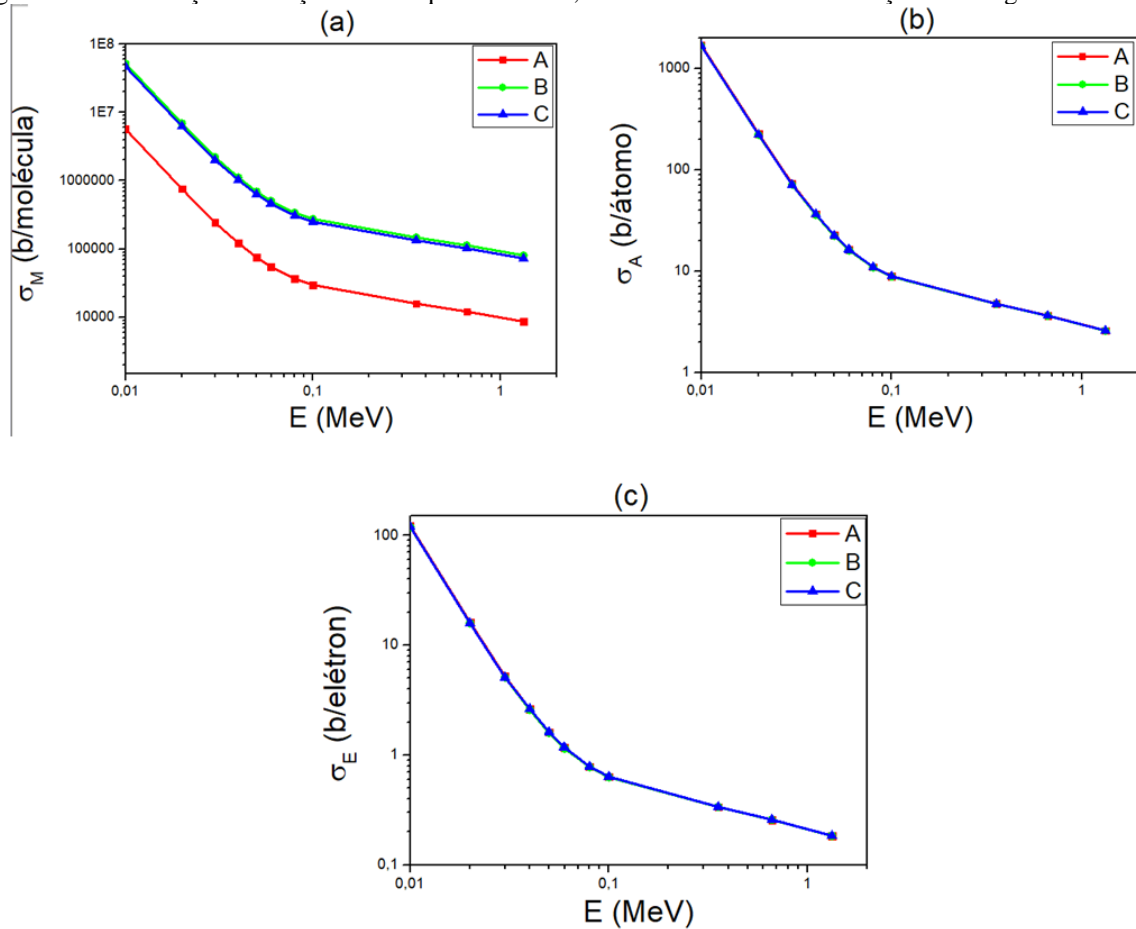
Tabela 5. 5 - Valores obtidos para M e $\sum_i n_i$ para as zonas de coleta do solo A, B e C.

Amostras de solo	M (g/mol)	$\sum_i n_i$
A	94516	3328
B	881406	31142
C	794081	28035

Fonte: A autora.

⁶ Valores dos μ/ρ total com suas respectivas faixas de energia podem ser vistos no Apêndice – Tabela A.3.

Figura 5. 15 – Variação das seções de choque molecular, atômica e eletrônica em função da energia.



Fonte: A autora.

Nos gráficos da Figura 5.14 podemos notar que os valores das seções de choque diminuem com o aumento da energia, isso se deve ao fato das seções de choque serem diretamente proporcionais aos valores de μ/ρ total dos solos (σ_M e σ_A) ou dos elementos que o compõe (σ_E). Na σ_M há a separação de A, B e C, com B e C estando mais próximos, enquanto em σ_A e σ_E há a sobreposição de A, B e C.

A separação da σ_M é feita na ordem B \rightarrow C \rightarrow A e podemos notar, a partir da Tabela 5.6, que o valor do M decresce nesta mesma ordem. Esta diminuição do valor do M das amostras de uma zona de coleta para outra está relacionada ao momento em que se é realizado o seu cálculo, durante o passo da normalização de n_i .

Para a normalização de n_i primeiramente devemos fazer para cada elemento a divisão da sua porcentagem pela sua massa atômica, em seguida localizamos qual elemento apresentou o menor valor desta divisão. Ao identificar qual elemento possui esta divisão de menor valor fazemos para cada um dos elementos restantes:

$$\text{normalização } n_i = \frac{\frac{e\%}{A_i}}{\text{valor da divisão do elemento com menor valor}} \quad (5.1)$$

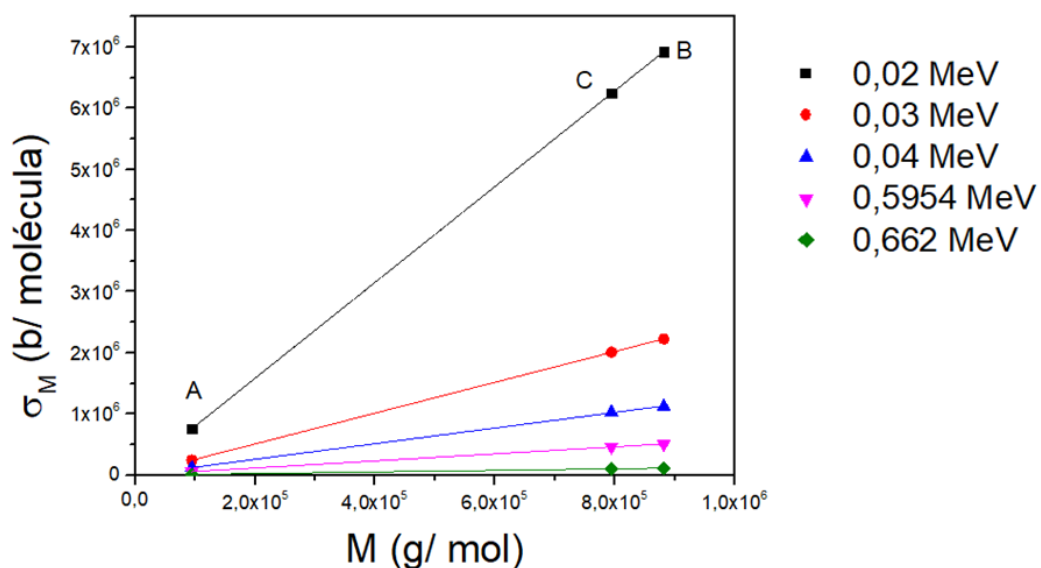
As três amostras apresentaram o elemento Cu com o menor valor de $e\%/A$, tendo a sequência de valores (do maior para o menor valor) sendo para: $A \rightarrow C \rightarrow B$. Ao dividirmos cada elemento pela resultante de Cu obteremos uma inversão na ordem, agora ficando: $B \rightarrow C \rightarrow A$.

A sobreposição dos valores na σ_a pode ser vista a partir da divisão de M por $\sum_i n_i$, além dos valores também similares do μ/ρ total. Ao dividirmos M por $\sum_i n_i$ obtemos um valor médio de $28,34 \text{ g/mol}$ para A, B e C, com desvios padrão de 0,03, 0,02 e 0,01 respectivamente. A sobreposição dos valores de σ_E se deve à sua dependência à abundância fracional, massa e número atômico e do respectivo valor de μ/ρ para cada elemento. Sabendo que para A, B e C foram utilizados os mesmos elementos, e que estes apresentaram porcentagens muito próximas, temos como consequência valores calculados de σ_E muito próximos.

Nas baixas energias, os valores da σ_M de A, B e C possuem uma maior divergência por conta da forte dependência do valor de μ/ρ ao efeito fotoelétrico, e consequentemente, ao número atômico. Com a redução da energia há em conjunto a diminuição nos valores de μ/ρ , fazendo com que o fator responsável pela diferença em altas energias para os valores da σ_M seja dado a partir dos valores do M (Figura 5.15).

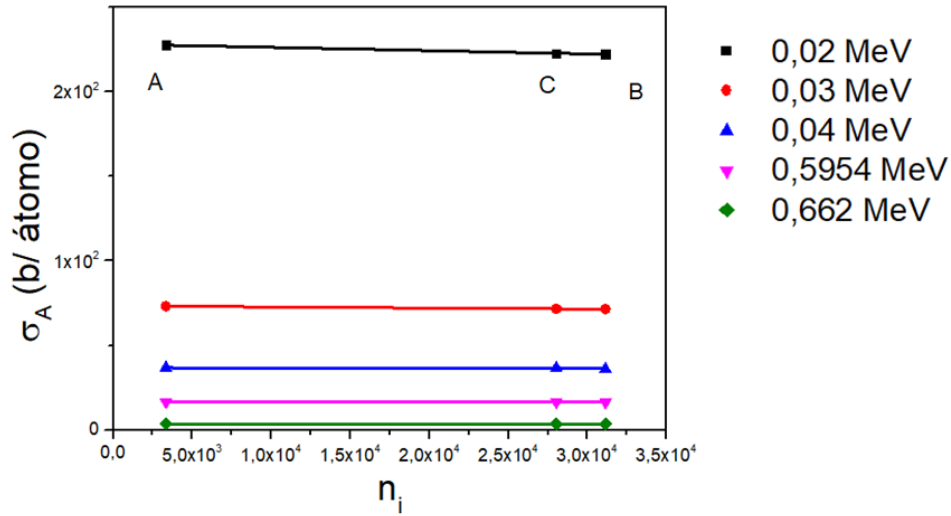
Na Figura 5.16 podemos observar que tanto para altas como para baixas energias a correlação da σ_A por n_i é dada através de uma reta constante ligando A, B e C. Apenas na energia de $0,02 \text{ MeV}$ houve um leve decréscimo, podendo estar ligada à maior sensibilidade do μ/ρ por Z em baixas energias.

Figura 5. 16 - Correlação entre a seção de choque molecular e peso molecular.



Fonte: A autora.

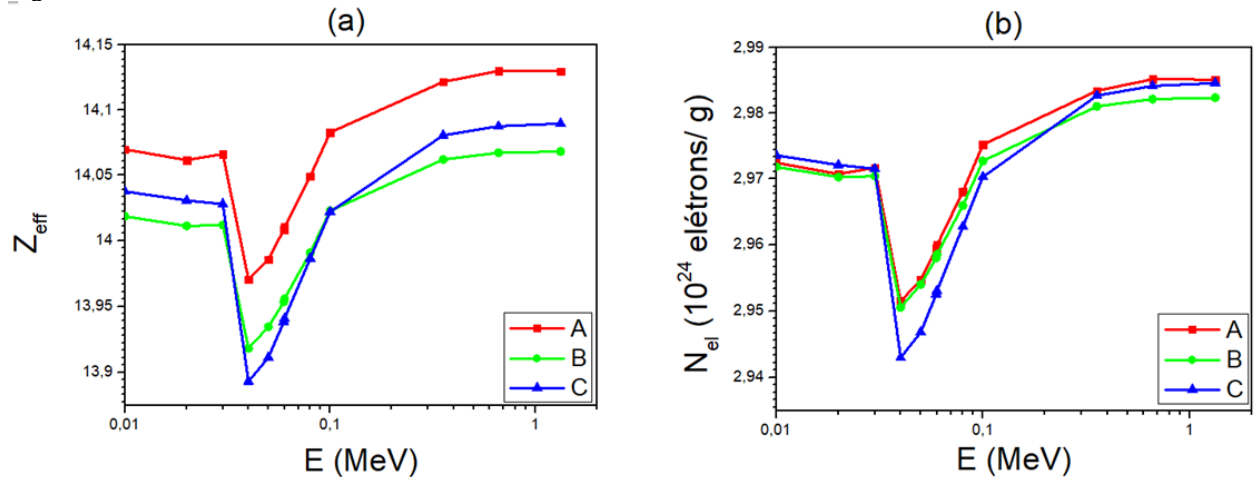
Figura 5. 17 - Correlação entre a seção de choque atômica e o número de fórmula.



Fonte: A autora.

A partir dos resultados obtidos na σ_A e σ_E foram calculados os valores de Z_{eff} e N_{el} (Figura 5.17). Tanto o Z_{eff} quanto a N_{el} são diretamente proporcionais aos μ/ρ dos solos e inversamente proporcionais aos μ/ρ dos elementos que o compõe, com isso espera-se que em baixas energias ocorra uma maior dependência de Z e com o acréscimo da energia a dependência diminua.

Figura 5. 18 - Número atômico efetivo e densidade eletrônica.

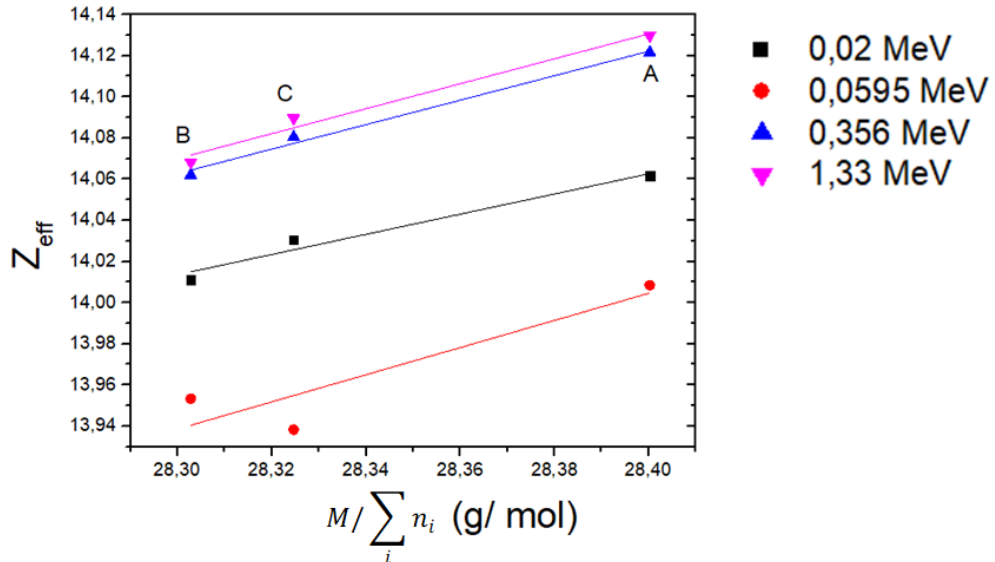


Fonte: A autora.

No Z_{eff} houve inicialmente a sequência indo de $A \rightarrow C \rightarrow B$, seguidos de $A \rightarrow B \rightarrow C$ e então retornando para $A \rightarrow C \rightarrow B$. Sabemos que tanto os valores de μ/ρ quanto de σ_E para as três amostras de solos são muito próximos, com a maior diferença entre eles sendo seu valor de M e $\sum_i n_i$, ao realizar a correlação de Z_{eff} com $M/\sum_i n_i$ (Figura 5.18) podemos notar que

em baixas energias (0,02 MeV) e em altas energias (0,356 e 1,33 MeV) há uma dependência do aumento do Z_{eff} com a razão $M/\sum_i n_i$.

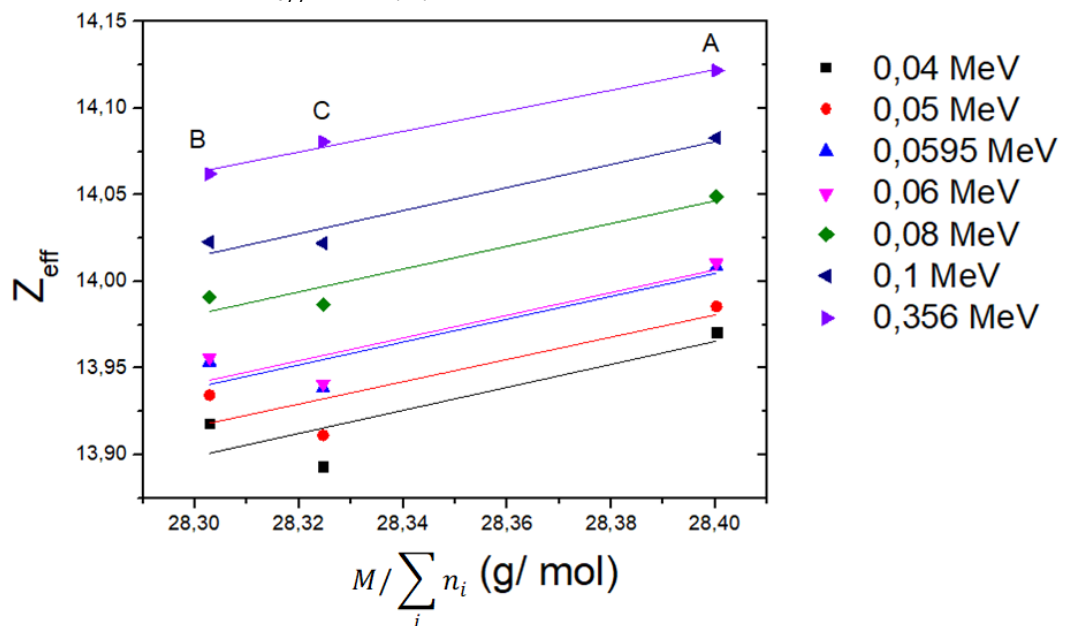
Figura 5. 19 - Correlação de Z_{eff} e $M/\sum_i n_i$.



Fonte: A autora.

No entanto, na faixa de energia de 0,0595 MeV podemos notar um comportamento anômalo, quando comparado as demais energias, e isto se repete para a faixa de 0,04 a 0,1 MeV (Figura 5.19).

Figura 5. 20 - Correlação entre Z_{eff} e $M/\sum_i n_i$ nas faixas de energia 0,04 a 0,356 MeV.

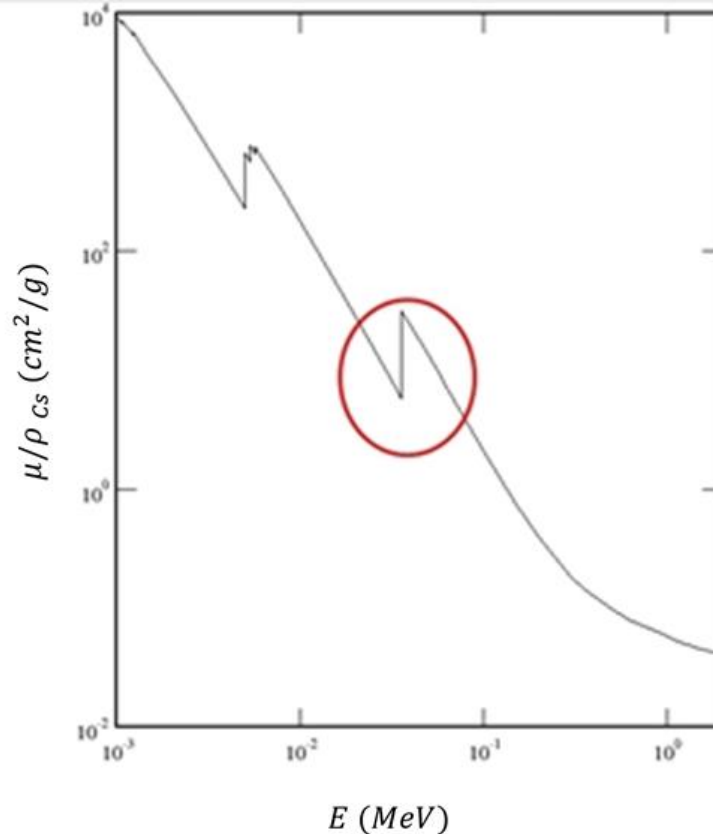


Fonte: A autora.

Esta variação segue a sequência: $A \rightarrow B \rightarrow C$; e pode ser vista também no momento de ponto mínimo no gráfico (em $0,04 \text{ MeV}$) apresentado para o Z_{eff} . De $0,04$ a $0,1 \text{ MeV}$ há novamente o aumento do Z_{eff} em função de E . Esta queda abrupta na faixa de energia de $0,04 \text{ MeV}$ pode ter sido ocasionada a partir de um elemento em específico: o Cs.

Ao calcular isoladamente o valor do μ/ρ total para o Cs, podemos notar uma queda abrupta no valor do μ/ρ na faixa de energia de $0,04 \text{ MeV}$ (Figura 5.20). Esta queda é chamada de camada K (ou borda K) e representa uma descontinuidade durante a interação da radiação com a matéria. Nesta descontinuidade a energia da radiação incidente não é suficiente para desalojar um elétron da camada K do átomo (NELSON; REILLY, 1991). Por Z_{eff} ser inversamente proporcional aos valores de μ/ρ dos elementos, pode ter ocorrido a inversão do pico da borda K, tornando-se um valor de mínimo em Z_{eff} .

Figura 5. 21 - Coeficiente de atenuação total do Cs, com o círculo em vermelho indicando o efeito da borda K.

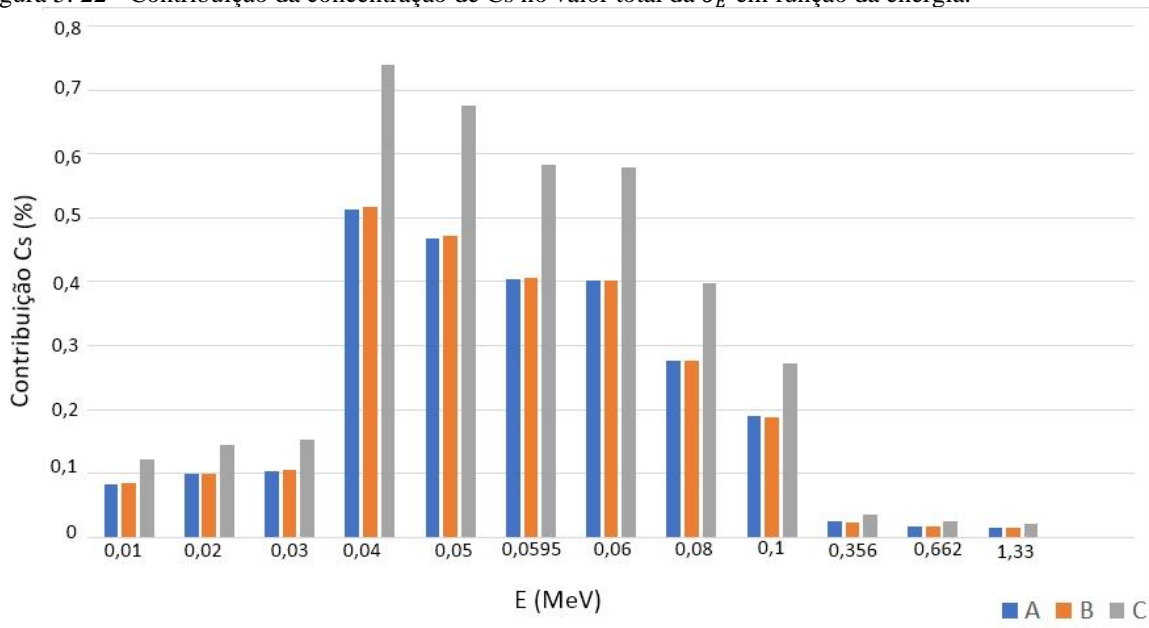


Fonte: Adaptado de NIST (2021).

Em $0,0595 \text{ MeV}$, observado na Figura 5.17, houve uma descontinuidade e inversão da ordem para a sequência $A \rightarrow B \rightarrow C$, com C sofrendo a maior descontinuidade e A a menor. A amostra C é o que apresenta a maior porcentagem do elemento Cs ($0,20\%$), enquanto A e B

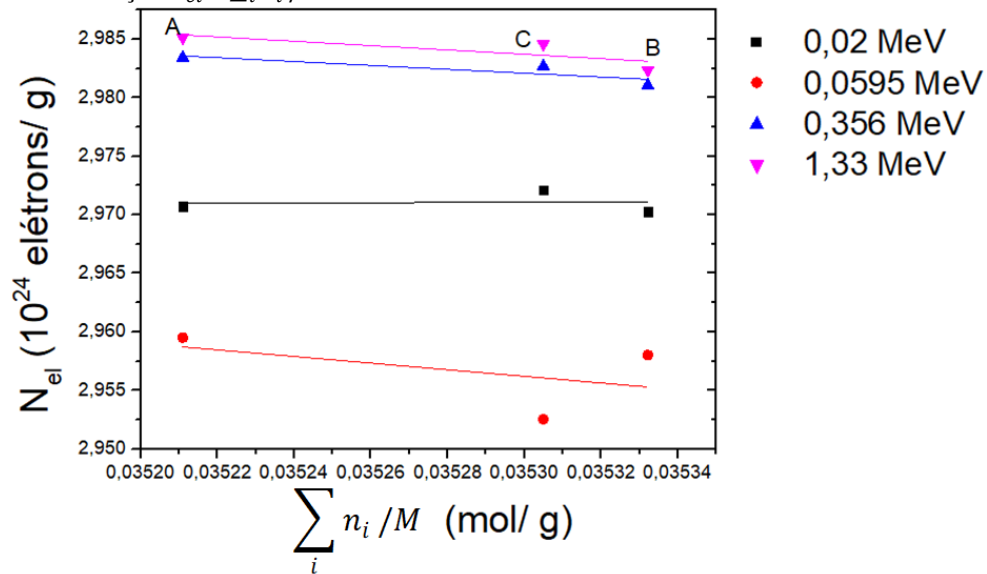
apresentam cerca de 0,14%. Sabendo que Z_{eff} é inversamente proporcional à σ_e , podemos supor que a queda mais abrupta em C é dada por possuir a maior quantidade de Cs e a menor quantidade dos demais elementos com maiores valores de Z. Mesmo com A e B possuindo as mesmas porcentagens para o Cs, A apresenta um maior valor de $M/\sum_i n_i$ fazendo com que resulte em um Z_{eff} superior. Podemos notar também que o elemento Cs possui sua maior contribuição nos valores da σ_e para as faixas de 0,04 MeV a 0,1 MeV, com C sendo aquele que recebe a maior contribuição (Figura 5.21).

Figura 5. 22 - Contribuição da concentração de Cs no valor total da σ_E em função da energia.



Fonte: A autora.

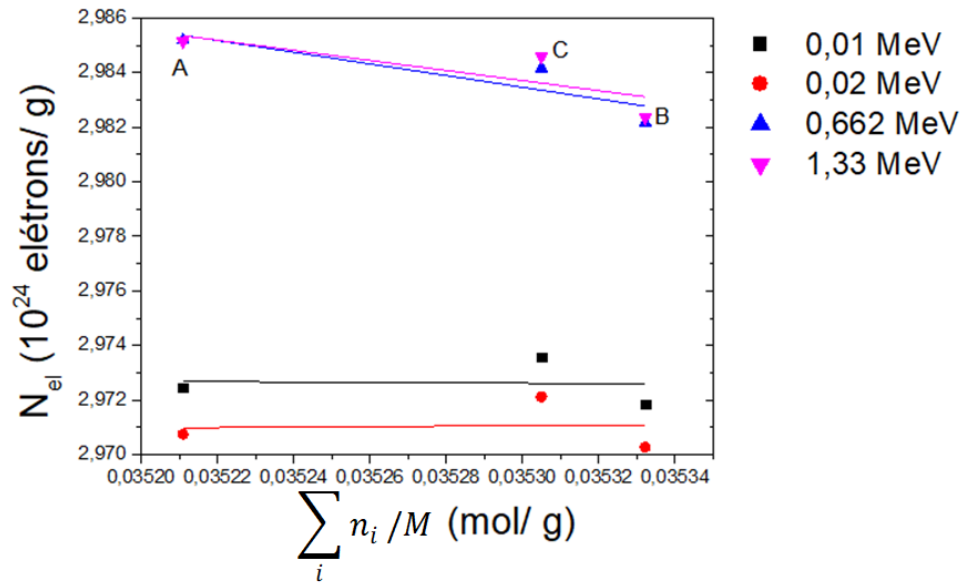
A descontinuidade na energia de 0,0595 MeV pode também ser da N_{el} , seguindo a mesma sequência: A \rightarrow B \rightarrow C; no entanto podemos observar que em faixas de baixa energia (e.g. 0,02 MeV) a sequência torna-se C \rightarrow A \rightarrow B – com o valor da N_{el} não sofrendo influências dos valores de M e $\sum_i n_i$ –, enquanto em altas energias (e.g. 0,356 MeV) a sequência passa a ser: A \rightarrow C \rightarrow B (Figura 5.22).

Figura 5. 23 - Correlação N_{el} e $\sum_i n_i / M$.

Fonte: A autora.

A sequência de N_{el} iniciou sendo $C \rightarrow A \rightarrow B$; com uma aproximação de A e B, e finalizou sendo $A \rightarrow C \rightarrow B$ (Figura 5.23); com uma aproximação de A e C. Sabendo que o N_{el} pode também ser escrita a partir dos valores de M , $\sum_i n_i$ e Z_{eff} e tendo visto que M e $\sum_i n_i$ são constantes (em função da energia), podemos calcular sua razão onde então teremos para A, B e C, respectivamente, o valor de $\sum_i n_i / M$ sendo aproximadamente: 0,0352, 0,0353 e 0,0353. Em baixas energias A possui o valor de Z_{eff} sendo levemente maior, seguido de C e B, porém por possuir a menor razão de $\sum_i n_i / M$ o valor da sua N_{el} tende a ficar abaixo do C. Mesmo com B e C possuindo valores próximos para a razão $\sum_i n_i / M$, há a separação entre eles a partir do Z_{eff} , com B resultando em um valor mais próximo de A do que de C.

Figura 5. 24 - Correlação entre os valores da N_{el} e $\sum_i n_i / M$ para baixas e altas energias.



Fonte: A autora.

Enquanto isso, em altas energias o valor de Z_{eff} de A possui uma maior diferença quanto de B e C, fazendo com que, mesmo que sua razão $\sum_i n_i / M$ seja a menor dentre as três amostras, possua o maior valor da N_{el} . As amostras das zonas de B e C são diferenciados basicamente por seu valor do Z_{eff} em altas energias, agora com C obtendo um valor da N_{el} mais próximo de A em relação ao B.

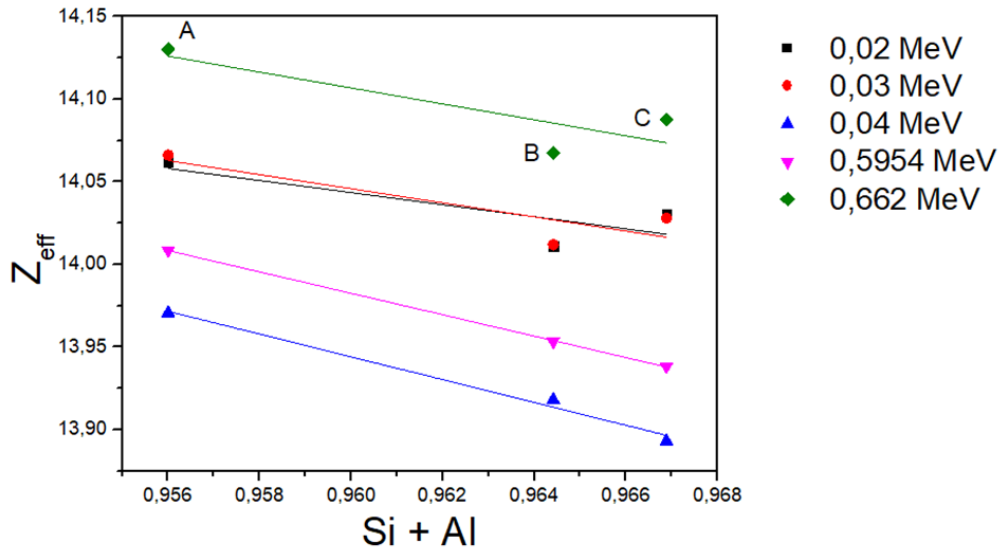
Sabendo que os valores de Z_{eff} e N_{el} são diretamente proporcionais ao μ/ρ e que este, nas faixas de energias selecionadas, possui como maior contribuinte o efeito fotoelétrico, esse dependente de Z^{4-5} , podemos também correlacionar seus valores com a porcentagem dos principais elementos que constituem os solos (CESAREO *et al.*, 1994; MEDATH *et al.*, 2014): Si + Al e Fe + Ti.

Ao fazer a correlação das porcentagens de Si + Al presentes em A, B e C com os valores de Z_{eff} e N_{el} , foram obtidos os gráficos apresentados nas Figuras 5.24 e 5.25. Para esta soma de elementos, temos a sequência de valores percentuais sendo: C \rightarrow B \rightarrow A. Podemos notar que em baixas e altas energias (0,02 a 0,03 MeV e 0,662 MeV, respectivamente), considerando as energias dos fótons estudados, há uma maior variação no valor de Z_{eff} em função das quantidades de Si + Al presentes nas amostras em relação as energias de 0,04 e 0,05954 MeV.

A contribuição do Si + Al no valor total da σ_e varia entre 85 – 96% (Figura 5.26), tendo sua maior contribuição em altas energias (0,356, 0,662 e 1,33 MeV) e a menor contribuição nas faixas de 0,04 e 0,05 MeV. Podemos notar que em todas as faixas de energia, A é o que

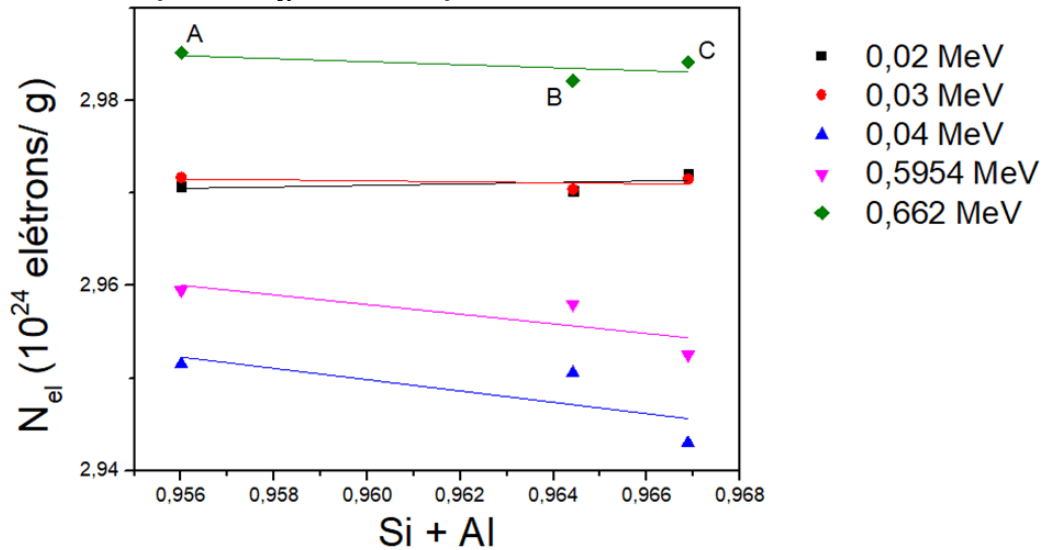
possui a menor contribuição de Si + Al no valor da σ_E , e sabendo que Z_{eff} e a N_{el} são inversamente proporcionais a σ_e , obtemos A possuindo o maior valor de Z_{eff} e N_{el} em todas as energias.

Figura 5. 25 - Correlação entre Z_{eff} e concentração de Si + Al.



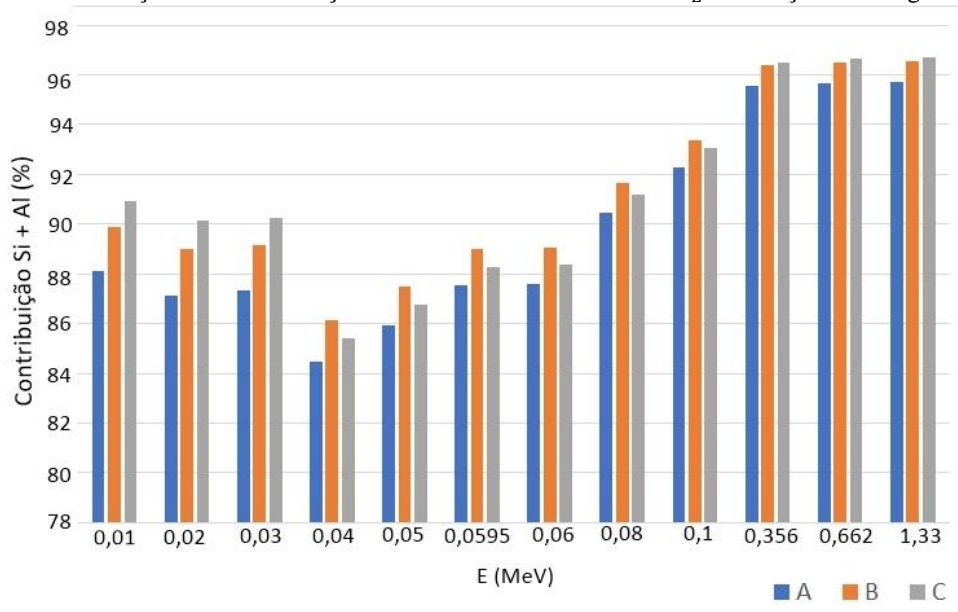
Fonte: A autora.

Figura 5. 26 - Correlação entre N_{el} e a concentração de Si + Al.



Fonte: A autora.

Figura 5. 27 - Contribuição das concentrações de Si + Al no valor total da σ_E em função da energia.

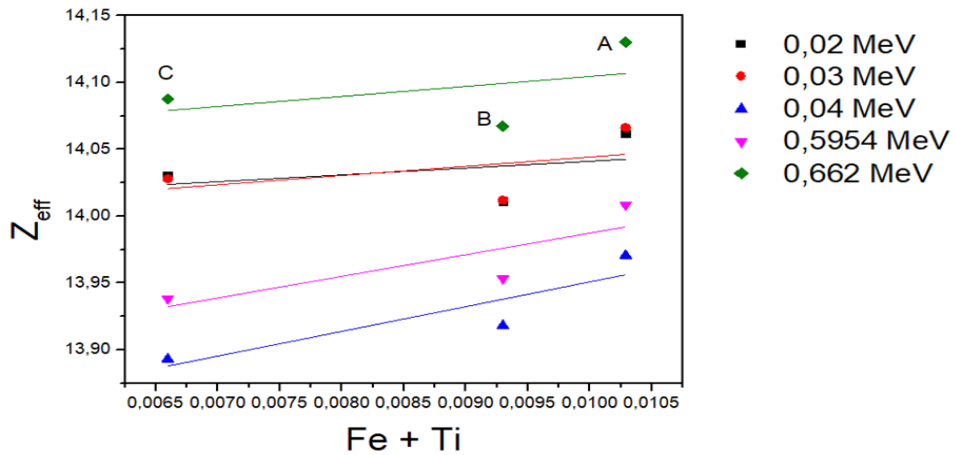


Fonte: A autora.

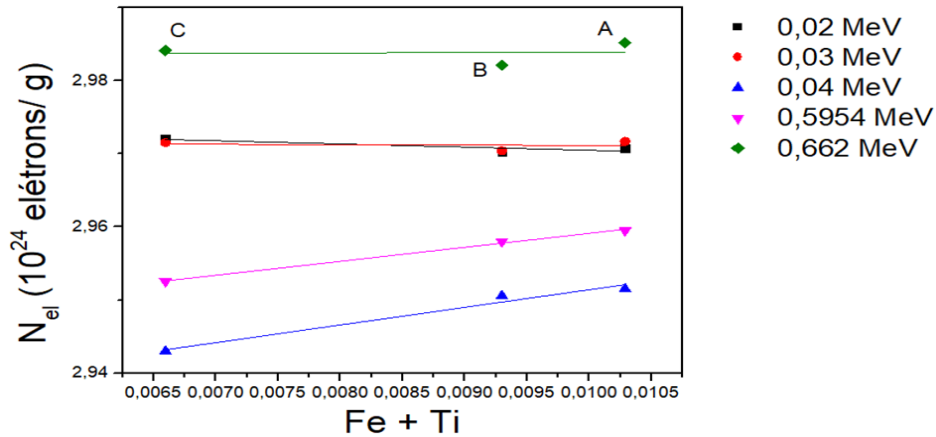
Nas faixas de energia 0,01 a 0,03 MeV temos C com maior contribuição de Si + Al na σ_e e nas faixas de 0,336 a 1,33 MeV B e C possuem contribuições muito próximas. Ao fazer σ_E^{-1} obtemos entre 0,01 a 0,03 MeV B com valor maior que C e em 0,336 MeV a 1,33 MeV valores aproximados para B e C, no entanto, como visto nos gráficos de correlação de Z_{eff} e $M/\sum_i n_i$, a razão do peso molecular com o número de fórmulas de C é superior de B, fazendo com que o valor do Z_{eff} de C se torne maior que o de B.

Para as energias que variam de 0,04 a 0,1 MeV temos B com maior contribuição de Si + Al, sabemos que nesta faixa de energia há o mínimo de Z_{eff} , onde, como visto anteriormente, ocorre por conta do Cs presente nas amostras seguindo a ordem de concentração deste elemento. Como B possui a mesma quantidade de Cs que A, mas ao mesmo tempo uma maior concentração de Si + Al; e que C possui a maior quantidade do elemento Cs, mas ao mesmo tempo uma maior concentração Si + Al, em relação de A e B, os valores de Z_{eff} seguem a ordem da relação de concentração: Si + Al + Cs; fazendo com que a ordem seja: A \rightarrow B \rightarrow C. Podemos observar que para a N_{el} , nesta mesma faixa de energia, ocorre resultado semelhante.

As correlações dos valores de Z_{eff} e N_{el} com as concentrações de Fe + Ti em A, B e C, podem ser vistas nas Figuras 5.27 e 5.28.

Figura 5. 28 - Correlação entre Z_{eff} e a concentração de Fe + Ti.

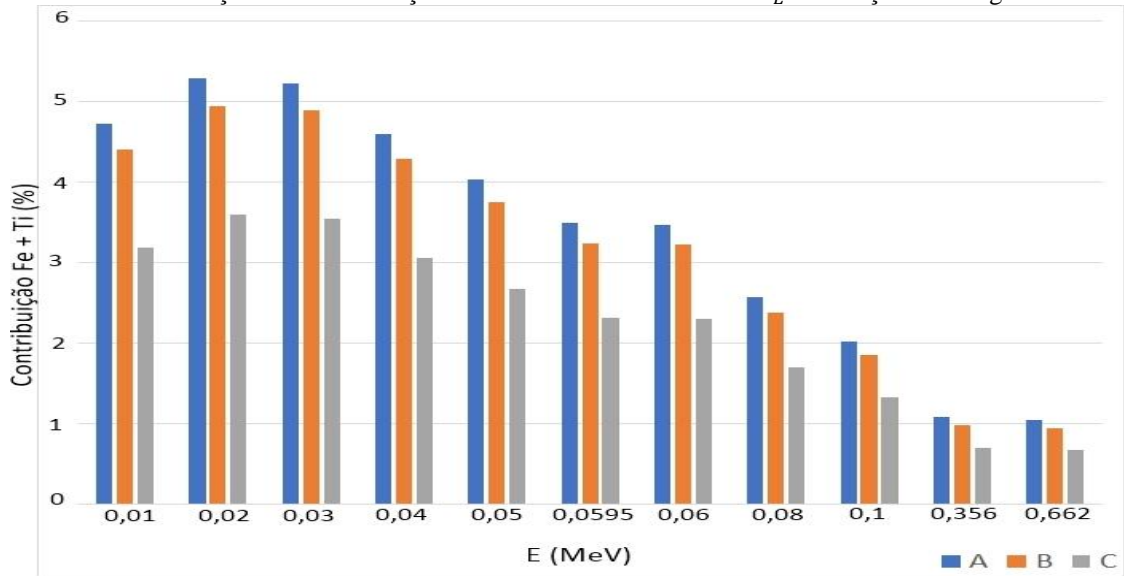
Fonte: A autora.

Figura 5. 29 - Correlação entre N_{el} e concentração Fe + Ti.

Fonte: A autora.

A relação das concentrações de Fe + Ti com os valores de Z_{eff} e N_{el} seguem as mesmas sequências vistas para as concentrações de Si + Al. Podemos notar também que agora as retas possuem os pontos mais afastados das retas para os valores de Z_{eff} (Figura 5.27) e mais próximos das retas para os valores de N_{el} (Figura 5.28), quando comparado às retas referentes as concentrações de Si + Al. É interessante notarmos também, que diferente da concentração Si + Al, a contribuição Fe + Ti no valor da σ_E decresce com o aumento de E (Figura 5.29).

Figura 5.30 - Contribuição das concentrações de Fe + Ti no valor total da σ_E em função da energia.

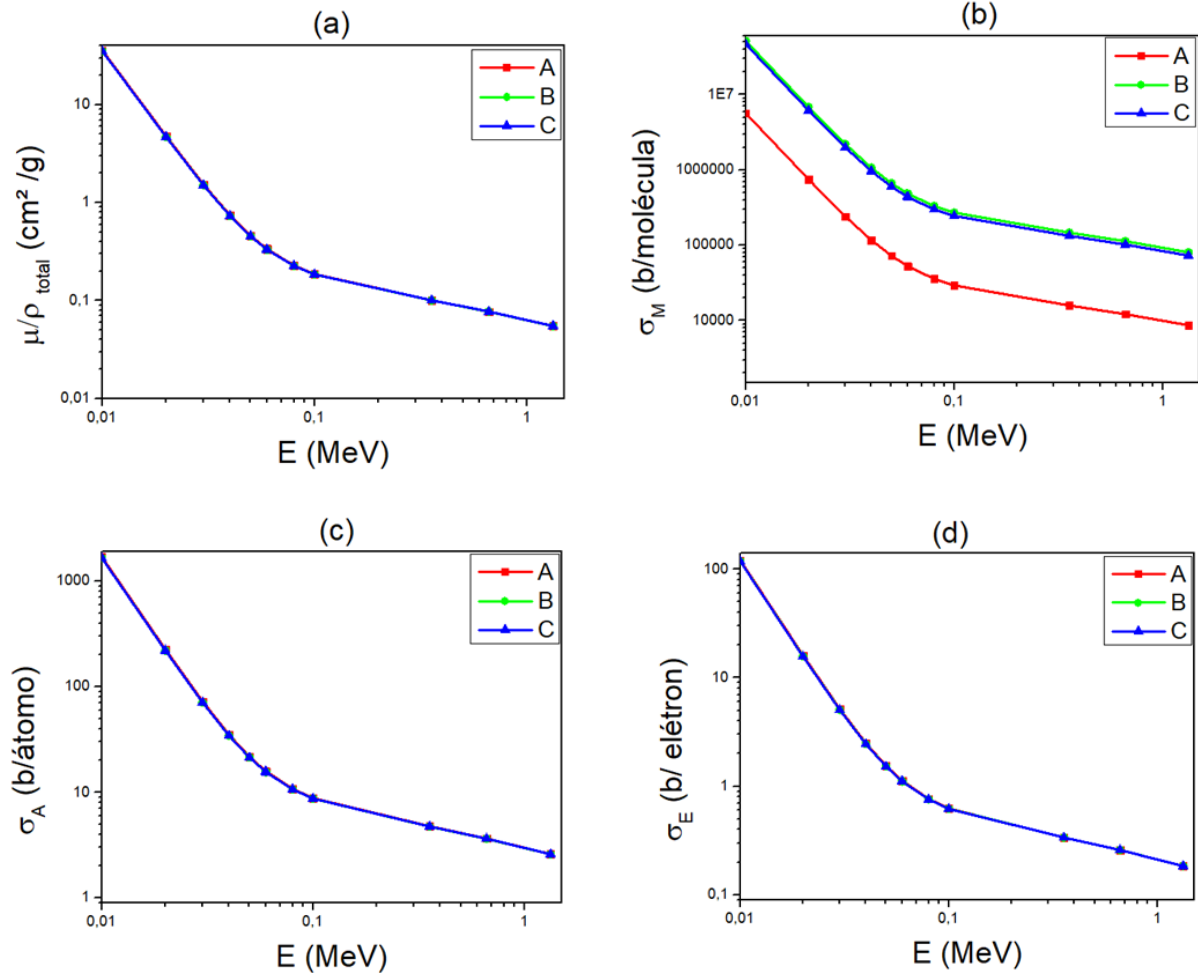


Fonte: A autora.

O afastamento dos pontos no Z_{eff} das retas pode ser discutido através da diminuição da contribuição da concentração de Fe + Ti nos solos com o aumento de E , fazendo com que com o aumento da energia haja a maior dispersão dos pontos. Enquanto no valor da N_{el} temos ao mesmo tempo o aumento do Z_{eff} e a diminuição da contribuição de Fe + Ti com o aumento de E , fazendo com que haja uma aproximação dos pontos nas retas.

Ao se estudar o coeficiente de atenuação de massa, e suas propriedades, é visto de maneira muito recorrente uma anomalia que ocorre na faixa específica da fonte do ^{241}Am , chamado por Tartari *et al.* (1998) de: borda próxima; onde há a passagem de um baixo para um alto valor de Z_{eff} . No entanto, por possuímos em A, B e C o elemento Cs a anomalia causada por este elemento supostamente mascarou o efeito da borda próxima. Se retirarmos o Cs, redistribuindo sua porcentagem para os demais elementos, e recalcularmos os valores de μ/ρ , M , $\sum_i n_i$ e f_i obtemos os gráficos das Figuras 5.30 e 5.31.

Figura 5. 31 – Gráficos do (a) coeficiente de atenuação total de massa, (b) seção de choque molecular, (c) seção de choque atômica e (d) seção de choque eletrônica em função da energia e sem a concentração do elemento Cs.



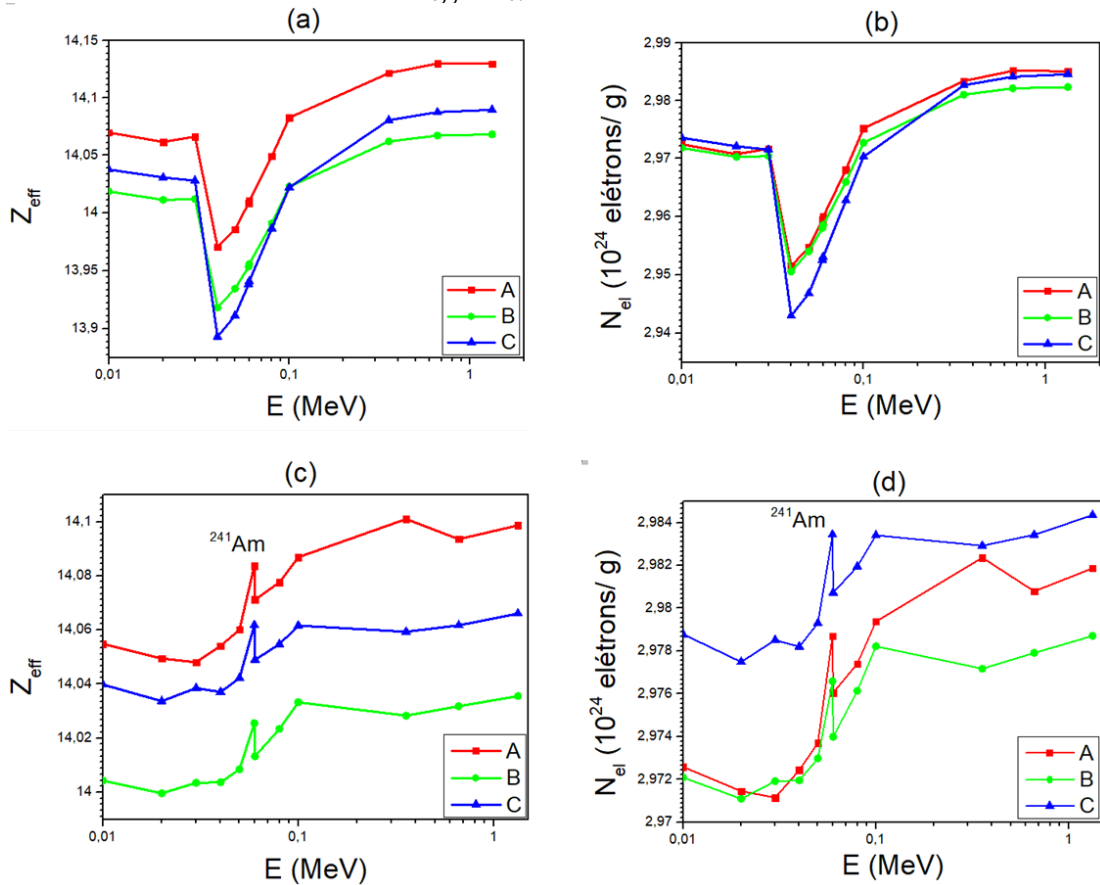
Fonte: A autora.

Podemos observar, na Figura 5.30, que não houve mudanças referentes aos gráficos de μ/ρ total e das seções de choque. A equivalência dos gráficos com e sem o Cs ocorre pelo fato de que ao ser retirado esse elemento os valores de μ/ρ continuaram muito próximos por conta das suas concentrações químicas similares, σ_M manteve o Cu como elemento de menor razão $e\%/A$ para A, B e C, σ_A manteve a razão $M/\sum_i n_i$ muito próxima para as três amostras e σ_E manteve também sua proximidade, pelo fato de A, B e C continuarem possuindo a mesma composição concentrações similares.

No entanto, ao analisar os gráficos Z_{eff} e N_{el} , presentes na Figura 5.31, podemos observar uma grande diferença em relação aos resultados apresentados na Figura 5.17. Podemos notar que não há mais a queda brusca que ocorria em $0,04 \text{ MeV}$, mas agora podemos observar a ocorrência do efeito da borda próxima, além disso vemos que há uma leve diminuição dos valores do Z_{eff} e da N_{el} . O pico máximo em $0,0595 \text{ MeV}$ ocorre ao mesmo tempo onde há a

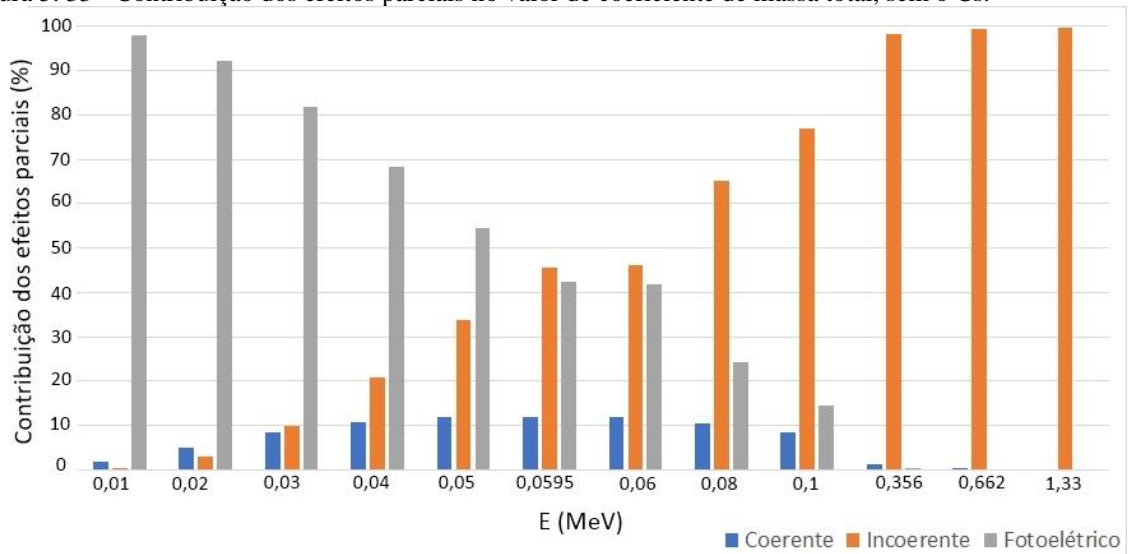
inversão das contribuições de efeitos, indo da contribuição máxima do efeito fotoelétrico para o efeito de espalhamento incoerente (Figura 5.32).

Figura 5.32 - Comparação dos gráficos do Z_{eff} e N_{el} a) e b) com Cs; e c) e d) sem Cs.



Fonte: A autora.

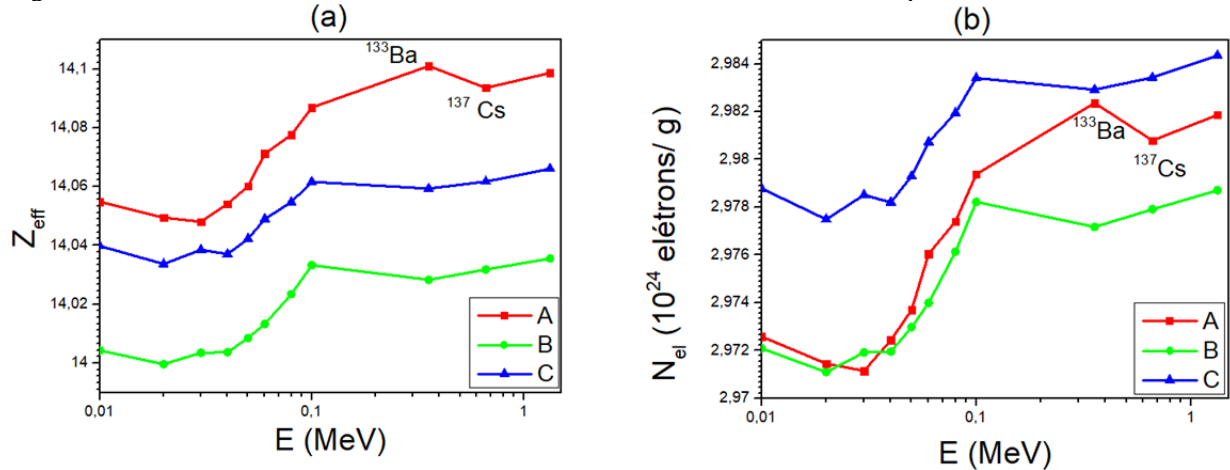
Figura 5.33 - Contribuição dos efeitos parciais no valor de coeficiente de massa total, sem o Cs.



Fonte: A autora.

Podemos notar que assim como no Z_{eff} quanto na N_{el} manteve-se a sequência de $A \rightarrow C \rightarrow B$ e $C \rightarrow A \rightarrow B$, respectivamente. Sem o efeito da borda próxima obtemos os gráficos de Z_{eff} e N_{el} apresentados na Figura 5.33.

Figura 5. 34 - Número atômico efetivo e densidade eletrônica sem o efeito da borda próxima e borda K do Cs.



Fonte: A autora.

Agora, ao realizar o cálculo de M e $\sum_i n_i$ obteve-se a razão $M/\sum_i n_i$ com valores de aproximadamente 28,37, 28,27 e 28,28 g/mol e $\sum_i n_i/M$ com valores de 0,0353, 0,0354 e 0,0354 mol/g ; para A, B e C respectivamente. Assim, podemos notar que o Z_{eff} segue a ordem decrescente dos valores de $M/\sum_i n_i$ e a N_{el} os valores decrescentes resultantes do Z_{eff} e da razão $\sum_i n_i/M$.

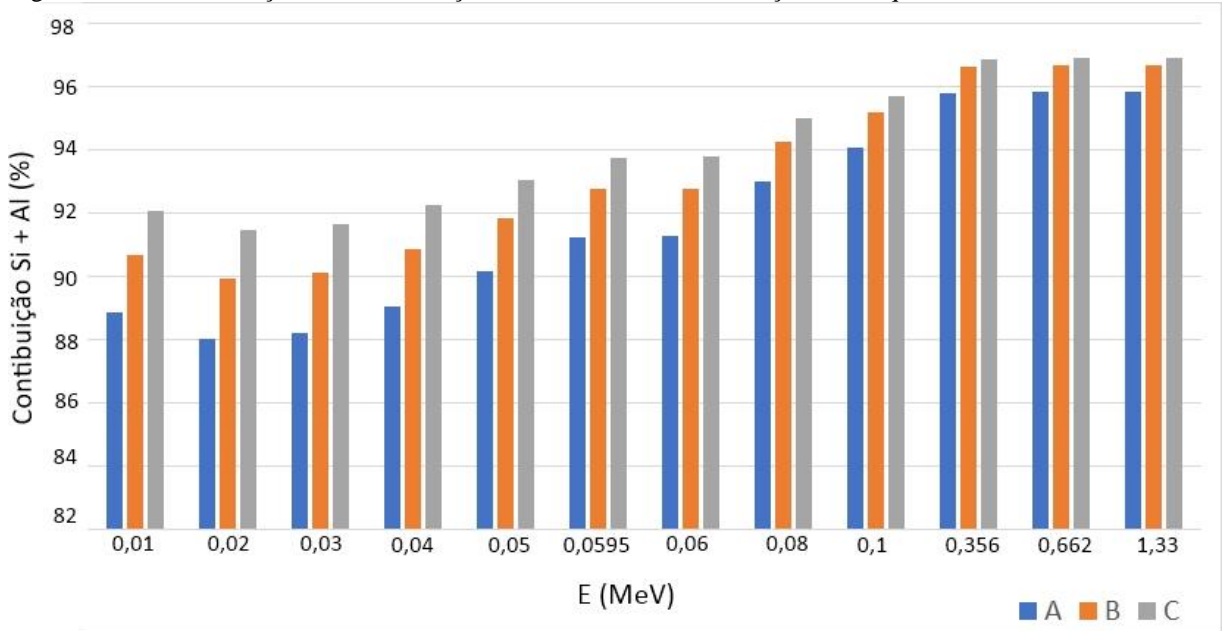
A partir da Figura 5.33 podemos notar também que os valores do Z_{eff} possuem uma maior variação na faixa de energia até 0,1 MeV , acima dela se mantendo quase constante. Essa variação ocorre até a faixa de energia onde há ainda contribuição do efeito fotoelétrico, como pode ser visto na Figura 5.32, com as energias superiores a 0,1 MeV possuindo contribuição dominante do efeito de espalhamento incoerente. Para os valores da N_{el} ocorrem o mesmo, devido a sua dependência diretamente proporcional à Z_{eff} .

Com a retirada do Cs, A, B e C passam a apresentar uma porcentagem com altos valores de Z (Fe, Ti e Cu) sendo: 1,1% A, 1,0% B e 0,7% C. E vemos que A sofre uma leve variação na faixa de energia de 0,356 MeV , esta podendo ser discutida a partir da sua concentração de elementos pesados.

Algo interessante também de se notar ao se retirar o Cs é que ao refazer o cálculo da contribuição das concentrações de Si + Al na seção de choque eletrônica é possível notar um aumento gradual da contribuição com a energia, tendo em vista que elementos de concentrações

de Z maiores diminuem sua contribuição com o aumento de E (Figura 5.34). Além disso, vemos que a contribuição sempre segue a ordem $C \rightarrow B \rightarrow A$, sem a variação vista na contribuição com o elemento Cs.

Figura 5. 35 - Contribuição das concentrações de Si + Al no valor da seção de choque eletrônica, sem o Cs.



Fonte: A autora.

6 CONCLUSÃO

A partir do apresentado, ao observar, visualmente, o aumento da matéria orgânica pode-se supor sua influência nos valores da densidade de partículas do solo, assim como da porcentagem das frações de areia, silte e argila. Ao considerar que a densidade de partícula do solo possui um valor próximo dos minerais que o compõe, pudemos vislumbrar os valores resultantes dos solos estando próximos ao da densidade do mineral quartzo, corroborando com as informações tanto da literatura quanto da pré-descrição onde sabe-se que o possível material de origem é proveniente de quartzitos. Com o aumento da matéria orgânica houve a diminuição dos valores de densidade de partículas como também foi visto o aumento da porcentagem de silte argila.

As zonas de coleta A, B e C resultaram na mesma classificação textural: Areia; não havendo a diferenciação entre eles a partir desta análise.

Na análise feita por meio da EDX-XRF foi encontrado o elemento Si com a maior porcentagem para os três solos, concordando com os resultados tanto na análise textural quanto na de densidade de partículas, seguido dos elementos Al e K, levantando a hipótese da existência do mineral muscovita nas amostras de solo.

Por meio dos parâmetros da interação da radiação com a matéria pode ser visto uma sobreposição de A, B e C referente ao: coeficiente de atenuação de massa, seções de choque atômica e eletrônica. Sendo visto a reta de ajuste do coeficiente de atenuação de massa dos solos muito próxima à do mineral muscovita e a alta influência do elemento Cs nos resultados tanto do número atômico efetivo quanto da densidade eletrônica.

Logo, a partir destas técnicas vemos que mesmo não notando diferenças consideráveis entre A, B e C a partir de sua classificação textural, e até mesmo em sua composição química, ao aplicarmos técnicas que são mais sensíveis às concentrações dos elementos químicos do solo, principalmente aos com alto valor de Z, conseguimos distingui-los, como foi visto nos parâmetros Z_{eff} e N_{el} .

As amostras de solo das três zonas de coleta analisadas do piso do Abrigo da Areia Solta, corroboraram com as características de Neossolo Litólico, com C se aproximando do seu material de origem, por suposição, proveniente de Quartzito ou Quartzitos-muscovíticos.

7 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento da metodologia deste trabalho foi iniciado a técnica de fracionamento físico e por conta da pandemia da Covid-19 houve a necessidade da paralisação do andamento desta técnica. É pretendido dar continuidade ao processo de fracionamento físico, assim como a análise por meio da técnica de difração de raios X para um estudo mais detalhado da fração argila dos solos e de sua mineralogia.

Para o estudo ainda espera-se empregar técnicas como de fluorescência de raios X por comprimento de onda, buscando a análise elementar em uma maior faixa de elementos, podendo encontrar o elemento F (presente na fórmula química da muscovita), assim como comprovar a diminuição ou aumento da matéria orgânica no solo; como também a de microscopia eletrônica por feixe de elétrons, que irá auxiliar na análise elementar e nas suposições mineralógicas e de matéria orgânica.

Pretende-se desenvolver estas técnicas seguindo um trabalho futuro de doutorado, visando a importância da contribuição do conhecimento e preservação do Parque Estadual da Serra Dourada, além de tentar empregar técnicas que consigam ligar os resultados da caracterização encontrados, podendo vislumbrar a interação das características físicas e químicas das amostras.

REFERÊNCIAS

- ALAM, M.N. et al. Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v.54, n.6, p. 973-976, jun. 2001.
- ALMEIDA, W. L. **Quantificação mineral das fases cristalinas de um Argissolo Amarelo pelo método de Rietveld**. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.
- ANJOS, L. H. C. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. In: KER, J.C. et al. (ed.). **Pedologia Fundamentos**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2012. cap.8, p. 303 – 343.
- APPOLONI, C. R.; RIOS, E. A. Mass Attenuation Coefficients of Brazilian Soils in the Range 10 – 1450 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, n.3, p. 287 – 291, 1994.
- ARAÚJO, A. J. **Metodologia para caracterização geoquímica de meteoritos de ferro utilizando a fluorescência de raios X portátil**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.
- ATTIX, F. H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. Wisconsin: Wiley-VCH, 1986.
- BARBOSA, O. et al. **Projeto Goiânia – Relatório Preliminar**. MME (Ministério das Minas e Energias), 1970.
- BARTHELMY, D. **Serach Mineralogy Database**. California, 2014. Disponível em: <http://www.webmineral.com/cgi-bin/search/search.pl>. Acesso em: 27 jan. 2021.
- BERGER, M. **XCOM: photon cross sections database**. Gaithersburg, nov. 2010. Disponível em: <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>. Acesso em: 27 jan. 2021.
- BHANDAL, G. S.; SINGH, K. Photon Attenuation Coefficient and Effective Atomic Number Study of Cements. **Applied Radiation Isotopes**, v.44, n.9, p. 1231 – 1243, set. 1993.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRAZ, A. M. S. **Fundamentos de Pedologia**. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.
- BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil Formation**. USA: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- CESAREO, R. et al. Attenuation Coefficients and Tomographic Measurements for Soil in the Energy Range 10 – 300 keV. **Applied Radiation Isotopes**, v. 45, n.5, p. 613 – 620, 1994.
- COSTA, J. C. et al. Soil bulk density evaluated by gamma-ray attenuation: analysis of system geometry. **Soil and Tillage Research**, v.129, p. 23 – 31, maio 2013.

COSTA, J. C. et al. Soil mass attenuation coefficient: Analysis and evaluation. **Annals of Nuclear Energy**, v. 64, 2014.

CULLITY, B. D. **Elements of X-Ray Diffraction**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1956.

DANNI, J. C. M. et al. Geologia da Extremidade Sudoeste da Serra Dourada (Goiás, Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, v.3, n.3, p.160 – 180, 1973.

DIAS, N. L. et al. A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n.4, 2017.

DINIZ, S. F. et al. Fontes de potássio não trocável e potássio total em quatro solos do estado do Ceará. **Geociências**. v.26, n.4, p. 379 – 386, 2007.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 1977.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018.

FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Florida: AGRIS, 1979.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. J. V. (ed.). **Física do Solo**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2010. cap 1, p. 1 – 28.

GRIEKEN, R. E. V.; MARKOWICZ, A. A. **Handbook of X-Ray Spectrometry**. New York: Marcel Dekker, 2002.

HAN, I. et al. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for some natural minerals. **Radiation Physics and Chemistry**. v.78, p. 760 – 764, 2009.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. USA: Elsevier Science, 1998.

KÄMPF, N; CURI, N. Conceito de solo e sua evolução histórica. In: KER, J.C. et al. (ed.). **Pedologia fundamentos**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2012. cap. 1, p.1 – 20.

KÄMPF, N. et al. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J.C. et.al. (ed.). **Pedologia fundamentos**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2012. cap. 4, p. 81 - 146.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. USA: Addison – Wesley Publishing Company, Inc., 1977.

KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. USA: Elsevier, 2005.

KODUM, K. S. **Caracterização de meteorito por espectroscopia de fluorescência de raios X e MEV**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Física) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of Soil Physics**. Copyright 2004, Marcel Dekker (USA).

LIMA, F. R. **Parque Estadual da Serra Dourada: Uma opção para o ecoturismo, seu cenário atual e perspectivas futuras**. Monografia (Especialização em Ecoturismo) - Universidade de Brasília Centro de Excelência em Turismo, Brasília, 2004.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R. Formação do Solo. In: LIMA, B.Q. et al. (ed.). **O Solo no meio ambiente: Abordagem para Professores do Ensino Fundamental e Médio e Alunos do Ensino Médio**. 1 ed. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007. cap. 1, p. 1 – 10.

LIMA, V. C. et al. Classificação brasileira de solos. In: LIMA B.Q. et al. (ed.). **O Solo no meio ambiente: Abordagem para Professores do Ensino Fundamental e Médio e Alunos do Ensino Médio**. 1 ed. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007. cap. 7, p.77 – 88.

LEINZ, V.; LEONARDOS, O. H. **Notas sobre as Esmeraldas da Fazenda Lages, Itaberaí, Goiás**. DNPM – SFPM: Avulso n° 13, 1936.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

LOPES, J. L. **A Estrutura Quântica da Matéria – do Átomo Pré-Socrático às Partículas Elementares**. 2 ed. Rio de Janeiro: ERCA, 1993.

MANOHARA, S. R.; HANAGODIMATH, S. M. Studies on effective atomic numbers and electron densities of essential amino acids in the energy range 1 keV – 100 GeV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. v.258, p. 321 – 328, 2007.

MANOHARA, S. R. et al. On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 266, p. 3906-3912, 2008.

MARINI, O. J. et al. Contribuição a geologia do pré-cambriano da porção central de Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n.4, 1977.

MEDHAT, M. E. Application of gamma-ray transmission method for investigation of the properties of cultivated soil. **Ann Nucl Energy**, v. 40, p. 53 – 59, 2012a.

MEDHAT, M. E. Study of the mass attenuation coefficients and effective atomic numbers in some gemstones. **J Radional Nucl Chem**, v. 293, p. 555-564, 2012b.

MEDHAT, M. E. et al. Analysis of photon interaction parameters as function of soil composition. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 200, p.1105, 2014.

MEDEIROS, L. C. et al. Caracterização físico química de um neossolo litólico na região Seridó do RN. **Revista ACSA**, v.9, n.4, p. 01-07, 2013.

MENEZES, S. O. **Rochas: manual fácil de estudo e classificação**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

MOMOLI, R. S. et al. Conservação dos solos e ecoturismo no Parque Estadual da Serra Dourada, Goiás. **Geografia**, v.46, n.1, 2021.

MOREIRA, A. C.; APPOLONI, C. R. Mass attenuation coefficient of the Earth, Moon and Mars samples over 1 keV – 100 GeV energy range. **Applied Radiation and Isotopes**. v.64, p. 1065 – 1073, 2006.

NASCIMENTO FILHO, V. F. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF). **Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA**, 1999.

NASCIMENTO, N. A. L. S. Geomorfologia do Estado de Goiás. Boletim Goiano de Geografia. **Goiania: UFG**, v.12, n.1. jan./dez., 1991.

NAVARRO, G. R. B. et al. O Grupo Araxá na Região Sul-Sudoeste do Estado de Goiás. **Revista do Instituto de Ciências – USP, São Paulo**, v. 13, n.2, p. 5-28, jun., 2013.

NELSON, G.; REILLY, D. Gamma-Ray Interactions with Matter. In: REILLY, D. et al. (ed.). **Passive Nondestructive Analysis of Nuclear Materials**. 1 ed. Washington: National Technical Information Service, 1991. cap. 2, p. 27-42.

NIST. **Interface software XCOM**. Gaithersburg, 17 set. 2009. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. Acesso em: 27 jan. 2021.

OLSON, G. **Soils and the Environment: A guide to soil surveys and their applications**. New York: Springer Netherlands, 1981.

PINTO FILHO, R. F. **Inventário e avaliação da geodiversidade no município de Goiás e Parque Estadual da Serra Dourada**. Dissertação (Mestrado em Geografia - Área de concentração: Análise Ambiental e Tratamento de Informação Geográfica) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

PIRES, L. F. Soil analysis using nuclear techniques: A literature review of the gamma ray attenuation method. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 216 – 234, 2018.

PIRES, L. F. et al. Gamma-ray attenuation method as an efficient tool to investigate soil bulk density spatial variability. **Ann Nucl Energy**, v. 36, p. 1734 – 1739, 2009.

PIRES, L. F. et al. Mineralogical composition of hardsetting soils and its effect on the radiation attenuation characteristics. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, p. 1059 – 1068, 2016.

PRANDEL, L. V. **Integração de métodos de caracterização mineralógica de solos caulínicos**. Tese (Doutorado em Ciências – Área de concentração: Física) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.

PRANDEL, L. V. et al. Mineralogical analysis of clays in hardsetting soil horizons, by X-ray fluorescence and X-ray diffraction using Rietveld method. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 65 – 68, 2014.

QUANTACHROME INSTRUMENTS. **Multipicnometer Intruments Model: MVP-D160-EM Operating Manual**. Inc. Boynton Beach, FL, 2009.

REVOLLO, E. **Geología Física y geología histórica de Sudamérica**. US: Xlibris, 2015.

RIBEIRO, M. R. et al. Caracterização morfológica do Solo. In: KER, J.C. et al. (ed.). **Pedologia Fundamentos**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2012. cap. 3, p. 47 – 80.

SANTOS, E. S. et al. Espectrometria de fluorescência de raios x na determinação de espécies químicas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n.17, 2013.

SANTOS, J. C. B. et al. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.36, p. 683 – 695, 2012.

SILVA, N. C. Laboratório virtual de física moderna: atenuação da radiação pela matéria. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n.3, p. 1206 – 1231, 2012.

SERWAY, R. A. et al. **Modern Physics**. 3ed. USA: Thomson Learning, 2005.

SIMÕES, L. S. A. **Geologia do Grupo Araxá na região de Mossâmedes – Goiás, e as ocorrências minerais associadas**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 1984.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo: Blucher, 2003.

TAKEHARA, L. **Avaliação do potencial de Terras Raras no Brasil**. Informe de Recursos Naturais Minerais: Série Minerais Estratégicos, Brasília, 2015.

TARIM, U. A. et al. Monte Carlo calculations for gamma-ray mass attenuation coefficients of some soil samples. **Annals of Nuclear Energy**, v.58, p. 198-201, 2013.

TARTARI, A. et al. Z dependence of mass attenuation coefficient at 59.54 keV photon energy: experimental assessment of biding energy effects. **Radioation Physics and Chemistry**, v.53, p. 445 – 448, 1998.

TAVARES FILLHO, J. **Física e conservação do solo e água**. Londrina: Eduel, 2016.

UN. A.; SAHIN. Y. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers, effective electron numbers and kermas of Earth and Martian soils. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Reasearch B.**, v.288, p. 42-47, 2012.

UHLEIN, A. et al. Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional. **Genomos**, v. 20, n. 2, p. 1-14, 2012.

VAZ, C. M. P. et al. Using a Computed Tomography Miniscanner for Studying Tillage inducedsoil compactation. **Soil Technology**, v. 2, p. 313-321, 1989.

VIANA, J. H. M. et al. Densidade de Partículas. In: TEIXEIRA, P.C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017. cap. 1, p. 76 – 81.

VIEIRA, M. J.; CARNEIRO, V. A. Trabalho de campo da disciplina “Tópicos de Geodiversidade” na Serra Dourada (estado de Goiás): impressões e relato. **Revista Territorial, Cidade de Goiás**, v. 9, n. 1, p. 49-64, 2020.

WASTOWSKI, A. D. et al. Caracterização dos Níveis de Elementos Químicos em Solo, Submetido a Diferentes Sistemas de Uso e Manejo, Utilizando Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1449-1452, 2010.

YANAGUISAWA, V. A. **Caracterização mineralógica de um Neossolo Flúvico por técnicas de espectroscopia, microscopia e difração de raios X**. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Física) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**. v.3, p. 57 – 67, 2009.

APÊNDICE – TABELAS DE COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA E SUAS CONTRIBUIÇÕES

Tabela A. 1 - Valores do coef. de atenuação de massa parciais e total para A, B e C.

E (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)											
	Coerente			Incoerente			Fotoelétrico			Total		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0,01	0,63	0,63	0,63	0,11	0,11	0,11	35,39	34,72	34,79	36,13	35,46	35,53
0,02	0,24	0,24	0,24	0,14	0,14	0,14	4,43	4,34	4,34	4,81	4,71	4,72
0,03	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,15	1,27	1,24	1,24	1,55	1,52	1,52
0,04	0,08	0,08	0,08	0,15	0,15	0,15	0,54	0,53	0,54	0,78	0,76	0,78
0,05	0,06	0,05	0,06	0,15	0,15	0,15	0,27	0,26	0,27	0,48	0,47	0,48
0,0595	0,04	0,04	0,04	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,35	0,34	0,35
0,06	0,04	0,04	0,04	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,34	0,34	0,34
0,08	0,02	0,02	0,02	0,15	0,15	0,15	0,06	0,06	0,06	0,23	0,23	0,23
0,1	0,02	0,02	0,02	0,14	0,14	0,15	0,03	0,03	0,03	0,19	0,19	0,19
0,356	0	0	0	0,10	0,10	0,10	0	0	0	0,10	0,10	0,10
0,662	0	0	0	0,08	0,08	0,08	0	0	0	0,08	0,08	0,08
1,33	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0	0	0	0,05	0,05	0,05

Fonte: A autora.

Tabela A. 2 - Contribuição dos efeitos parciais no valor do coef. de atenuação de massa total para A, B e C.

E (MeV)	Contribuição (%) no valor do μ/ρ total								
	Coerente			Incoerente			Fotoelétrico		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0,01	1,8	1,8	1,8	0,3	0,3	0,3	98,0	97,9	97,9
0,02	5,0	5,0	5,1	2,9	3,0	3,0	92,1	92,0	92,0
0,03	8,3	8,4	8,5	9,7	9,9	9,9	82,0	81,7	81,7
0,04	10,4	10,5	10,4	19,7	20,0	19,7	69,9	69,5	69,9
0,05	11,6	11,7	11,5	32,0	32,4	32,0	56,4	55,9	56,5
0,0595	11,7	11,7	11,7	43,6	44,1	43,8	44,7	44,2	44,8
0,06	11,7	11,7	11,6	44,2	44,7	44,4	44,2	43,6	44,2
0,08	10,3	10,3	10,2	63,4	63,9	65,2	26,3	25,9	26,4
0,1	8,4	8,4	8,3	75,6	75,9	80,5	16,0	15,7	16,1
0,356	1,3	1,3	1,3	98,1	98,1	98,1	0,6	0,6	0,6
0,662	0,5	0,5	0,5	99,3	99,3	99,3	0,2	0,1	0,2

Fonte: A autora.

Tabela A. 3 - Faixas de energia e valores de μ/ρ utilizados para os cálculos de seção de choque, Z_{eff} e N_{el} .

E (MeV)	μ/ρ total (cm ² /g)		
	A	B	C
0,01	36,1300	35,4600	35,5300
0,02	4,8090	4,7130	4,7180
0,03	1,5460	1,5160	1,5170
0,04	0,7757	0,7627	0,7757
0,05	0,4783	0,4716	0,4790
0,0595	0,3486	0,3445	0,3493
0,06	0,3442	0,3402	0,3449
0,08	0,2329	0,2311	0,2334
0,01	0,1887	0,1877	0,1890
0,356	0,1007	0,1006	0,1008
0,662	0,0771	0,0770	0,0772
1,33	0,05494	0,05489	0,05499

Fonte: A autora

ANEXO A - ETIMOLOGIA DOS TERMOS USADOS NO 1º NÍVEL CATEGÓRICO DO SIBCS, E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS

Nomenclatura ¹	Etimologia	Característica Associada
ARGISSOLOS	Do latim "argilla", conotando solos com processo de acumulação de argila.	Horizonte B textural
CAMBISSOLOS	Do latim "cambiare", trocar; conotativo de solos em formação (transformação).	Horizonte B incipiente
CHERNOSSOLOS	Do russo "chern", negro; conotativo de solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura.	A chernozêmico; preto; rico em bases
ESPODOSSOLOS	Do grego "spodos", cinza vegetal, solos com horizonte subsuperficial de acumulação de materiais orgânicos associados à presença de Al e, ou, Fe.	Horizonte B espódico
GLEISSOLOS	Do russo "gley", massa de solo pastosa; conotativo de excesso de água.	Horizonte glei; cor cinza; redução
LATOSSOLOS	Do latim "lat", material altamente alterado (tijolo); conotativo de elevado conteúdo de óxidos.	Horizonte B latossólico
LUVISSOLOS	Do latim "luere", lavar; conotativo de acumulação de argila.	Solo saturado com bases; B textural; acúmulo de argila de alta atividade (Ta)
NEOSSOLOS	Do grego "neos", novo, moderno; conotativo de solos jovens, em início de formação.	Pequeno desenvolvimento; sem horizonte diagnóstico subsuperficial
NITOSSOLOS	Do latim "nitidus", brilhante; conotativo de superfícies brilhantes em unidades estruturais.	Horizonte B nítico
ORGANOSSOLOS	Do grego "organikós", pertinente ou próprio dos compostos de carbono. Conotativo de solos com maior expressão da constituição orgânica, ambientes hidromórficos ou de umidade elevada.	Horizonte H ou O hístico
PLANOSSOLOS	Do latim "planus", plano, horizontal; conotativo de solos desenvolvidos sob a influência de encharcamento superficial estacional.	Horizonte B plânico
PLINTOSSOLOS	Do grego "plinthos", ladrilho; conotativo de materiais argilosos, coloridos, que endurecem quando expostos.	Horizonte plíntico
VERTISSOLOS	Do latim "vertere"; conotativo de movimento de material de solo na superfície e que atinge a subsuperfície do solo (expansão/contração).	Horizonte vértico

¹ A grafia apresentada para as ordens, com letras maiúsculas, é a padronizada pelo SiBCS para ser usada em legendas de mapas de solos e nos respectivos relatórios. As características associadas são aquelas listadas no SiBCS (Embrapa, 2006).

ANEXO B – DIÂMETRO E TEMPOS DE SEDIMENTAÇÃO PARA AS FRAÇÕES DO SOLO

Fração do solo	diâmetro (μm)	Tempo de sedimentação
Areia muito grossa	2000 (= 2 mm)	0,03 s
Areia fina	200	2,7 s
Silte	20	4,5 min
Argila	2	7,7 h
Argila fina	0,2	32 d
Argila ultra fina	0,002	860 anos

(*) considerou-se: temperatura 20 °C; densidade da água 1000 kg m⁻³; densidade de partículas 2700 kg m⁻³; viscosidade da água 10⁻³ Pa s.

Fonte: Ferreira (2010).

ANEXO C - FICHA DE DESCRIÇÃO DA REGIÃO V6 DO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DOURADA - GO – BR

FOLHA DE DESCRIÇÃO DE PERFIS

ID Ponto: V6 Serra Dourada **Data:** 13/06/2018 **Município:** Mossâmedes **Coordenadas:** 0586810; 8221789 UTM; WGS 84; Z 22
Nome do anotador: Renata **Integrantes da equipe:** Aline, Renata, Jéssica e Vlândia
Provável Classificação (ou Regional): Neossolo litólico **Relevo local/Declividade:** Montanhoso/50%
Material de Origem (se conhecido): Quartzito; Quartzo-xisto **Formação Geológica:** Grupo Araxá

Horiz. Diagn.	Prof. (cm)	Cor (Munsell)		Agregados (Estrutura)			Consistência			Textura	Transição	Cerosidade	Atração magnética
		Seca	Úmida	Tamanho	Tipo	Grau	Seca	Úmida	Molhada				
A	0-5			pequeno	granular	fraco	Solta	Muito frável		arenosa	-	ausente	ausente



Observações:

Sedimentos arenosos coletados no piso de uma caverna do tipo "abrigo", apenas uma passagem aberta na rocha sem zona afótica.