



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

RADÔNIO EM ÁREA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL NO MUNICÍPIO DE
FIGUEIRA (PR)

LEONARDO ALFREDO SALIM

Orientador Prof. Dr.

DANIEL MARCOS BONOTTO

TESE DE DOUTORADO

Rio Claro - SP
2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

LEONARDO ALFREDO SALIM

**RADÔNIO EM ÁREA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL NO MUNICÍPIO DE
FIGUEIRA (PR)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

RIO CLARO-SP
2018

549 Salim, Leonardo Alfredo
S165r Radônio em área de extração de carvão mineral no
município de Figueira (PR) / Leonardo Alfredo Salim. - Rio
Claro, 2018
146 f. : il., figs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Daniel Marcos Bonotto

1. Mineralogia. 2. Radônio. 3. Carvão mineral. 4. Taxa de
exalação. 5. Radiação. 6. Radônio no solo. I. Título.

LEONARDO ALFREDO SALIM

**RADÔNIO EM ÁREA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL NO MUNICÍPIO DE
FIGUEIRA (PR)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto – orientador
Prof. Dr. Francisco Yukio Hido
Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva
Profa. Dra. Rosemarie Rohn Davis
Prof. Dr. Antônio Carlos Artur

Conceito: APROVADO

Rio Claro/SP, 02 de maio de 2018

RESUMO

O gás radônio, resultado do decaimento radioativo do ^{238}U e ^{232}Th , é motivo de grande preocupação para o homem. Ele é uma das mais importantes fontes de radiação ionizante de origem natural que as pessoas estão expostas, sendo considerado pela OMS (Organização Mundial da Saúde) como o segundo maior causador de câncer de pulmão. O carvão mineral como qualquer outro combustível fóssil está associado a materiais radioativos naturais, devido principalmente ao seu conteúdo de ^{238}U e ^{232}Th . Para a compreensão do comportamento do gás radônio em área de mineração de carvão e determinar o grau de exposição das pessoas ao gás nesta área, foram determinadas a taxa de exalação de radônio de amostras de carvão, cinza, siltito e tufo vulcânico coletadas na mina Amado Simões PI-08 (Companhia Carbonífera do Cambuí), em Figueira (PR), a concentração de radônio no ar do interior da mina e a concentração de radônio, parâmetros físicos e químicos dos solos próximos à mina. As taxas de exalações foram obtidas por curvas experimentais da concentração de radônio em função do tempo, e variaram de 0,064 a 0,717 Bq/kg.h. Observou-se que o gás radônio entrou em equilíbrio radioativo após 180 horas de análise. A concentrações de radônio dissolvido no ar do interior da mina variaram de 7,2 a 770,5 Bq/m³, observou-se que o radônio tem maior escape das rochas por fraturas presentes nas frentes de lavra e que maior taxa de exalação vem das rochas encaixantes, remetendo em um problema radiológico à área de descarte. A concentrações de radônio nas amostras de solo variaram de 0,04 a 276,48 (kBq/m³), a qual obteve correlação com a concentração de U, que variou de 0,43 a 8,46 ppm. Observou-se a tendência do radônio se acumular em ambientes com maior concentração de urânio, úmidos, aluminosos, argilosos e com presença de matéria orgânica.

Palavras-chave: Radônio, Carvão mineral, Taxa de exalação, Radiação.

ABSTRACT

Radon gas, the result of the radioactive decay of ^{238}U and ^{232}Th , is a matter of great concern to man. It is one of the most important sources of naturally occurring ionizing radiation that people are exposed to and is considered by the World Health Organization (WHO) to be the second largest cause of lung cancer. Mineral coal like any other fossil fuel is associated with natural radioactive materials, mainly due to its content of ^{238}U and ^{232}Th . In order to understand the behavior of the radon gas in the coal mining area and determine the degree of exposure of the people to the gas in this area, the radon exhalation rate of samples of coal, ash, silt, and volcanic tuff collected at the Amado mine Simões PI-08 (Companhia Carbonífera do Cambuí), in Figueira (PR), the radon concentration in the air inside the mine and the radon concentration, physical and chemical parameters of the soils near the mine. The exhalation rates were obtained by experimental curves of the radon concentration as a function of time, and ranged from 0.064 to 0.717 Bq / kg.h. It was observed that the radon gas entered into radioactive equilibrium after 180 hours of analysis. The concentrations of radon dissolved in the air inside the mine varied from 7.2 to 770.5 Bq / m³, it was observed that the radon has greater escape of the rocks by fractures present in the mining fronts and that higher exhalation rate comes from encasing rocks, sending in a radiological problem to the area of discard. The concentrations of radon in the soil samples ranged from 0.04 to 276.48 (kBq / m³), which correlated with the U concentration, which ranged from 0.43 to 8.46 ppm. It was observed the tendency of radon to accumulate in environments with higher concentration of uranium, humid, aluminous, clayey and with presence of organic matter.

Keywords: Radon, Mineral coal, Exhalation rate, Radiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U (4n+2), ^{232}Th (4n) e do ^{235}U (4n+3).	22
Figura 2 - Distribuição de urânio em rochas ígneas	27
Figura 3 - Decaimento radioativo do ^{224}Ra , produzindo ^{220}Rn , que por recuo é interceptado pela fase fluida circundante (ar/água subterrânea).....	30
Figura 4 - Atividade relativa em função de unidades de meia vida.....	34
Figura 5 - Localização do município de Figueira nos territórios brasileiro e paranaense	38
Figura 6 - Mapa geomorfológico da região de Figueira	39
Figura 7 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. Destaque em vermelho as unidades citadas no trabalho e em azul as formações Rio Bonito e Palermo..	41
Figura 8 - Mapa geológico da região de Figueira (PR).	42
Figura 9 - Camada de carvão explorada com espessura de aproximadamente 45 cm	45
Figura 10 – Mina Amado Simões PI-08 , ressaltando o blocos já lavrados e os planejados.....	46
Figura 11 – Localização da mina Amado Simões PI-08 (Companhia Carbonífera do Cambuí), Termoelétrica e o pátio de rejeito de cinzas no município de Figueira-PR.....	48
Figura 12 - Alpha Guard PQ2000PRO.	50
Figura 13 - Amostra de carvão e cinzas condicionadas para análise.....	51
Figura 14 - Sistema usado para medir a exalação do gás radônio nas amostras estudadas composto de (1) espectrômetro alfa; (2) bomba de ar; (3) garrafão e (4) sistemas de válvulas e, o (5) sentido da circulação do ar interno conforme especificação do aparelho.	52

Figura 15 - Sistema usado para medir a concentração do gás radônio dissolvido no ar no interior da mina.....	53
Figura 16 - Imagem ilustrativa da montagem do equipamento para medir o <i>background</i> do AlphaGUARD.....	55
Figura 17 - AlphaGUARD montado para medida de <i>background</i>	56
Figura 18 - Haste de perfuração com marcações coloridas.	57
Figura 19 - Esquema ilustrativo do circuito sonda ligado ao AlphaGUARD. ...	57
Figura 20 - Esquema montado com a sonda ligada ao AlphaGUARD.	58
Figura 21 - Esquema ilustrativo de limpeza do AlphaGUARD.....	59
Figura 22 - Pontos de coleta para determinação dos índices físicos do solo ..	60
Figura 23 - Anéis de aço inoxidável utilizados para tirar amostra indeformada.	61
Figura 24 - Balão Volumétrico conectado à bomba para retirada de ar.	63
Figura 25 – Ensaio de sedimentação	64
Figura 26 - Bateria de peneiras sobre a mesa vibratória.....	65
Figura 27 - Espectrômetro gama NaI(Tl), do Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO) do DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro	67
Figura 28 – Sistema espectrométrico gama instalado no Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO).....	68
Figura 29 - Curva de calibração do U em concentração..	70
Figura 30 - Curva de calibração do Th em concentração.....	70
Figura 31 - Fluorescência de raios-X do laboratório de radiações ionizantes (LARIN)	71
Figura 32 – Difração de raios-X do laboratório de radiações ionizantes (LARIN)	72
Figura 33 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de carvão mineral.....	75

Figura 34 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de cinza.....	75
Figura 35 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de siltito.....	76
Figura 36 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de tufo vulcânico.....	76
Figura 37 - Teor de urânio e tório de cada amostra analisada.....	79
Figura 38 - Mapa da mina Amando Simões dividido em 5 setores (A - E).	82
Figura 39 – Setor A (P1,P2 e P8).....	83
Figura 40 - Setor B (P7 e P8).....	84
Figura 41 - Setor C (P3,P4, P5,P6 e P18).....	85
Figura 42 - Setor D (P10,P11 e P12).....	86
Figura 43 - Setor E (P13,P14,P15,P16 e P17).....	87
Figura 44 – Localização dos furos de sondagem F08-22, F08-58 e F08-62 ...	91
Figura 45 – Localização dos pontos onde foram efetuadas as análises de solo.....	94
Figura 46 - Distribuição do pH do solo na área estudada.....	96
Figura 47 - Distribuição da temperatura do solo na área estudada.....	96
Figura 48 - Distribuição de SiO_2 no solo na área estudada.....	99
Figura 49 - Distribuição de Al_2O_3 no solo na área estudada.....	99
Figura 50 - Distribuição de Fe_2O_3 no solo na área estudada.....	100
Figura 51 - Distribuição de TiO_2 no solo na área estudada.....	100
Figura 52 - Distribuição de K_2O no solo na área estudada.....	101
Figura 53 - Distribuição de MgO no solo na área estudada.....	101
Figura 54 - Distribuição de SO_3 no solo na área estudada.....	102
Figura 55 - Distribuição de ZrO_2 no solo na área estudada.....	102

Figura 56 - Distribuição de P_2O_5 no solo na área estudada.....	103
Figura 57 - Distribuição de CaO no solo na área estudada.....	103
Figura 58 - Distribuição de MnO no solo na área estudada.....	104
Figura 59 - Distribuição de ZnO no solo na área estudada.....	104
Figura 60 - Distribuição de Rb_2O na área estudada.....	105
Figura 61 – Espectro da difração de raios-x da amostra 6, mostrando a presença quartzo, caulinita, muscovita, illita e goethita na amostra.....	106
Figura 62 - Diagrama triangular $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$	106
Figura 63 - Relação entre teores de SiO_2 e Al_2O_3	107
Figura 64 - Relação entre teores de SiO_2 e Fe_2O_3	107
Figura 65 - Relação entre teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3	108
Figura 66 - Distribuição de matéria orgânica na área estudada.	108
Figura 67 - Relação entre teores de MO e SiO_2	109
Figura 68 - Relação entre teores de MO e Al_2O_3	109
Figura 69 – Variação densidade do solo na área de estudo.	111
Figura 70 – Variação do teor de umidade do solo na área de estudo.	112
Figura 71 - Variação da massa específica seca do solo na área de estudo..	112
Figura 72 – Variação da massa específica dos sólidos na área de estudo. ...	113
Figura 73 – Variação do índice de vazios no solo na área de estudo.	113
Figura 74 – Variação da porosidade do solo na área de estudo.	114
Figura 75 – Variação no grau de saturação do solo na área de estudo	114
Figura 76 – Curvas granulométricas das amostras analisadas	115
Figura 77 – Distribuição da fração areia na área estudada.	116
Figura 78 – Distribuição da fração silte na área estudada.....	117

Figura 79 – Distribuição da fração argila na área estudada	117
Figura 80 – Diagrama triangular de classificação textural proposta por Lemos e Santos (1996).....	118
Figura 81 - Distribuição de U no solo na área estudada.....	120
Figura 82 - Distribuição de Th no solo na área estudada	120
Figura 83 - Relação entre teores de U e SiO_2 no solo	121
Figura 84 - Relação entre teores de U e Fe_2O_3 no solo.....	122
Figura 85 - Relação entre teores de U e Al_2O_3 no solo.	122
Figura 86 - Relação entre teores de U e umidade no solo.	123
Figura 87 - Relação entre teor de U e porcentagem de argila no solo	123
Figura 88 - Relação entre teores de U e MO no solo	124
Figura 89 - Relação entre teores de U e Th no solo.....	125
Figura 90 - Relação entre teores de Th e SiO_2 no solo	125
Figura 91 - Relação entre teores de Th e Al_2O_3 no solo.....	126
Figura 92 - Relação entre teores de Th e umidade no solo	126
Figura 93 - Relação entre teor de Th e porcentagem de argila no solo.....	127
Figura 94 - Relação entre teores de Th e MO no solo.....	127
Figura 95 - Distribuição de Rn no solo na área estudada	129
Figura 96 - Relação entre teores de Rn e U no solo.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração média de tório para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.	25
Tabela 2 – Conteúdo de urânio em minerais de rochas	27
Tabela 3 - Concentração média de urânio para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.	28
Tabela 4 – Energia e probabilidade de emissão das partículas α dos isótopos de radônio	29
Tabela 5 – Atividade relativa em função de unidades de meia vida.	33
Tabela 6 – Atividade relativa em função do tempo para ^{219}Rn , ^{220}Rn e ^{222}Rn	34
Tabela 7 – Formulas para a determinação dos índices físicos do solo.....	62
Tabela 8 - Malhas de peneiramento utilizadas	66
Tabela 9 – Resultados da concentração e da taxa de exalação de radônio em cada material estudado.	77
Tabela 10 - Concentrações de U e Th das amostras analisadas.....	79
Tabela 11 – Concentração de radônio dissolvido no interior da mina.....	81
Tabela 12 – Correlação entre espessura de camada com concentração de Rn.	90
Tabela 13 – Localização dos pontos.....	93
Tabela 14 – Valores de pH e temperatura determinados <i>in situ</i>	95
Tabela 15 - Porcentagem de óxidos presentes nas amostras de solo.....	98
Tabela 16 – Resultado dos índices físicos das amostras de solo.....	110
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de granulometria/sedimentação.	116
Tabela 18 – Resultados da análise do solo por espectrometria gama.	119
Tabela 19 – Resultados das analisa da concentração de radônio no solo. ...	128
Tabela 20 – Concentração de radônio obtida comparada com os limites da literatura..	131

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	17
3 CONCEITOS BÁSICOS	18
3.1 Quantificação da Radioatividade	19
3.2 Séries radioativas	20
3.3 Ocorrência de tório e urânio nas rochas	23
3.3.1 Tório	23
3.3.2 Urânio	25
3.4 Radônio	29
3.5 Equilíbrio Radioativo Secular	31
3.6 Diminuição da atividade isotópica de radônio	32
3.7 Fatores que influenciam na concentração de radônio nos solos	34
3.7.1 Umidade do solo e precipitação	35
3.7.2 Porosidade e permeabilidade	35
3.7.3 Pressão atmosférica	35
3.7.4 Temperatura do solo e do ar	36
3.7.5 Ventos	36
3.8 Carvão mineral	36
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	38
4.1 Geologia Regional	40
4.2 A mineração de carvão em Figueira	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS	49
5.1 Trabalho de campo	49
5.2 Alpha Guard	49

5.3 Determinação da taxa de exalação de radônio	51
5.4 Determinação da concentração de radônio no ar do interior da mina	53
5.5 Determinação da concentração de radônio no solo	54
5.5.1 Determinação de ^{222}Rn e ^{220}Rn no solo utilizando AlphaGUARD	54
5.5.1.1 Medida do <i>background</i>	55
5.5.1.2 Procedimento de análise	56
5.5.1.3 Limpeza do sistema	59
5.5.1.4 Análise dos dados	59
5.6 Determinação dos índices físicos do solo.....	60
5.6.1 Trabalho de campo.....	60
5.6.2 Ensaio geotécnicos.....	61
5.7 Espectrometria Gama	66
5.7.1 Sistema Espectrométrico	67
5.7.2 Calibração do sistema em concentração.....	69
5.8 Fluorescência de raios x	71
5.9 Difração de raios x	72
5.10 Concentração de matéria orgânica (MO).....	73
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
6.1 Exalação de radônio.....	74
6.1.1 Curva de exalação de radônio.....	74
6.1.2 Concentrações de Urânio e Tório	78
6.1.3 Correlação dos dados.....	80
6.2 Determinação da concentração radônio no ar do interior da mina ...	81
6.3 Determinação da concentração de radônio no solo	93
6.3.1 Composição química dos solos	97
6.3.2 Índices físicos do solo.....	110
6.3.3 Concentração de Urânio, Tório e Potássio no solo.....	119
6.3.4 Concetração de Rn no solo.	128

7 CONCLUSÕES	132
8 REFERÊNCIAS.....	134
ANEXO A – CORRELAÇÃO PEARSON DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SOLO	145

1 INTRODUÇÃO

Radônio é um gás inerte natural que se origina do rádio, um membro das séries de decaimento do urânio e tório. Urânio e tório são elementos presentes em rochas, solos e minerais. Existem três isótopos de ocorrências naturais de radônio (Rn): ^{219}Rn (actinión), ^{220}Rn (torônio), e ^{222}Rn , comumente chamado de radônio. O ^{222}Rn é o principal isótopo do radônio. Ele pertence à série de decaimento do ^{238}U , tem uma meia vida de 3.82 dias e é produzido pelo decaimento radioativo do ^{226}Ra (SELINUS, 2005).

O ^{222}Rn é motivo de grande preocupação para o homem. Ele é uma das mais importantes fontes de radiação ionizante de origem natural que as pessoas estão expostas, sendo considerado pela OMS (Organização Mundial da Saúde) como o segundo maior causador de câncer de pulmão, depois do cigarro (WHO, 2009).

Além das preocupações com o ^{222}Rn , a contribuição do ^{220}Rn (torônio) para a saúde humana também foi reconhecida. ^{220}Rn é derivado do isótopo de rádio ^{224}Ra , um produto de decaimento na série de tório (^{232}Th). ^{220}Rn possui meia-vida de 54,5 s, e em decomposição emite uma única partícula alfa com energia de 6,3 MeV. Sua desintegração gera alguns isótopos radioativos até chegar ao isótopo estável ^{208}Pb .

Por serem gerados por emissão alfa, os nuclídeos de ^{220}Rn e ^{222}Rn estão sujeitos a um processo de recuo no instante do seu nascimento; este recuo permite que uma fração do gás produzido escape das rochas e minerais, sendo interceptada pela fase fluida circundante, por exemplo, ar e água subterrânea. A migração do ^{220}Rn ocorre principalmente por difusão através dos poros das rochas e dos solos, falhas e fissuras, bem como por dissolução nas águas subterrâneas e superficiais (BONOTTO, 2008).

O ^{220}Rn por muito tempo foi desprezado devido sua meia vida curta e sua disponibilidade no ambiente. Contudo, estudos recentes mostram que em certas regiões, a exposição ao gás torônio e suas progênes pode igualar ou até exceder a do ^{222}Rn (STEINHÄUSLER, 1996). Por exemplo, na China, Shang et al. (2005) relatou medições de ^{220}Rn no ar, em residências tradicionais chinesas construídas com

tijolos de barro, que variou de 33,9 a 513 Bq/m³ enquanto o radônio variou de 41,7 a 101 Bq/m³, na província de Gansu Yamada et al.(2006) obteve uma concentração média de ²²⁰Rn igual a 391 Bq/m³ contra 91 Bq/m³ de ²²²Rn.

Além de estudos realizados na China, em vários outros países estão sendo relatados resultados de altas concentrações de ²²⁰Rn. Vaupotič e Návási (2010) obtiveram concentrações extremamente elevadas de ²²⁰Rn, de 11 a 1361 Bq/m³, em ambientes internos de edifícios públicos na Eslovênia; Reddy et al.(2004) detectou uma variação de 8 a 330 Bq/m³ de ²²⁰Rn em residências de diferentes tipos de construção na cidade de Hyderabad, Índia; Chen et al (2008) obteve concentrações de ²²⁰Rn em algumas residências de Ottawa no Canadá que variaram de 5 a 924 Bq/m³, com média de 56 Bq/m³; Na Hungria, Kovács (2010) analisou a concentração de ²²⁰Rn em habitações, minas de manganês e bauxita, e cavernas, no qual obteve valores médios de 100 Bq/m³ a 1000 Bq/m³.

No Brasil ainda não foi criada uma norma que regulamente limites para os níveis de exposição de ²²²Rn em solos pois ainda não há medidas suficientes realizadas. Tratando-se de clima tropical existem poucas pesquisas que relacionem aspectos geológicos com a concentração de radônio dos gases nos solos (LARA, 2013).

A posição de regulamentação da CNEN 3.01/007, Comissão Nacional de Energia Nuclear, (CNEN-NE 3.01, 2005) estabeleceu que valores acima do valor de referência adotado de 10 mSv/a necessitam sofrer ação de intervenção em situações de exposição crônica, ou seja, ao longo do tempo da população deste ambiente de convívio em questão. Este valor, de acordo com a ICRP 106 (ICRP, 2008) corresponde a 300 Bq/m³.

A *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR), adotou como referência o limite de concentração indoor de ²²²Rn o valor de 200 Bq/m³, sendo este limite considerado normal perante esta agência internacional regulamentadora, para concentrações *indoor* (UNSCEAR, 2000). A *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) tem como valor de referência limite, considerado normal, 200 Bq/m³. Na qual, valores abaixo deste limite não apresentam situações de risco de acordo com esta agência internacional regulamentadora para concentrações indoor (ICRP, 1993).

Na Suécia os valores limites para concentração de ^{222}Rn no solo que caracterizam risco ou podem caracterizar, determinando que concentrações inferiores a 10 kBq/m^3 são considerados de “baixo risco” e não necessitam de construções especiais. Já, solos com concentrações de 10 e 50 kBq/m^3 são classificados como “risco normal” e necessitam de ações para proteger as habitações. Solos que apresentam concentrações acima de 50 kBq/m^3 caracterizam situação de “alto risco” e necessitam de medidas de segurança contra o radônio (AKERBLON,1987).

Na Alemanha também foram determinadas concentrações com valores limites baseadas nas concentrações de radônio no solo, apresentado por Kemski *et al.*, (2001), determinando que valores abaixo de 10 kBq/m^3 são classificados como baixo risco. Valores de 10 a 100 kBq/m^3 como risco médio e valores acima de 100 kBq/m^3 como alto risco. Na Itália, concentrações do gás radônio no solo determinadas em 25 kBq/m^3 no solo são de risco médio-alto (BERTOLO; VERDI, 2001).

^{220}Rn e ^{222}Rn são frequentemente encontrados em conjunto no ambiente; esta particularidade, além da meia vida curta, é uma das grandes dificuldades para determinar a concentração exata de ^{220}Rn . Para suas análises é necessário utilizar uma metodologia que os discrimine, para que um não interfira no valor do outro (TOKONAMI, 2010).

O carvão mineral é uma rocha sedimentar formada a partir da decomposição de vegetais que sofreram soterramento e se compactaram em bacias pouco profundas. Como qualquer outro combustível fóssil, o carvão está associado a elementos radioativos, como U e Th (BALOGUNA et al., 2003), sendo assim capaz de produzir e emanar radônio. De acordo com dados da International Energy Agency (IEA), o carvão é a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, respondendo por 41% da produção total, sendo sua extração (ou mineração) de forma subterrânea ou a céu aberto. Desta forma tanto no momento da extração, beneficiamento e uso do carvão as pessoas ficam expostas ao radônio.

Em contexto geral, são poucas ou inexistentes as pesquisas direcionadas ao estudo da concentração de radônio em minas subterrâneas brasileiras. Por serem locais fechados, em certas ocasiões, com pouca ventilação e grande fluxo de

trabalhadores é de extrema importância saber o grau de exposição dos trabalhadores ao gás. Em muitos países esta exposição é estudada em diferentes tipos de minerações, sendo uma delas a de carvão mineral, e em muitas das ocasiões os valores obtidos são superiores ao proposto pela ICRP 106 (300 Bq/m³), por exemplo, Tchorz-Trzeciakiewicz e Parkitny (2015) fizeram levantamentos da concentração de radônio na Rota Turística Subterrânea “Mina de Carvão”, Sudoeste da Polônia, nos anos de 2004-2007 e no ano de 2011, e obtiveram o valor médio de 799 Bq/m³, e Quresshi et al. (2000) que determinou a concentração de radônio nas minas de carvão de Baluchistan, Paquistão, que variou de 121 a 408 Bq/m³.

No município de Figueira, no estado do Paraná, as minas de carvão pertencentes à Companhia Carbonífera do Cambuí, que fazem parte da maior reserva ainda em exploração no estado, tendo sido registrada a ocorrência de urânio associado ao carvão mineral (DAEMON et al., 1982), com conteúdo de urânio e tório de 28 e 8 ppm, respectivamente (FERNANDES et al., 1997).

O carvão extraído e beneficiado em Figueira abastece a termelétrica do município, que dista cerca de 6 Km do complexo mineiro. Campaner (2013) concluiu que o carvão e as cinzas (rejeito da combustão do carvão) de Figueira apresentaram elevadas concentrações de ²³⁸U (36 a 138 Bq/kg), ²²⁶Ra (35.2 a 122 Bq/kg) e ²¹⁰Pb (de 52.4 a 174 Bq/kg). Este cenário remete não somente a implicações radiológicas para os trabalhadores da mina, que somam mais de 350, mas também para a população residente no ambiente imediato dos depósitos de carvão e da termelétrica, uma vez que, tanto no processo de extração e beneficiamento do carvão como no processo de combustão para geração de energia elétrica, os radionuclídeos naturais podem ser liberados para o meio (FERNANDES et al., 1997; SHUQAIR, 2002; VEIGA et al., 2004; FLUES et al., 2006; VEIGA et al., 2006; CAMPANER e LUIZ-SILVA, 2009; CAMPANER et al., 2014).

Barescut et al. (2011), Bhangare et al. (2011), Sahu et al. (2014), Suhana e Rashid (2016) mostram em seus trabalhos que com a queima do carvão mineral nas termoelétricas, a parte orgânica do carvão entra em combustão, aumentando a concentração de elementos radioativos, como U²³⁸ e Th²³², elementos que irão

gerar os isótopos de radônio. Desta forma uma investigação dos rejeitos da queima do carvão é necessária.

2 OBJETIVOS

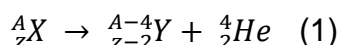
Esta pesquisa apresenta como objetivo geral contribuir para a compreensão do comportamento do gás radônio em área de mineração de carvão e determinar o grau de exposição das pessoas ao gás nesta área. Para tanto, foi conduzida a investigação química e física das rochas e solos presentes na região, para poder associar com a concentração de radônio presente no ambiente. Como objetivos específicos, busca-se:

- Determinação da taxa de exalação de Rn no carvão, em rejeitos do processo de mineração (siltito e tufo vulcânico) e da cinza da queima do carvão.
- Detectar a concentração de radônio no ar dentro da mina de carvão.
- Determinar a concentração de Rn no solo na região da mina; correlação com as propriedades físicas e químicas do solo;
- Identificar e quantificar a concentração de urânio e tório nas rochas da mina, utilizando espectrometria gama.

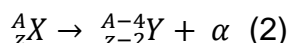
3 CONCEITOS BÁSICOS

O núcleo atômico estável é constituído principalmente por prótons e nêutrons, os quais são mantidos ligados por intensas forças nucleares. Conforme se sabe, para núcleos muito pesados (número atômico $Z \geq 83$), as forças coulombiana de repulsão mútua entre os prótons são suficientemente fortes, de maneira que o núcleo se torna instável, tendendo a produzir um decaimento radioativo. Esse decaimento pode se processar de várias maneiras distintas, por exemplo: por meio de decaimento alfa e beta.

No decaimento alfa (α), o núcleo “pai” emite uma partícula α , ou seja, um núcleo de ${}^4_2\text{He}$, composto de dois prótons e dois nêutrons. Assim, quando um núcleo emite uma dessas partículas, seu número atômico (Z) diminui de duas unidades e o seu número de massa (A) diminui de quatro unidades:



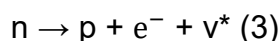
ou



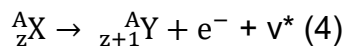
Os núcleos emissores de partícula α são, principalmente, aqueles com grande número de massa, nos quais a repulsão coulombiana entre os prótons é muito grande.

As partículas alfa possuem um pequeno poder de penetração, apenas conseguindo atingir a superfície da pele humana, e são facilmente blindadas. Entretanto, a ingestão ou a inalação de radionuclídeo emissores alfa pode trazer sérias consequências ao ser humano, uma vez que elas produzem alta densidade de ionização, isto é, sua deposição de energia por unidade de comprimento é muito grande.

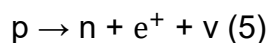
Quando o número de nêutrons é grande comparado ao número de prótons, o núcleo correspondente pode ser instável e o número de nêutrons pode ser diminuído pela transformação de um nêutron num próton (decaimento β^-). Essa transformação é acompanhada da emissão de um elétron (e^-) e de um antineutrino (ν^*):



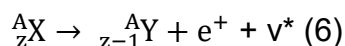
Em um decaimento β^- o número atômico aumenta de uma unidade, diminuindo o número de nêutrons em uma unidade, permanecendo constante o número de massa.



Quando o número de prótons é relativamente grande comparado ao número de nêutrons, o núcleo correspondente pode ser instável e o número de prótons pode ser diminuído pela transformação de um próton num nêutron (decaimento β^+). Essa transformação é acompanhada da emissão de um pósitron (e^+), e de um neutrino (ν):



No decaimento β^+ o núcleo filho tem o mesmo número de massa que o núcleo pai, mas um número atômico com uma unidade a menos:



Uma partícula beta é mais penetrante, produz uma densidade de ionização menor e possui um alcance maior que uma partícula alfa de mesma energia. O alcance de uma partícula beta de 3 MeV é de, respectivamente, 1,260, 1,50 e 0,56 cm no ar, no tecido humano e no alumínio.

Após ocorrer qualquer um desses tipos de decaimento, o núcleo resultante é deixado em um estado excitado, ou seja, apresenta energia em excesso. Quando esse núcleo retorna ao seu estado fundamental de energia, ocorre a emissão de fótons na forma de radiação gama (γ).

3.1 Quantificação da Radioatividade

A mensuração da radioatividade pode ser efetuada através da atividade A dos núclídeos, que é definida como sendo o módulo da função:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (7)$$

Na qual, dN/dt representa a taxa de variação do número de núclídeos (N) por unidade de tempo (t) , também expressa:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (8)$$

Nesta equação, λ é a constante de decaimento, grandeza que representa a probabilidade de um núcleo desintegrar-se espontaneamente por unidade de tempo. Uma unidade comumente usada para a atividade é o Becquerel (Bq).

A integração da equação (8) fornece a seguinte expressão:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (9)$$

Onde N_0 representa o número de átomos inicialmente presente no sistema. Se $T_{\frac{1}{2}}$ é o tempo para a desintegração de metade dos átomos do sistema (meia-vida do núclídeos), então, é possível escrever:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

3.2 Séries radioativas

Quando um núcleo radioativo decai, o núcleo filho no estado fundamental pode ser também radioativo, e decair para formar outro núcleo radioativo e assim por diante. Esse processo pode se prolongar por vários estágios, formando uma série de gerações de núcleos relacionados um ao próximo da série como pai para filho.

Os núcleos radioativos se agrupam em quatro séries de decaimento: ^{232}Th (série do tório), o ^{238}U (série do urânio), ^{235}U (série do actínio) e ^{237}Np (série do netúnio). As três primeiras séries são naturais e a quarta, artificial. As séries terminam em núcleos estáveis. São quatro as séries porque quatro é o número de massa da partícula α e também porque, enquanto o decaimento α ocasiona uma

diminuição de quatro unidades no número de massa do núcleo pai para o núcleo filho, o decaimento β e o decaimento γ não ocasionam mudança nesse número.

A série do urânio começa com o ^{238}U e após 14 transformações (8 do tipo α e 6 do tipo β^-) atinge-se o produto final estável, ^{206}Pb . A fórmula geral para as massas dessa série é $4n+2$. A série do tório parte do ^{232}Th e após 12 transformações (7 do tipo α e 5 do tipo β^-) atinge-se o produto estável, ^{208}Pb , sendo $4n$ a fórmula geral das séries. A série do actínio tem início com o ^{235}U e após 11 transformações (7 do tipo α e 4 do tipo β^-) atinge-se o produto final estável, ^{207}Pb , sendo $4n+3$ a fórmula geral da série.

Na Figura 1 representam-se os membros das séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U ($4n+2$), ^{232}Th ($4n$) e do ^{235}U ($4n+3$), as transformações que ocorrem e as meias-vidas envolvidas.

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U (4n+2), ^{232}Th (4n) e do ^{235}U (4n+3).

	U - 238					Th - 232					U - 235					
Np																
U	U-238 4.49x10 ⁹ a		U-234 2.48x10 ⁵ a										Pa-234 7.13x10 ⁸ a			
Pa	α ↓ β ↑ 1.16m	Pa-234	α ↓										α ↓ β ↑ 3.43x10 ⁴ s	Pa-234		
Th	Th-234 24.1d		Th-230 7.5x10 ⁴ a			Th-232 1.39x10 ¹⁰ a	Th-232 1.90s				Th-231 25.6h	α ↓ β ↑ 16.6d	Th-227			
Ac			α ↓			α ↓ β ↑ 6.13h	Ac-228	α ↓				Ac-227 2.20s	α ↓			
Ra			Ra-226 1622a			Ra-228 6.7a		Ra-224 3.64d						Ra-223 11.1d		
Fr			α ↓					α ↓						α ↓		
Rn			Rn-222 3.83d					Rn-220 54.5s						Rn-219 3.52s		
At			α ↓					α ↓						α ↓		
Po			Po-218 3.05d	β ↑ 1.6x10 ⁻⁴ s	Po-214	β ↑ 138d	Po-210	Po-216 0.16s	65% β ↑ 3.0x10 ⁻⁷ s	Po-212				Po-215 1.6x10 ⁻³ s		
Bi			α ↓ β ↑ 19.7m	Bi-214	α ↓ β ↑ 50d	Bi-210	α ↓	α ↓ β ↑ 60.5s	Bi-212	α ↓				α ↓ β ↑ 2.16m	Bi-211	
Pb			Pb-214 26.5m		Pb-210 22.2a	Pb-206		Pb-212 10.6h	α ↓ β ↑	Pb-208				Pb-211 36.1m	α ↓ β ↑	Pb-207
Tl								Tl-206 3.1m							Tl-207 4.79m	

Fonte: Bonotto (2004)

3.3 Ocorrência de tório e urânio nas rochas

3.3.1 Tório

O tório, elemento metálico radioativo, pertencente ao III B da tabela periódica, mais especificamente à família dos actinídeos, possui número atômico 90, massa atômica 232,04 e número de coordenação 6. Sua configuração eletrônica é dada por $6d^2 7s^2$; densidade de $11,5 - 11,9 \text{ g.cm}^{-3}$ (17°C); pontos de fusão a $1740 - 1760^\circ\text{C}$ e de ebulição $4780 - 4800^\circ\text{C}$.

O tório é um elemento instável, sendo o ^{232}Th o precursor da série natural de decaimento $4n$ (série do tório), que origina o ^{208}Pb após 12 transformações (7 do tipo alfa e 5 do tipo beta). Na mesma cadeia ocorre outro isótopo natural de tório, o ^{230}Th , de meia vida de 1,9 anos. O tório também está presente na cadeia natural de decaimento $4n+2$ (série do urânio), na qual aparece como nuclídeo ^{230}Th , emissor alfa de meia vida $7,5 \cdot 10^4$ anos e como o nuclídeo ^{234}Th , emissor beta de meia-vida de 24,1 dias. Aparece ainda na série do actínio como isótopo ainda na série do actínio como isótopos ^{231}Th (emissor beta de meia vida de 25,6 h) e ^{227}Th , emissor alfa de meia-vida de 18,6 dias. Finalmente, na cadeia $4n+1$ (série do neptúnio), está presente como ^{229}Th (emissor alfa, com meia-vida de 7340 anos)

Este elemento é cerca de três a quatro vezes mais abundantes na crosta terrestre do que o urânio por ser menos sujeito à mobilização no ambiente supérgeno (DNPM, 1973). Ocorre predominantemente como cátion tetra valente sendo um constituinte traço em fosfatos, óxidos simples e múltiplos e silicatos e como elemento principal na torianita (ThO_2) e torita (ThSiO_4) (GASCOYNE, 1992); respectivamente, isomorfos com uraninita e zircão. Por esta razão, uma grande parte das ocorrências naturais de tório são encontradas incorporadas à estrutura do zircão (LANGMUIR ; HERMAN, 1980).

Os minerais portadores de tório são encontrados principalmente em granitos, pegmatitos, carbonatitos, veios hidrominerais e em placeres. As grandes fontes mundiais deste elemento são depósitos de monazita nas praias da Índia, que apresentam cerca de 9% de ThO_2 , e no Brasil, com teores de 5 a 6% de ThO_2 . Outra ocorrência bastante famosa é a verificada no Morro do Ferro, situado próximo ao centro do planalto de Poços de Caldas, Estado de

Minas Gerais, onde o tório se encontra associado principalmente com os elementos terras raras (DNPM,1973).

Nas rochas ígneas, as concentrações de tório são relativamente maiores que as observadas nas sedimentares, embora algumas areias podem, por processos mecânicos, concentrar minerais enriquecidos em tório, por exemplo, a monazita $(Ce,La,Y,Th) PO_4$, a qual contém de 3-9% até 20% de ThO_2 . Nas rochas metamórficas, o tório presente depende da matriz que serviu de origem (GASCOYNE,1992), podendo ainda ser encontrado adsorvido em argilas e coloides (LIESER; HILL, 1992).

A Tabela 1 apresenta a concentração média de tório para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

Tabela 1 - Concentração média de tório para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

	Rochas	Th (ppm)
Í G N E A S	Graníticas	21,5
	Ultramáficas	0,05
	Eclogitos	0,37
	Alcalinas intrusivas	17,1
	Basálticas	1,58
	Gabróicas	3,84
S E D I M E N T A R E S	Arenitos	1,7
	Areia de praia Atlântica	9,5
	Grauvaca vulcânica	2,6
	Arcóseos	5
	Folhelhos	11,8
	Bauxita	48,9
	Bentonita	24
	Calcários	1,75
	Fosfáticas	1 a 5
	Sedimentos do Pacífico	
	areias	1,2
	lamas	2,7
	lamas argilosas	4,8
	argilas pelágicas	7,78
M E T A M Ó R F I C A S		
	Anfibolito	5
	Gnaisse	6,4
	Paragnaisse	21
	Granulito	5,5
	Ortognaisse	21,8
	Cordierita gnaisse	0,03
	Mármore	5,5
	Filito	7,5
	Xisto	10
	Rochas máficas	13,1

Fonte: Rogers e Adams (1969a)

3.3.2 Urânio

O urânio, elemento metálico radioativo pertencente ao grupo III B da tabela periódica, mais especificamente à família dos actinídeos, possui número atômico 92 e massa atômica 238,03. Sua configuração eletrônica é dada por

5f3 6d1 7s2; densidade de $19,05 \text{ g.cm}^{-3}$ (20°C); pontos de fusão a 1132° e de ebulição 3818°C .

O mais abundante mineral de urânio da crosta terrestre é a uraninita, dióxido de urânio, cuja composição química pode variar de UO_2 a U_3O_8 . A presença de U^{6+} na uraninita se deve ao processo de oxidação (GOLDSCHMIDT, 1954).

O urânio também pode se associar parageneticamente aos carbonatos, fosfatos, vanadatos, silicatos, sulfetos, sulfatos, etc. (FRONDEL 1956; PERTLIK et al. 1974). Betejtin (1970) salienta que a ocorrência de urânio é mais acentuada em rochas graníticas, pegmatitos graníticos e em sienitos, onde a uraninita distribuem-se irregularmente, tendo como paragêneses os minerais de tório, terras raras, nióbio, tântalo, turmalina e zircão (os feldspatos e micas às vezes ocorrem associados a compostos uraníferos carbonatados).

Picciotto (1950; BONOTTO 1986) apresentou evidência de que nos granitos o urânio se encontra tanto nos minerais essenciais como nos acessórios. Na Tabela 2 estão relacionados os teores desse elemento em vários minerais principais e acessórios de rochas ígneas, segundo Pertlik et al. (1974).

Moreira-Nordemann (1997; BONOTTO, 1986) estudou a distribuição de urânio nos minerais formadores de rochas ígneas e constatou que sua ocorrência é também acentuada no quartzo e feldspato. Notou que a biotita retém de 19 a 22% do teor total de urânio na rocha e que os minerais pesados (zircão, monazita, apatita, magnetita, ilmenita e riebekita) contém de 61 a 65% deste teor. A Figura 2 apresenta a distribuição generalizada do urânio em grandes grupos de rochas ígneas.

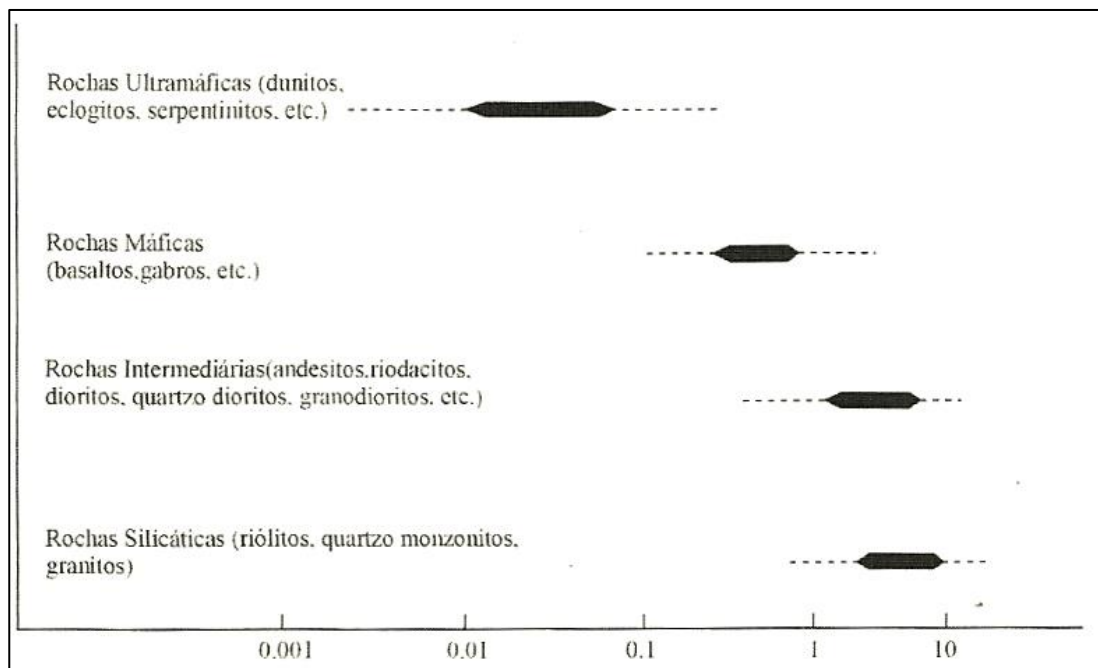
Nas rochas Sedimentares, os arenitos se destacam como os que geralmente apresentam maiores concentrações de urânio, o qual normalmente está disseminado nos minerais ortoquartzíticos. A Tabela 3 apresenta as concentrações médias de urânio para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

Tabela 2 – Conteúdo de urânio em minerais de rochas

Mineral	U (ppm)
Quartzo	1,7
Feldspatos	2,7
Biotita	8,1
Muscovita	2,8
Horneblenda	0,2 a 60
Piroxênio	0,1 a 50
Olivina	0,05
Alanita	30 a 1000
Apatita	10 a 100
Epídoto	20 a 200
Granada	6 a 30
Huttonita	3 a 70000
Magnetita e Opacos	1 a 30
Monazita	500 a 3000
Titanita	10 a 700
Xenotima	300 a 40000
Zircão	100 a 6000

Fonte: Pertlik et al. (1974)

Figura 2 - Distribuição de urânio em rochas ígneas



Fonte: Rogers e Adams (1969b)

Tabela 3 - Concentração média de urânio para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

	Rochas	U (ppm)
Í G N E A S	Graníticas	4,19
	Gabróides	0,84
	Ultramáficas	0,022
	Eclogitos	0,2
	Intrusivas alcalinas	9,82
	Extrusivas silicáticas	5
	Basálticas	0,43
S E D I M E N T A R E S	Arenitos	1,48
	Grauvacas	2,1
	Arcóseos	1,5
	Folhelhos	3,25
	Bauxita	11,4
	Bentonita	5
	Calcários	2,19
	Dolomitos	0,03 a 2,0
	Fósfatias	50 a 300
	Evaporitos	< 0,1
	Sedimentos do Pacífico	
	areias	3
	lamas	2,3
	lamas argilosas	2,7
	argilas peláticas	2
M E T A M Ó R F I C A S		
	Anfibolito	3,5
	Gnaisse	2,2
	Paragneisse	4,5
	Granulito	4,9
	Ortogneisse	3,6
	Cordierita gnaisse	5,8
	Mármore	0,17
	Filito	1,9
	Xisto	2,5
	Rochas máficas	3,2

Fonte: Rogers e Adams (1969a).

3.4 Radônio

O Radônio é um gás nobre ao 7º período da Tabela periódica. Como se observa na Figura 1, nas três séries naturais de decaimento radioativo aparecem isótopos de radônio, todos eles emissores alfa: ^{222}Rn (radônio) na série do ^{238}U produzido pelo decaimento α do ^{226}Ra ; o ^{219}Rn (actínio) na série do ^{235}U produzido pelo decaimento α do ^{223}Ra ; e o ^{220}Rn (torônio) na série do ^{232}Th produzido pelo decaimento α do ^{224}Ra .

^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn , com meias-vida de 3,83 dias, 54,5 segundos e 3,52 segundos respectivamente, são elementos instáveis e decaem por emissão alfa para suas respectivas progenias ^{218}Po , ^{216}Po e ^{215}Po . Após o decaimento os isótopos de radônio liberam partículas alfa com energias características. Na Tabela 4 estão apresentados os valores da energia e probabilidade de emissão de partículas alfa dos isótopos de radônio.

Tabela 4 – Energia e probabilidade de emissão das partículas α dos isótopos de radônio

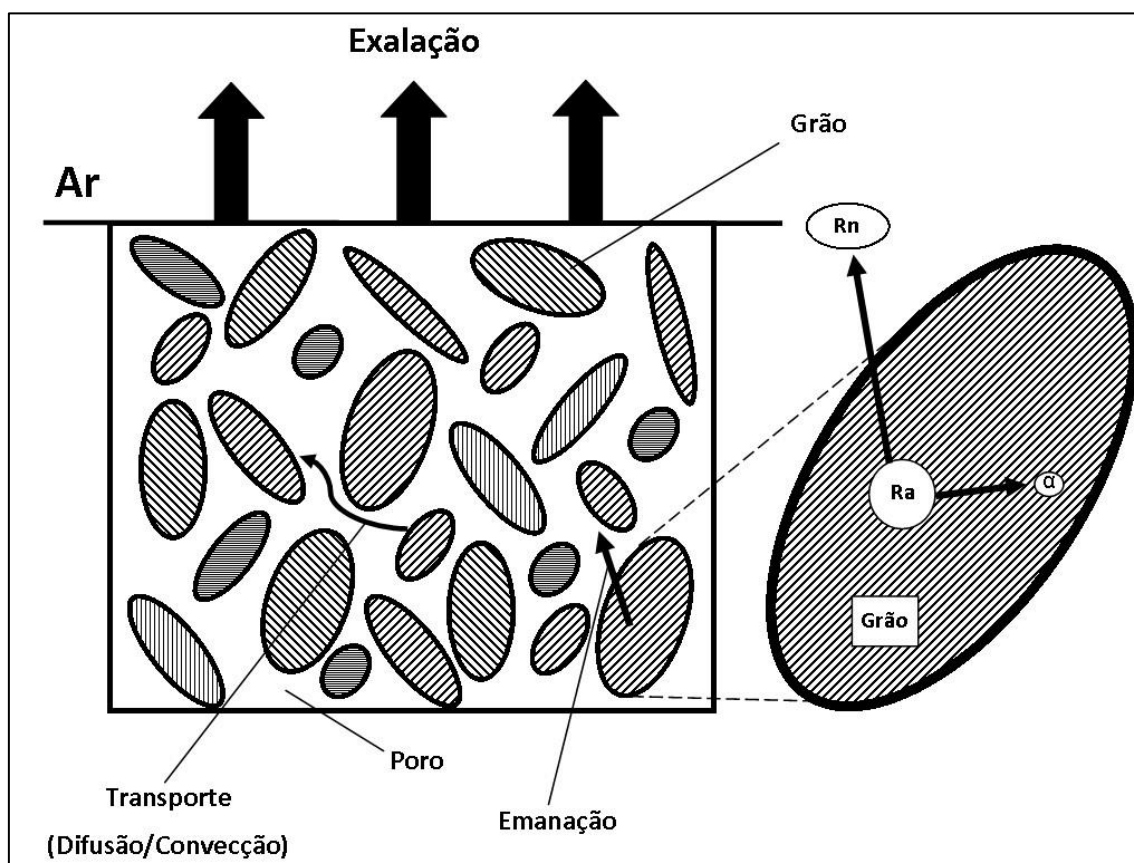
Nuclídeo	Energia (MeV)	Probabilidade de emissão (%)
Rn-222	5,49	100,0
	6,28	99,93
Rn-219	5,74	0,07
	6,423	7,5
	6,551	11,5
	6,817	81,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Por serem gerados por emissão alfa, os isótopos de radônio estão sujeitos a um processo de recuo no instante do seu “nascimento”; este recuo permite que uma fração do gás produzido escape das rochas e minerais, sendo interceptada pela fase fluida circundante, por exemplo, ar e água subterrânea (Figura 3). A migração do Rn ocorre principalmente por difusão através dos poros das rochas e dos solos, falhas e fissuras, bem como por dissolução nas águas subterrâneas e superficiais (BONOTTO, 2008). O número de átomos

que saem do material, por unidade de massa por unidade de tempo ($Bq/kg \cdot h$), é uma grandeza denominada taxa de exalação.

Figura 3 - Decaimento radioativo do Ra, produzindo Rn, que por recuo é interceptado pela fase fluida circundante (ar/água subterrânea).



Fonte: Elaborado pelo autor

A taxa de exalação de materiais é mensurada por meio do monitoramento do crescimento da concentração de radônio em função do tempo, de acordo com a Equação 11 (PRETOPOULOS *et al.* 2001; Kovler *et al.* 2005). Para realizar esse monitoramento é necessário um ambiente confinado, no qual não ocorra perda do gás.

$$C = C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} + \frac{M \cdot E}{V \cdot \lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad (11)$$

onde C é a concentração de Rn [$Bq m^3$], que representa o crescimento exponencial do Rn até atingir o estado de equilíbrio, C_0 é a concentração inicial

de Rn [Bq/m^3] no sistema, λ é a constante de decaimento [h^{-1}], t é o tempo [h], E é a taxa de exalação de Rn [$Bq/kg.h$] e V é o volume total de circulação do gás [m^3].

3.5 Equilíbrio Radioativo Secular

Conforme referido, nas séries radioativas os “filhos” sofrem vários decaimentos até atingirem a estabilidade. O acúmulo dos produtos de decaimento numa série radioativa, para um número muito grande de átomos, é descrito pelo sistema de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} dN_1 &= -\lambda_1 N_1 \\ dN_2 &= (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) dt \\ dN_3 &= (\lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3) dt \quad (12) \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ dN_i &= (\lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i) dt \end{aligned}$$

Cada “Ni” representa o número de átomos do i-ésimo nuclídeos da série radioativa presente no instante “t” e “ λ_i ” é a sua respectiva constante de decaimento.

Se o índice “0” corresponde ao estado inicial no instante $t=0$, assumindo $N_2^0 = 0$ (N_2^0 é o número inicial de átomos do segundo elemento da série), a integração da segunda equação acima fornece o número de isótopos produzidos a partir do decaimento radioativo de um determinado “pai”:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \quad (13)$$

No caso em que $\lambda_2 \gg \lambda_1$, é possível simplificar a expressão para:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (14)$$

Se o sistema existente há muito tempo ($t \rightarrow \infty$), pode-se escrever:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2} \quad (15)$$

Nessas condições $dN_2/dt = 0$ e o número de átomos do produto permanece inalterado. O conjunto de equações diferenciais (12) será estacionário, valendo as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) = 0 \\ \frac{dN_3}{dt} &= (\lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3) = 0 \quad (16) \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{dN_i}{dt} &= (\lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i) dt \end{aligned}$$

Segundo elas, o número de átomos que decai por unidade de tempo é igual ao número de átomos formados no mesmo intervalo de tempo. Tal situação ocorre num sistema fechado para membros das séries radioativas naturais, constituindo o Equilíbrio Radioativo Secular, também expresso:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \lambda_i N_i \quad (17)$$

Portanto, se um sistema é constituído por uma série de decaimento em equilíbrio radioativo secular, as atividades dos produtos de decaimento são iguais entre si. Como as constantes de decaimento (λ 's) dos "pais" das séries radioativas naturais são extremamente menores que as de seus "filhos", a equação 14 é uma boa aproximação que possibilita determinar o tempo para os núclídeos de cada série atingirem o equilíbrio radioativo com seus "pais".

3.6 Diminuição da atividade isotópica de radônio

Utilizando a meia-vida de um núclídeo instável é possível determinar a taxa de perda da sua radioatividade. Cada núclídeo possui uma meia-vida característica e constante, podendo variar de poucos segundos a milhões de anos. A equação 9 pode ser escrita em função de atividade:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (18)$$

Substituindo a equação 10 na 18, obtém-se a expressão:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \quad (19)$$

Na qual, “A” representa a atividade num instante de tempo “t” e A_0 corresponde à atividade inicial dos núclídeos radioativos.

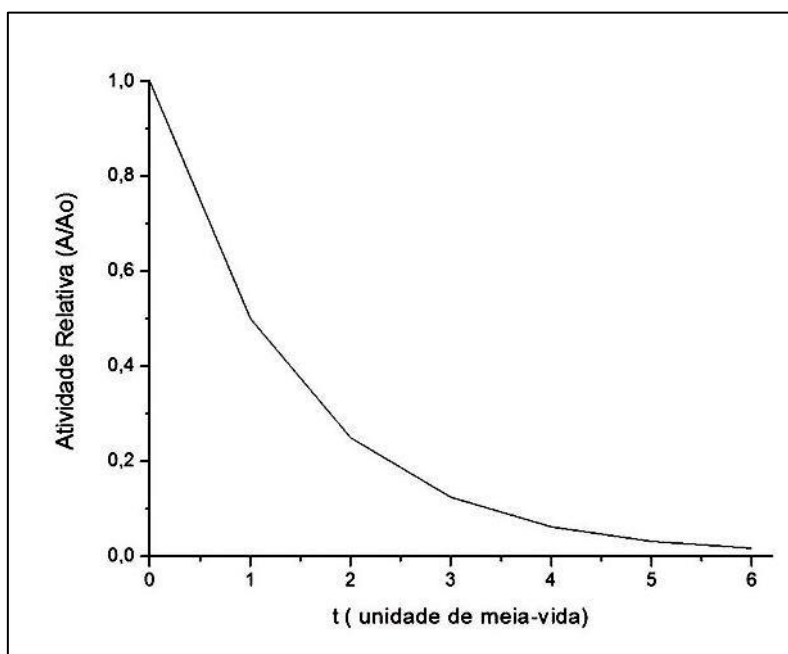
A Tabela 5 apresenta valores de unidades de meia-vida em função da atividade relativa (A_0/A) e a Figura 4 mostra o gráfico obtido a partir dos valores apresentados. O decréscimo da atividade em função do número de meias-vidas representado na Tabela 5 pode ser avaliado para os isótopos de radônio: ^{219}Rn (actinión), ^{220}Rn (torônio), e ^{222}Rn (radônio). A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos, na qual se observa que a atividade relativa dos isótopos de radônio corresponde a apenas 1,6% em relação a inicial após cerca de 22 segundos para o ^{219}Rn , 6 minutos para ^{220}Rn e 23 dias para o ^{222}Rn .

Tabela 5 – Atividade relativa em função de unidades de meia vida.

t (unidade de meia-vida)	A/A ₀
0	1
1	0,5
2	0,25
3	0,125
4	0,062
5	0,031
6	0,016

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4 – Atividade relativa em função de unidades de meia vida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Atividade relativa em função do tempo para ^{219}Rn , ^{220}Rn e ^{222}Rn .

A/A0	Tempo		
	Rn-219	Rn-220	Rn-222
1	0	0	0
0,5	3,52 s	54,5 s	3,83 dias
0,25	7,04 s	109,0 s	7,66 dias
0,125	10,56 s	163,5 s	11,49 dias
0,062	14,08 s	218,0 s	15,32 dias
0,031	17,60 s	272,5 s	19,15 dias
0,016	21,12 s	327,0 s	22,98 dias

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Fatores que influenciam na concentração de radônio nos solos

Os aspectos geológicos da região tem grande influência na concentração de radônio no solo. Além dela, outros fatores interferem na concentração e no transporte para a atmosfera do radônio, os quais se resumem em: umidade do solo, precipitação, porosidade, permeabilidade,

pressão atmosférica, temperatura do solo e do ar e os ventos (ASHER-BOLINDER, et al., 1993).

3.7.1 Umidade do solo e precipitação

Umidades altas no solo influenciam de forma que a taxa de emissão diminui, pois a água atua diretamente na emissão de radônio em solos, de modo que absorverá a energia cinética dos átomos de radônio, impedindo-o de penetrar no grão do solo. Valores acima de 17% de umidade permitem notar também a diminuição da distância percorrida pelos átomos de radônio, isto devido ao fato de que no ar átomos de radônio se movem mais rapidamente do que nas moléculas de água (ASHER-BOLINDER, et al, 1993).

3.7.2 Porosidade e permeabilidade

A porosidade é a relação entre o volume de espaços vazios de uma rocha ou solo e o volume total da mesma, sendo seu valor expresso em porcentagem. Permeabilidade é a capacidade de circulação de um fluido ou gás através de uma rocha ou solo sem que haja alteração na estrutura interna destes. Assim valores de porosidade e permeabilidade elevados nos solos e nas rochas, maior será a exalação do radônio nos gases do solo para a atmosfera (LARA, 2013).

3.7.3 Pressão atmosférica

Mudanças de pressão atmosférica, com decréscimo de 1 a 2%, por exemplo, associadas com a passagem de massas de ar, podem produzir alterações de 20 a 60% no fluxo de radônio. Isto se deve ao fato de que o decréscimo da pressão atmosférica promove a ascensão dos gases de solos ricos em radônio para a superfície. Já o aumento da pressão atmosférica causa o oposto empurrando a massa de ar para o subsolo, diluindo com isso os gases presentes no solo (ASHERBOLINDER, et al, 1993).

3.7.4 Temperatura do solo e do ar

Alterações na temperatura acompanham alterações na umidade, na pressão e nas condições dos ventos, isto dificulta relacionar o efeito da temperatura do efeito destes outros fatores que exercem uma influência de maior porte na concentração de radônio nos gases do solo já que uma alteração vem acompanhada da outra (ASHER-BOLINDER, et al., 1993).

3.7.5 Ventos

Os ventos atuam na diluição ou remoção dos gases presentes na superfície e com isso diminuem a concentração de radônio nos gases do solo. Já fatores como velocidade dos ventos, permeabilidade, quantidade de umidade e quantidade da área de cobertura no solo afetam a magnitude do efeito dos ventos e a profundidade da influência que ele causa sobre os gases no solo (ASHER-BOLINDER, et al., 1993).

3.8 Carvão mineral

O carvão mineral, de origem fóssil, foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem. Ele é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos, como ocorre com todos os combustíveis fósseis (ANEEL, 2008). Sua qualidade, determinada pelo conteúdo de carbono, varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos:

1. **Turfa**, com teor de carbono na ordem de 45%;
2. **Linhito**, com teor de carbono que varia de 60% a 75%;
3. **Carvão betuminoso (ou hulha)**, contém entre 75% e 85% de carbono;
4. **Antracito**, que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

De acordo com dados da International Energy Agency (IEA), o carvão é a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, respondendo por 41% da produção total. 53% das reservas mundiais de carvão mineral são compostas por carvão com alto teor de carbono (hulha) e 47% com baixo teor de carbono. A produção e o consumo mundial concentram-se nas categorias

intermediárias: os carvões tipos betuminoso/sub-betuminoso e linhito (ANEEL, 2008).

O carvão é o combustível fóssil com a maior disponibilidade do mundo. As reservas totalizam 847,5 bilhões de toneladas, quantidade suficiente para atender a produção atual por 130 anos. As reservas brasileiras são compostas pelo carvão dos tipos linhito e sub-betuminoso. As maiores jazidas situam-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As menores, no Paraná e São Paulo. Do volume de reservas, o Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional (ANEEL, 2008).

As pesquisas de carvão no Paraná iniciaram em 1910 e intensificaram-se após 1938. As reservas paranaenses são da ordem de 100 milhões de toneladas, destacando-se as jazidas de Sapopema e Cambuí. O depósito de Sapopema é um dos jazimentos de maior importância, com reservas da ordem de 42 milhões de toneladas. As minas da Companhia Carbonífera do Cambuí, em Figueira, constituem a maior jazida em exploração no Estado, com reservas de 18 milhões de toneladas (MINEROPAR, 2001).

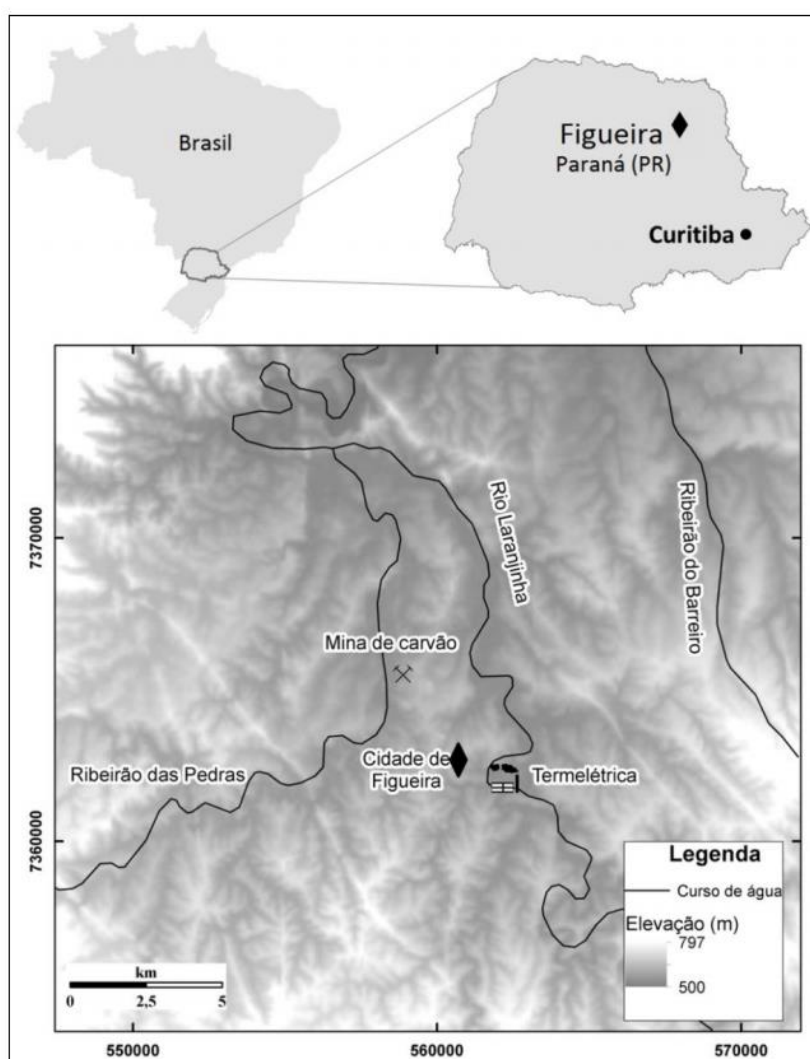
Próximo às minas de carvão da Companhia Carbonífera do Cambuí há ocorrência de mineralização de urânio, descrita por Saad (1974) e Morrone e Daemon (1985) como resultado de processos singenéticos e epigenéticos. O carvão acaba se associando ao urânio devido sua capacidade de absorção do mesmo. Esta capacidade de processo está diretamente ligada com a área superficial de absorção, processos de trocas iônicas, redução química, mudanças no pH e a formação de compostos metalo-orgânicos. (DOI et al., 1975; GRANDSTAFF, 1976; LANGMUIR, 1978; FRANCIS, 1990; PRIKRYL et al., 2001; ARBUZOV et al., 2012; GALHARDI, 2016).

Todos os combustíveis fósseis contêm níveis naturais elementos radioativos (BALOGUNA et al., 2003). O Carvão, segundo Flues et al. (2006), contêm níveis aproximados de 12 a 24 Bq/kg de ²³⁸U e 12 a 17 Bq/kg de ²³²Th. De acordo com o estudo realizado por UNSCEAR (2010), no qual foram analisados amostras de carvão coletadas em 15 países, as concentrações médias de ⁴⁰K, ²³⁸U e ²³²Th são estimadas em 50, 20 e 20 Bq/kg, respectivamente.

4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Figueira está localizado na porção nordeste do Estado do Paraná a 23° 50' 57" de latitude sul e 50° 24' 11" de longitude oeste (Figura 5). A cidade dista 280 quilômetros da capital do estado, Curitiba. Está inserido na Bacia Hidrográfica dos rios Cinzas, Itararé, Paranapanema I e Paranapanema II, que abrange outros 41 municípios.

Figura 5 Localização do município de Figueira nos territórios brasileiro e paranaense

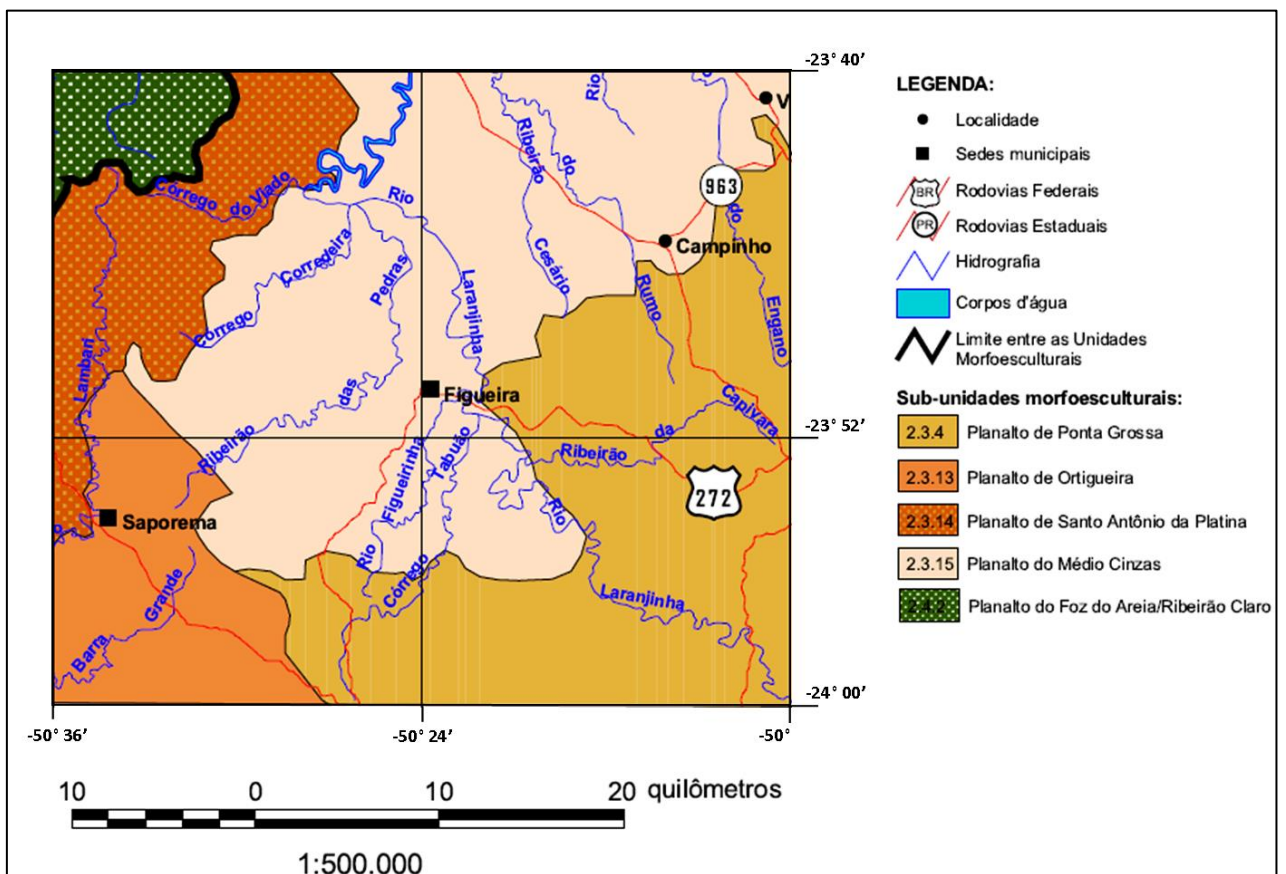


Fonte: Galhardi (2016)

Está inserido em duas sub-unidades morfoesculturais, Planalto de Ponta Grossa e Planalto do Médio Cinzas, situadas no Segundo Planalto Paranaense (Figura 6). O relevo do Planalto de Ponta Grossa apresenta um gradiente de

460 metros com altitudes variando entre 480 (mínima) á 940 (máxima) metros sobre o nível do mar. As formas predominantes são topos alongados, vertentes retilíneas e côncavas e vales em “U”. A direção geral da morfologia é NW/SE, modelada em rochas do Grupo Itararé. O relevo do Planalto do Médio Cinzas apresenta um gradiente de 340 metros com altitudes variando entre 440 (mínima) e 780 (máxima) metros sobre o nível do mar. As formas predominantes são topos aplainados, vertentes convexas e vales abertos de fundo chato. A direção geral da morfologia é NW/SE, modelada em rochas das Formações Rio do Rastro, Teresina, Serra Alta, Rio Bonito e Grupo Itararé (MINEROPAR, 2006).

Figura 6 - Mapa geomorfológico da região de Figueira



Fonte: Modificado de MINEROPAR(2006)

Os solos predominantes são rasos, ácidos, distróficos, imperfeitamente drenados (MARRONE; DAEMON, 1985), sendo mais frequente o tipo Argilossolo Vermelho-Amarelo.

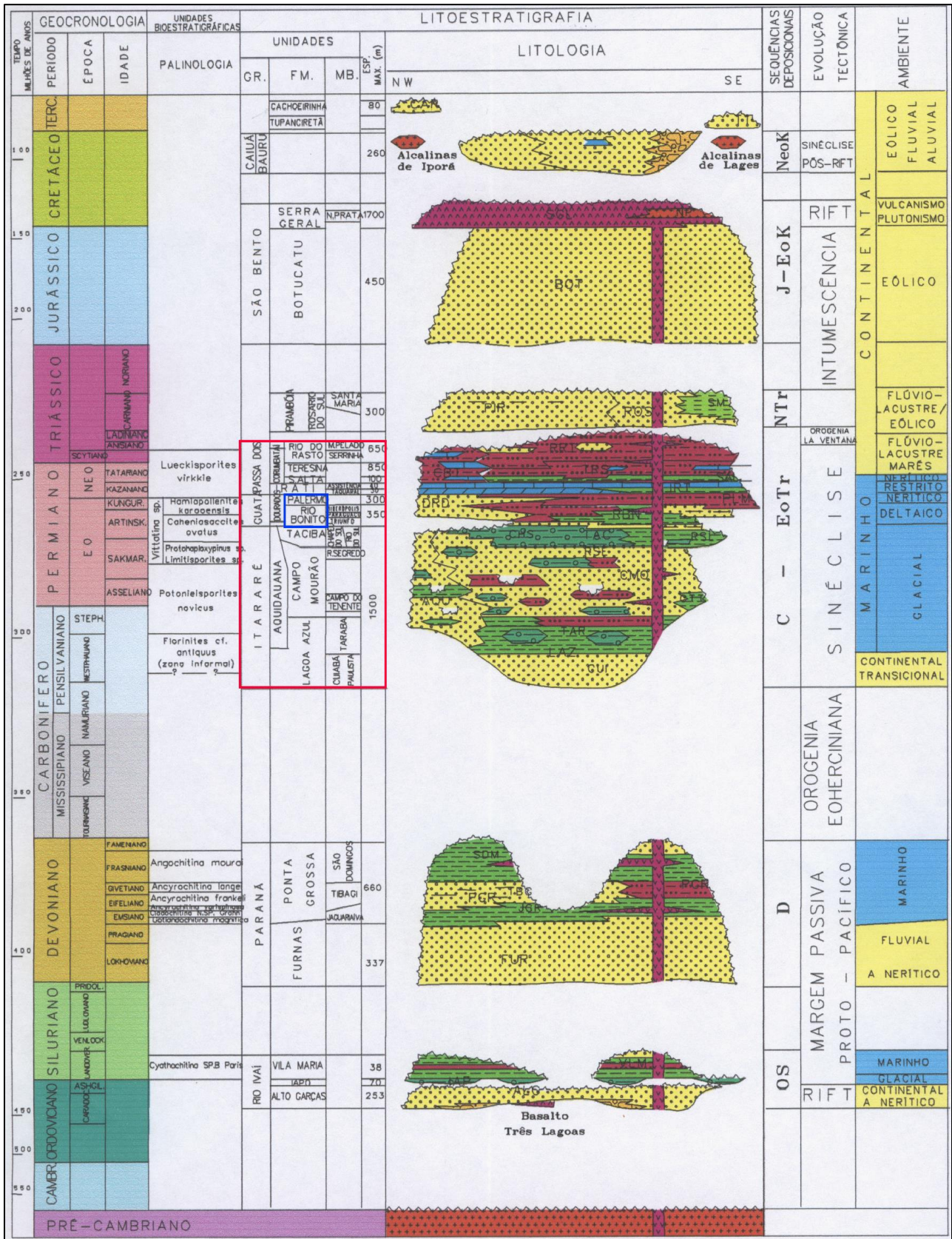
O clima da região de Figueira, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa: clima subtropical úmido. Possui duas estações bem definidas: quente e úmido (outubro a março, com temperaturas máximas entre 24° a 27°) e seco-frio (abril a setembro, com temperaturas médias mensais entre 13° e 17°C), tendo assim uma temperatura média anual de 18,5°. A precipitação anual varia entre 1400 mm e 1600 mm. Nos meses mais secos a pluviosidade varia de 200 mm a 250 mm e nos meses mais chuvosos a precipitação vai de 500 mm a 600 mm.

4.1 Geologia regional

A área de estudo está inserida no domínio da Bacia Sedimentar do Paraná, que constitui unidade geotectônica estabelecida sobre a Plataforma Sul-Americana a partir do Devoniano Inferior ou mesmo Siluriano (Almeida and Melo, 1981). Localiza-se no centro-leste da América do Sul, onde abrange uma área de 1.600.000 km² distribuída pelos territórios de quatro países e vários estados brasileiros, dentre eles o de São Paulo. Constitui também um dos maiores sistemas geohidrológicos do mundo, com volume total de poros estimado em 57×10^{12} m³ (ARAÚJO et al., 1999).

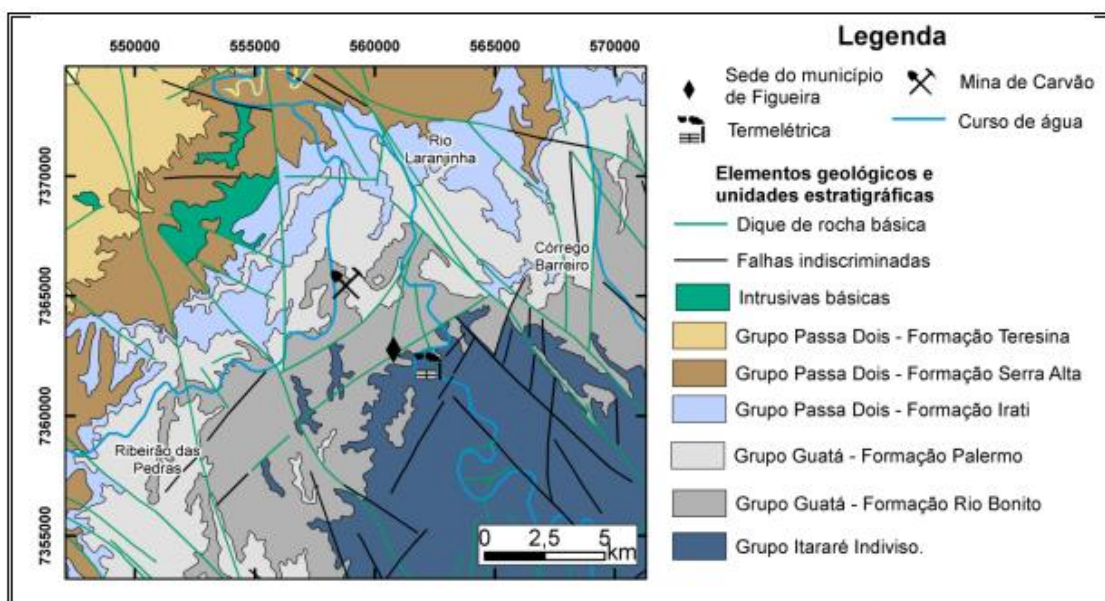
Conforme a proposta apresentada por Milani *et al.* (1997; 2007), a estratigrafia da Bacia do Paraná é composta por seis supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neo-jurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). A área de estudo está contida na Supersequência Gondwana I, sendo as unidades estratigráficas aflorantes de idade permiana pertencentes ao Subgrupo Itararé (Formação Rio do Sul), Grupo Guatá (Formações Rio Bonito e Palermo) e Grupo Passa Dois (Formações Irati, Serra Alta e Teresina) (Figura 7). Ocorrendo também o afloramento da sequência Gondwana III, representada pelo derrame basáltico da Formação Serra Geral (Figura 8).

Figura 7 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. Destaque em vermelho as unidades citadas no trabalho e em azul as formações Rio Bonito e Palermo.



Fonte: Sbarani (2006), Modificado de Milani et al. (1994).

Figura 8 - Mapa geológico da região de Figueira (PR).



Fonte: Modificado por Galhardi (2016), MINEROPAR (www.mineropar.com.br)

O Grupo Itararé apresentam grande heterogeneidade composicional, algumas características são mais frequentes, tais como granulação fina à média e constituição principal de quartzo, feldspatos e fragmentos líticos e arenitos constituídos essencialmente por quartzo (BIZZI et al., 2003; GALHARDI, 2016). No Estado do Paraná, esta unidade é subdividida entre as formações Campo do Tenente (basal), Mafra e Rio do Sul (topo); dentre estas somente a Formação Rio do Sul aflora na região estudada (PETRI e FÚLFARO, 1983; SBARANI, 2006).

.A Formação Rio do Sul caracteriza o pacote sedimentar argiloso que se encontra no topo do Subgrupo Itararé. Esta formação pode ser dividida em duas partes distintas, uma basal constituída por folhelhos e argilitos; localmente com aspecto várvido, e uma ao topo desta formação onde encontram-se argilitos, ritmitos, arenitos finos e diamictitos (PETRI e FÚLFARO, 1983; SBARANI, 2006).

Na porção Leste da Bacia do Paraná, a Formação Rio Bonito, com espessura de 120 a 140 metros, sotoposta ao Grupo Itararé, foi dividida em membros denominados Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis por Schneider *et al.* (1974). O Membro Triunfo, parte basal da unidade, constitui-se de arenitos finos a médios e grossos, com estratificações cruzadas, grãos

subarredondados e seleção moderada, ocorrendo siltitos e carvão intercalados. O Membro Paraguaçu representa a porção média da formação, com camadas de siltitos e folhelhos intercaladas com arenitos finos e rochas carbonáticas. O Membro Siderópolis, parte superior da unidade, é constituído de camadas de arenito fino a muito fino intercalados com folhelhos carbonosos e carvão.

Associado ao carvão da Formação Rio Bonito ocorre mineralização de urânio, situada na parte sedimentar entre o veio de carvão e o horizonte de arenitos e siltitos carbonosos. Nos arenitos o urânio é encontrado sob a forma de uraninita e nos siltitos carbonosos e no carvão ocorre sob a forma de complexos organo-minerais. Cerca de 70% da uraninita está presente no arenito e 30% nos siltitos carbonosos e carvão (DAEMON et al., 1982; VEIGA et al., 2004; VEIGA et al., 2006).

A deposição da Formação Rio Bonito pode ser descrita como fluvial durante o intervalo basal, e transicional e marinha durante os intervalos médio e superior (TOMASSI, 1973).

A Formação Palermo, possui contato transicional com intercalação de camadas com a Formação Rio Bonito. É formada por siltitos cinzas, frequentemente alterados para amarelo-esverdeados. Apresentando camadas arenosas e calcíferas na parte superior da unidade, chegando até 10 metros de espessura na região da área de estudo. O ambiente de deposição é interpretado como marinho de águas rasas (VIEIRA, 1973).

A Formação Irati, na área de estudo possui, aproximadamente 45 metros de espessura. Pode ser dividida em uma parte basal (Membro Taquaral), formada por folhelhos e siltitos, e uma parte superior (Membro Assistência), formada por folhelhos pirobotuminosos intercalados com calcários (SCHNEIDER et al, 1974), sendo o ambiente de deposição interpretado como marinho restrito (BIZZI *et.al.*, 2003)

A Formação Serra Alta possui espessura média de 85 metros e encontra-se em contato concordante abrupto com a Formação Irati, a qual ela recobre. É constituída predominantemente por folhelhos escuros, siltitos e argilitos intercalados com lentes e concreções de calcário, indicativos de sedimentação em águas calmas/distais. Esta unidade passa gradacionalmente para a Formação Teresina (VIEIRA, 1973; SCHNEIDER et. al, 1974; BIZZI et al., 2003)

A Formação Teresina pode atingir 120 metros de espessura, é caracterizada por interlaminanças de folhelhos e arenitos muito finos com acamamento wavy, geralmente organizados em sucessões granocrescente cíclicas submétricas a métricas, também por intercalações de arenitos finos calcíferos ou calcários com sedimentação carbonáticas, indicando deposição em águas que passam de relativamente profundas para rasas, com influência frequente de ondas de tempestade (VIEIRA,1973; RODRIGUES; QUADROS, 1976).

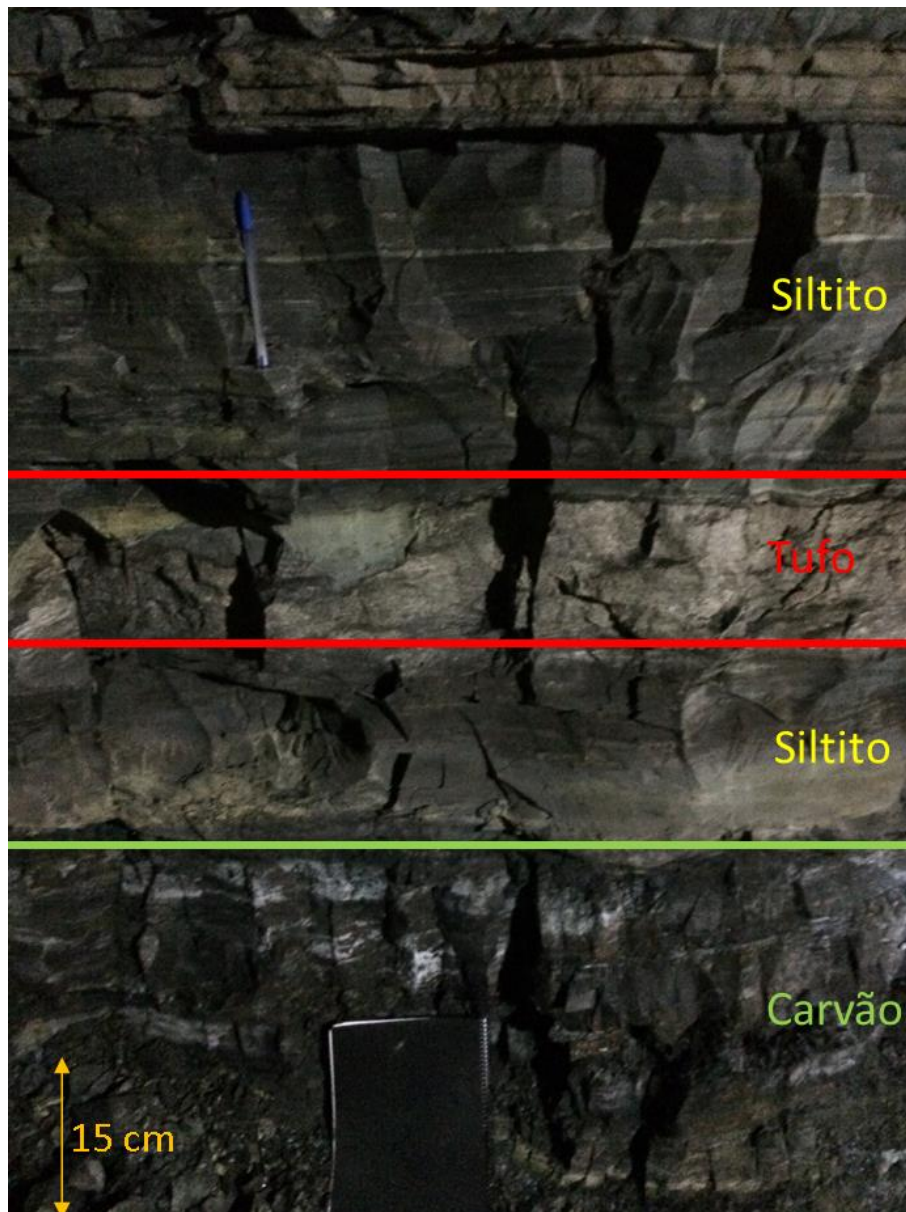
4.2 A mineração de carvão em Figueira

O carvão encontrado nas jazidas do Estado do Paraná se diferencia dos demais carvões brasileiros explorados em minas subterrâneas pelos seguintes aspectos, segundo a ANEEL (2011): apresenta-se como camada de carvão única, algumas vezes sendo possível notar intercalação de siltito carbonoso, com teor de cinzas na camada variando aproximadamente de 18% a 30% e teor de enxofre variando de 7% a 12%.

Na mina Amando Simões, atualmente explorada pela Companhia Carbonífera do Cambuí, a espessura da camada de carvão varia entre 0,50 m e 0,80 m, e ela se encontra em uma profundidade de aproximadamente 120 metros. A camada de carvão é intercalada com camadas de siltito e de tufo vulcânico como é observado na Figura 9. A lavra do carvão ocorre de forma subterrânea, utilizando o método de pilares, os quais possuem áreas de aproximadamente 60m² (Figura 10).

As análises efetuadas para caracterizar a camada de carvão indicam uma umidade de 6%, matéria volátil de 28,8%, carbono fixo de 32,5%, teor de cinzas de 38,7%, teor de enxofre entre 4 a 12% e poder calorífico de 4300 kcal/kg (base seca). Essas características classificam a camada de carvão das minas da região de Figueira como carvão betuminoso alto volátil (SHUQAIR, 2002).

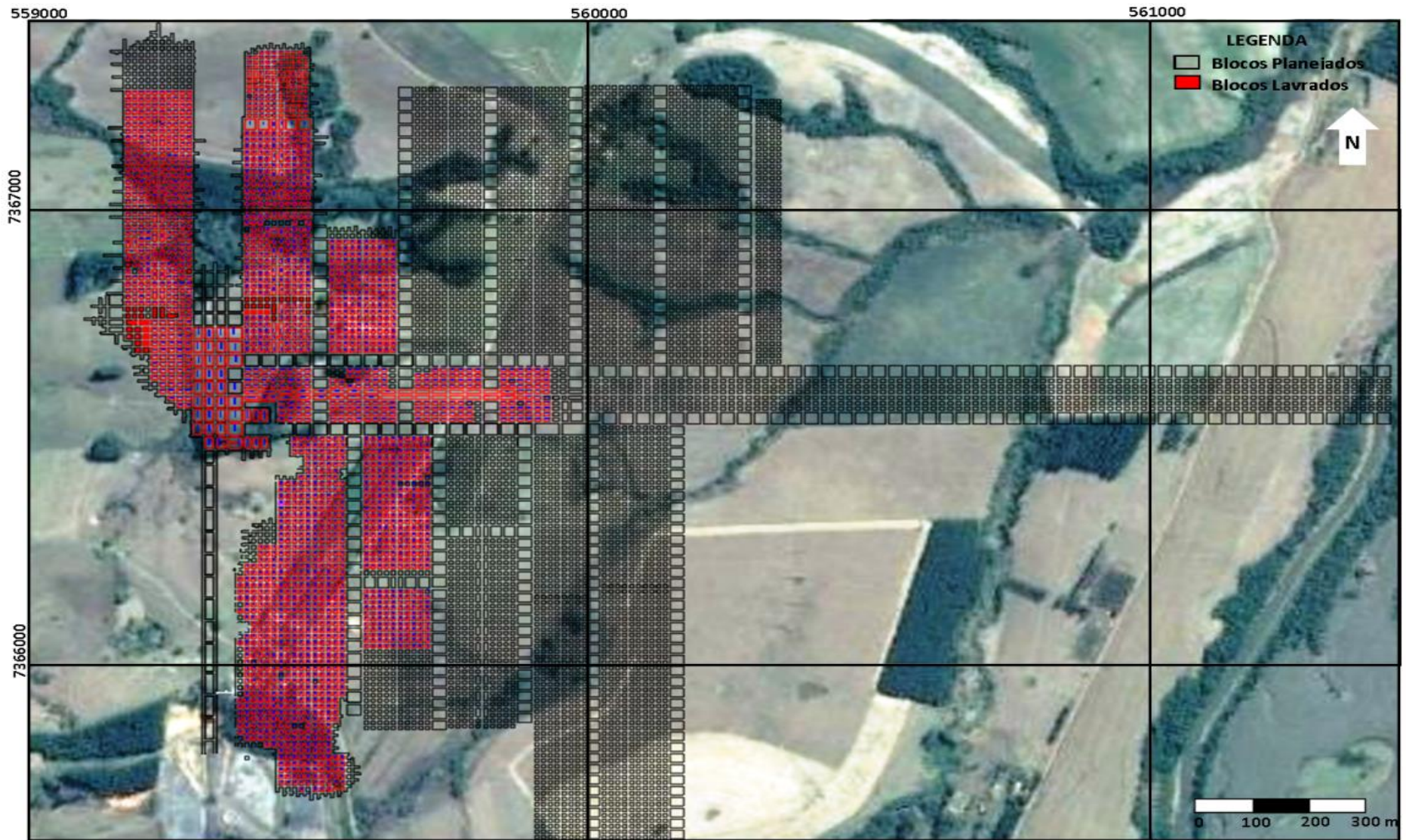
Figura 9 - Camada de carvão explorada com espessura de aproximadamente 45 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor

A usina de beneficiamento, composta de unidade de britagem e de concentração, tem capacidade para 80 t de minério bruto para uma recuperação de 63,2% (Figura 12). O beneficiamento gera dois tipos de produto: carvão grosso apresentando a granulometria de 5 a 38 mm com 20% de cinzas e o carvão fino que possui granulometria entre 0,5 e 5 mm com 20 % de cinzas (SHUQAIR, 2002).

Figura 10 – Mina Amando Simões PI-08 , ressaltando o blocos já lavrados e os planejados.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os rejeitos das minas de carvão de Figueira estão dispostos em duas pilhas principais: a do rejeito estéril e a do rejeito piritoso. O rejeito estéril acumula material produzido há mais de 50 anos, com altura média aproximadamente de 20 metros. Consiste de material estéril retirado por ocasião da lavra do carvão. O material de melhor qualidade é fornecido para a Usina Termoelétrica de Figueira (Figura 11), para geração de energia elétrica.

A Usina Termoelétrica de Figueira foi instalada da em duas fases. A primeira foi em 1963 com duas caldeiras e dois grupos geradores, e a segunda em 1966 com a instalação da caldeira 3. Em 1969 a Copel adquiriu a Utelfa, e em 1974 instalou o terceiro grupo. Em 1986 foi desmobilizado o grupo gerador 2. Em 1997 a operação e a manutenção da usina foram terceirizadas, sendo executadas atualmente pela Companhia Carbonífera do Cambuí, que também é responsável pelo fornecimento do carvão consumido na planta. A usina tem uma potência de 20MW (Copel, 2018). A cinza resultado da queima do carvão é depositada em uma área à 3,5 km de distância da termo elétrica (Figura 12).

Figura 11 – Localização da mina Amando Simões PI-08 (Companhia Carbonífera do Cambuí), Termoelétrica e o pátio de rejeito de cinzas no município de Figueira-PR.



Fonte: Modificado de Google Earth (2018)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Trabalho de campo

O trabalho de campo foi realizado no município de Figueira em duas etapas: A primeira nos dias 6 a 13 de maio de 2016 e a segunda nos dias 23 a 29 de janeiro de 2017.

Na primeira etapa, foram feitas análises *in situ* da concentração de radônio no interior da mina. Foram analisados 18 pontos, os quais representam diferentes ambientes da mina: painéis lacrados e abertos; pouco e muito ventilado; com alto e baixo fluxo de trabalhadores. Além destas análises foram coletadas amostras carvão, siltito e tufo vulcânico do interior da mina e rejeito de cinzas, resultado da queima do carvão na termoelétrica. Essas amostras foram utilizadas para estudar a taxa de exalação de radônio destes diferentes tipos de matérias.

Na segunda etapa, foi realizada a análise da concentração de radônio no solo em torno na mina. Além desta análise foi determinada a temperatura e o pH do solo *in situ*. Foram analisados 23 pontos, nos quais foram coletas amostras para análise química e física do solo.

5.2 Alpha Guard

Para determinar concentração do gás radônio foi utilizado o espectrômetro alfa Alpha Guard PQ2000PRO Alpha (Genitron GmbH), pertencente ao Laboratório de Isótopos e Hidroquímica (LABIDRO) do IGCE-UNESP - Campus de Rio Claro, seguindo o protocolo proposto pelo fabricante (GENITRON, 2000) (Figura 12). O Alpha Guard é uma câmara de pulso otimizado de ionização, onde o gás é difundido em uma câmara cilíndrica com filtro de fibra de vidro, retendo todos os produtos de decaimento do radônio.

Os sinais ou pulsos, gerados pelos produtos do decaimento radioativo, foram quantificados e digitalizados na saída da câmara. Um eletrodo leu as taxas de ionização (pulsos) que foram processados por uma unidade pré-amplificadora muito sensível, constituído por três canais independentes em

uma rede de processamento digital, o que permitiu diferenciar os eventos alfa dos efeitos de interferência, e determinar as concentrações de radônio.

Figura 12 - Alpha Guard PQ2000PRO.



Fonte: SAPHYMO (www.saphymo.com)

Ele pode medir radônio no ar, solo, água e materiais de construção, e pode simultaneamente monitorar, a temperatura do ar (na gama de -10°C a $+50^{\circ}\text{C}$), a pressão de ar (a partir de 700 mbar a 1,100 mbar), e a umidade do ar (a partir de 0% a 99%). Pode operar com bateria interna para 10 dias em dois modos: Modo de difusão (com 10 min e 60 min de medição ciclos) e no modo de fluxo (1 min ou 10 min medindo ciclos). A característica importante do AlphaGUARD é sua resposta linear de 2 Bq/m^3 a 2 MBq/m^3 de concentração ^{222}Rn (GENITRON, 2000). Uma desvantagem deste dispositivo é que ele detecta emissores alfa, sem discriminação de energia. Por essa razão, vale a pena examinar o quanto ^{220}Rn pode aumentar o resultado da medição de ^{222}Rn . Verificou-se por Ishikawa (2004), de que o AlphaGUARD trabalhando no modo de difusão tem uma sensibilidade relativa a ^{220}Rn sobre o nível de 10%.

5.3 Determinação da taxa de exalação de radônio

O monitoramento de radônio foi realizado em amostras de carvão, siltito e tufo vulcânico coletadas no interior da mina Cambuí e de cinza (resultado da queima do carvão na termoelétrica), coletada em pilhas de rejeito da termoelétrica.

Para esse estudo foi utilizado o método de detecção ativa executado nos laboratórios de Isótopos Instáveis e de Rochas Ornamentais do DPM/IGCE/UNESP - Campus de Rio Claro SP, a fim de se obter uma curva de emissão de radônio.

As amostras de carvão, siltito, tufo vulcânico e cinzas foram condicionadas individualmente em recipientes de vidro Pirex[®] (vidro borossilicatado resistente ao calor e ao ataque químico de compostos agressivos), no formato de garrafão, com volume de 19L, com rolha de borracha de 5 cm de diâmetro para vedação do ar exterior em relação ao interior. Foram utilizados 2 kg de cada material para realização do ensaio (Figura 13).

Figura 13 - Amostra de carvão e cinzas condicionadas para análise

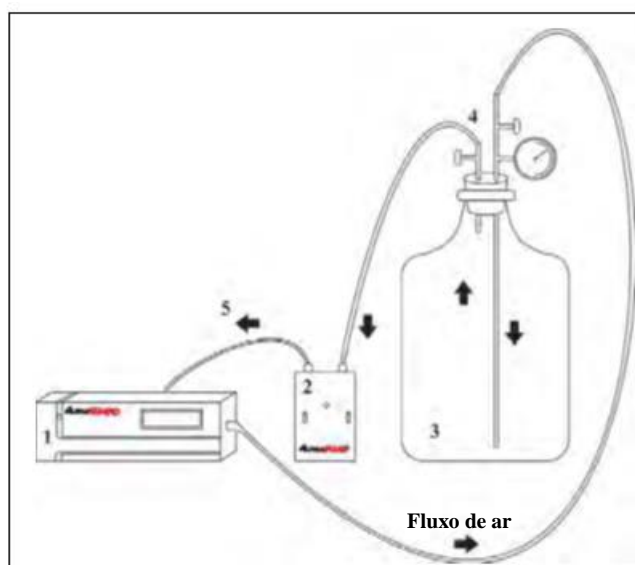


Fonte: Elaborada pelo autor

O garrafão foi conectado através de mangueiras de silicone flexíveis ao equipamento AlphaGUARD e a uma bomba para fazer a circulação do ar para dentro do aparelho. A rotina de ensaio foi semelhante à empregada por Artur et al.(2013). A Figura 14 representa o sistema empregado, onde o espectrômetro

alfa (1) se conecta a bomba de ar (2) e ao garrafão (3) onde as amostras foram aprisionadas. A circulação de ar foi liberada através de um sistema de válvulas (4) conectadas por mangueiras plásticas, com um sentido de circulação (5) estabelecido conforme especificações do aparelho.

Figura 14 - Sistema usado para medir a exalação do gás radônio nas amostras estudadas composto de (1) espectrômetro alfa; (2) bomba de ar; (3) garrafão e (4) sistemas de válvulas e, o (5) sentido da circulação do ar interno conforme especificação do aparelho.



Fonte: Elaborado por Amaral (2011)

Rotina de ensaio, segundo Artur et al.(2013):

- O sistema foi instalado conforme visto na Figura 15
- O aparelho foi ligado e os dados iniciais do aparelho foram anotados, observando-se se o nível de marcação do radônio estava no zero ou com a taxa de erro bem maior que os números iniciais.
- A bomba de ar foi acionada para extrair e puxar ar do garrafão para dentro do aparelho com um fluxo 0,5 L/min.
- As válvulas foram abertas para começar a circulação do ar interno entre o garrafão e o aparelho.
- O aparelho foi configurado internamente no modo de fluxo em 10 minutos, ou seja, a cada 10 minutos ele realizou uma leitura do gás.

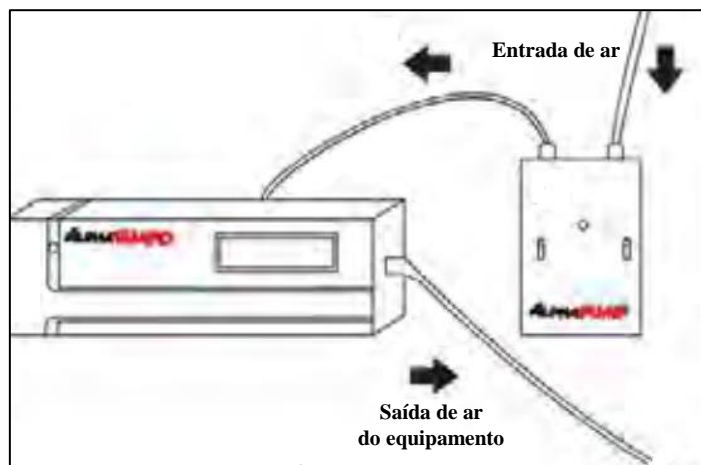
- No final da medição, o sistema foi desmontado e o espectrômetro alfa foi limpo ejetando-se o ar filtrado através de um filtro de carvão ativo até que os níveis de radônio fossem zerados, após este processo o sistema estava liberado para a medição de outra amostra.
- Análise dos dados: Após a leitura o AlphaGUARD foi conectado a um computador, e utilizando o *software* DataEXPERT, foi possível realizar a análise gráfica dos dados.

5.4 Determinação da concentração de radônio no ar do interior da mina

A concentração de radônio no interior da mina foi determinada utilizando o equipamento AlphaGuard acoplado a AlphaPump. Inicialmente o equipamento alpha guard foi limpo ejetando-se o ar filtrado através de um filtro de carvão ativo até que os níveis de radônio zerem. Após a limpeza, garantindo que todo o radônio medido fosse realmente daquele local, o AlphaGuard foi ligado e configurado com o modo de fluxo em 1 minuto, sendo assim a cada minuto ele realizava uma medição (Figura 15).

Após a configuração, a AlphaPump foi ligada, e mantida assim durante 10 minutos. Após 10 minutos ela foi desligada, continuando a análise por mais 20 minutos. Obtendo os dados posteriormente utilizando o *software* DataEXPERT.

Figura 15 - Sistema usado para medir a concentração do gás radônio no ar do interior da mina.



Fonte: Modificado de Amaral (2011)

5.5 Determinação da concentração de radônio no solo

Para medir a concentração de Rn no solo foi utilizado o equipamento AlphaGUARD, empregando a metodologia descrita no trabalho de Del Claro (2013) e também foram utilizadas informações contidas nos manuais dos próprios equipamentos (DURRIDGE, 2011; SAPHYMO,2014).

As medidas foram realizadas *in situ* nos solos próximos a mina de carvão. Os locais de análise foram escolhidos de forma que fosse possível garantir a diversidade do solo, para uma possível correlação, e que o local não tivesse sido mexido profundamente ou aterrado, ou seja, sem influência nas suas propriedades físicas.

5.5.1 Determinação de ^{222}Rn e ^{220}Rn no solo utilizando AlphaGUARD

Na execução das medidas de solo foram acoplados ao equipamento AlphaGUARD uma haste de perfuração de solo e uma sonda (de 1 m e 15 cm de comprimento cada) e uma bomba de ar (AlphaPUMP) que foi responsável por fazer o ar presente no solo passar pela câmara de ionização do equipamento AlphaGUARD. A bomba sugou o gás presente no interior da sonda e levou até o interior da câmara de ionização.

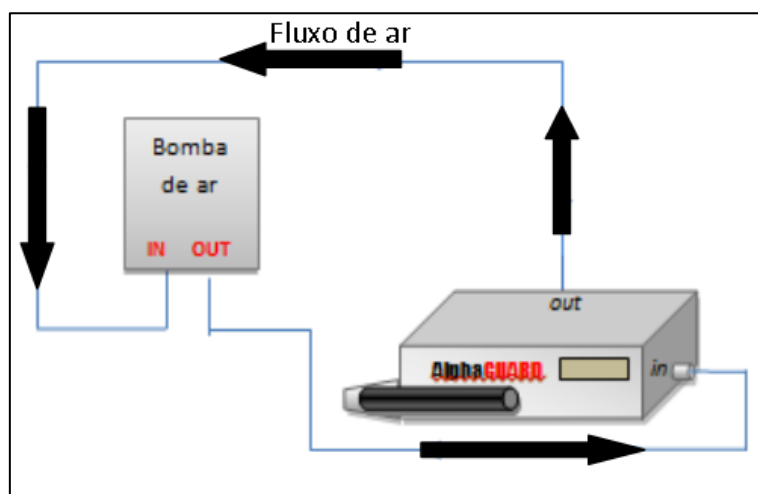
Durante a análise foram utilizados também outros instrumentos como um rotâmetro, que determinou o fluxo de ar no sistema; filtros, que impediram a entrada de alguma partícula ou substância que pudessem contaminar ou comprometer o funcionamento da bomba ou do equipamento; um balão inflável, o qual serviu para confirmar que a quantidade de ar retirada do solo foi à mesma que a analisada pelo equipamento.

O modo de operação selecionado no AlphaGUARD foi de 1 min/flow, com a bomba de ar permanecendo em 1 L/min em todas as etapas deste procedimento. Os processos que envolvem a coleta de dados foram: medida do *background* do equipamento em um circuito fechado, para que fosse descontado do valor da medida coletada do solo; a medida de solo com a bomba de ar ligada; e a medida com a bomba de ar desligada.

5.5.1.1 Medida do *background*

Para iniciar a medida de radônio no solo escolhido foi inicialmente realizada a medida de *background* do AlphaGUARD (Figura 16), sendo montado um circuito fechado com apenas a bomba ligada no equipamento. Neste circuito, a entrada *IN* da bomba se conecta com o *OUT* do AlphaGUARD e a saída *OUT* da bomba ligada no *IN* do AlphaGUARD, como mostra a Figura 16, na qual as setas azuis indicam o sentido do fluxo de ar. Esta etapa serviu para que o nível de *background* do equipamento fosse registrado para que, posteriormente, essa concentração obtida fosse descontada das concentrações de ^{222}Rn das medidas de solo.

Figura 16 - Imagem ilustrativa da montagem do equipamento para medir o *background* do AlphaGUARD



Fonte: Modificado de Del Claro (2013).

Após montar o circuito descrito, foi ligado o AlphaGUARD, aguardou-se dois minutos (tempo em que o equipamento necessita para começar a operar / medir) e após este tempo a bomba de ar deve ser ligada. A medida do *background* teve duração de 10 minutos. A Figura 17 mostra uma fotografia do equipamento, já montado, durante uma medida de *background*.

Figura 17 - AlphaGUARD montado para medida de *background*.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.5.1.2 Procedimento de análise

Após a medida do *background*, foi realizada medida da concentração de Rn com a bomba de ar ligada. Para isto são necessários os procedimentos que estão descritos a seguir.

A haste de perfuração foi colocada anteriormente à sonda para que o furo no solo fosse feito. Ao retirar a haste de perfuração, a sonda foi inserida o mais rápido possível no orifício feito pela haste, para que o furo não fosse desfeito e também para que não ocorresse perda de Rn para o ambiente. Desta forma a sonda inserida a 1 m de profundidade (marcação com fita azul na sonda) foi puxada para cima 5 cm (marcação com fita verde na sonda), para permitir a entrada de ar. A Figura 18 a seguir mostra a marcação com a fita azul e verde na sonda, onde está sendo realizada a perfuração do solo.

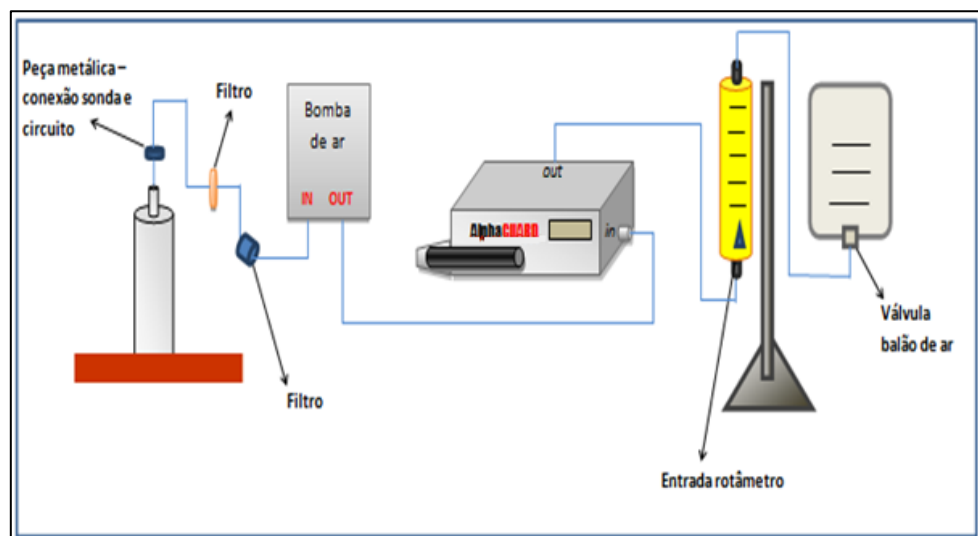
Figura 18 - Haste de perfuração com marcações coloridas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A sonda foi conectada ao circuito de medida após a sua inserção no solo, mostrado na Figura 19. Esta conexão entre a sonda e a mangueira que sai para a bomba de ar foi feita de forma rápida para que o fluxo de ar vindo do solo, presente na sonda, não fosse perdido para o ambiente (Figura 20).

Figura 19 - Esquema ilustrativo do circuito sonda ligado ao AlphaGUARD.



Fonte: Del Claro (2013).

Figura 20 - Esquema montado com a sonda ligada ao AlphaGUARD.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para iniciar a medida da concentração verificou-se se o balão de ar estava vazio e se sua válvula estava fechada. Ao ligar o AlphaGUARD aguardou-se dois minutos (exigidos pelo equipamento). Após este tempo, a bomba de ar foi ligada e o fluxo de ar mostrado pelo rotâmetro verificado, para ver se estava atingindo um fluxo apropriado de aproximadamente 1 L de ar para a execução da medida. Ao atingir este fluxo e ser confirmado pelo balão de ar que deve estar cheio, a válvula foi aberta para que o ar saísse para o ambiente. A duração desta medida com a bomba de ar ligada foi de 10 minutos. Após estes 10 minutos de medida com a bomba de ar ligada, a mesma foi desligada e a medida continuada por mais 20 minutos, sendo realizada anotação a cada 10 minutos.

Resumindo, a medida de solo com a bomba de ar desligada foi à continuação da etapa de medida de solo com a bomba de ar ligada, diferenciando apenas no acionamento ou não da bomba de ar. O AlphaGUARD não deve ser desligado entre as duas etapas.

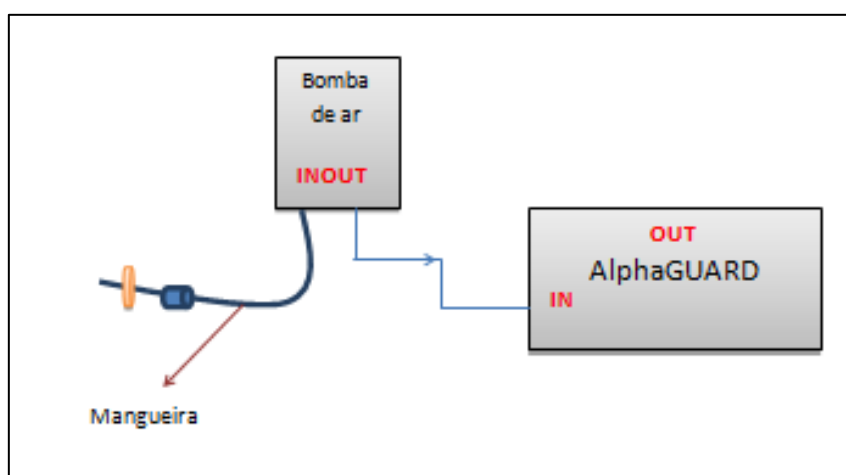
Eventualmente, quando o solo apresentava permeabilidade muito baixa, houve necessidade de se puxar a sonda para ter um fluxo de ar passível de medida. Quando a sonda era puxada em quase sua totalidade do solo para que

se obtenha fluxo de ar no rotômetro, foi desconsiderado o furo e procurado outro ponto para realizar a medida.

5.5.1.3 Limpeza do Sistema

Após a medida de solo realizada pelo AlphaGUARD, foi feita uma limpeza nas vias do circuito com a circulação de ar em sistema aberto, com a bomba de ar ligada, como mostrado no esquema da Figura 21, isto para que o equipamento estivesse em condições para uma próxima medida e para que não alterasse o resultado da medida real se estiver acumulado grande quantidade de partícula alfa na câmara de ionização do equipamento.

Figura 21 - Esquema ilustrativo de limpeza do AlphaGUARD.



Fonte: Del Claro (2013)

5.5.1.4 Análise dos dados

Para análise das concentrações de atividade de radônio obtidas nas medidas, os dados foram transferidos para o *software* DataEXPERT para que a análise gráfica dos dados possa ser realizada.

5.6 Determinação dos índices físicos do solo

5.6.1 Trabalho de campo.

Durante o trabalho de campo foram escolhido 15 pontos de amostragem (Figura 22). Estes pontos foram escolhidos de modo que tivesse maior representatividade da área e variabilidade de tipos de solo. Em cada ponto foram retiradas 3 amostra indeformadas e, aproximadamente, 1 kg de amostra deformada para realização do ensaios geotécnicos.

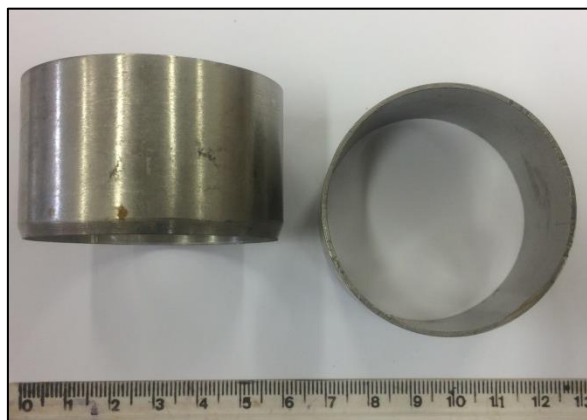
Figura 22 – Pontos de coleta para determinação dos índices físicos do solo



Fonte: Modificado de Google Earth (2018)

Para a retirada das amostras indeformadas foram feitas trincheiras de aproximadamente 50 centímetros de profundidade. Anéis de aço inoxidável (Figura 23), com aproximadamente 3,05 centímetros de altura e 4,75 centímetros de diâmetro, foram cravados completamente no solo com ajuda de um martelo. Este tipo de amostragem dificilmente deforma o material no interior do anel. E para que não ocorresse deformação da parte superior da amostra, as batidas do martelo foram focadas nas bordas do anel.

Figura 23 - Anéis de aço inoxidável utilizados para tirar amostra indeformada.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os anéis foram retirados do solo utilizando uma espátula, a qual não permitiu que ocorresse perda de amostra, e colocados em sacos plásticos juntas com amostras de solos deformados, para que não perdessem umidade.

5.6.2 Ensaio geotécnicos.

Após a coleta das amostras foram realizados ensaios a fim de estabelecer alguns parâmetros, como: índices físicos, granulometria/sedimentação, seguindo as normas NBR 6509 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para execução desses ensaios foi utilizada a infraestrutura do laboratório de geotecnia no Departamento de Geologia Aplicada (DGA) na Unesp – Campus Rio Claro. O objetivo de determinar esses parâmetros é correlacionar com a concentração de radônio e o tipo de solo analisado, podendo assim interpretar o transporte e a concentração do radônio.

Os índices físicos expressam as proporções entre pesos e volumes de três fases (sólida, líquida e gasosa) presentes em uma mesma estrutura de solo. Assim para a determinação dos mesmos, as amostras indeformadas em conjunto com os anéis foram pesadas, para que em conjunto com os valores das dimensões e massas dos anéis fosse possível calcular a massa específica (ρ) de cada amostra (Tabela 7). Após este processo as amostras foram

retiradas dos anéis e colocadas em três cápsulas metálicas. Como citado anteriormente, foram amostrados 3 anéis em cada ponto, os quais foram dividido em 3 capsulas, totalizando 9 alíquotas de um mesmo ponto, garantindo assim uma melhor estatística dos dados.

As cápsulas foram pesadas e colocadas em uma estufa, durante 12 horas em uma temperatura de 100° C, para retirar a umidade. Durante esse processo, béqueres contendo amostra deformada também foram colocados na estufa com o mesmo objetivo. Dado o tempo de secagem, as cápsulas foram retiradas da estufa e pesadas novamente, agora sem umidade, obtendo assim pela a diferença a porcentagem de umidade contida em cada amostra (Tabela 7).

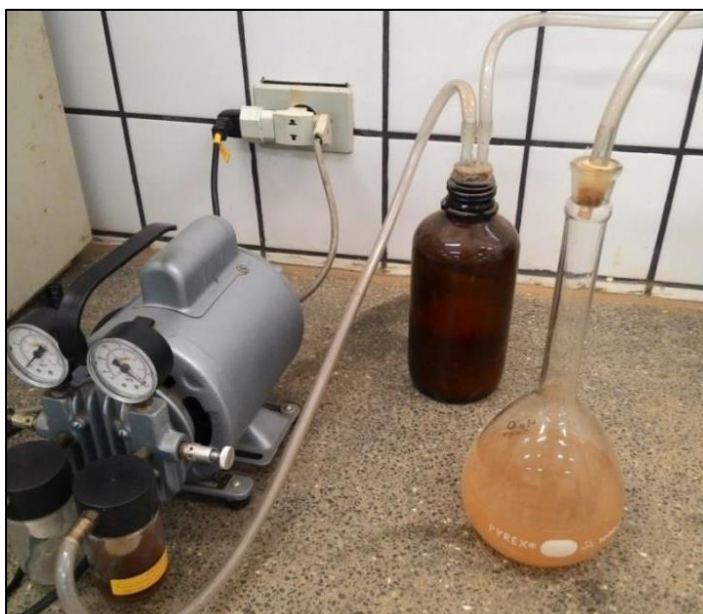
Tabela 7 – Fórmula para a determinação dos índices físicos do solo

ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO	FORMULAS	LEGENDA
Densidade do solo (g/cm ³)	$\rho = \frac{M}{V}$	ρ = densidade M = massa V = volume
Teor de umidade (%)	$W = \left(\frac{Mw}{Ms}\right) \cdot 100$	w = teor de umidade Mw = massa de água Ms = massa de sólidos
Massa específica seca do solo (g/cm ³)	$\rho_d = \frac{\rho}{1 + W}$	ρ_d - Massa específica <i>seca</i> do solo ρ = massa específica w = teor de umidade
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	$\rho_s = \frac{M_{ss}}{M_1 - M_2 + M_{ss}} \times \rho_w$ $M_1(t) = \left[\left(\frac{\rho_w(t)}{\rho_w(t_0)}\right) \times (M_1(t_0) - M(p))\right] + M(p)$	ρ_s - Massa específica dos sólidos M_{ss} - Massa do solo seco M_1 - Massa do balão volumétrico + água destilada na temperatura desejada M_2 - Massa do balão volumétrico + sólidos + água destilada na temperatura desejada ρ_w - Massa específica da água destilada na temperatura desejada $\rho_w(t_0)$ - Massa específica da água destilada na temperatura de calibração (20° C) $M_1(t_0)$ - Massa do balão volumétrico + água destilada na temperatura de calibração (20° C) . $M(p)$ - Massa do balão volumétrico seco + tampa.
Índice de Vazios	$e = \left(\frac{\rho_s}{\rho_d}\right) - 1$	e - Índice de Vazios ρ_s - Massa específica dos sólidos ρ_d - Massa específica <i>seca</i> do solo
Porosidade (%)	$\eta = \left(\frac{e}{(1 + e)}\right) \cdot 100$	η – Porosidade e - Índice de Vazios
Grau de Saturação (%)	$Sr = \frac{(\rho_s \cdot W)}{(e \cdot \rho_w)}$	Sr - Grau de Saturação ρ_s - Massa específica dos sólidos ρ_w - Massa específica da água destilada na temperatura desejada

Fonte: Elaborada pelo autor

Para determinar a massa específica dos sólidos (ρ_s) foi utilizada seguinte metodologia: Inicialmente 40 gramas de cada amostra foram colocadas em balões volumétricos, preenchidos com água destilada até 1/3 de seu volume total. O balão volumétrico foi então conectado a uma bomba de vácuo por 10 minutos, retirando o ar presente na água e entre os grãos (Figura 24). O balão foi então retirado e preenchido novamente com água destilada, agora a até 2/3 de seu volume total e o procedimento com a bomba foi repetido. Depois de dez minutos o balão foi retirado e preenchido com água destilada até seu volume máximo e fechado, tomando cuidado para que nem um pouco de ar fique em seu interior, e nem que fique água no exterior do equipamento.

Figura 24 - Balão Volumétrico conectado à bomba para retirada de ar.



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a obtenção enfim da massa específica dos sólidos presentes na amostra o balão volumétrico com água + solo foi pesado e sua temperatura foi obtida, e esses valores foram jogados na fórmula presentes na Tabela 7, que relaciona esses valores à massa específica da água na temperatura medida e a massa do solo seco.

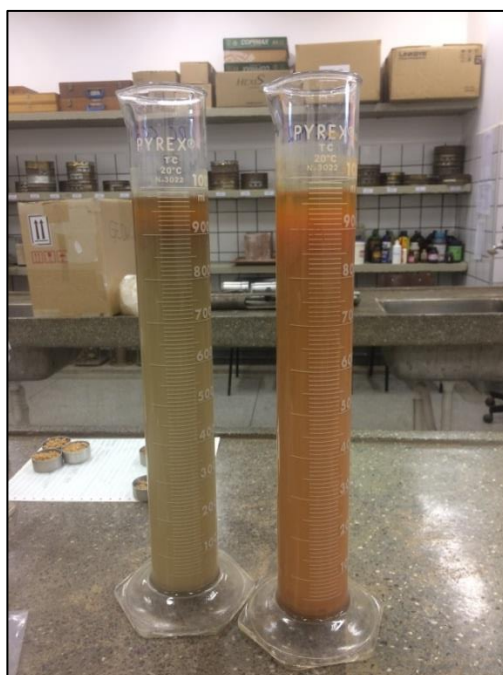
A partir dos valores de umidade (W) e massa específica dos sólidos (ρ_s) foi possível determinar os valores da Massa específica seca do solo, Índice de

Vazios, Porosidade e Grau de Saturação, utilizando as formulas presentes na Tabela 7.

O ensaio de granulometria/sedimentação auxilia na determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total de solo analisado. Para o mesmo retirou-se 20 gramas de amostra deformada que foi lavada sobre uma peneira de 270 mesh, com abertura de 0,053 mm, para separar a fração areia da fração silte e argila. Obtendo assim quantidade de finos e areia nesta massa. A fração de finos foi submetida ao teste de sedimentação e a fração areia a peneiramento.

Com o valor de finos determinados para 20 gramas realizou-se um cálculo visando obter o peso necessário de material para se obter 55 gramas de finos. Este material é misturado com 125 mL de uma solução de 45,7 g defloculante (hexametáfosfato de sódio) para 1 L de água destilada. Deixou-se o defloculante agir por 12 horas. Depois de 12 horas a solução de solo+defloculante levada para um dispersor por 5 minutos para soltar o material, que depois é lavado sobre a mesma peneira de 270 mesh, colocada sobre um funil para que o material que passa da peneira (os finos) caia sobre uma proveta graduada de 1 litro (Figura 25).

Figura 25 – Ensaio de sedimentação



Fonte: Elaborada pelo autor

Um densímetro foi colocado na solução (defloculante + finos + água) para determinar a densidade dos finos em suspensão em intervalos pré-definidos de 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos. Esses valores e a altura de queda do densímetro na solução são utilizados para fazer o cálculo do diâmetro e a proporção das partículas de finos.

O material retido na peneira de 270 mesh (fração areia) foi colocado em um béquer e colocado para secar na estufa por 12 horas para retirar a umidade. Sem umidade, a fração areia é levada para peneiramento durante 20 minutos (Figura 26). A Tabela 8 mostra as respectivas malhas de peneiramento utilizadas.

Figura 26 - Bateria de peneiras sobre a mesa vibratória.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados obtidos no teste de sedimentação e no peneiramento da fração areia resultaram em um gráfico de granulometria. O qual foi desenvolvido utilizando o *software Grapher*. Este gráfico permitiu determinar a porcentagem exata de cada material em função do diâmetro de cada partícula.

Tabela 8 - Malhas de peneiramento utilizadas.

malha	diâmetro
#	mm
4	4,760
10	2,000
16	1,190
30	0,590
40	0,420
50	0,297
60	0,250
100	0,149
200	0,074
270	0,053
prato	< 0,053

Fonte: Elaborada pelo autor

5.7 Espectrometria Gama

Segundo Ward (1981) a espectrometria de raios gama apresenta dois objetivos: a detecção direta de depósitos de urânio e tório e o mapeamento geológico através da detecção e delimitação da distribuição lateral de urânio e tório na superfície rochosa e solos.

O seu uso seria mais efetivo na detecção a delimitação das rochas fontes nos quais os depósitos de urânio ocorram ou de onde estes possam ser derivados, assim como no mapeamento de rochas ígneas ácidas, zonas de metassomatismo potássico, folhelho, arenitos, carbonatos e evaporitos. Uma característica relevante do método é que, mesmo que as rochas apresentem baixos teores de urânio e tório, estas serão facilmente distinguíveis (MOURA, 2005).

A espectrometria de raios gama utilizando a análise da energia dos picos possibilita a identificação direta dos radionuclídeos em amostras que emitem radiação gama. Sendo comumente utilizadas as janelas espectrais 1,66 - 1,86 MeV (^{214}Bi -1,76 MeV) e 2,42 - 2,82 MeV (^{208}Tl -2,62 MeV) para medidas gama-espectrométricas de urânio e tório respectivamente (WARD,1981). Tais determinações, assim como a espectrometria alfa ou beta, são possíveis porque as transições nucleares relacionadas com a emissão gama são específicas a cada radionuclídeo. Entretanto, a espectrometria gama tem

algumas vantagens sobre os outros métodos, principalmente por causa da grande penetração dos raios gama se comparada com a das partículas alfa e beta (IVANOVICH; MURRAY, 1992).

Para realizar as leituras de espectrometria de raios gama as amostras foram pulverizadas e colocadas em recipientes cilíndricos de alumínio, sendo levadas ao sistema espectrométrico, onde foram analisadas durante 8 horas.

5.7.1 Sistema Espectrométrico

O espectrômetro gama utilizado pertence ao Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO) do DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro (Figura 27), é formado de um sensor gama e circuitos eletrônicos que separam a radiação incidente no cristal em dois ou mais componentes de energia. Em decorrência da interação entre a radiação gama emitida por uma fonte radioativa e um cristal cintilador de NaI(Tl), são produzidos pulsos de pequena amplitude no ânodo de uma fotomultiplicadora. Para que sejam detectados, cada pulso é pré-amplificado e aplicado a um amplificador, onde é conformado para ser analisado no próximo estágio (BONOTTO, 1990).

Figura 27 - Espectrômetro gama NaI(Tl), do Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO) do DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro

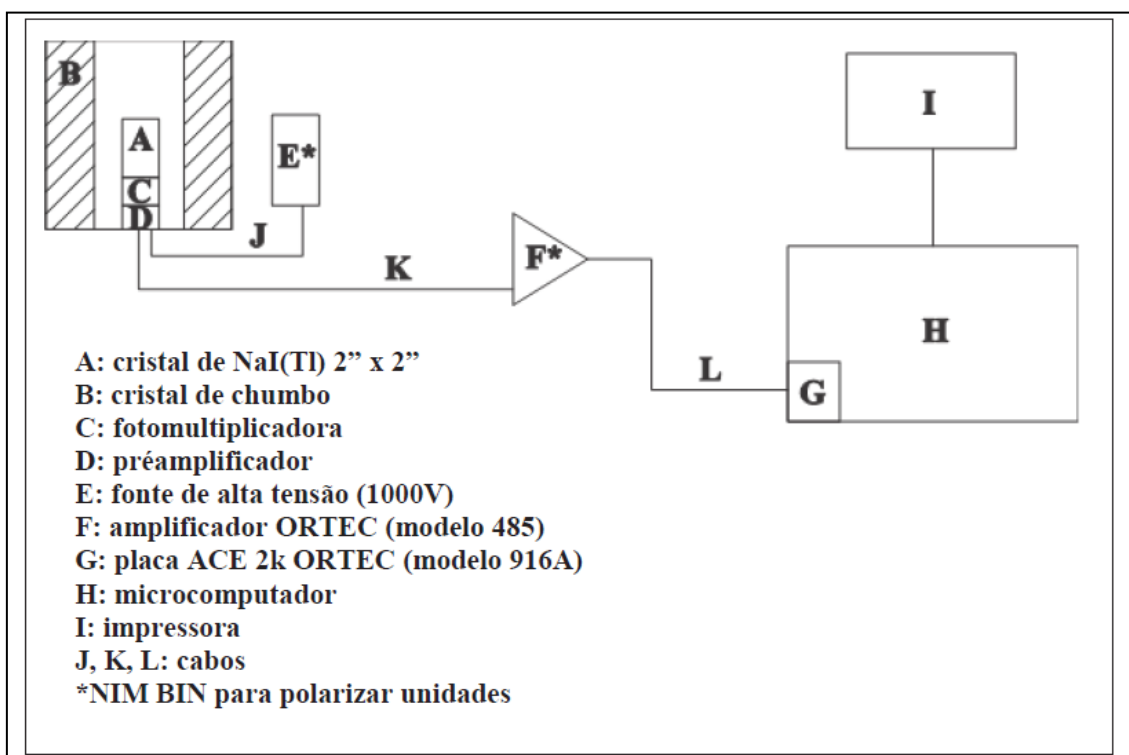


Fonte: Elaborada pelo autor

Os pulsos produzidos apresentam alturas variáveis que dependem diretamente da energia das radiações; portanto, depois que são discriminados de acordo com suas alturas, fornecem espectros relacionados com a energia da radiação gama emitida nas transições nucleares. O dispositivo que realiza esta separação é o analisador de altura de pulsos (BONOTTO, 1990).

Os componentes principais do sistema espectrométrico, consistem por uma blindagem de chumbo onde estão colocados o pré-amplificador e o cristal de NaI(Tl) sendo que estes estão conectados a uma fonte de alta tensão. É nesta blindagem de chumbo que é inserida a amostra acondicionada no recipiente de alumínio (Figura 28).

Figura 28 – Sistema espectrométrico gama instalado no Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO).



Fonte: Modificado de Duarte (2002)

Um cabo coaxial conduz o sinal do pré-amplificador ao amplificador, na entrada do multicanal, ligado ao microcomputador que processa o sinal efetuando a sua contagem (Figura 15). O processamento dos dados obtidos é efetuado através do software Maestro II, da EG & G - ORTEC, instalado no sistema disponível no LABIDRO.

5.7.2 Calibração do sistema em concentração

Duarte (2002) realizou a calibração do sistema espectrométrico para medidas de concentração utilizando padrões com concentrações conhecidas dos núclídeos de interesse.

Para o urânio, empregaram-se padrões adquiridos junto ao “New Brunswick Laboratory” do “U.S. Department of Energy Argonne”, Illinois, Estados Unidos, consistindo de pechblenda (códigos NBL-101-A, NBL-102-A, NBL-103-A, NBL104-A, NBL-105-A, NBL-106-A e NBL-107-A), para os quais procedeu-se a determinação da taxa de contagem nos fotopico do Bi^{214} .

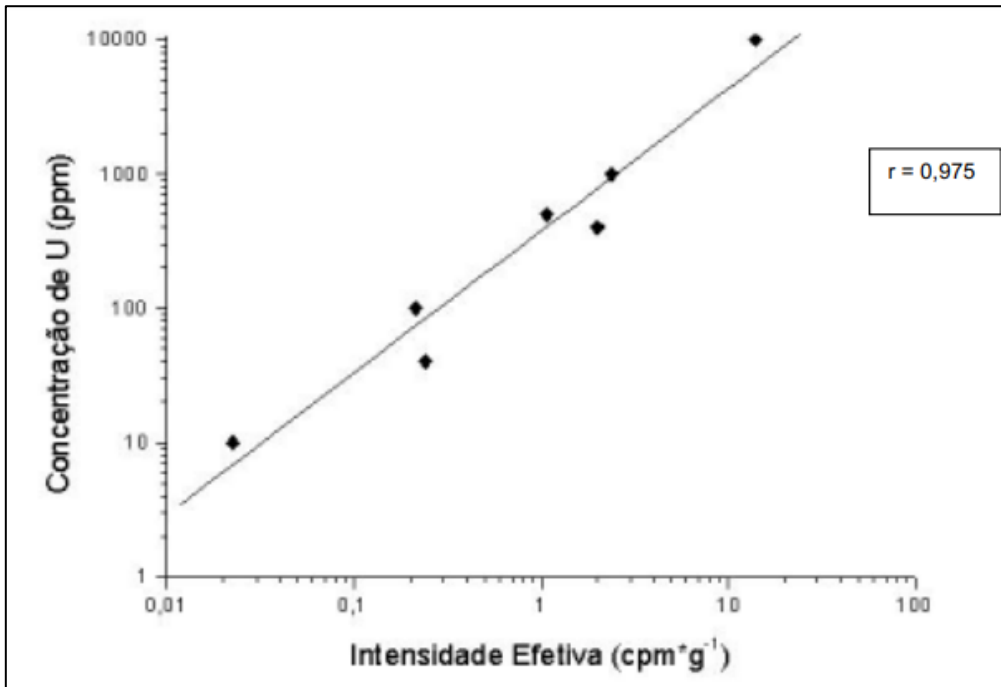
Para o tório, tomou-se a areia monazítica adquirida junto ao “New Brunswick Laboratory” do “U.S. Department of Energy”, Estados Unidos, (códigos NBL-106-A, NBL-107-A, NBL-108-A, NBL-109-A, NBL-110-A) e um padrão elaborado no LABIDRO – Laboratório de Isótopos e Hidroquímica, do Departamento de Petrologia e Metalogenia – IGCE (UNESP), a partir de amostra de sedimento de corrente proveniente do Morro do Ferro (Poços de Caldas, MG). Para os quais se procedeu à determinação da taxa de contagem no fotopico Tl^{208} .

Os resultados das leituras espectrométricas para os padrões foram utilizados para traçar as curvas de calibração da concentração de urânio e tório (C_U e C_{Th}) em função da intensidade efetiva de cada deles (I_u e I_{Th}) (Figura 29 e 30), que é linear e expressa pelas equações 20 e 21.

$$\log C_U = 1,057(\log I_u) + 2,578 \quad (20)$$

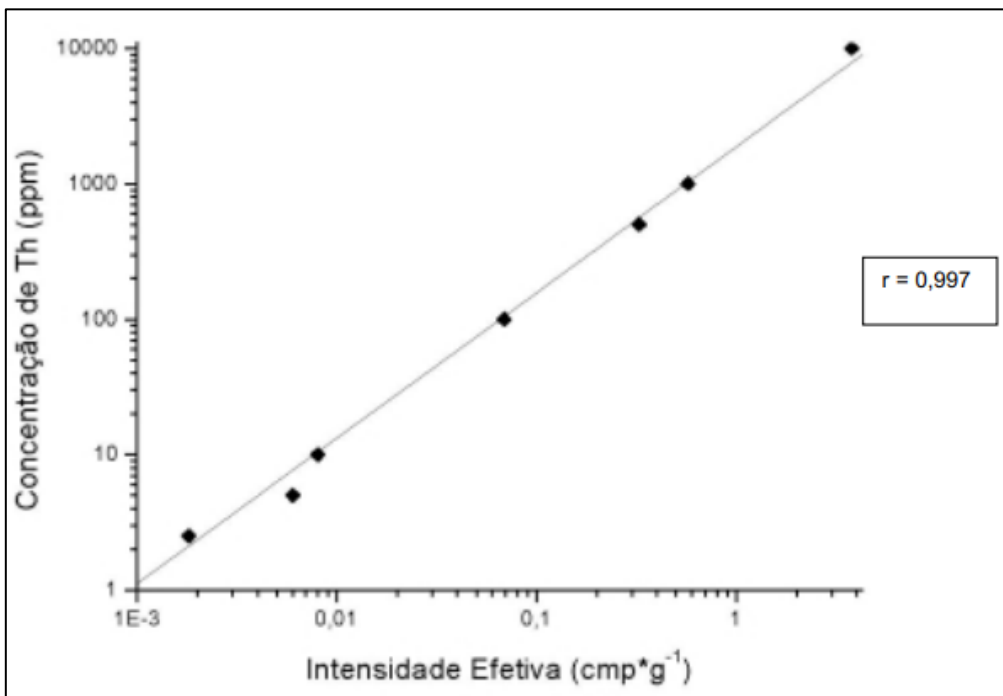
$$\text{Log} C_{Th} = 1,075(\log I_{Th}) + 3,273 \quad (21)$$

Figura 29 – Curva de calibração do U em concentração.



Fonte: Duarte (2002)

Figura 30 – Curva de calibração do Th em concentração.



Fonte: Duarte (2002)

5.8 Fluorescência de raios x

As análises de fluorescência de raios x foram realizadas utilizando o equipamento S8 Tiger – Bruker do laboratório de radiações ionizantes (LARIN) do Centro de Geociências Aplicado ao Petróleo – UNESPetro (Figura 31).

A fluorescência de raios x (XRF) utiliza sinais de raios x para excitar uma amostra desconhecida. Os elementos individuais presentes na amostra emitem seus raios x característicos (fluorescentes), podendo assim determinar qualitativamente e quantitativamente os elementos que compõem a amostra.

Para realizar a análise, as amostras de solo foram pulverizadas e misturada com a cera MaxiWax 1000, utilizando 8 gramas de amostra e 1,6g de cera. Após esta etapa as amostras foram prensadas junto com 3,5g de ácido bórico, o qual constituiu a base da pastilha. As amostras foram encaminhadas para análise, na qual foi possível determinar qualitativamente a presença de elementos maiores e traços, os quais foram correlacionados com a concentração de U, Th e Rn presentes nas amostras de solo.

Figura 31 - Fluorescência de raios x do laboratório de radiações ionizantes (LARIN)



Fonte: Elaborada pelo autor

5.9 Difração de raios x

As propriedades químicas e físicas do solo são amplamente controladas pelos seus minerais, de maneira especial por aqueles constituintes da fração argila. A identificação e o entendimento das propriedades dos diferentes minerais do solo ajudam na compreensão da sua gênese e das suas propriedades relacionadas. Desta forma foi utilizado método de difração de raios x para a caracterização mineralógica das amostras, para ver qual sua influência na concentração de radônio no solo.

As amostras foram pulverizadas e separadas por peneiras de 325 mesh. A fração fina que passou pela peneira foi colocada em moldes próprios do equipamento em formato de pastilha e levadas para análise. As análises foram feitas utilizando o equipamento D2 Phaser – Bruker, do laboratório de radiações ionizantes (LARIN) do Centro de Geociências Aplicado ao Petróleo – UNESPetro (Figura 32).

Figura 32 – Difração de raios x do laboratório de radiações ionizantes (LARIN)



Fonte: Elaborada pelo autor

5.10 Concentração de matéria orgânica (MO)

A concentração de matéria orgânica no solo foi realizada utilizando o método estabelecido por Goldin (1987). Primeiramente as amostras foram colocadas em cadinhos, previamente pesados, e colocadas em uma estufa a uma temperatura de 60°C durante 24 horas, com objetivo de tirar a umidade. Após retirar a umidade a amostra foi novamente pesada e colocada em um mufla a uma temperatura de 850°C, durante 6 horas. Após esta etapa a amostra foi pesada e pela diferença do último valor pesado é possível determinar a massa de matéria orgânica. Sua porcentagem foi determinada pela equação 22.

$$MO(\%) = \left(\frac{m_{MO}}{m_{amostra}} \right) \times 100 \quad (22)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Exalação de radônio

6.1.1 Curva de exalação de radônio

Após o ensaio de exalação de radônio os resultados foram transferidos do equipamento AlphaGuard para o computador, utilizando o *software* DataEXPERT. Os resultados da concentração de radônio foram plotados utilizando o *software* OriginPro 8 em função do tempo de análise. Para desenvolver a curva, realizou-se o ajuste não linear, no *software* OriginPro 8, utilizando a equação 11. Para equação 11 ficar em função da meia-vida ($T_{1/2}$), do radônio, foi substituída nela a equação 10, resultando na equação 23. O objetivo do ajuste é, além de conseguir desenvolver a curva, determinar o fator E da equação 23, que representa à taxa de exalação de radônio.

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t} + \frac{M \cdot E \cdot T_{1/2}}{V \cdot \ln(2)} \left(1 - e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t}\right) \quad (23)$$

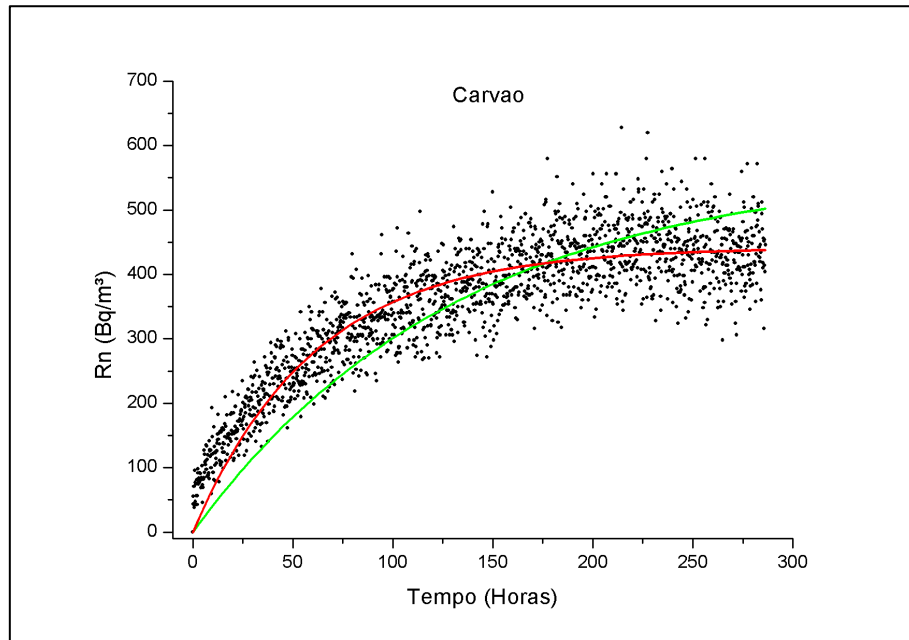
O volume livre V da montagem experimental (garrafão + mangueiras) utilizada é de 0,0193 m³ (19,3 L). A $T_{1/2}$ do ²²²Rn de 3,82 dias (91,68 horas). A massa (M) de cada amostra no ensaio foi de 2 kg. A concentração inicial (C_0) de cada análise será igual à zero, tendo em vista que o protocolo de limpeza do equipamento foi seguido.

Após realizar o ajuste utilizando a equação 24, observou-se que a curva resultante (curva verde) não representou os resultados obtidos experimentalmente (curva vermelha), como é observado nas Figura 33 a 36. Desta forma duas hipóteses foram consideradas:

- 1) Ocorreu vazamento de gás durante a análise.
- 2) Algum dos valores utilizados nas variáveis, V , $T_{1/2}$, M e C_0 , não estão corretas. Tendo em vista que o volume, massa e concentração inicial são valores corretos e mensurados no laboratório, concluiu-se que essa possível interferência viria do valor da $T_{1/2}$ (3,82 dias), o qual pode ter sofrido interferência devido ao tempo que o elemento leva para sair do material e ser detectado no sistema.

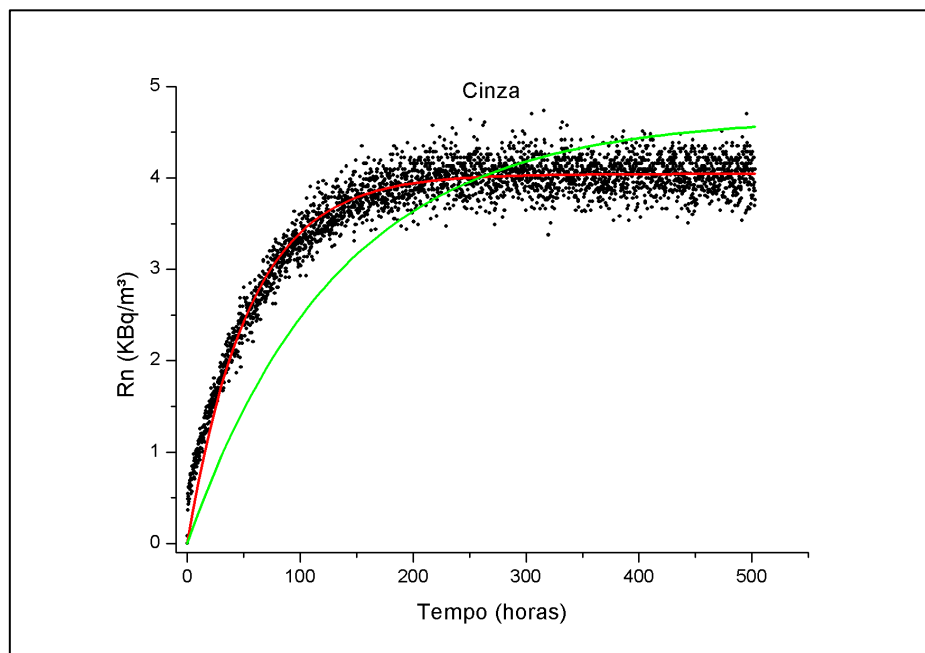
Como não houve vazamento de gás, pois todas as ligações foram vedadas e testadas, a segunda hipótese foi tomada como a mais adequada.

Figura 33 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de carvão mineral.



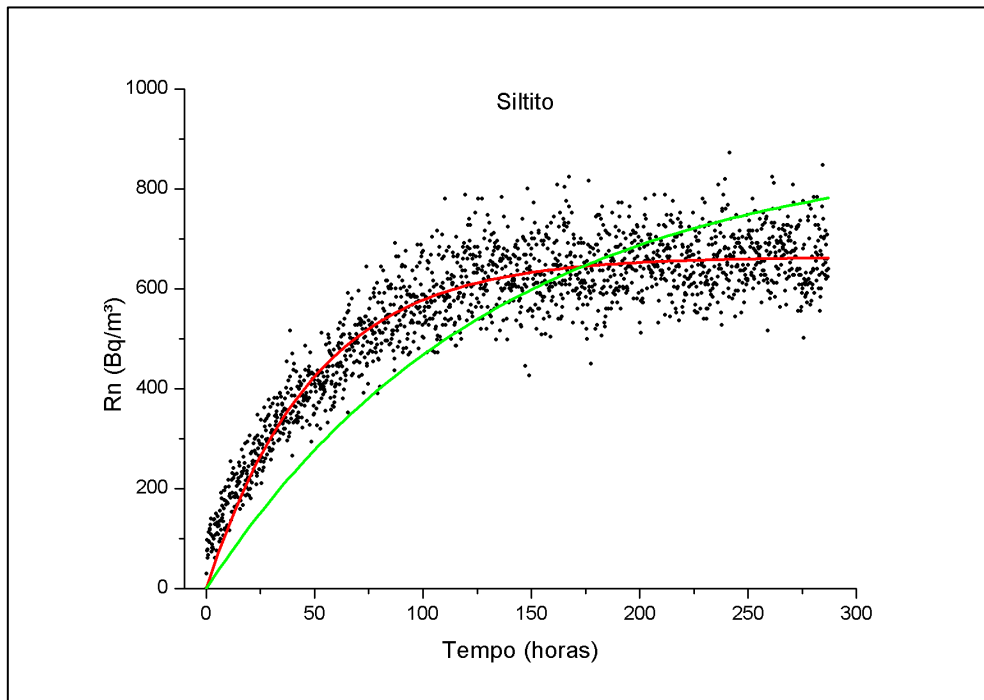
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de cinza.



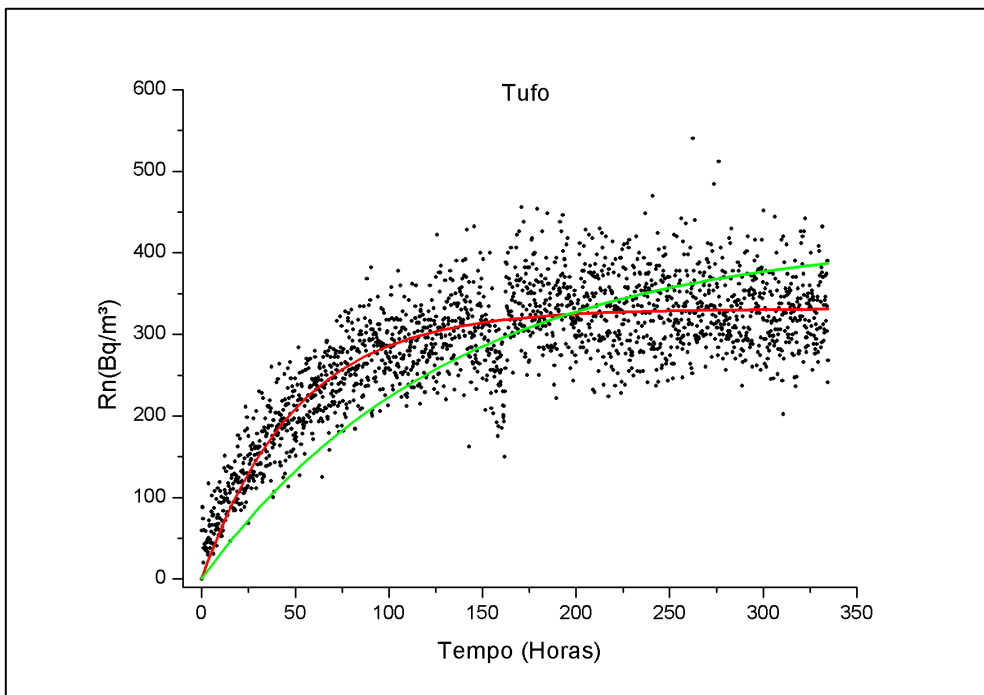
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de siltito



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 36 - Gráfico da concentração de Rn em função do tempo para amostra de tufo vulcânico



Fonte: Elaborada pelo autor

Para resolver este problema foi utilizada a abordagem feita por Perna (2016), a qual a $T_{1/2}$ foi substituída por uma nova grandeza denominada “tempo característico de decaimento” (G) (Equação 24), que foi tomada como parâmetro de ajuste. Após esta mudança, as curvas vermelhas, nas Figuras 33 a 36, conseguem representar os dados experimentais, obtendo valores de G (Tabela 9) inferior ao valor da $T_{1/2}$, o que segundo Perna (2016) comprova que o radônio demora certo tempo para ser exalado e que a hipótese de que o tempo característico de decaimento não é de 3,82 dias (91,68 horas).

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t} + \frac{M.E.G}{V \cdot \ln(2)} (1 - e^{-\frac{\ln(2)}{G} \cdot t}) \quad (24)$$

Tabela 9 – Resultados dos parâmetros de ajuste da taxa de exalação e da concentração de radônio em cada material estudado.

Amostra	Tempo de análise (horas)	Número de pontos	G (horas)	Taxa de exalação (Bq/kg.h)	Rn (Min) (Bq/m ³)	Rn (Max) (Bq/m ³)	Rn (média) (Bq/m ³)
Carvão	286,3	1718	41,95	0,070	38,5	628	352,6
Cinza	503	3018	37,71	0,717	81,5	4736	3620
Siltito	287	1722	33,99	0,131	30	872	553,18
Tufo	334,7	2008	34,88	0,064	20	540	282,92

Fonte: Elaborada pelo autor

É importante ressaltar que a meia-vida é uma grandeza muito bem estabelecida. Sendo assim, o tempo característico de decaimento G dá a informação de quanto tempo, em média, os átomos de radônio, a partir do momento que foi gerado, demoram em sair da amostra e ser mensurado pelo equipamento. Em todas as análises é possível observar graficamente que dados experimentais atingem um regime constante a partir de 180 horas Figuras 31 a 34, o que caracterizaria o início do equilíbrio radioativo.

A taxa de exalação variou de 0,064 a 0,717 Bq/kg.h (Tabela 9), sendo o menor o valor correspondente ao tufo vulcânico e o maior à cinza. Valores coerentes com as concentrações médias de radônio obtidas, que variaram de 282,92 a 3620 Bq/m³, valores referentes ao tufo vulcânico e a cinza, respectivamente.

Como citado anteriormente, a *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) e a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) recomendam como valor de concentração de radônio referência limite, considerado normal 200 Bq/m³. Acima de 300 Bq/m³ é considerado ambiente inadequado para exposição, durante muito tempo. Os resultados da concentração de radônio nas amostras, apresentados na Tabela 9, mostram que todas ultrapassam o valor estipulado de 200 Bq/m³. É importante ressaltar que o gás estava confinado e não escapou. Então é relevante considerar que em um ambiente onde tenha circulação de ar o gás terá concentração menor que a obtida, podendo não gerar riscos a saúde. Mesmo assim aconselha-se monitorado periódico do ambiente.

Os valores obtidos para as amostras de cinza de carvão são aproximadamente 40 vezes o valor estipulado pelos comitês internacionais, o que leva certa preocupação em relação aos locais de deposição deste rejeito. Preferencialmente devem ser colocados em locais abertos, ventilados e afastados da população. Requisito atendido pela Companhia Carbonífera do Cambuí, a qual deposita seus rejeitos de cinza à uma distância de aproximadamente 500 m da população, e em local de difícil acesso.

6.1.2 Concentrações de Urânio e Tório

As concentrações de U e Th nas amostras estudadas foram obtidos pelo método da Espectrometria Gama no LABIDRO – Laboratório de Isótopos e Hidroquímica, do Departamento de Petrologia e Metalogenia – IGCE (UNESP). Foram obtidos espectros de energia gama em função do número de contagens como resultado das análises. Analisando os espectros e utilizando as equações 20 e 21 foi possível determinar as concentrações de U e Th, em ppm, de cada amostra, as quais estão apresentadas na Tabela 10.

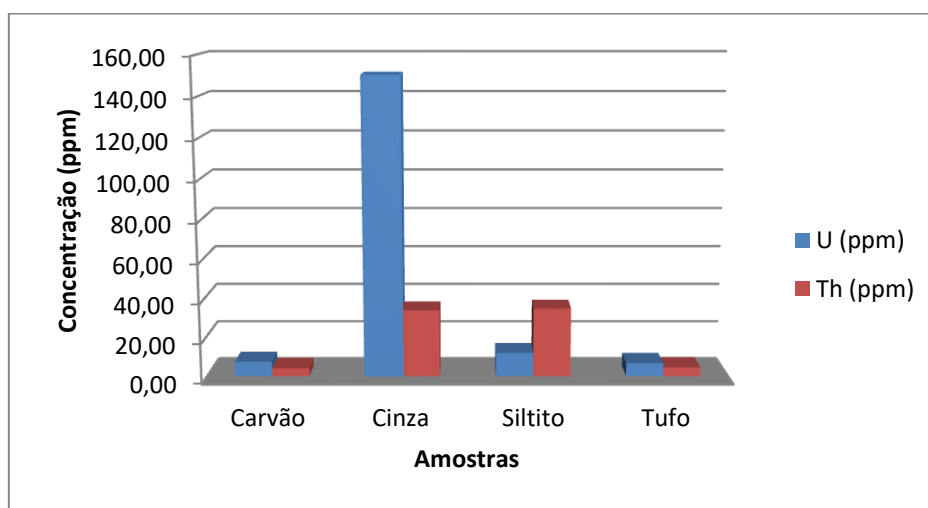
Tabela 10 - Concentrações de U e Th das amostras analisadas.

	U	Th
Amostra	ppm	ppm
Carvão	7,52	4,09
Cinza	150,13	34,01
Siltito	12,07	34,88
Tufo	6,78	4,67

Fonte: Elaborada pelo autor

A concentração de urânio nas amostras variou de 7,52 a 150,13 ppm. Tendo menor concentração o tufo vulcânico e a maior a cinza. O teor de tório nas amostras variou de 4,09 a 34,88 ppm. Tendo menor concentração o carvão mineral e a maior a siltito. Estes resultados estão graficamente representados na Figura 37. Observar-se que os teores de urânio e tório encontrados nas cinza são bem altos. Isto ocorre devido ao processo de combustão do carvão na termoelétrica, no qual os componentes orgânicos são eliminados, concentrando assim os outros elementos presentes que não entraram em combustão, no caso o U e Th, responsáveis por gerarem, após uma série de decaimentos, o gás radônio.

Figura 37 - Teor de urânio e tório de cada amostra analisada



Fonte: Elaborada pelo autor

6.1.3 Correlação dos dados

Através dos dados obtidos no ensaio de exalação de radônio e na espectrometria gama, foi possível comprovar que a taxa de exalação e a concentração de radônio são diretamente proporcionais a concentração de urânio. O carvão que possui menor teor de U e menor taxa de exalação, enquanto que as cinzas produziram maior quantidade do gás radônio. Resultado apresentasse coerente, pois quanto maior a quantidade de elementos “pai”, maior será produção de elementos “filhos”.

O valor da concentração de radônio do siltito foi o segundo maior obtido (553,18 Bq/m³) e a sua concentração de tório foi a maior obtida (34,88 pmm), concluindo-se que a contribuição do torônio, na elevação da concentração do radônio, nesta amostra, foi maior que nas outras.

6.2 Determinação da concentração radônio no ar do interior da mina

A Determinação da concentração radônio misturado no ar do interior da mina foi realizada utilizando o detector portátil AlphaGuard. Foram realizadas 18 análises em pontos diferentes, os quais foram escolhidos de modo que pudesse representar todos os ambientes da mina: painéis lacrados e abertos, com pouco ou muita ventilação e locais com maior fluxo de trabalhadores. Para melhor visualização dos pontos analisados o mapa topográfico da mina Amando Simões foi dividido em 5 setores (A - E)(Figura 38), os quais podem ser observados nas figuras 39 a 43.

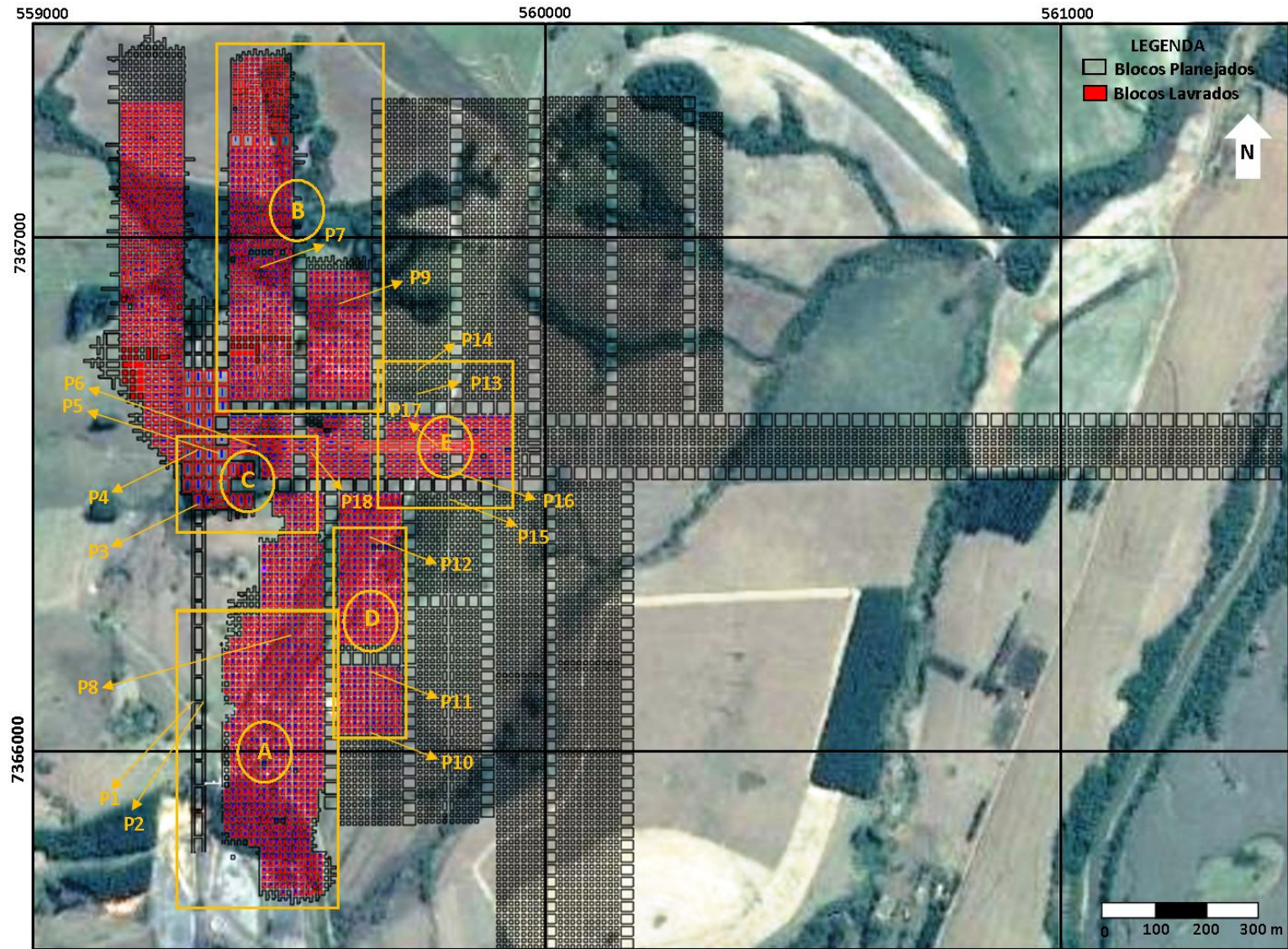
Os resultados da concentração de radônio no ar, localização dos pontos analisados e classificação do ambiente e fluxo de trabalhadores estão apresentados na Tabela 11. A concentração de radônio variou de 7,2 a 770,5 Bq/m³. O menor valor foi obtido no ponto 6, localizado na travessa W2/T5 (Figura 41), e maior valor foi obtido no ponto 2, localizado na rampa de secundária (Figura 39).

Tabela 11 – Concentração de radônio no ar do interior da mina.

Ponto	Localização	Rn (Bq/m ³)	Ambiente	Fluxo de trabalhadores
1	T(6) Rampa (primaria) Entrada de Ar	132	Aberto	Médio
2	T(6) Rampa (secundaria) Saída de Ar	770,5	Aberto	Baixo
3	T(14)	496	Fechado	Baixo
4	T(18) Cabine eletricidade	157	Fechado	Baixo
5	T(18) sala de refúgio	256	Fechado	Baixo
6	W2/T5 (Na frente do painel AE)	7,2	Aberto	Médio
7	AE(0) T-21	126,5	Aberto	Baixo
8	AD(0) T20	16,5	Aberto	Baixo
9	BE(0) T-13	166	Aberto	Baixo
10	BD(0) T-43 (Frente de lavra)	230	Aberto	Alto
11	BD(0) T-27 (refeitório)	130	Aberto	Alto
12	BD(0) T-13	167,5	Aberto	Médio
13	CE(0) T-3	215,5	Aberto	Alto
14	CE(0) T-8 (Frente de lavra)	336	Aberto	Alto
15	CD(0) T-3 (Frente de lavra)	264	Aberto	Alto
16	WE8/CD(0)	194,5	Aberto	Médio
17	W0/ T-25	196	Aberto	Médio
18	W2/T-15 (subestação)	221,5	Aberto	Médio

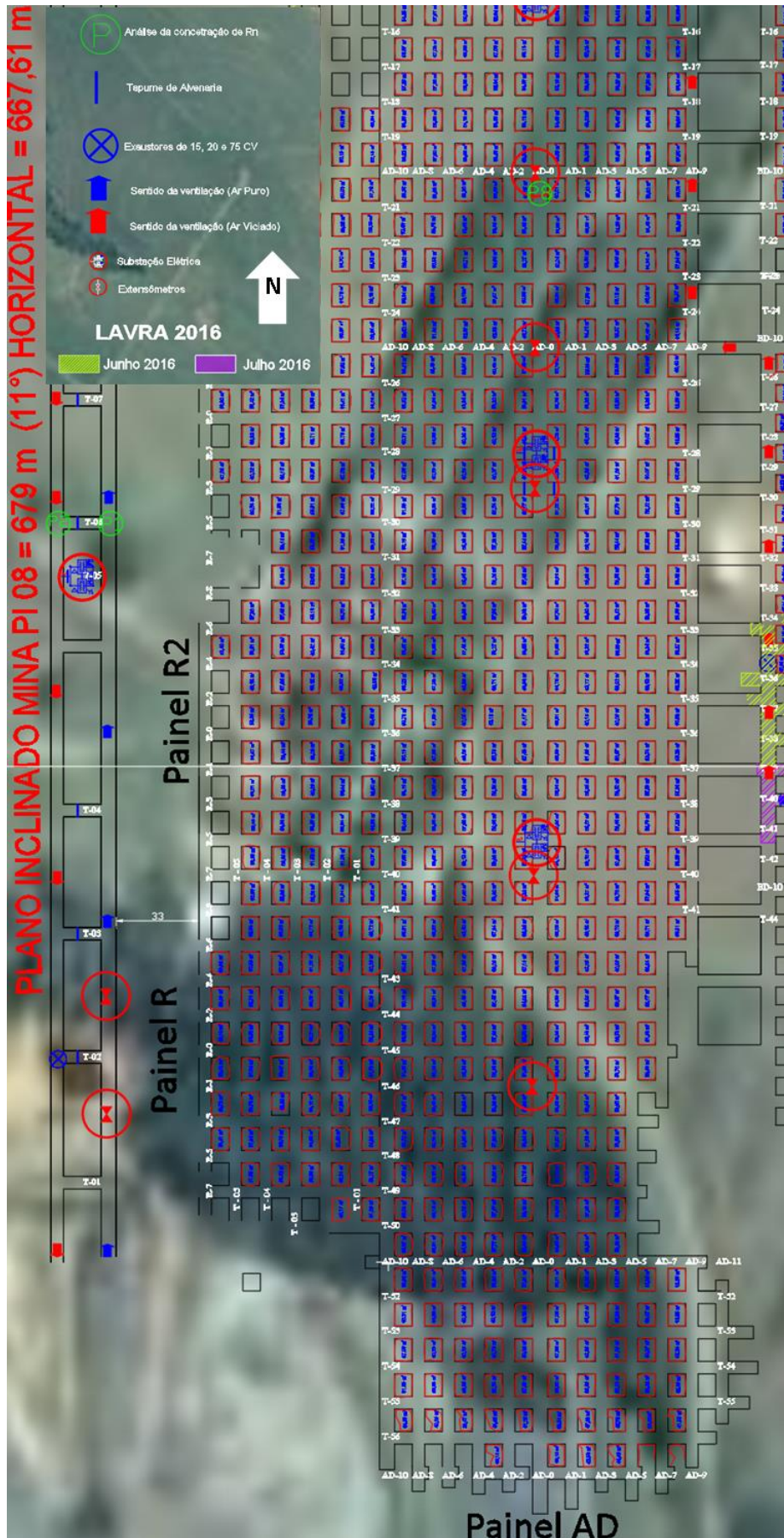
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 38 - Mapa da mina Amando Simões, dividido em 5 setores (A - E).



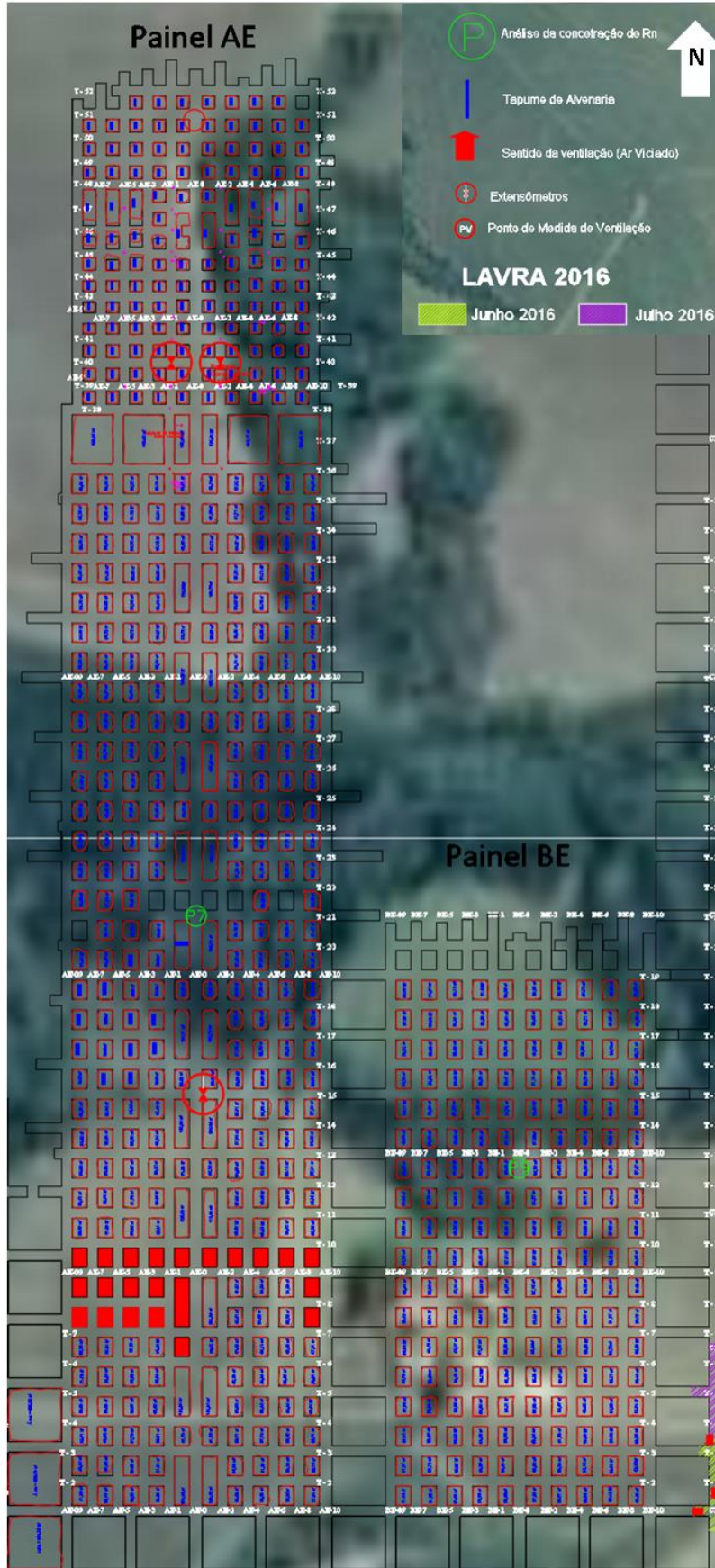
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 39 – Setor A (P1,P2 e P8)



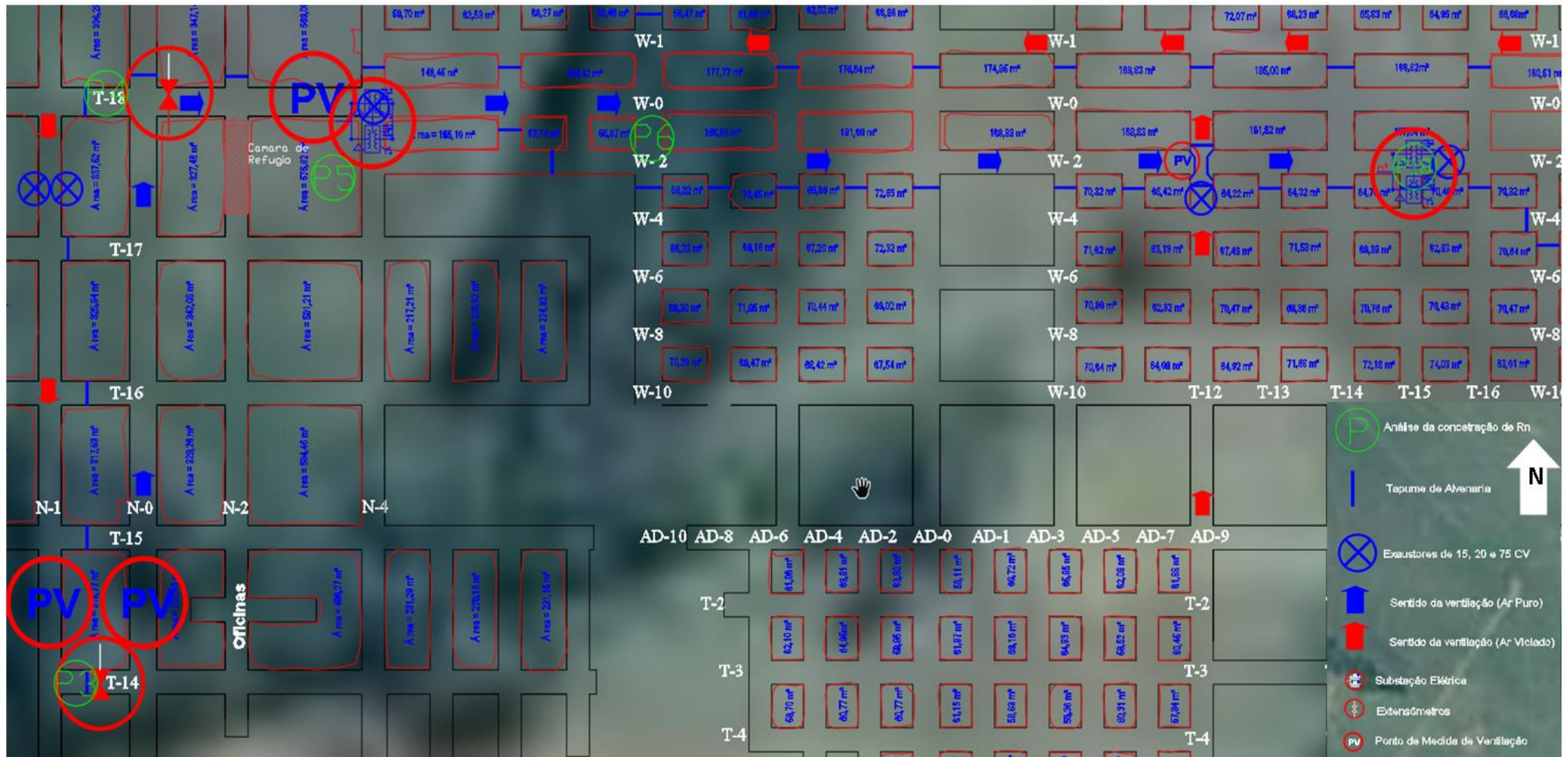
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 40 - Setor B (P7 e P8)



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 41 - Setor C (P3,P4, P5,P6 e P18)



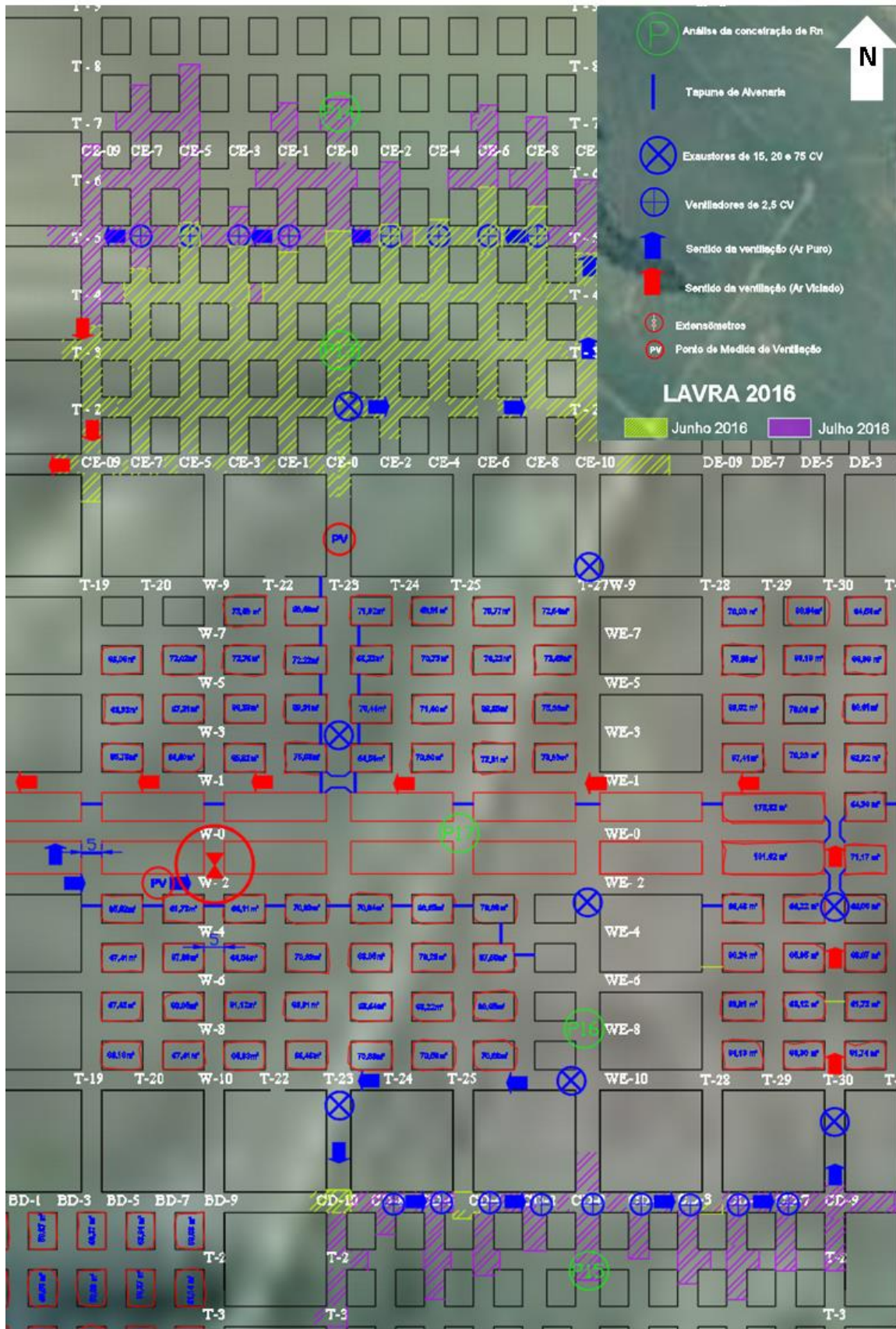
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 42 - Setor D (P10,P11 e P12)



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 43 - Setor E (P13,P14,P15,P16 e P17)



Fonte: Elaborada pelo autor

Os pontos 1 e 2, localizados no setor – A (Figura 39), representam a entrada e saída do ar da mina. No ponto 1, localizado na rampa primária (T6), onde ocorre o acesso ao interior da mina, o ar é puxado do exterior da mina por exaustores localizados no final da rapa. Devido ao grande fluxo de ar puro nesta região, observa-se que a concentração de radônio é baixa (132 Bq/m^3), devido a grande mistura do gás com o ar, do exterior da mina, não contaminado. O ar que passa pelo ponto 1 é empurrado pelos exaustores para o interior da mina, para que lá tenha circulação de ar. No ponto 2, localizado na rapa secundária (T6), a qual é utilizada somente para saída de ar e saída de emergência, ocorre a passagem de todo o ar viciado do interior da mina, ou seja, todo tipo de gás (CO , H_2S , O_2 , CH_4 , Rn) do interior da mina é direcionado por exaustores e ventiladores para esta saída de ar. Desta forma, o resultado da análise neste ponto apresenta-se coerente, o qual é o maior encontrado no interior da mina ($770,5 \text{ Bq/m}^3$).

O ponto 3 está localizado no setor – C (Figura 41) em uma travessa da rampa primária para rampa secundária (T14). Este acesso é utilizado para que os trabalhadores consigam sair da rapa primária e se deslocar para a secundária como rota de fuga para caso ocorra algum incêndio. Esse acesso é lacrado com duas portas corta fogo. Neste ponto foi obtida a segunda maior concentração de Rn de 496 Bq/m^3 , esse valor é explicado por o acesso ter ligação direta com a rapa secundária, e ao abrir a porta para entrada e saída o ar viciado é empurrado para o interior ficando confinado.

O ponto 4 está localizado no setor – C (Figura 41), no final da rampa primária (T-18), a uma profundidade de aproximadamente 120 metros (nível de lavra), sendo um acesso para a rampa secundária. No interior desse acesso temos uma cabine de eletricidade. Este acesso é fechado por duas portas, as quais não impedem a entrada e saída de ar. A concentração de radônio obtida na análise foi de 157 Bq/m^3 , valor aproximadamente 3 vezes menor que o ponto 3, que possuem condições parecidas (acesso entre as duas rapas). O que faz a concentração de radônio neste ponto ser menor é a presença de dois exaustores na rapa secundária, localizados entre as travessas T-17 e T-18, os quais por estarem muito próximos ao acesso conseguem puxar o ar viciado do interior pelas frestas da porta, fato observado no trabalho de campo.

O ponto 5 está localizado no setor – C (Figura 41) (T-18) na sala de refúgio. Esta sala tem por objetivo assegurar que os trabalhadores tenham um lugar seguro para ficar caso ocorra um desabamento ou incêndio no interior da mina. Esse local é feito de alvenaria e possui porta corta-fogo e com pouca ventilação. O valor da concentração de radônio obtida neste local foi de 256 Bq/m³.

O ponto 6 está localizado no setor – C (Figura 41) (W2/T5) na frente da entrada do painel AE, o qual está fora de operação. A concentração de radônio nesse ponto foi a menor encontrada 7,2 Bq/m³. Este ponto está localizado bem próximo de um exaustor de grande potência (exaustor localizado na rua W0). Esse exaustor é o primeiro no nível de lavra, assim é responsável por puxar o ar que vem pela rampa primaria para o interior da mina. Desta forma no ponto 6 ocorre grande fluxo de ar não viciado, responsável pela mistura do radônio neste ponto.

O ponto 18 está localizado no setor – C (W2/T15) (Figura 41), onde temos uma subestação elétrica. A concentração de radônio obtida neste ponto é de 221,5 Bq/m³. Apesar de ter um grande fluxo de ar passando pelo local, devido à presença de um exaustor localizado a alguns metros (W2/ entre T15 e T16), seu valor foi muito maior que o obtido no ponto 6, localizado na mesma rua (W2/T5). Isto é explicado pela contaminação que o ar sofre entre W2/T12 (Figura 41). O ar viciado que sai do painel BD é direcionado para a travessa rua AD-9 (Figura 42), o qual quando passa pela rua W2 e entra em contato com o ar não viciado trazido de fora da mina, contaminando-o, e posteriormente acaba sendo puxado pelo exaustor próximo ao ponto 18. Este ar é empurrado para o painel BD pela rua BD(0) que tem um comprimento de 550 metros até a frente de lavra, com um total de 42 travessas (Figura 42).

O ponto 12 está localizado no setor – D (BD(0)/T-13) (Figura 42). Neste ponto a concentração de radônio obtida foi de 167,5 Bq/m³. Observa-se uma mistura do gás radônio do ar vindo do ponto 18. Esta mistura ocorre pelo fato deste painel estar em operação, e um número grande de ventiladores e exaustores estão em operação na região. O ponto 11 também localizado no setor – D na rua BD(0) com a travessa T-27 confirma isto. A concentração de radônio neste ponto foi de 130 Bq/m³. Neste ponto está localizado o refeitório

dos trabalhadores, onde ventiladores permanecem sempre ligados, para diminuir a exposição dos mesmos aos gases.

O ponto 10 está localizado no setor – D (BD(0)/T-43) (Figura 42) e os pontos 14 e 15 estão localizados no setor – E (CE(0)/T-8) e CD(0)/T-3, respectivamente) (Figura 43). Nestes pontos foram obtidas as maiores concentrações de radônio, no que diz respeito a espaço aberto e com maior fluxo de trabalhadores, que foram 230, 336 e 264 Bq/m³, respectivamente. Estes três pontos estão localizados na frente de lavra, as quais foram detonadas no dia da análise. Esse resultado comprova que a principal forma de escape do gás radônio no interior da mina são as fraturas geradas pelas detonações. É importante ressaltar que em todas as frentes de lavra, inúmeros ventiladores estão instalados, como observado nas Figuras 42 e 43, de modo que este resultado obtido já representa uma concentração dissolvida. O que mostra a importância dos ventiladores e exaustores neste local.

Como foi mostrado anteriormente neste trabalho, o tipo de litologia e concentração de U e Th influenciam diretamente na taxa de exalação e concentração de radônio no ambiente. Sabendo disso, foram selecionados alguns furos de sondagem feitos pela Companhia Carbonífera do Cambuí (Figura 44) que permitiram correlacionar à espessura das camadas com a concentração de radônio no ambiente como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Correlação entre espessura de camada com concentração de Rn.

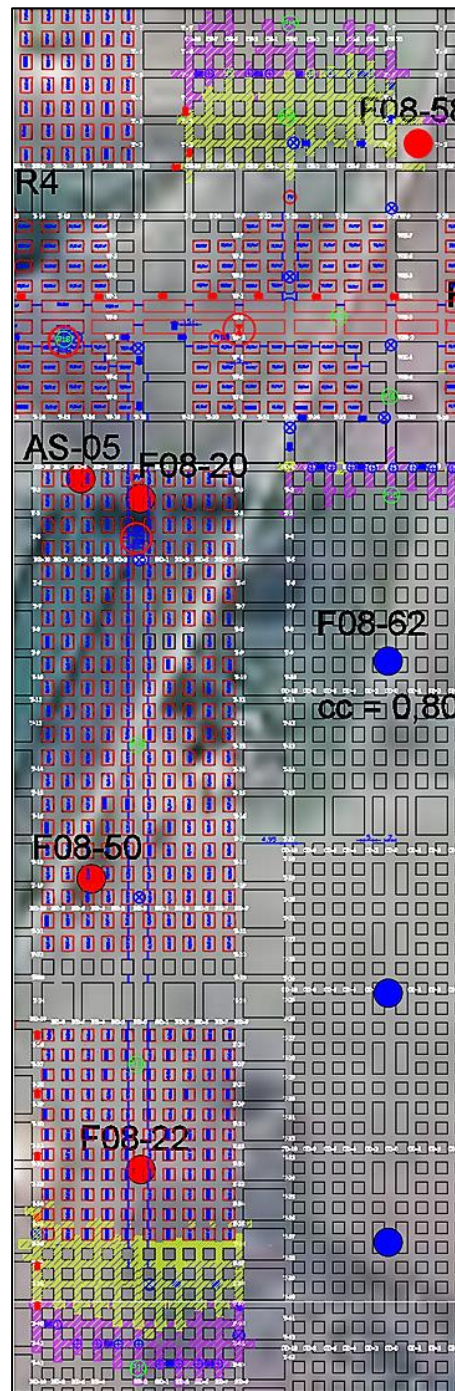
Sondagem	Camada de carvão (m)	Ponto de análise	Concentração de Rn (Bq/m ³)
F08-22	0,8	10	230
F08-58	0,57	14	336
F08-62	0,8	15	264

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que quanto menor a espessura da camada de carvão maior é a concentração de radônio no ar, isto ocorre porque a camada mais expostas é a de silito. Como apresentado nas tabelas 9 e 10, o silito possui maior taxa de exalação que o carvão mineral e maior concentração de urânio. O ponto 13 localizado no setor – E (CE(0)/T-3), também apresenta uma concentração

próxima à estes valores ($215,5 \text{ bq/m}^3$). Está localizado próximo à sondagem F08-58 e ao ponto 14. Neste ponto observa-se uma concentração menor que a do ponto 14, apesar da proximidade, concluindo que quanto mais próximo da frente de lavra maior é a concentração de radônio devido à proximidade da área recém fraturada da rocha, que é o local de escape do gás.

Figura 44 – Localização dos furos de sondagem F08-22, F08-58 e F08-62



Fonte: Elaborada pelo autor

Os pontos 16 e 17 estão localizados no setor – E entre as travessas WE8/CD(0) e W0/T25, respectivamente (Figura 43). As concentrações de radônio nestes pontos foram de 194,5 e 196 Bq/m³, respectivamente. Estes dois pontos estão localizados a 170 e 230 metros do ponto 18, no qual ocorreu mistura de ar limpo com viciado. O Ar é puxado pelo exaustor localizado em W2/CD(0) (Figura 43), o qual força a passagem desse ar pelos pontos 16 e 17.

O ponto 8 está localizado no setor – D (AD(0)/T-20) (Figura 39) e os pontos 7 e 9 estão localizados no setor – E (AE(0)/T-21) e BE(0)/T-13, respectivamente). A concentração de radônio nestes pontos foi de 16,5, 126,5 e 166 Bq/m³. Estes três pontos estão localizados em painéis desativados, ou seja, não está em processo de lavra. Nestes painéis não tem ventiladores nem exaustores. Desta forma, era esperado uma concentração maior nestes painéis devido à falta de circulação de ar, levando a acreditar que o principal modo de escape de Rn seja pelas fraturas geradas no momento da detonação da frente de lavra e não pelos poros das rochas.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 11, somente os pontos 2, 3 e 14 excederam o valor de 300 Bq/m³ proposto por ICRP (2008). Os pontos 2 e 3 são locais de pouco fluxo e baixo tempo de permanência dos trabalhadores, o que não gera preocupação. O ponto 14 é um ponto que merece atenção pelo alto fluxo e tempo de permanência dos trabalhadores. Como mencionado anteriormente, não somente no ponto 14, mas em todas as frentes de lavra é necessária uma grande quantidade de ventiladores e exaustores para diluição e redirecionamento dos gases liberados no momento do faturamento da rocha. As Figuras 42 e 43 mostram que Companhia Carbonífera do Cambuí cumpre este requisito, pela quantidade de ventiladores e exaustores presentes no painel que está sendo lavrado.

6.3 Determinação da concentração de radônio no solo

A determinação da concentração de radônio foi realizada na segunda etapa de campo, durante os dias nos dias 23 a 29 de janeiro de 2017. Foram analisados 23 pontos (Tabela 13), os quais foram escolhidos de modo que tivessem maior representatividade espacial, litológica, química e topográfica da área ao redor da mina de carvão (Figura 45). *In situ*, além da concentração do radônio, foram obtidos os valores de pH e temperatura do solo, que estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 13 – Localização dos pontos onde foram efetuadas as análises de solo.

Ponto	Coordenadas			Uso e ocupação
	X	Y	Altitude	
1	559557	7365172	596	Área reflorestada, próximo à plantação de aveia e pátio de estoque de carvão.
2	558964	7365157	562	Próximo à pilha de rejeito
3	559000	7365106	563	Plantação de eucalipto
4	560128	7365628	581	Plantação de milho
5	560499	7365702	562	Plantação de milho
6	560589	7366059	557	Plantação de eucalipto
7	560172	7365867	567	Plantação de milho
8	559727	7365597	562	Pasto
9	559221	7365738	582	Próximo à pilha de rejeito
10	559415	7365125	589	Plantação de aveia (preparo de solo para plantação de soja)
11	559650	7365862	565	Plantação de milho
12	559505	7365923	580	Plantação de milho
13	559824	7366393	570	Pasto
14	559311	7366080	564	Pasto
15	558980	7366279	551	Pasto
16	558601	7366080	537	Pasto
17	560003	7365082	577	Plantação de milho
18	560297	7365202	574	Plantação de milho
19	558612	7365051	542	Mata nativa
20	558592	7365362	537	Próximo à pilha de rejeito
21	558675	7365717	537	Próximo à pilha de rejeito
22	559235	7365641	580	Pilha de rejeito
23	559165	7365038	570	Plantação de aveia (preparo de solo para plantação de soja)

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 45 – Localização dos pontos onde foram efetuadas as análises de solo.



Fonte: Modificado de Google Earth (2018)

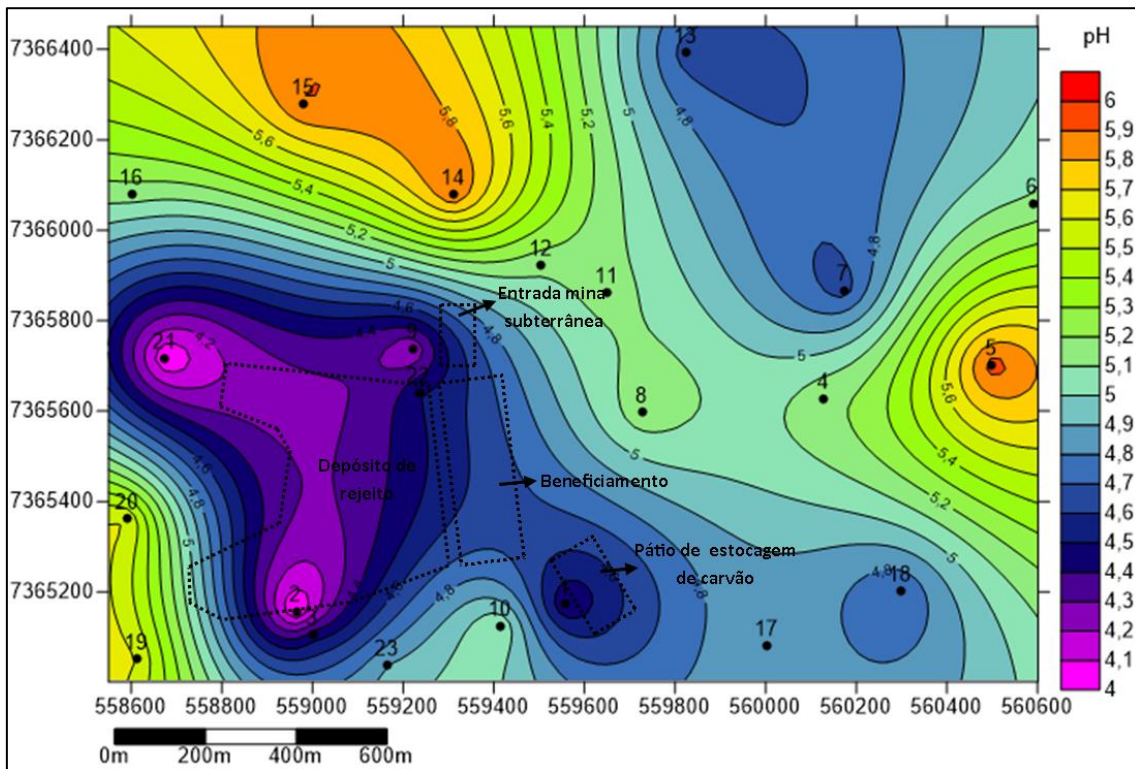
Tabela 14 – Valores de pH e temperatura determinados *in situ*.

Pontos	pH	Temperatura (°C)
1	4,4	18,0
2	4,0	22,0
3	4,5	14,0
4	5,2	15,0
5	6,0	14,0
6	5,1	14,0
7	4,7	16,0
8	5,2	18,0
9	4,2	18,0
10	5,1	18,0
11	5,1	14,0
12	5,1	16,0
13	4,7	16,0
14	5,9	16,0
15	5,9	15,0
16	5,2	18,0
17	4,9	18,5
18	4,7	19,5
19	5,6	15,0
20	5,6	17,5
21	4,0	21,0
22	4,5	18,0
23	4,9	18,0

Fonte: Elaborada pelo autor

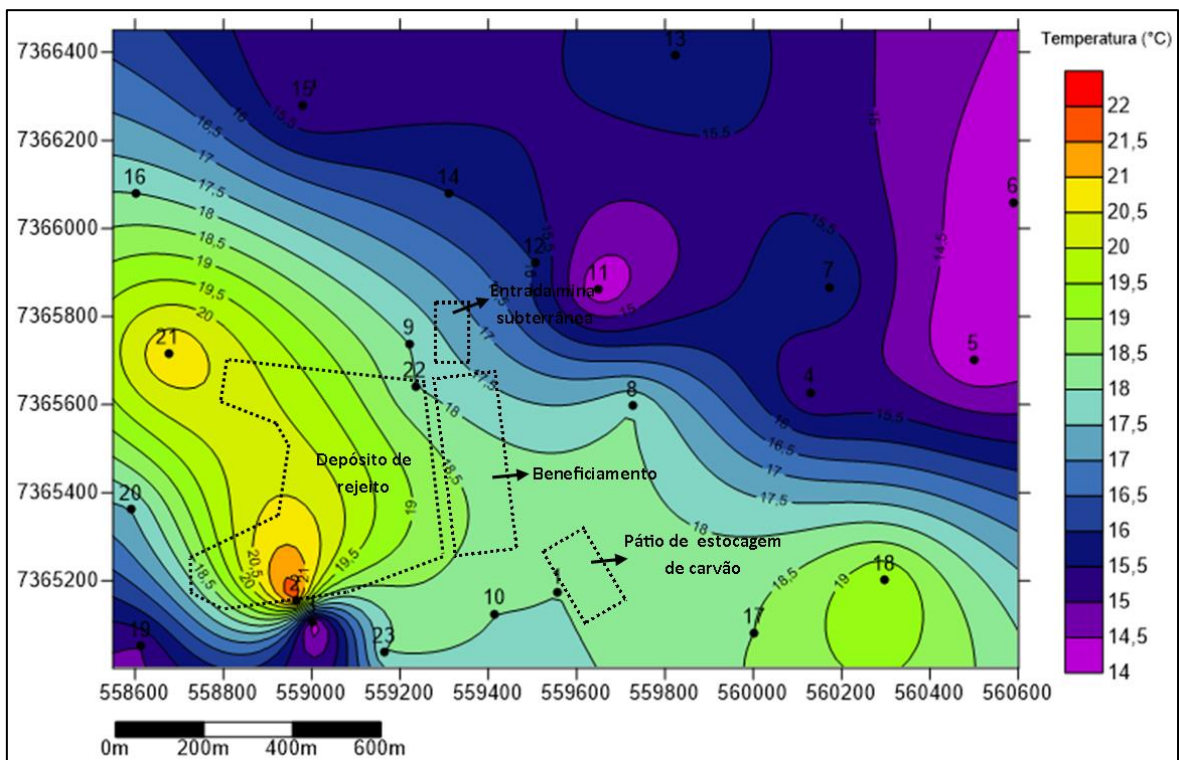
O potencial hidrogeniônico (pH), que mede a capacidade de um ambiente fornecer prótons (íons de hidrogênio) a uma base ou de retirar prótons de um ácido, foi determinado utilizando um phmetro portátil, o qual determinou o pH da mistura do solo com água destilada, que variou de 4,0 à 6,0. Mostrando que os solos, nos pontos analisados, possuem caráter ácido. A temperatura foi medida no período da manhã, entre 6 e 9 horas, e variou de 14,0 a 22,0°C. A variação do pH e da temperatura na área estudada está ilustrada nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Distribuição do pH do solo na área estudada



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 47 - Distribuição da temperatura do solo na área estudada



Fonte: Elaborada pelo autor

6.3.1 Composição química dos solos

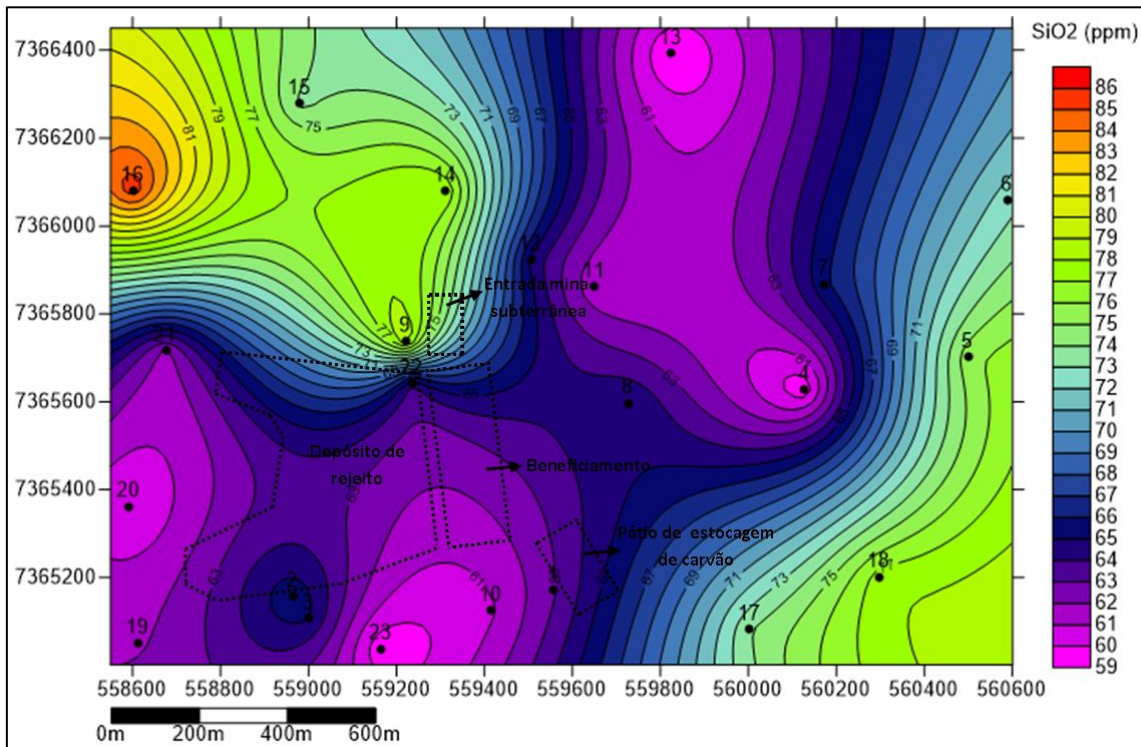
A caracterização elementar realizada pelo equipamento S8 Tiger – Bruker, do laboratório de radiações ionizantes (LARIN), possibilitou determinar a porcentagem dos óxidos presentes nas amostras dos solos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , MgO , SO_3 , ZrO_2 , P_2O_5 , CaO , MnO , ZnO e Rb_2O). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15. As Figuras 48 a 60 ilustram a distribuição destes óxidos na área de estudo.

Tabela 15 - Porcentagem de óxidos presentes nas amostras de solo

Pontos	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	TiO₂ (%)	K₂O (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	ZrO₂ (%)	P₂O₅ (%)	CaO (%)	MnO (%)	ZnO (%)	Rb₂O (%)	MO (%)
1	62,88	26,20	7,17	1,62	0,88	0,55	0,27	0,14	0,13	0,06	0,0100	0,0100	0,0100	6,79
2	65,73	22,59	7,36	1,43	0,84	0,56	1,06	0,11	0,10	0,09	0,0200	0,0200	0,0090	5,58
3	65,10	25,23	6,52	1,44	0,76	0,51	0,13	0,11	0,12	0,03	0,0094	0,0099	0,0093	4,79
4	59,20	29,67	7,84	1,52	0,65	0,43	0,15	0,12	0,18	0,15	0,0100	0,0100	0,0066	6,82
5	75,64	16,72	4,63	1,31	0,46	0,33	0,13	0,12	0,19	0,37	0,0700	0,0100	0,0044	4,76
6	72,54	19,41	5,29	1,55	0,35	0,29	0,12	0,13	0,14	0,10	0,0200	0,0094	0,0029	4,66
7	65,78	24,91	6,51	1,61	0,33	0,34	0,13	0,14	0,12	0,06	0,0086	0,0059	0,0036	4,59
8	65,05	23,67	7,55	1,34	1,10	0,71	0,13	0,10	0,16	0,09	0,0100	0,0100	0,0100	4,86
9	78,83	14,30	2,90	1,18	1,51	0,68	0,12	0,13	0,14	0,11	0,0400	0,0089	0,0092	4,58
10	60,87	28,17	7,06	1,47	0,91	0,64	0,12	0,13	0,13	0,41	0,0100	0,0100	0,0100	6,53
11	61,31	27,34	7,46	1,36	1,27	0,74	0,11	0,11	0,12	0,11	0,0200	0,0100	0,0100	5,97
12	64,75	25,39	6,21	1,50	0,99	0,57	0,15	0,14	0,14	0,06	0,0100	0,0095	0,0100	5,37
13	58,92	28,90	8,22	1,61	1,11	0,64	0,11	0,14	0,11	0,09	0,0200	0,0100	0,0200	6,72
14	77,96	12,95	3,31	1,15	2,33	0,83	0,15	0,14	0,17	0,63	0,0500	0,0100	0,0100	3,83
15	73,77	18,02	4,46	1,30	0,98	0,75	0,09	0,14	0,13	0,31	0,0100	0,0071	0,0100	5,88
16	85,69	8,89	2,46	1,34	0,60	0,33	0,10	0,12	0,14	0,20	0,0400	0,0066	0,0049	2,94
17	73,93	17,91	4,94	1,76	0,50	0,30	0,11	0,15	0,13	0,14	0,0600	0,0100	0,0042	3,57
18	77,46	15,69	4,16	1,25	0,52	0,27	0,11	0,12	0,23	0,08	0,0600	0,0070	0,0052	3,32
19	61,87	20,56	13,36	1,16	1,46	0,94	0,06	0,10	0,08	0,34	0,0000	0,0095	0,0100	4,43
20	60,05	27,55	8,66	1,63	0,80	0,49	0,16	0,12	0,11	0,33	0,0500	0,0100	0,0100	4,68
21	61,77	22,41	10,28	1,16	1,74	1,03	1,14	0,11	0,08	0,11	0,0200	0,0200	0,0200	5,32
22	63,95	22,27	7,57	1,11	2,49	1,39	0,37	0,09	0,09	0,39	0,0200	0,0200	0,0200	3,99
23	59,16	28,39	8,32	1,33	1,48	0,80	0,12	0,10	0,13	0,09	0,0100	0,0200	0,0200	5,57

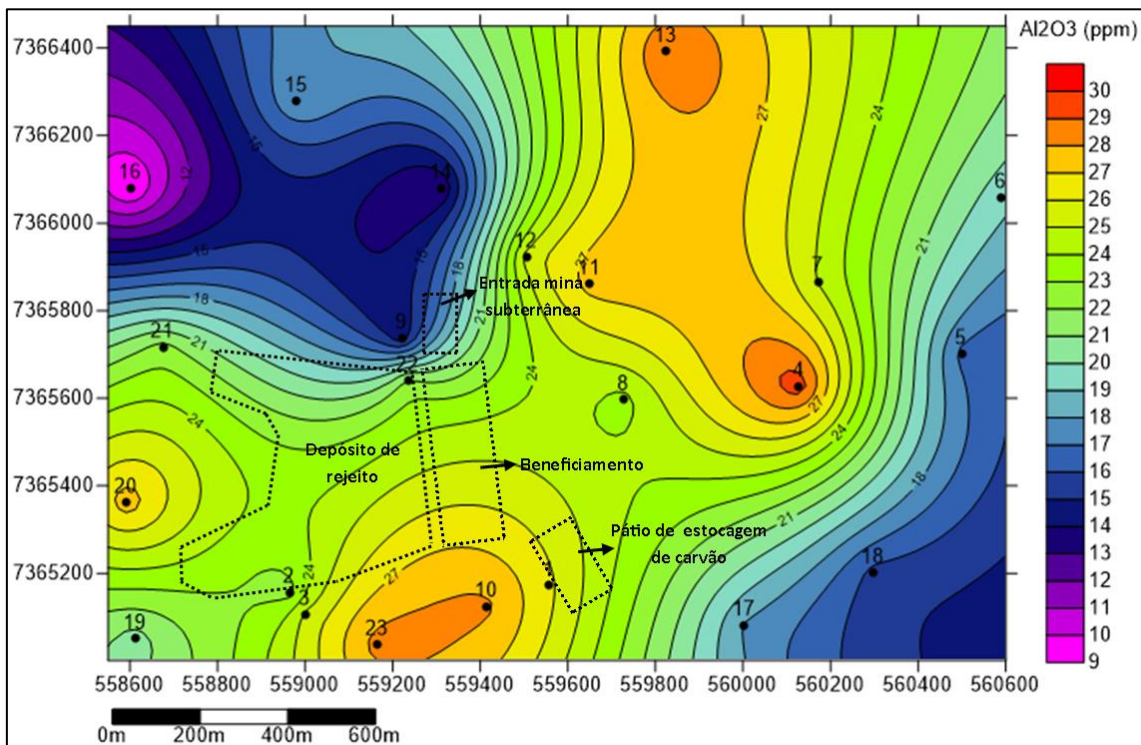
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 48 - Distribuição de SiO_2 no solo na área estudada



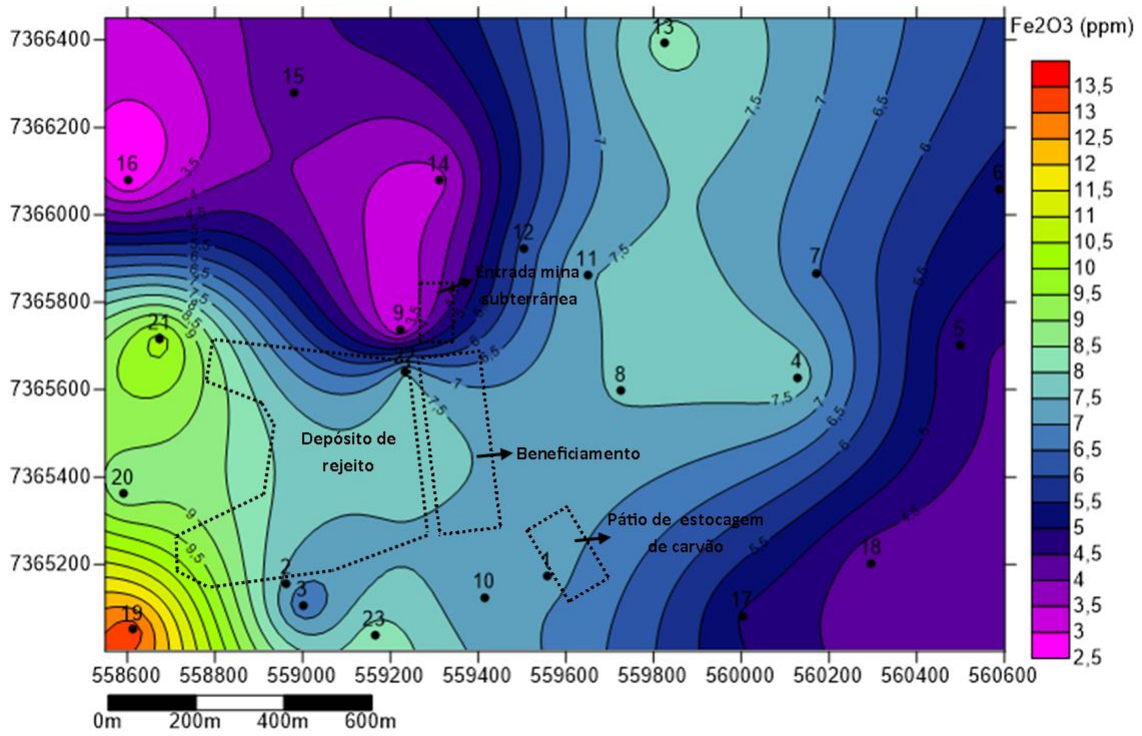
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 49 - Distribuição de Al_2O_3 no solo na área estudada



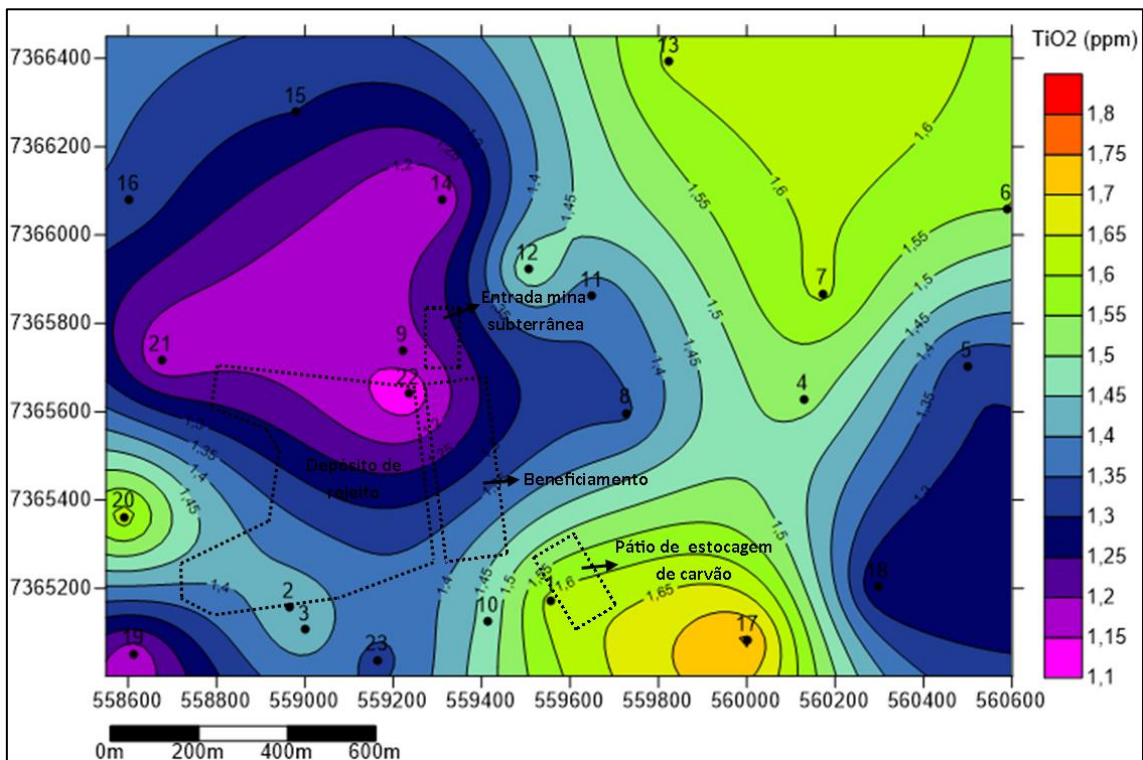
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 50 - Distribuição de Fe_2O_3 no solo na área estudada



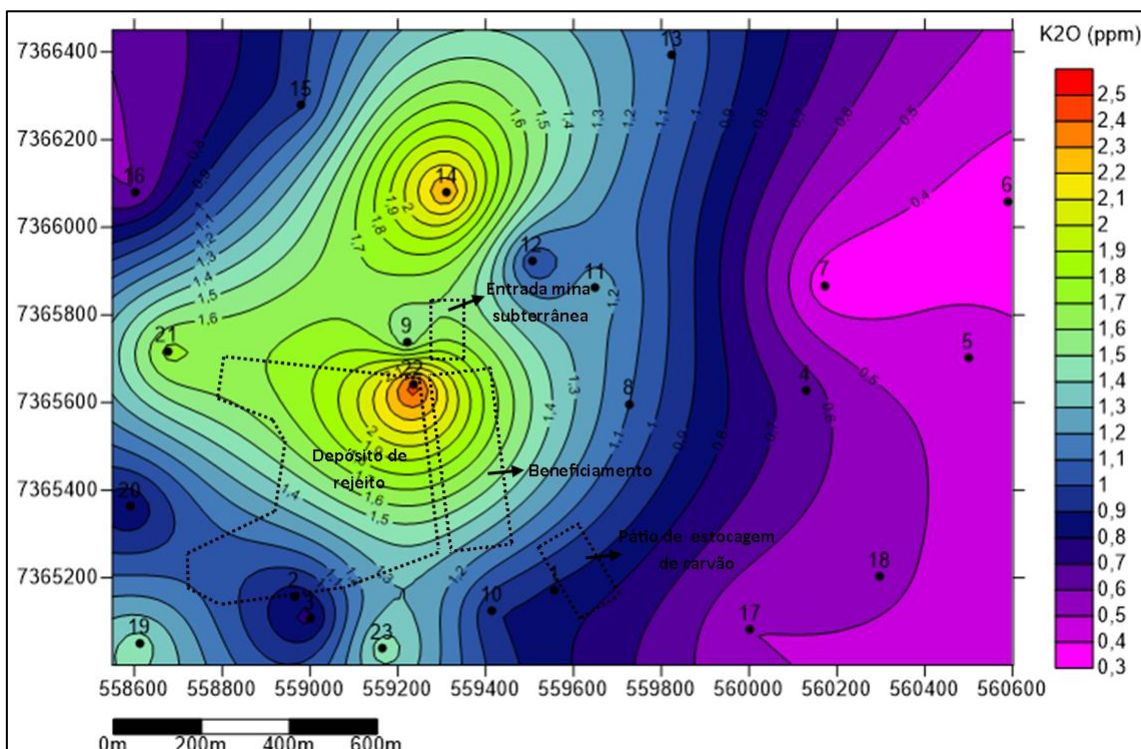
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 51 - Distribuição de TiO_2 no solo na área estudada



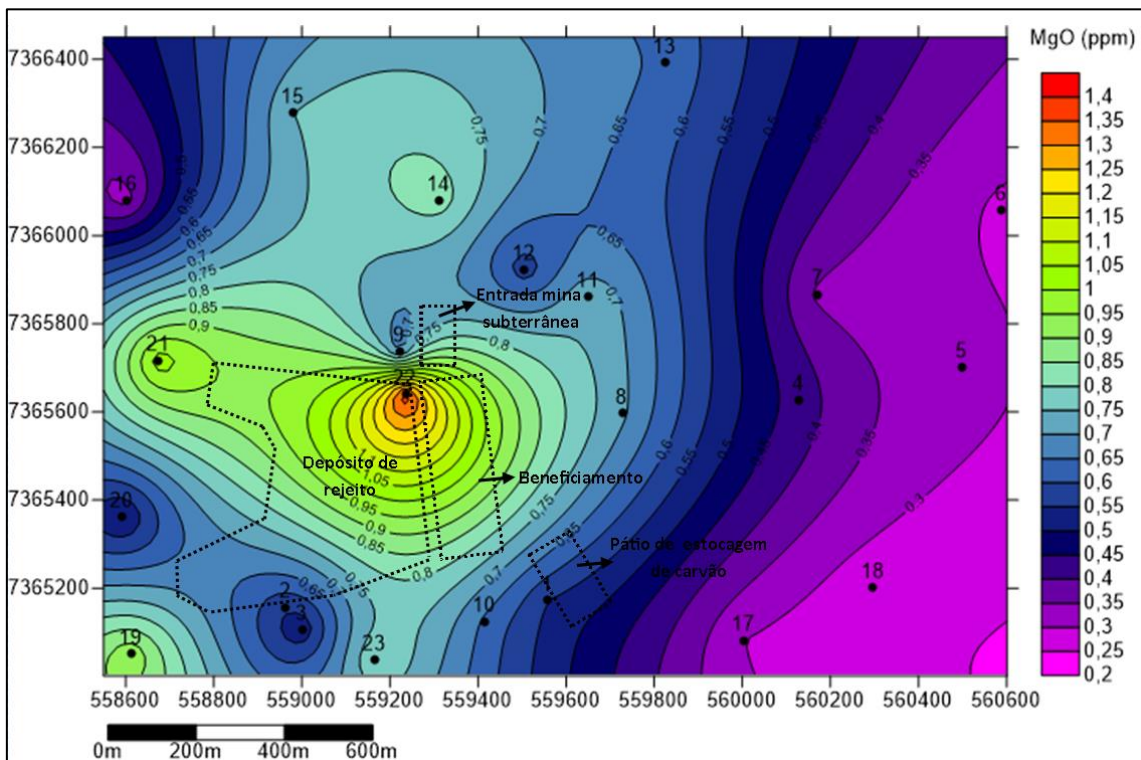
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 52 - Distribuição de K_2O no solo na área estudada



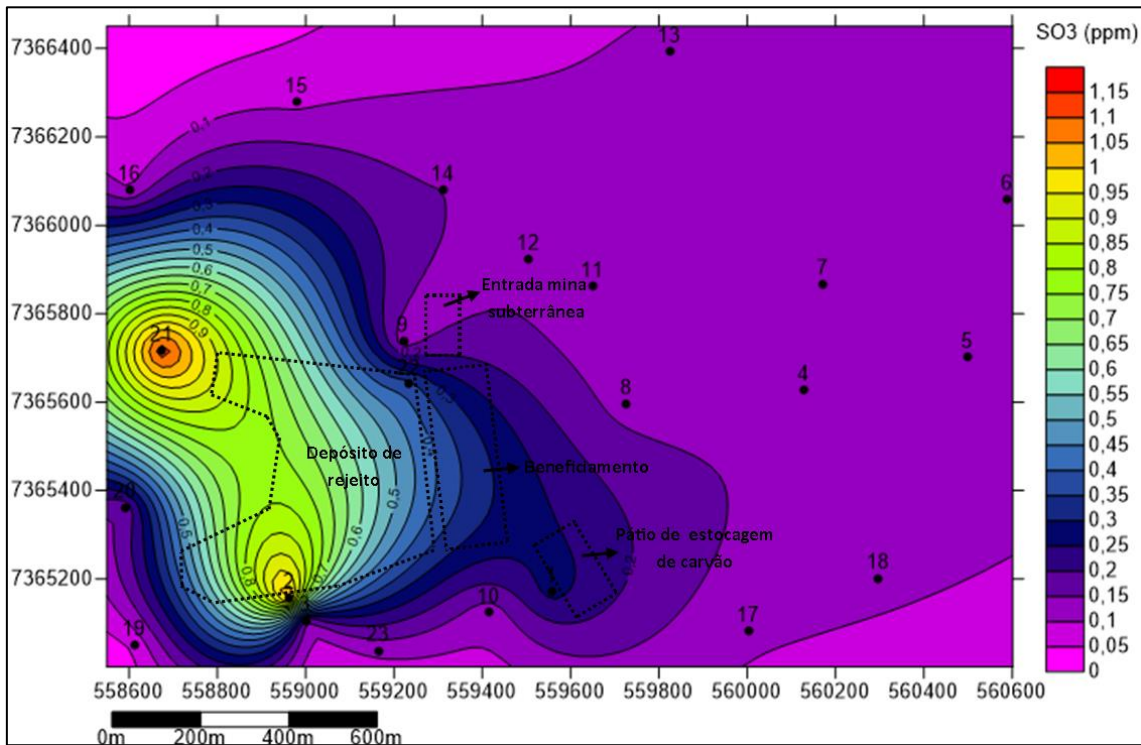
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 53 - Distribuição de MgO no solo na área estudada



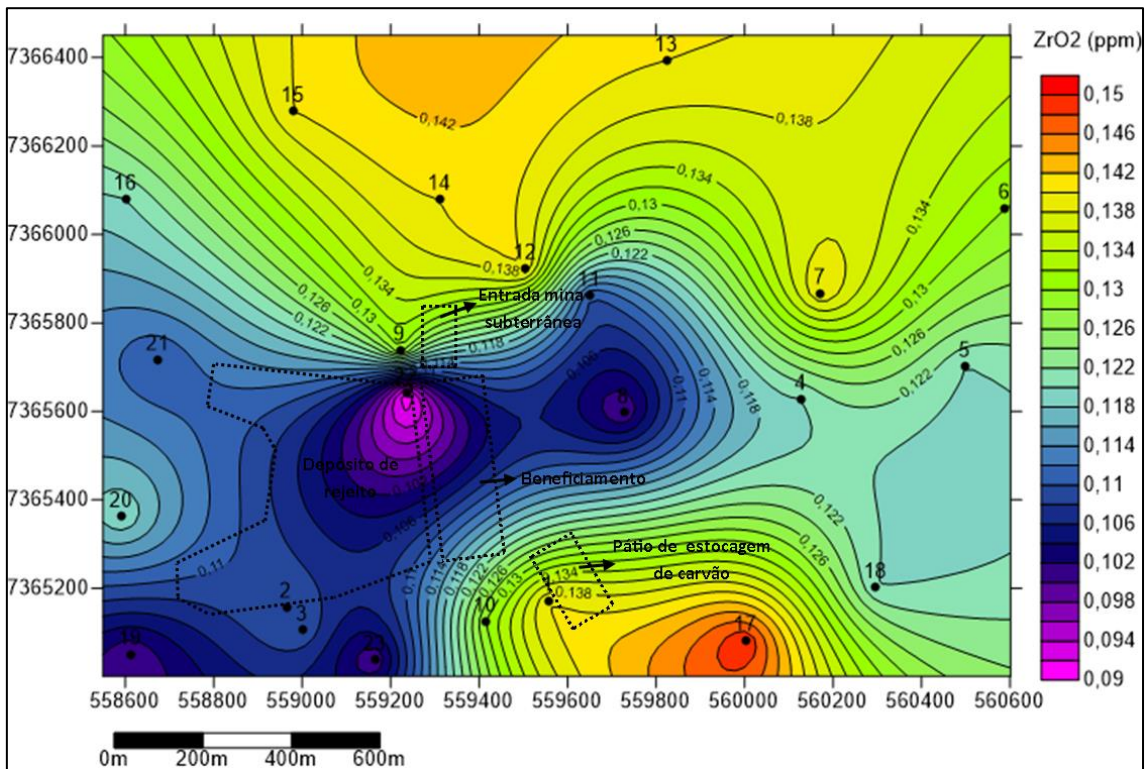
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 54 - Distribuição de SO_3 no solo na área estudada



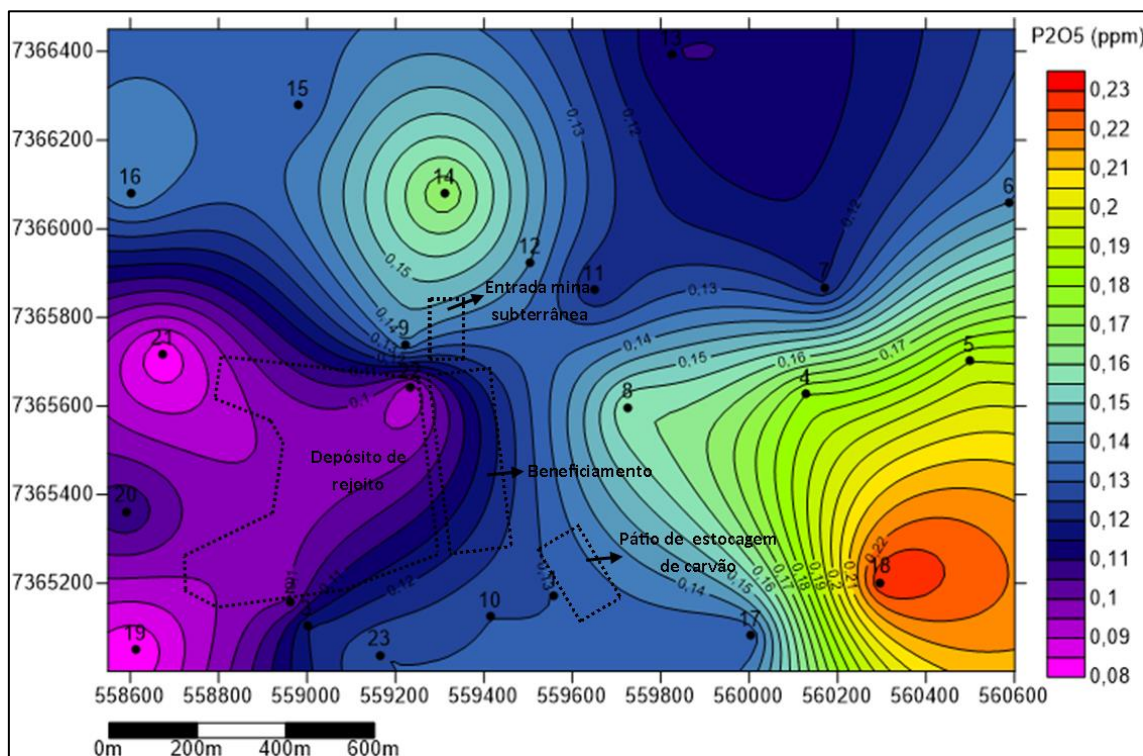
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 55 - Distribuição de ZrO_2 no solo na área estudada



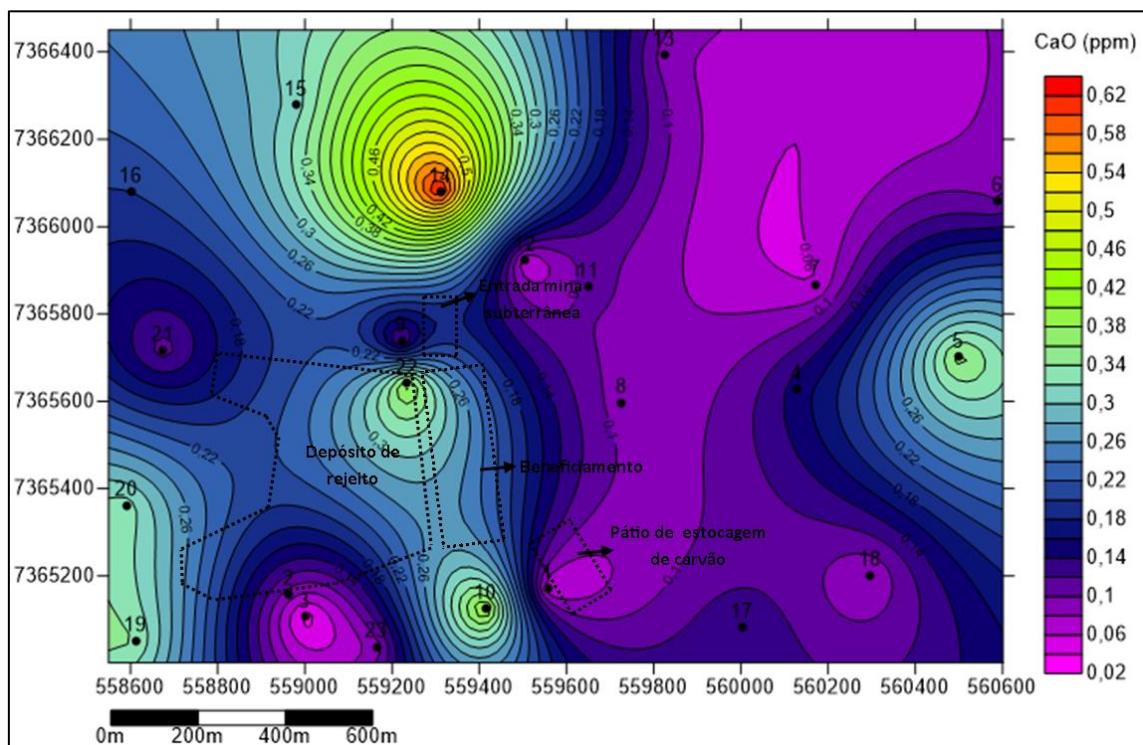
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 56 - Distribuição de P_2O_5 no solo na área estudada



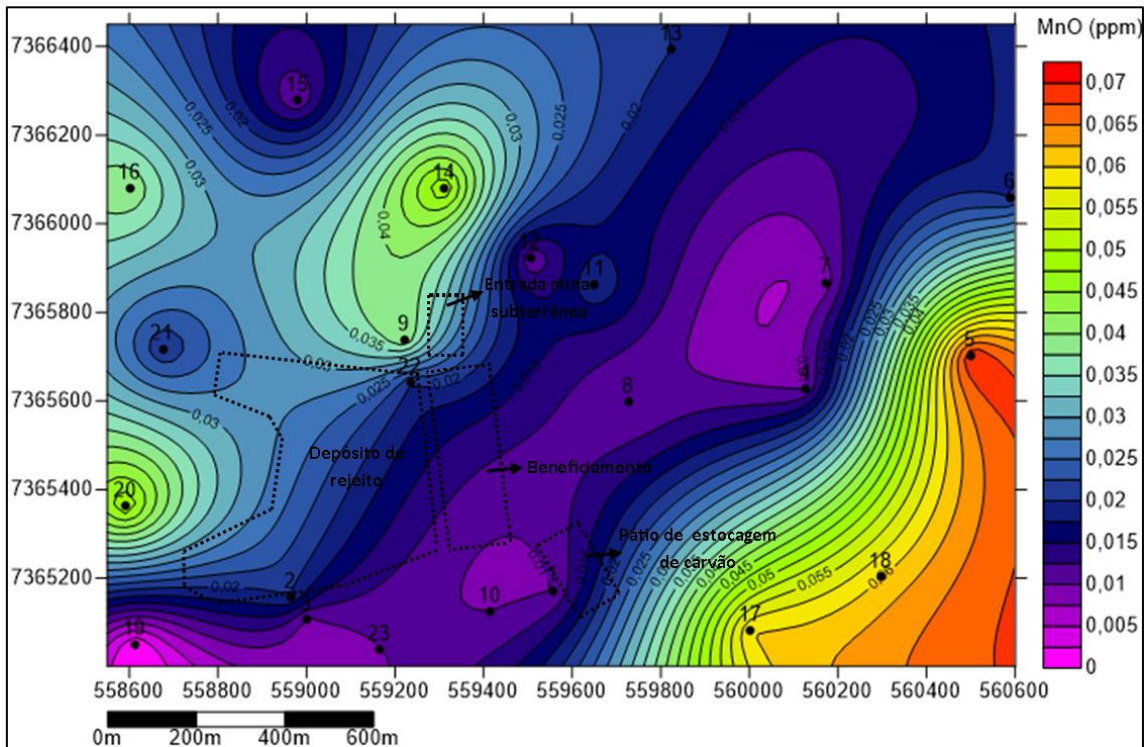
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 57 - Distribuição de CaO no solo na área estudada



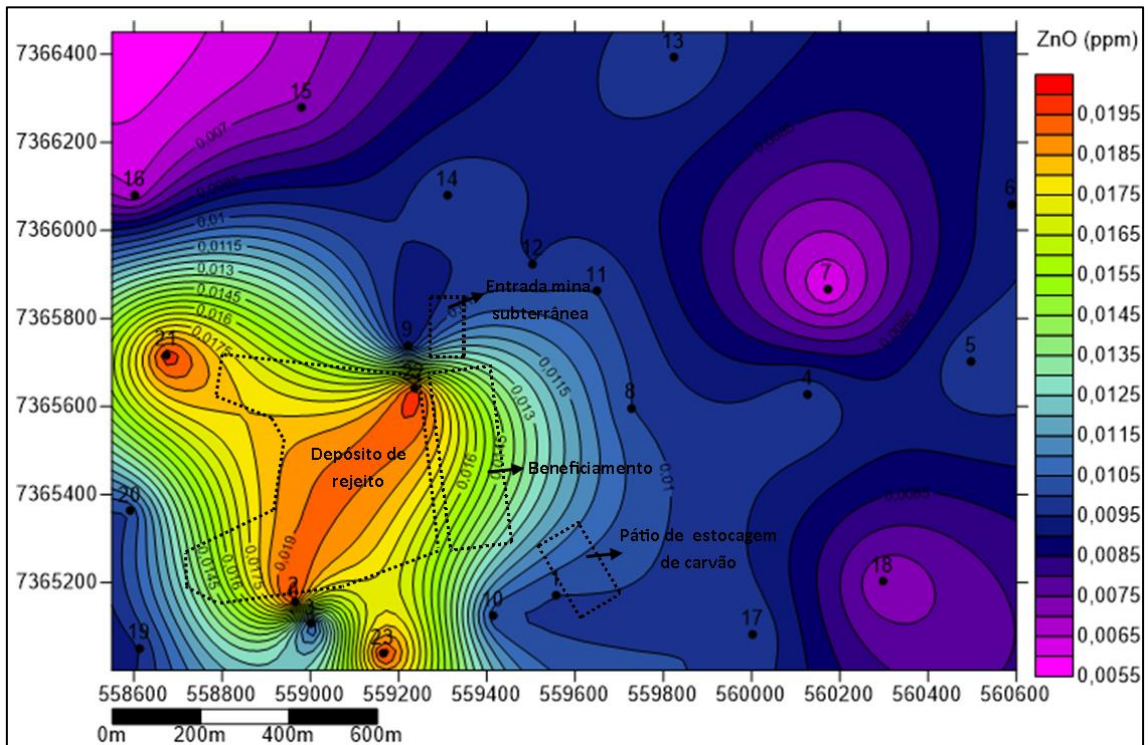
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 58 - Distribuição de MnO no solo na área estudada



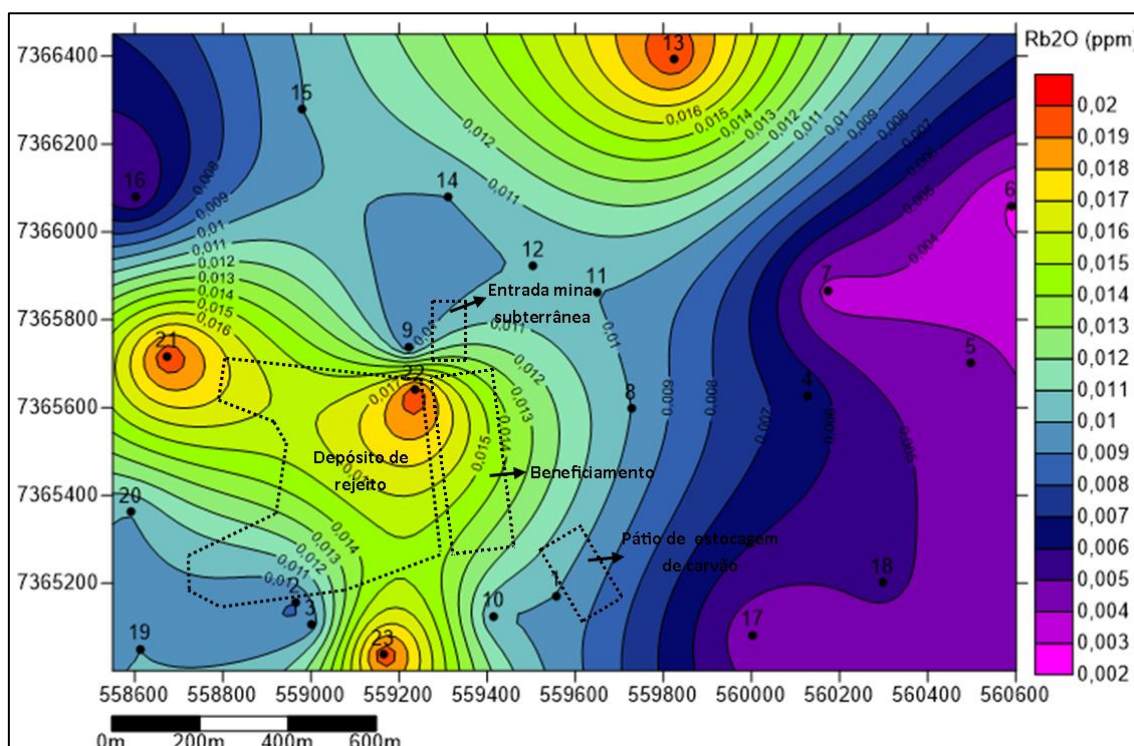
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 59 - Distribuição de ZnO no solo na área estudada



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 60 - Distribuição de Rb_2O na área estudada

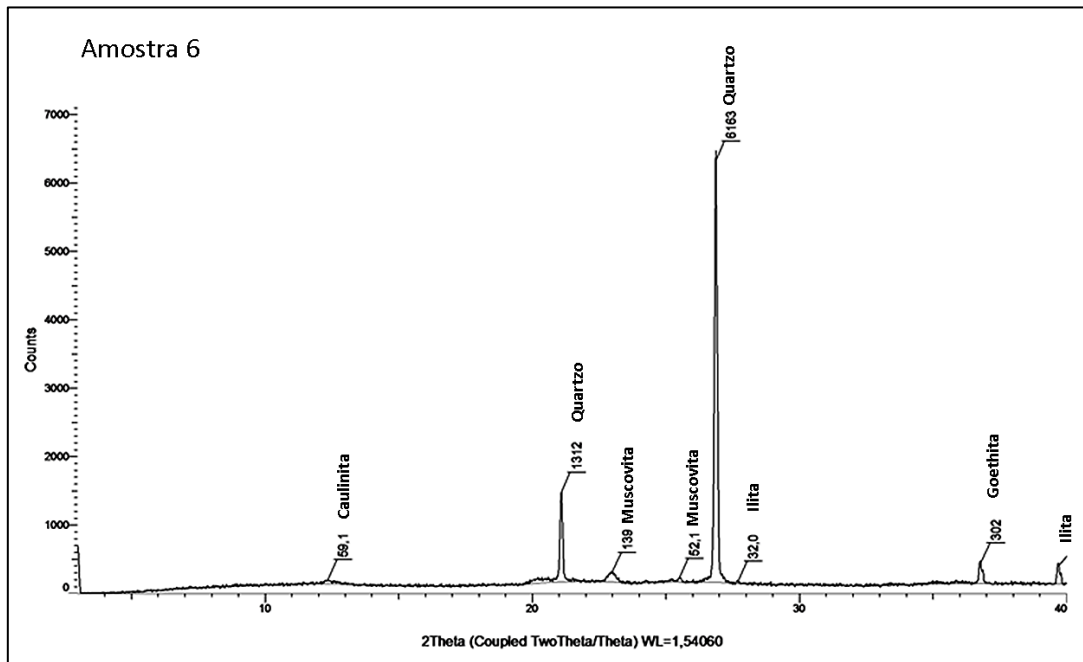


Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com a Tabela 15, as amostras são constituídas principalmente pelos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . O SiO_2 foi o principal óxido em todas as amostras, na quais seu teor variou de 58,92 a 85,59 %. O teor de Al_2O_3 variou de 8,89 a 29,67 (%) e o de Fe_2O_3 variou de 2,46 a 13,36. Esses resultados estão de acordo com a mineralogia determinada pela análise de difração de raios x realizada utilizando o equipamento D2 Phaser – Bruker, do Laboratório de Radiações ionizantes (LARIN). Os espectros obtidos na difração de raios x mostram que as amostras são compostas principalmente por silicatos, silicatos aluminosos e óxidos de ferro: quartzo (SiO_2), caulinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, muscovita ($KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$), ilita ($(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,H_2O]$) e goethita ($FeO(OH)$) (Figura 61), sendo também observado em alguns espectro a presença de Ilmenita ($FeTiO_3$).

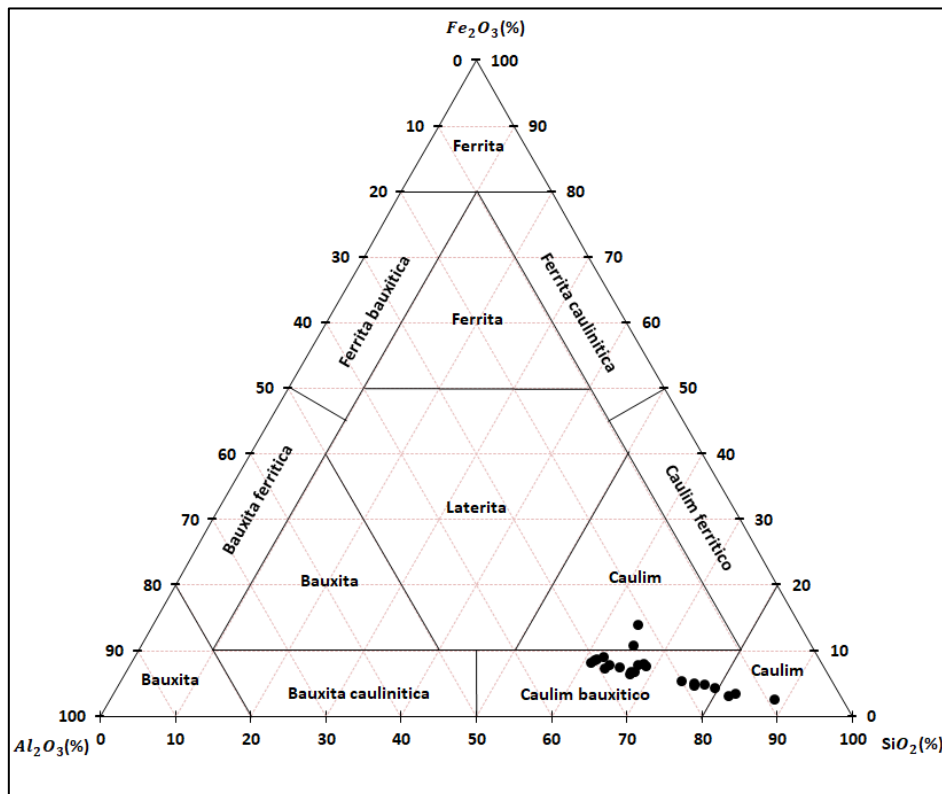
Os dados obtidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 inseridos no diagrama triangular $SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$, proposto por Balasubramaniam et al. (1983) para definir a presença de ferrita, bauxita e caulim (Figura 62), mostram que os solos estão em processo de caulinização.

Figura 61 – Espectro da difração de raios x da amostra 6, mostrando a presença quartzo, caulinita, muscovita, ilita e goethita na amostra.



Fonte: Elaborada pelo autor

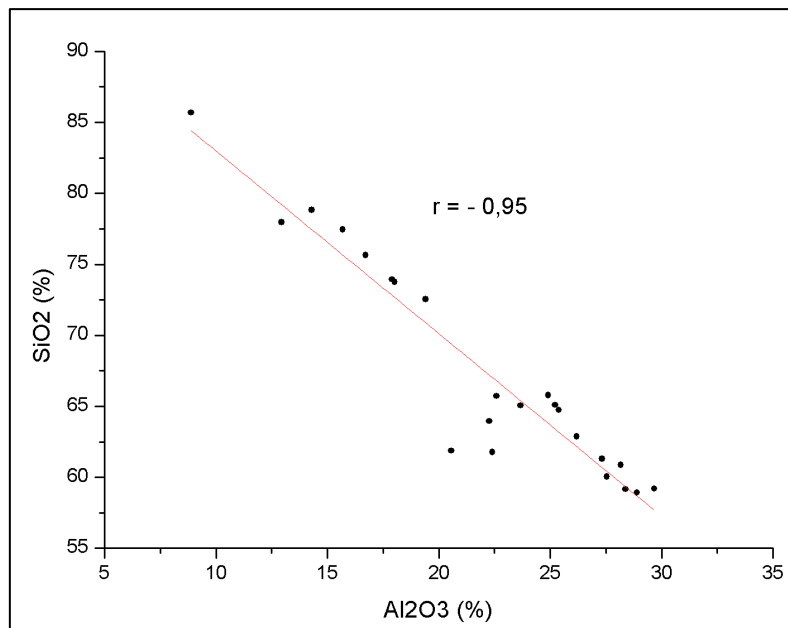
Figura 62 - Diagrama triangular $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$ para solos da área estudada



Fonte: Elaborada pelo autor

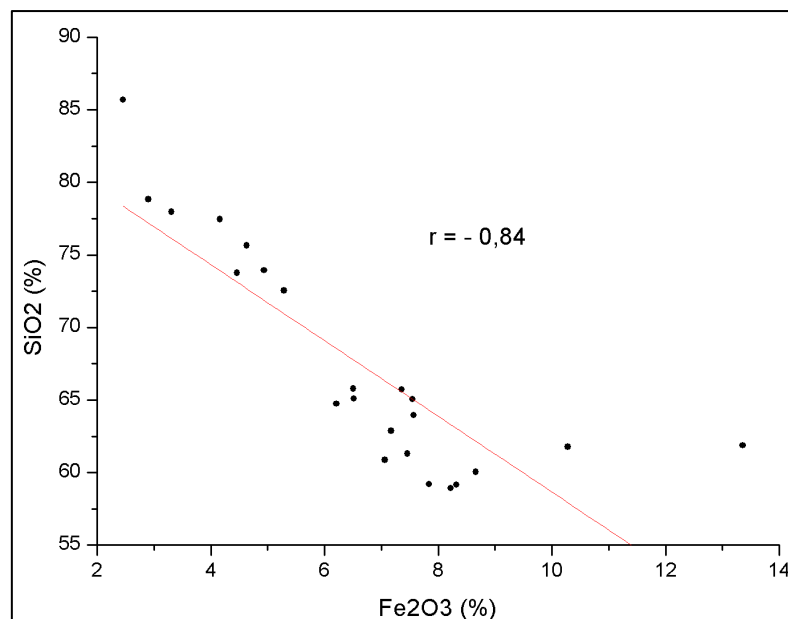
Os resultados mostram uma correlação significativa entre esses principais óxidos. O SiO_2 possui uma correlação inversa com Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Figuras 63 e 64, respectivamente), enquanto Al_2O_3 e Fe_2O_3 possuem uma correlação direta (Figura 65).

Figura 63 - Relação entre teores de SiO_2 e Al_2O_3 .



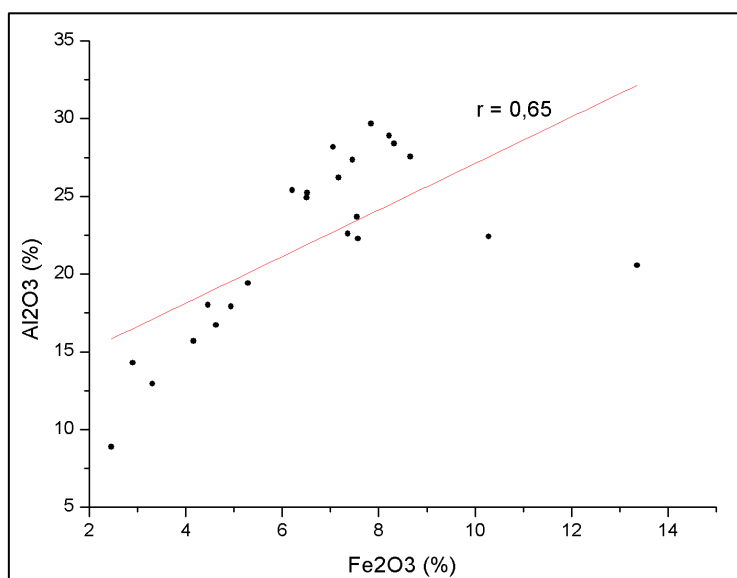
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 64 - Relação entre teores de SiO_2 e Fe_2O_3 .



Fonte: Elaborada pelo autor

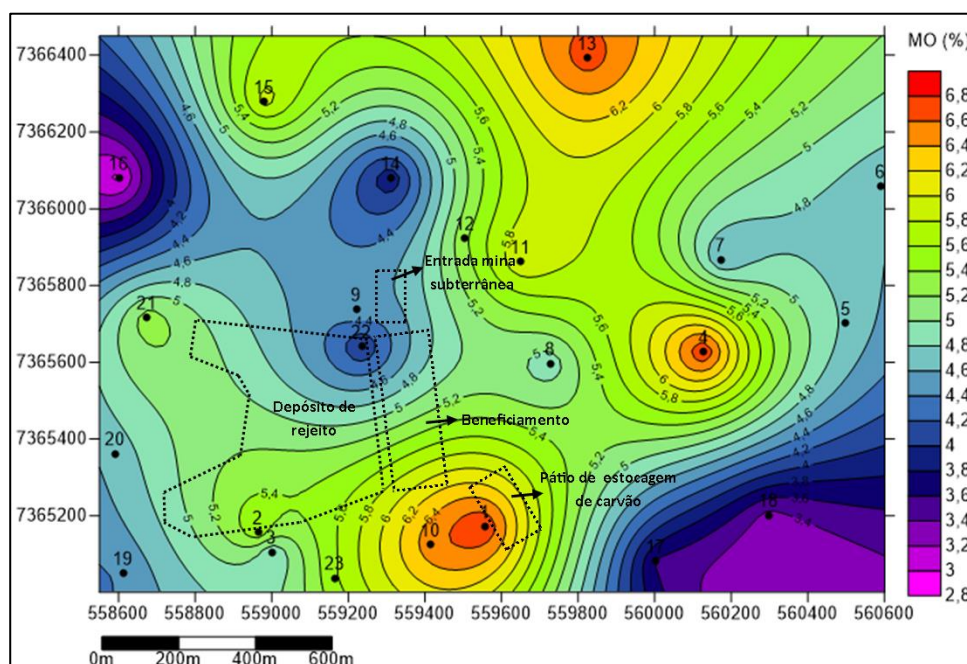
Figura 65 - Relação entre teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 .



Fonte: Elaborada pelo autor

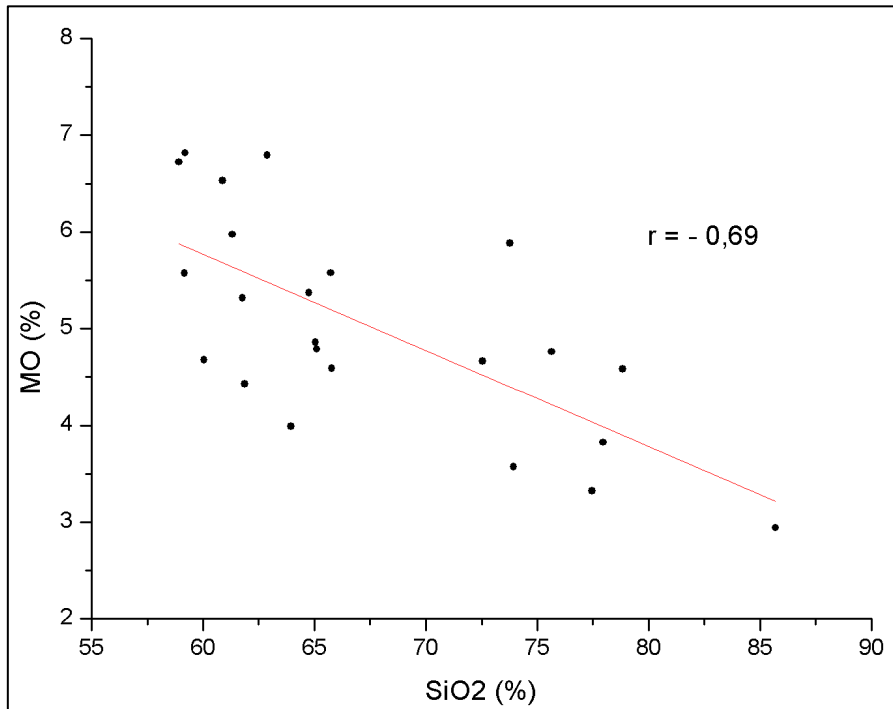
A concentração de matéria orgânica (MO) nas amostras variou de 2,94 a 6,81% (Tabela 15). A Figura 66 ilustra a distribuição de matéria orgânica na área de estudo. A MO apresentou uma correlação inversa com o SiO_2 (Figura 67), diminuindo com o aumento de SiO_2 . Contrário ao observado em relação ao Al_2O_3 , que possuem uma correção direta (Figura 68).

Figura 66 - Distribuição de matéria orgânica na área estudada.



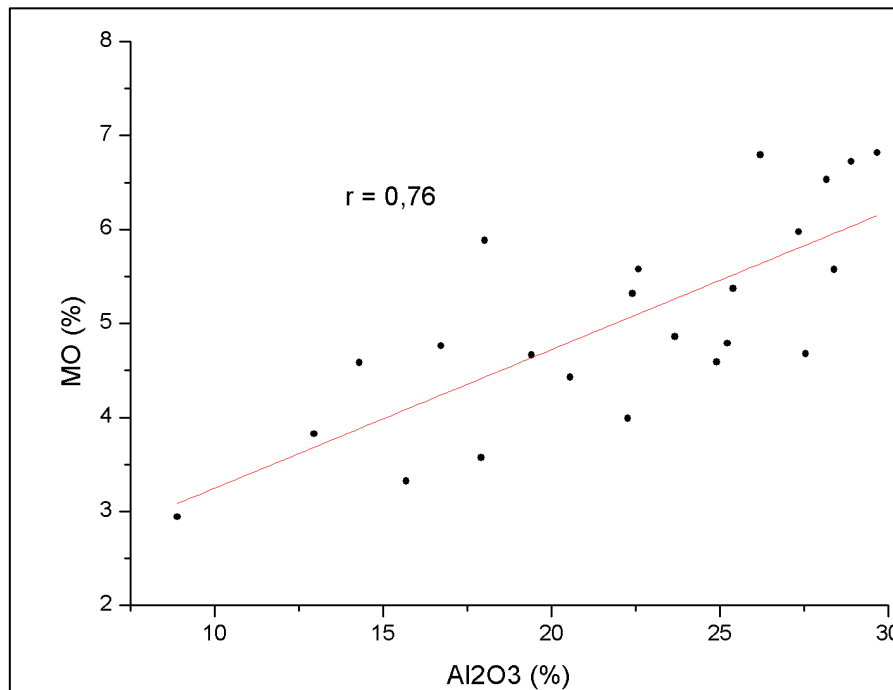
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 67 - Relação entre teores de MO e SiO_2 .



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 68 - Relação entre teores de MO e Al_2O_3



Fonte: Elaborada pelo autor

Uma relação importante a se analisar é o teor de SO_3 e o pH próximo a mina de carvão. Os pontos 2 e 21 mostraram os maiores valores de SO_3 1,06 e 1,14 (Figura 54), respectivamente, e o valor mais baixo de pH (4,0) (Figura 46). Este dois pontos estão localizados na parte basal das pilhas de rejeito (Figura 45). Como mencionado anteriormente (Capítulo 4.2), esse rejeito é constituído por um material com a presença de pirita (FeS_2). Este mineral oxidado e em contato com a água produz ácido sulfúrico e lixiviação, resultando em um pH baixo e alta concentração de SO_3 no local.

6.3.2 Índices físicos do solo

Os índices físicos (densidade do solo (ρ); Teor de umidade (W); Massa específica seca do solo (ρ_d); Massa específica dos sólidos (ρ_s); Índice de Vazios (e); Porosidade (n); Grau de Saturação (Sr) de 15 amostras de solos foram determinados no laboratório de geotecnia, no Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da Unesp – Campus Rio Claro, e estão apresentados na Tabela 16.

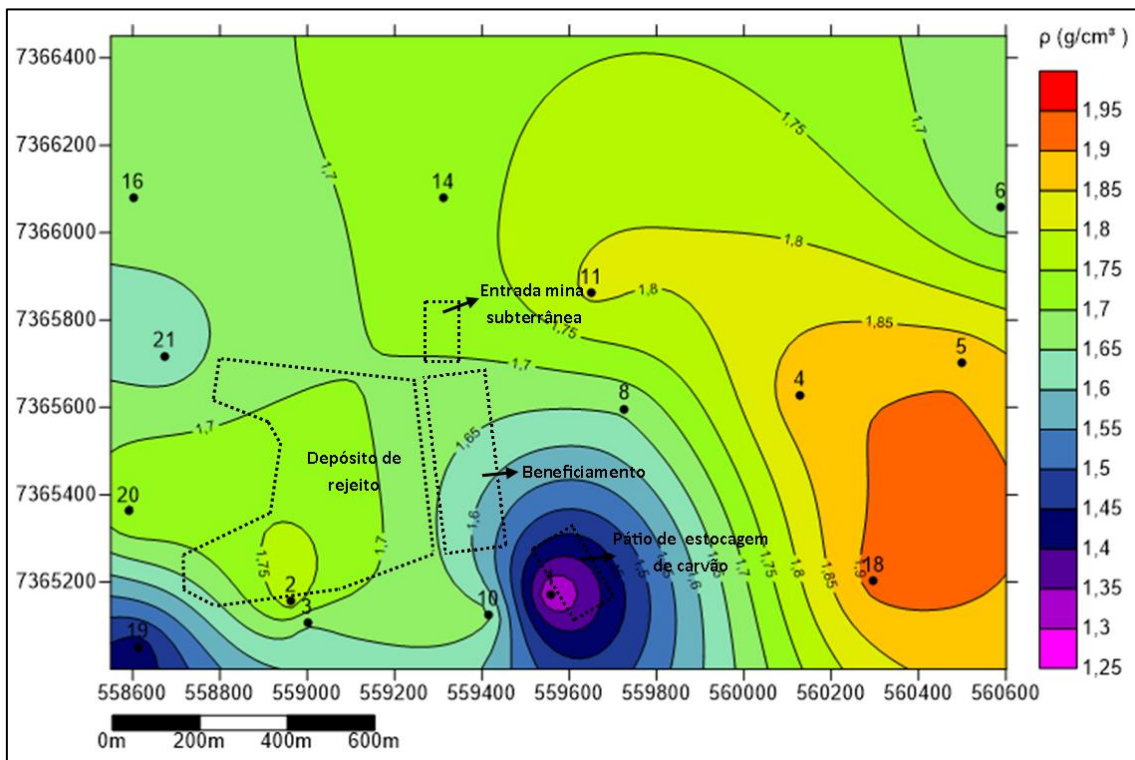
Tabela 16 – Resultado dos índices físicos das amostras de solo

	(ρ)	(W)	(ρ_d)	(ρ_s)	(e)	(n)	(Sr)
Pontos	(g/cm^3)	(%)	g/cm^3	g/cm^3		(%)	(%)
1	1,29	21,05	1,07	2,60	1,44	58,94	38,10
2	1,78	17,08	1,52	2,59	0,72	41,18	65,14
3	1,65	18,51	1,39	2,64	0,90	47,29	54,48
4	1,88	20,61	1,56	2,65	0,70	41,05	78,78
5	1,89	16,65	1,62	2,60	0,61	37,76	71,57
6	1,66	13,16	1,46	2,61	0,78	43,82	44,01
8	1,66	19,81	1,38	2,60	0,88	46,83	58,57
10	1,67	19,21	1,40	2,57	0,84	45,65	58,91
11	1,81	22,29	1,48	2,49	0,68	40,55	81,44
14	1,72	17,25	1,47	2,55	0,74	42,47	59,67
16	1,67	13,20	1,48	2,60	0,76	43,02	45,45
18	1,92	6,64	1,80	2,64	0,47	31,78	37,94
19	1,42	18,86	1,19	2,63	1,20	54,63	41,26
20	1,75	17,46	1,49	2,61	0,75	42,80	61,06
21	1,62	19,77	1,35	2,60	0,93	48,00	55,80

Fonte: Elaborada pelo autor

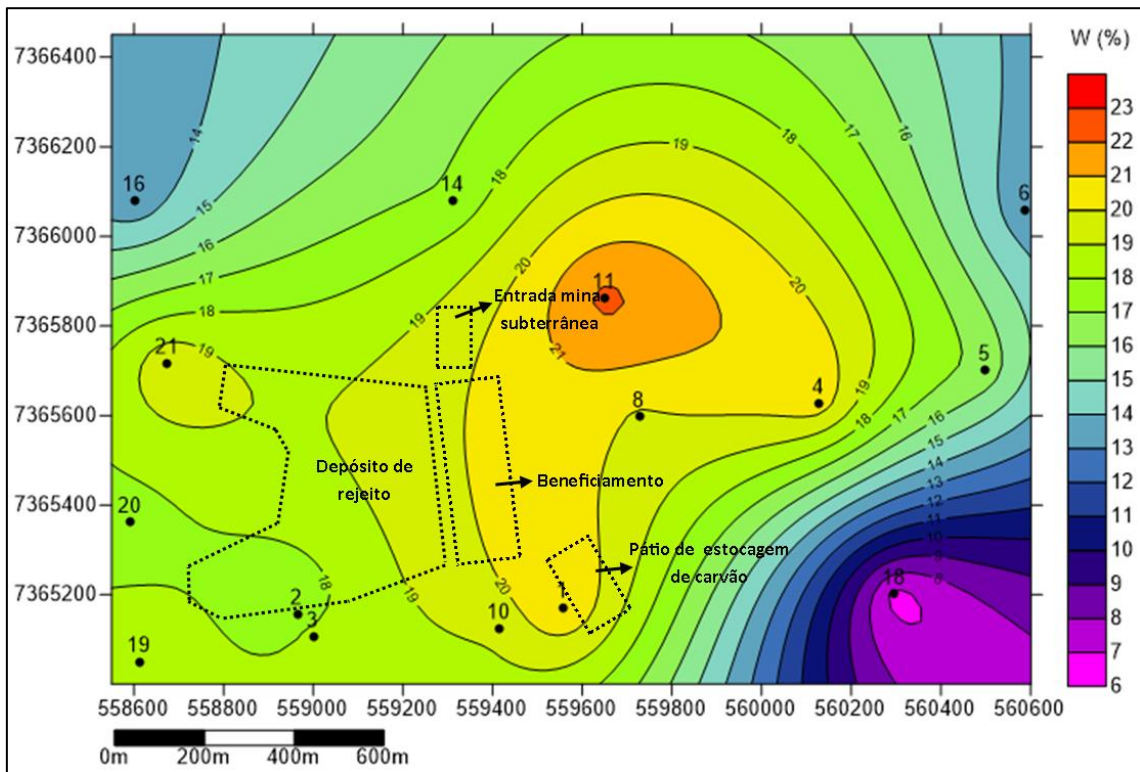
A densidade do solo (ρ) variou de 1,29 a 1,92 g/cm³ (Figura 69); Teor de umidade (W) variou de 6,64 a 22,29 % (Figura 70); Massa específica seca do solo (ρ_d) variou de 1,07 a 1,80 g/cm³ (Figura 71); Massa específica dos sólidos (ρ_s) variou de 2,49 a 2,65 g/cm³ (Figura 72); Índice de Vazios (e) variou de 0,47 a 1,44 (Figura 73); Porosidade (n) variou de 31,78 a 58,94% (Figura 74); Grau de Saturação (S_r) variou de 37,94 a 81,44% (Figura 75). As relações apresentadas no Anexo A mostram que o solo com maior ρ_d tende a ter menor teor de umidade, porosidade e índice de vazios, variáveis essas que influenciam diretamente na taxa de exalação do radônio no solo.

Figura 69 – Variação da densidade do solo na área de estudo.



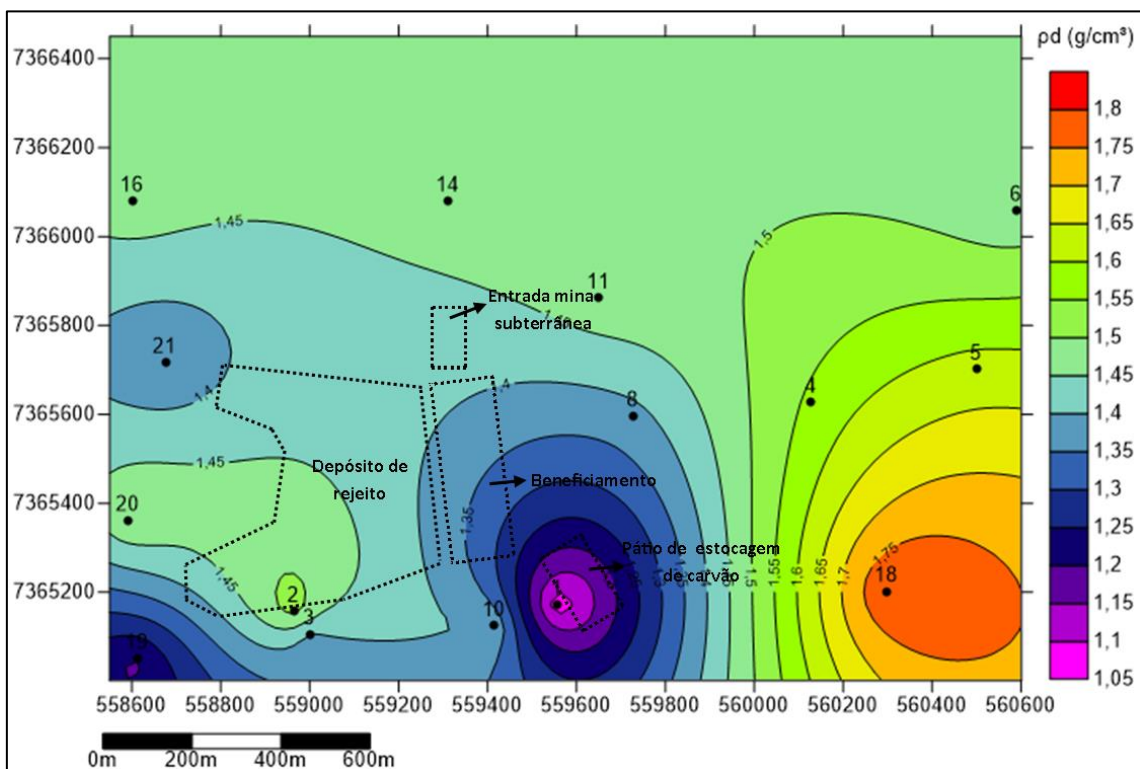
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 70 – Variação do teor de umidade do solo na área de estudo.



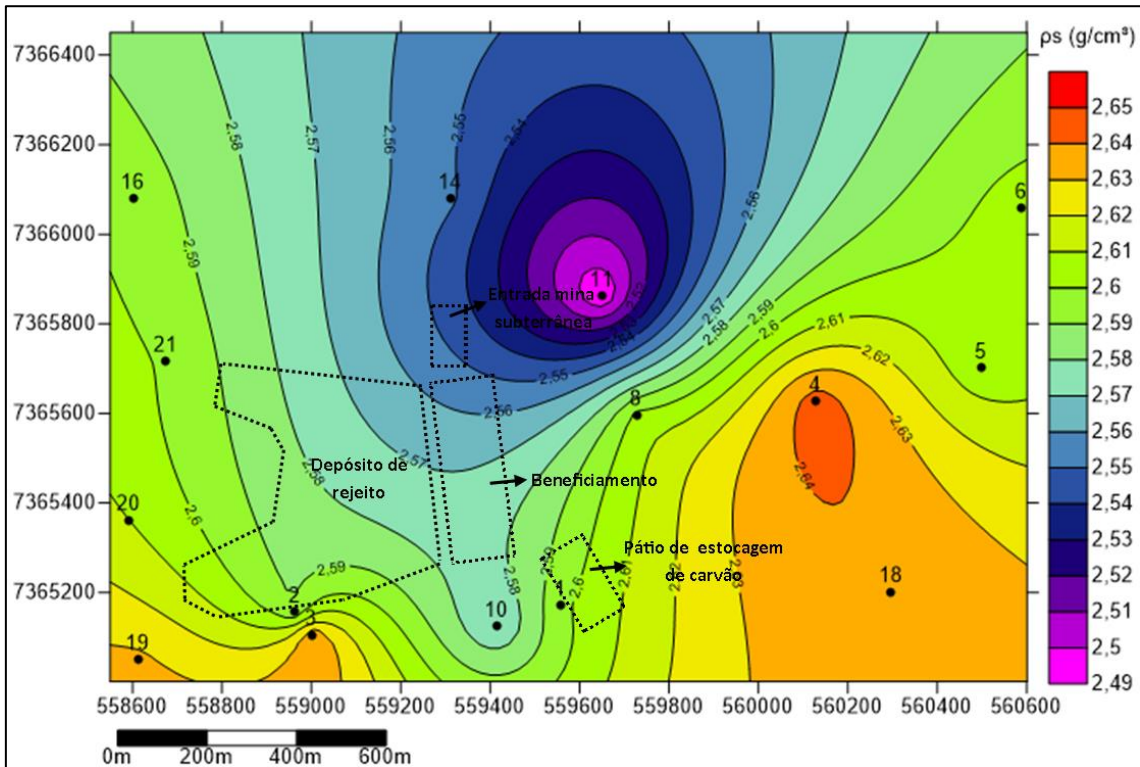
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 71 - Variação da massa específica seca do solo na área de estudo.



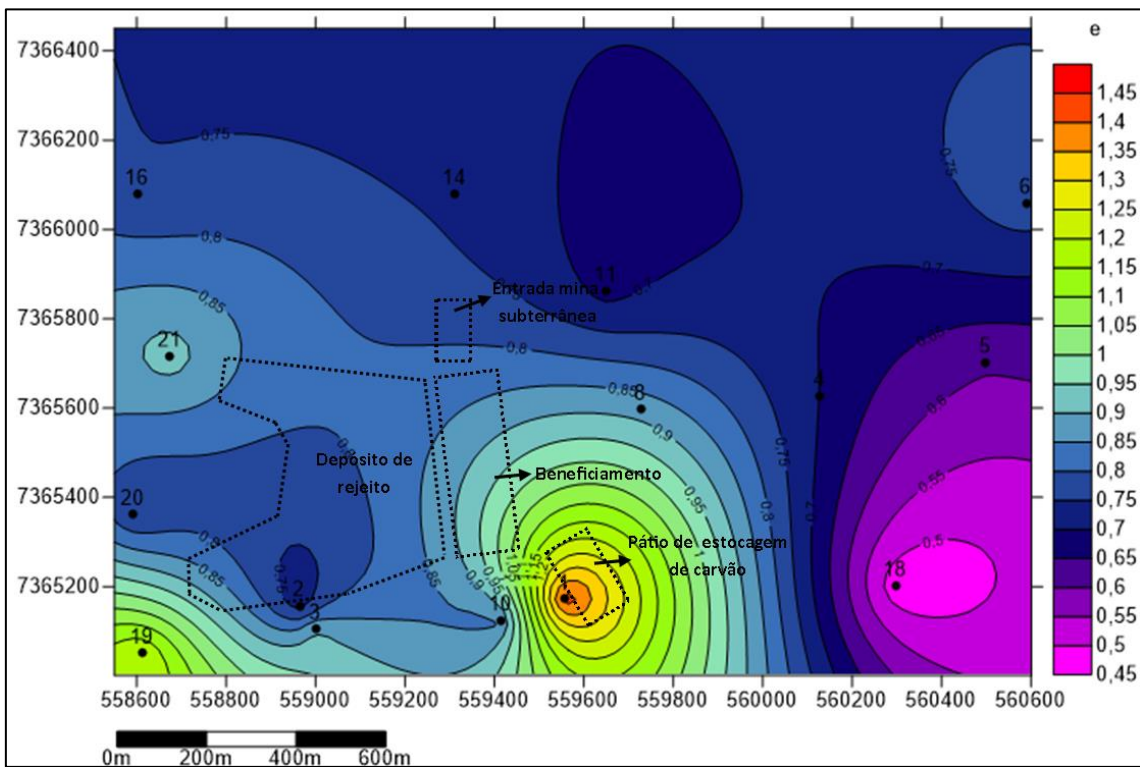
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 72 – Variação da massa específica dos sólidos na área de estudo.



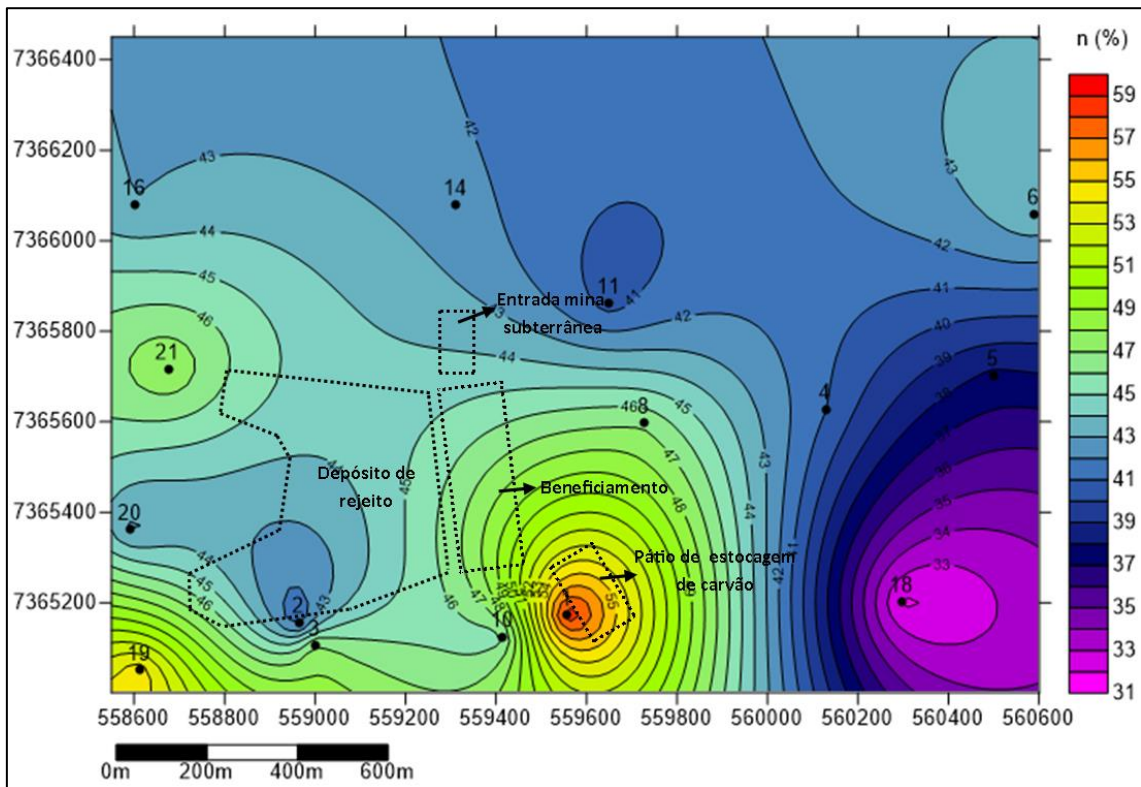
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 73 – Variação do índice de vazios no solo na área de estudo.



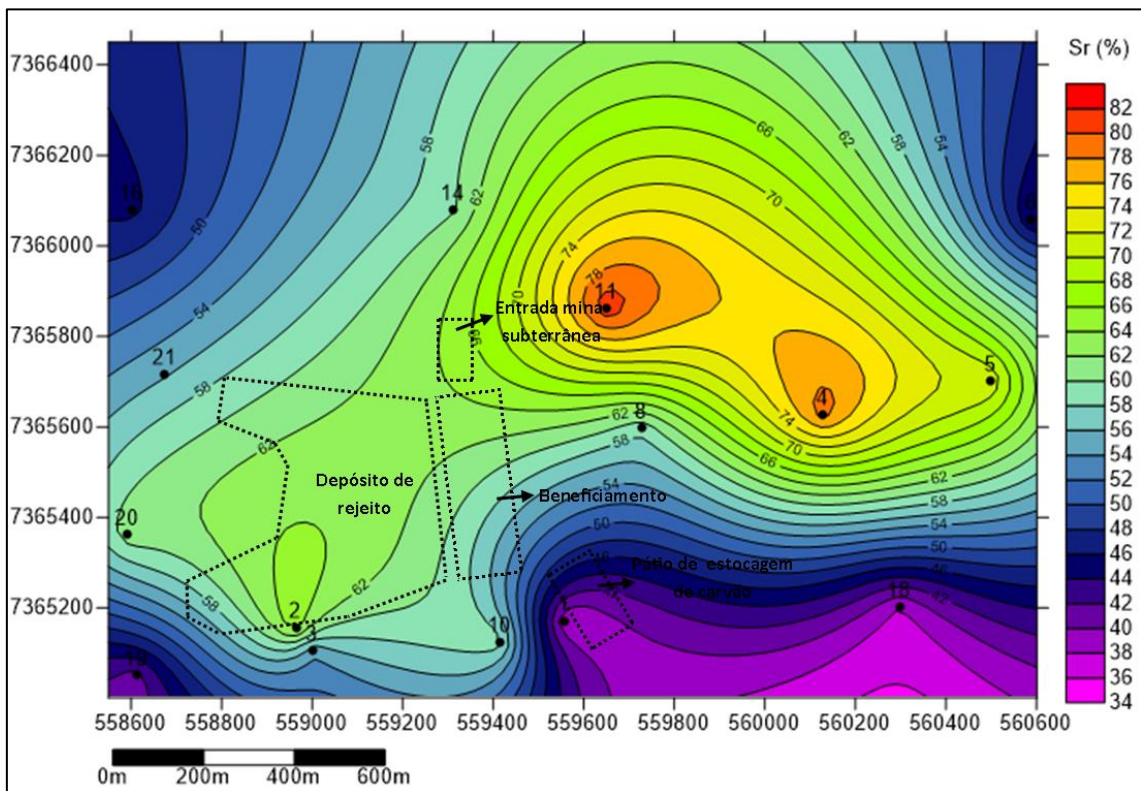
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 74 – Variação da porosidade do solo na área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor

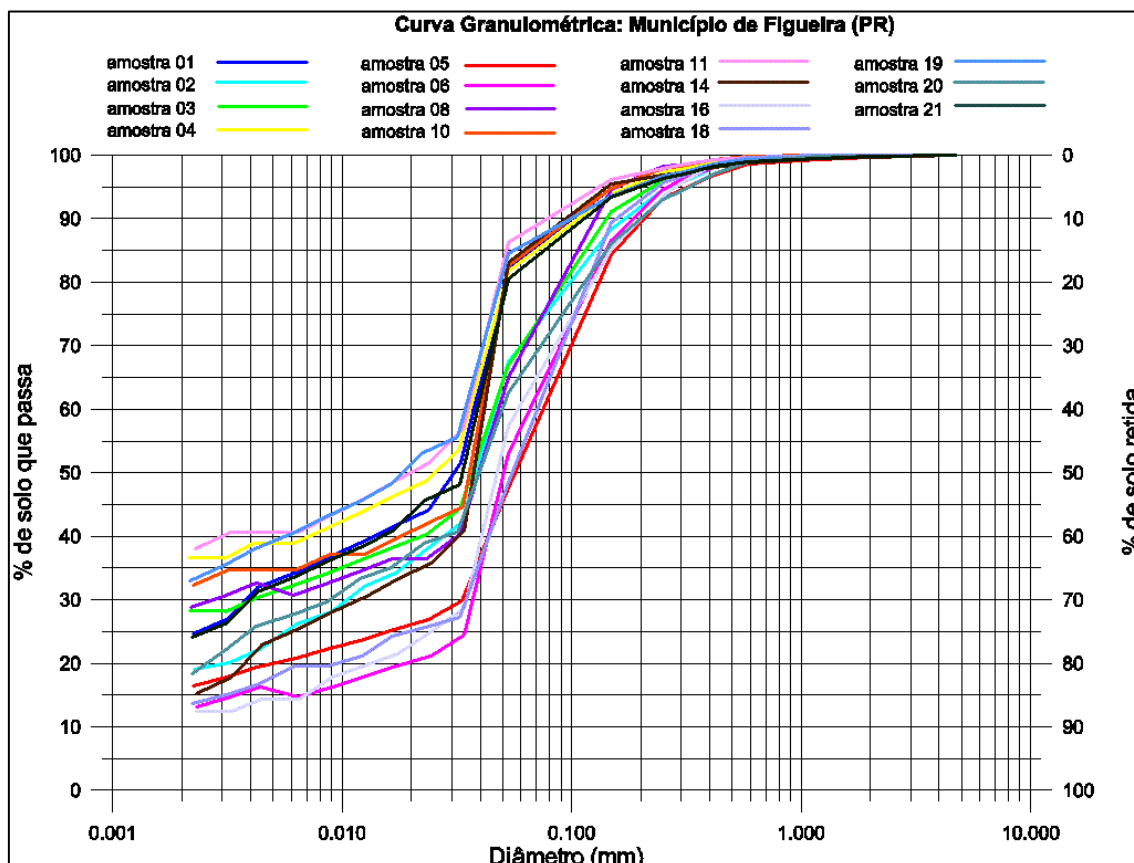
Figura 75 – Variação no grau de saturação do solo na área de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor

O ensaio de granulometria/sedimentação auxiliou na determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total de solo analisado. A Figura 76 apresenta a curva granulométrica das amostras estudadas, a qual permitiu o cálculo das porcentagens de cada faixa granulométrica de cada amostra, conforme representado na Tabela 17.

Figura 76 – Curvas granulométricas das amostras analisadas



Fonte: Elaborada pelo autor

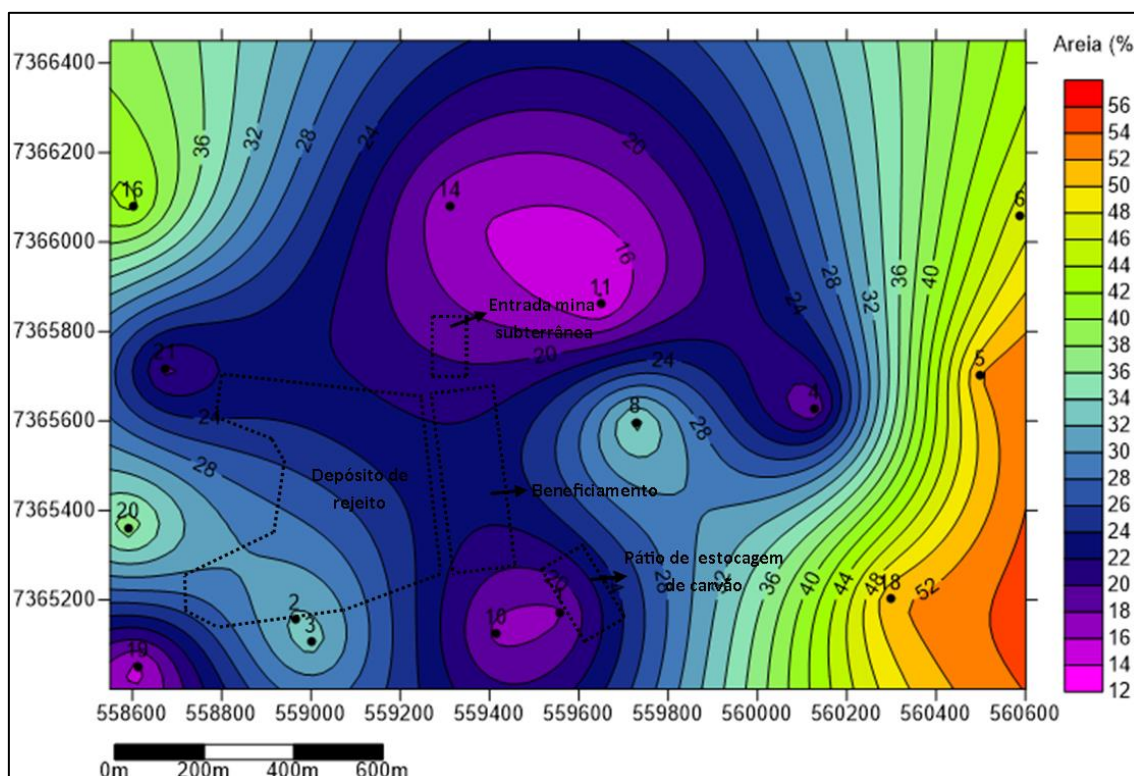
A fração areia total (grossa+média+fina) variou de 13,81 a 52,12 %, o menor valor foi obtido no ponto 11 e maior valor foi obtido no ponto 5, sendo representada principalmente pela areia fina (Figura 77) . A fração silte, a qual teve maior representatividade na maioria das amostras, variou de 31,20 a 67,83 %, o menor valor foi obtido no ponto 5 e maior valor foi obtido no ponto 14 (Figura 78). A fração argila variou de 12,53 a 37,98 %, o menor valor foi obtido no ponto 16 e maior valor foi obtido no ponto 11 (Figura 79).

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de granulometria/sedimentação

Pontos	Granulo	Areia				Silte	Argila	Finos
	(%)	Grossa (%)	média(%)	Fina (%)	Total (%)	(%)	(%)	(%)
1	0,00	0,18	1,93	15,57	17,68	57,78	24,54	82,32
2	0,15	0,70	4,56	27,14	32,40	48,35	19,10	67,46
3	0,00	0,30	3,64	29,08	33,01	38,81	28,18	66,99
4	0,26	0,42	2,17	15,47	18,06	45,14	36,54	81,68
5	0,29	1,19	5,26	45,67	52,12	31,20	16,39	47,59
6	0,15	0,69	4,54	41,70	46,93	39,87	13,05	52,92
8	0,13	0,20	1,51	33,09	34,80	36,35	28,73	65,07
10	0,00	0,24	1,94	15,29	17,47	50,30	32,24	82,53
11	0,00	0,39	1,70	11,72	13,81	48,21	37,98	86,19
14	0,33	0,90	1,97	13,68	16,55	67,83	15,30	83,13
16	0,07	0,35	5,95	36,26	42,56	44,85	12,53	57,37
18	0,00	0,33	4,09	47,15	51,58	34,81	13,61	48,42
19	0,19	0,50	2,68	12,05	15,23	51,69	32,89	84,58
20	0,11	0,87	6,04	30,43	37,33	44,06	18,50	62,56
21	0,25	0,83	2,65	15,81	19,28	56,43	24,04	80,46

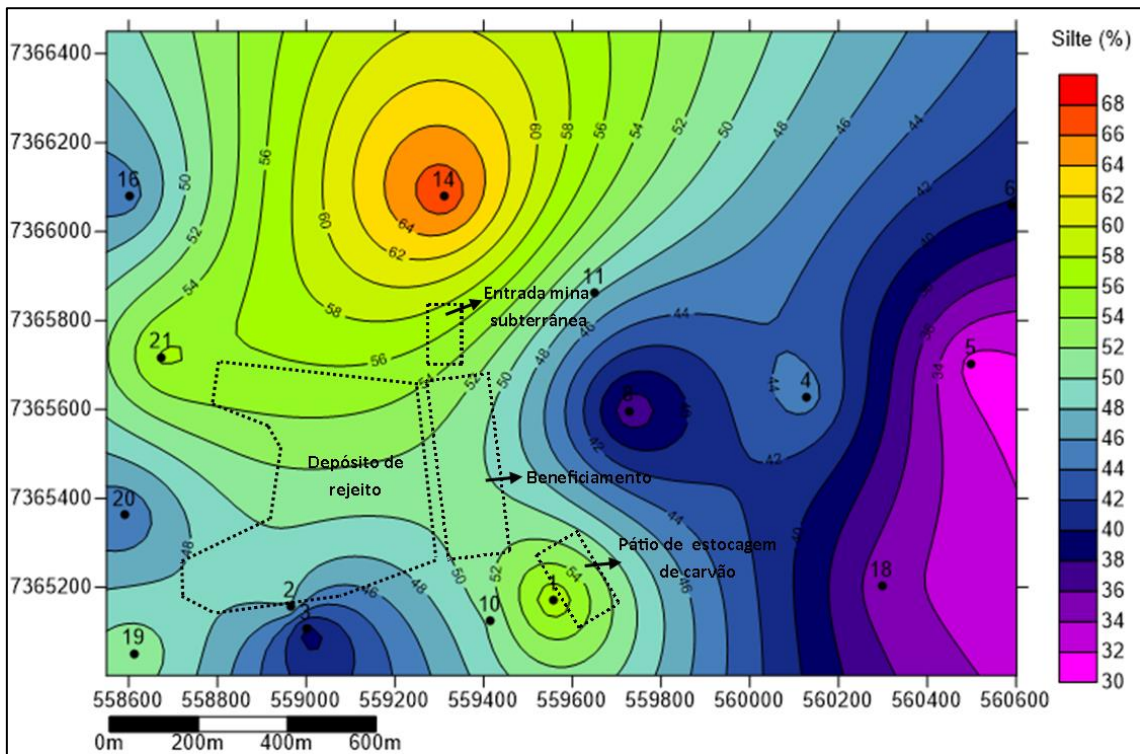
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 77 – Distribuição da fração areia na área estudada.



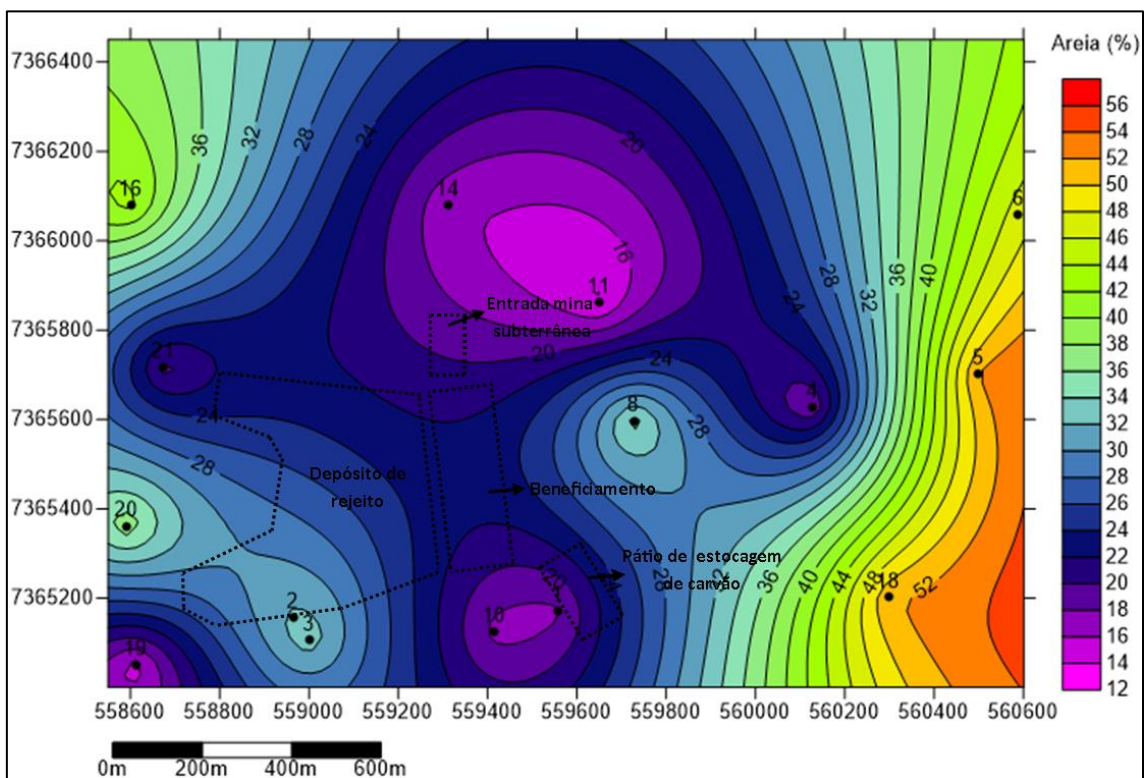
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 78 – Distribuição da fração silte na área estudada.



Fonte: Elaborada pelo autor

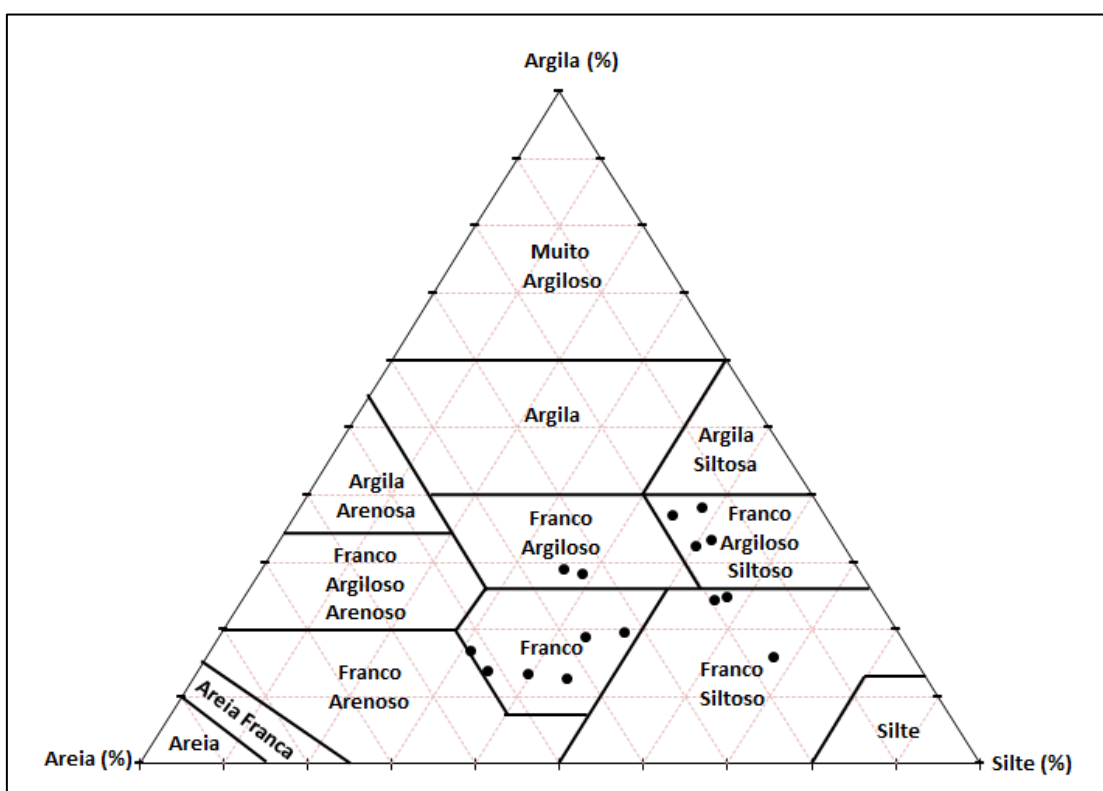
Figura 79 – Distribuição da fração argila na área estudada.



Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo o diagrama triangular de classificação textural proposta por Lemos e Santos (1996) (Figura 80), três amostras foram classificadas como franco siltoso (1, 14 e 21), 4 amostras foram classificadas como franco argiloso siltoso (4,10,11 e 19), 2 amostras foram classificadas como franco argiloso (3 e 8) e 6 amostras foram classificadas como franco (2, 5, 6, 16,18,20).

Figura 80 – Diagrama triangular de classificação textural proposta por Lemos e Santos (1996).



Fonte: Modificado de Lemos e Santos (1996)

De acordo com as relações apresentadas no Anexo A, foi possível observar uma relação inversa entre a porcentagem da fração argila no solo e a concentração de SiO_2 . Também foi observado que a fração argila tem uma relação direta com a concentração de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MO, e com o teor de umidade.

6.3.3 Concentração de Urânio e Tório no solo.

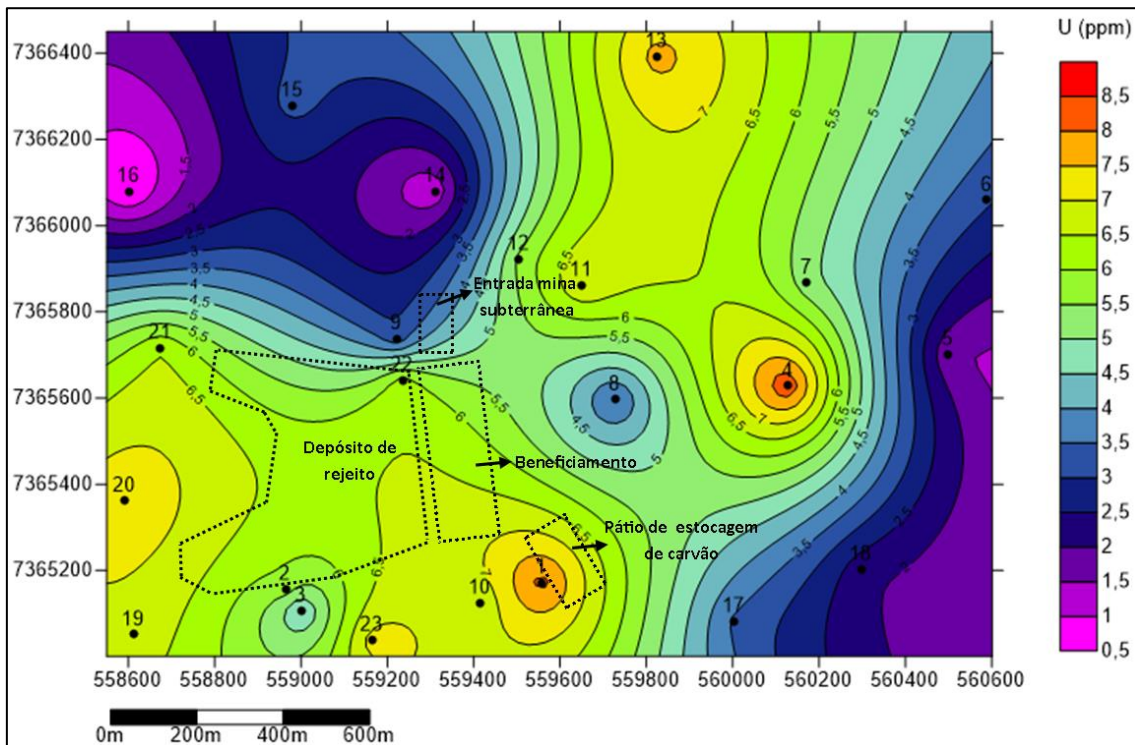
A determinação da concentração de urânio, tório e potássio no solo foi determinada utilizando o espectrômetro gama NaI(Tl), do Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO) do DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro. Foram obtidos espectros de energia gama em função do número de contagens como resultado das análises. Analisando os espectros e utilizando as equações 20 e 21 foi possível determinar as concentrações de U e Th de cada amostra, as quais estão apresentadas na Tabela 18. A Figuras 81 e 82 ilustram a distribuição de urânio, tório e potássio na área de estudo.

Tabela 18 – Resultados da análise do solo por espectrometria gama

Pontos	U (ppm)	Th (ppm)
1	8,19	23,84
2	5,76	22,69
3	4,42	21,24
4	8,46	25,01
5	1,58	13,54
6	3,08	15,17
7	5,19	20,51
8	3,35	21,83
9	3,14	18,21
10	6,61	25,88
11	6,96	30,12
12	5,62	24,24
13	7,69	29,33
14	1,10	14,04
15	3,19	15,15
16	0,43	13,45
17	3,41	23,54
18	2,18	14,04
19	6,82	17,49
20	7,36	24,16
21	6,46	22,29
22	6,27	26,88
23	7,24	23,26

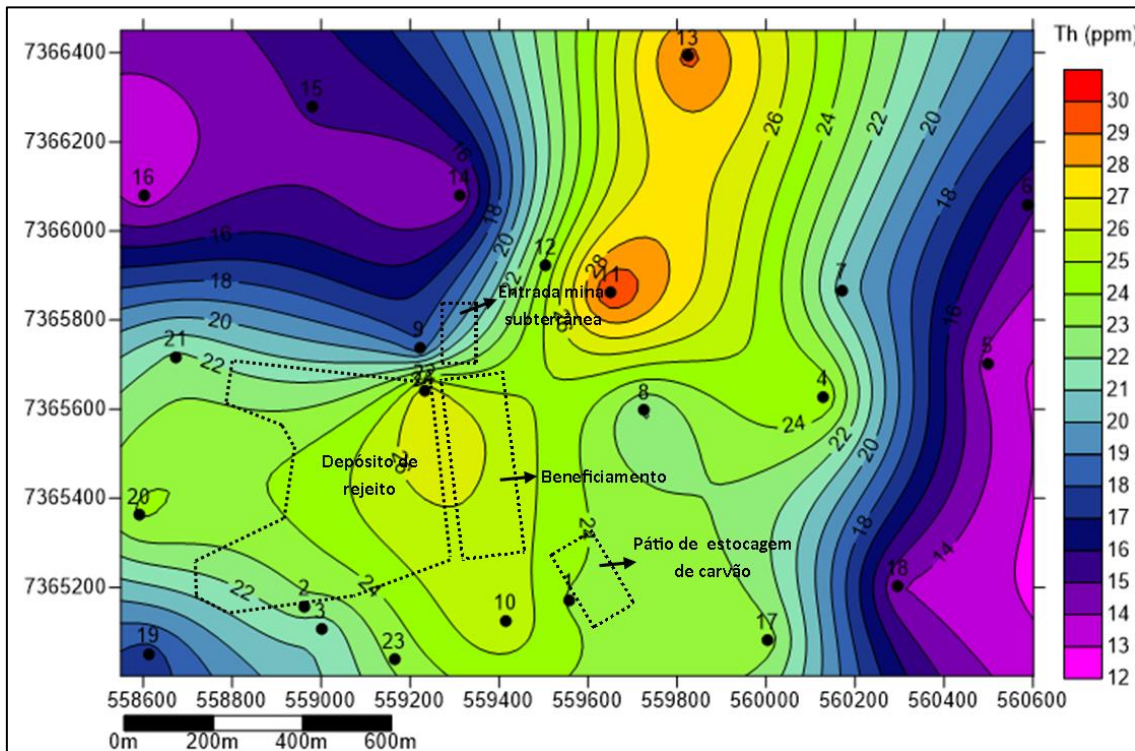
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 81 - Distribuição de U no solo na área estudada



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 82 - Distribuição de Th no solo na área estudada



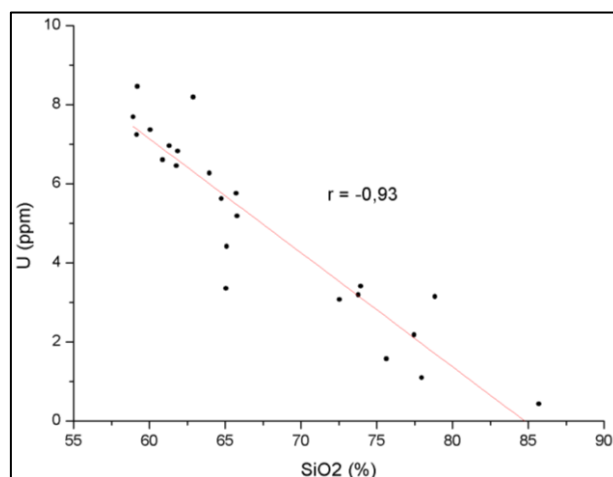
Fonte: Elaborada pelo autor

A concentração de urânio nas amostras variou de 0,43 a 8,46 ppm. A menor concentração foi obtida o ponto 16 e a maior o ponto 4. O teor de tório nas amostras variou de 13,45 a 30,12 ppm. A menor concentração foi obtida no ponto 16 e a maior o ponto 11. A concentração de potássio nas amostras variou de 0,36 a 2,90 %. A menor concentração foi obtida no ponto 6 e a maior o ponto 22.

Os resultados mostram que o urânio tem uma correlação inversa com a concentração de SiO_2 (Figura 83), e uma correlação direta com a concentração de Fe_2O_3 (Figura 84). Segundo Bonotto et. al. (2017), a relação inversa observada na Figura 64 entre SiO_2 e Fe_2O_3 , resultam em uma maior ou menor concentração de urânio. O óxido de ferro tem uma grande importância na retenção do urânio no solo. Embora o Fe tenha menor probabilidade de formar ligações estruturais com compostos de U ou UO_2 devido as suas incompatibilidades, ele continua a ser altamente influente em termos de química de U. Dois processos que afetam o comportamento e a especiação do UO_2 são adsorção às superfícies de Fe e redox (BRUGGEMAN e MAES, 2010; VODYANITSKII, 2011; CUMBERLAND et al., 2016). Desta forma em regiões que tem maior acúmulo de ferro também podem ocorrer maior concentração de urânio.

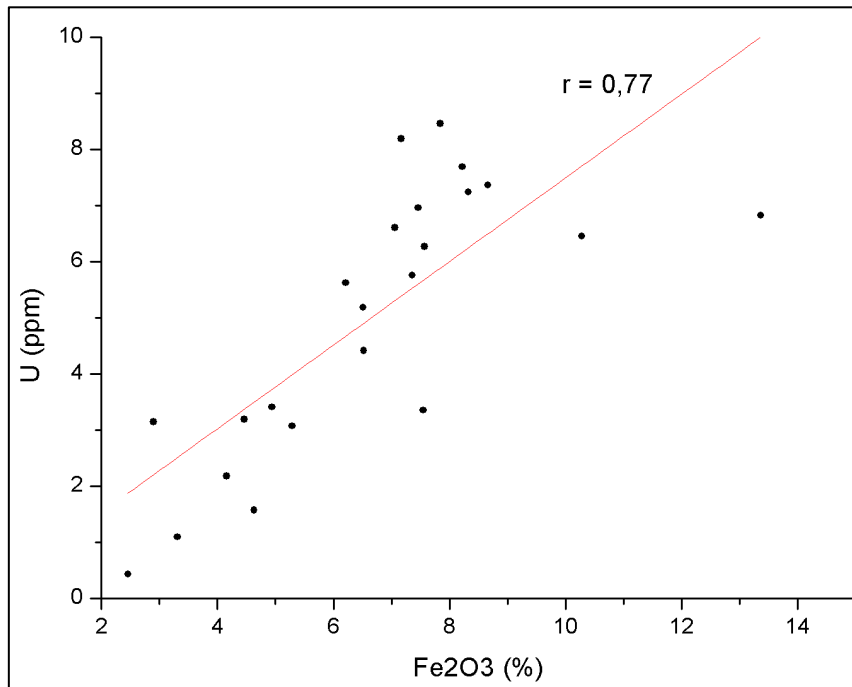
Além destas correlações foi possível observar que o urânio tende a se acumular em ambientes mais úmidos, aluminosos, argilosos e com presença de matéria orgânica, estas relações podem ser observadas nas Figuras 85 a 88.

Figura 83 - Relação entre teores de U e SiO_2 no solo.



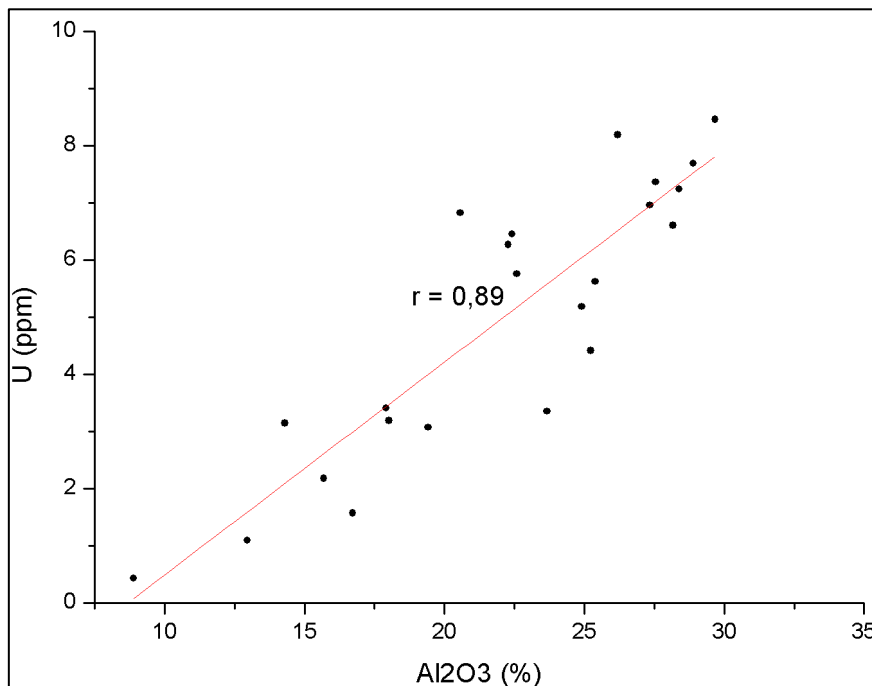
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 84 - Relação entre teores de U e Fe_2O_3 no solo.



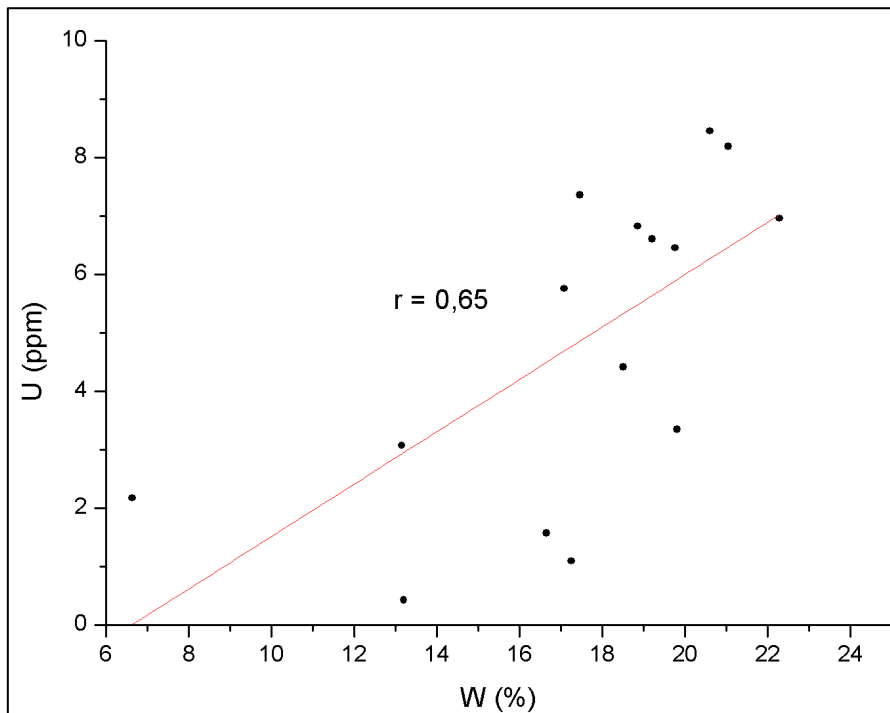
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 85 - Relação entre teores de U e Al_2O_3 no solo.



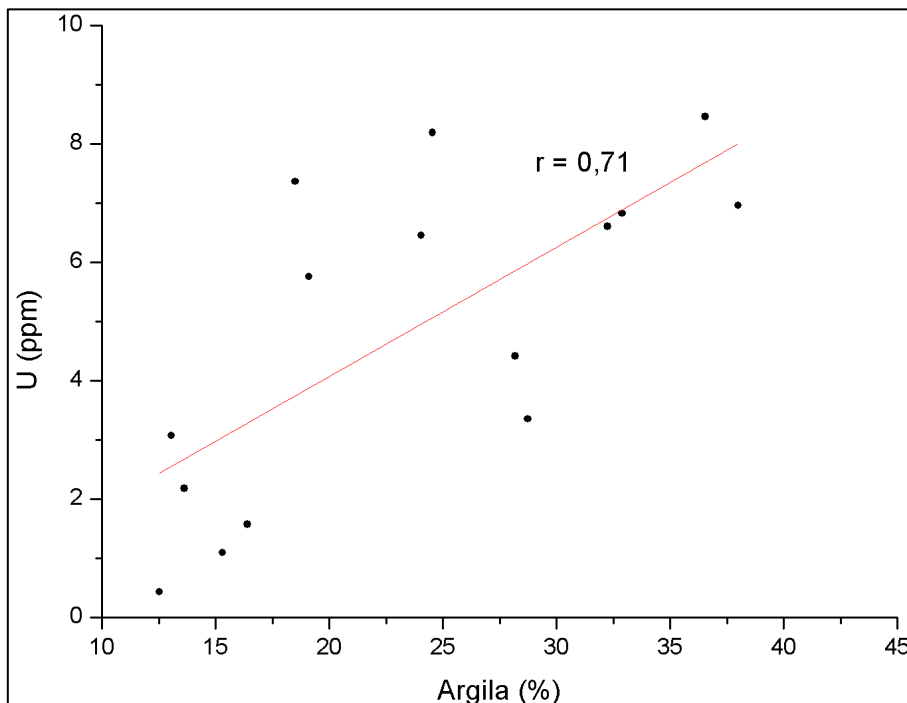
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 86 - Relação entre teores de U e umidade no solo.



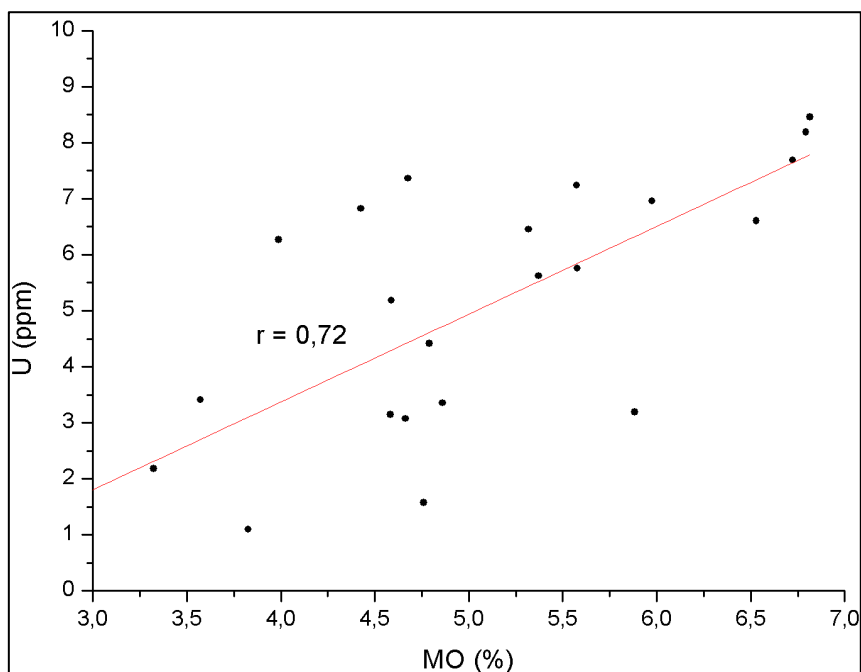
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 87 - Relação entre teor de U e porcentagem de argila no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 88 - Relação entre teores de U e MO no solo.

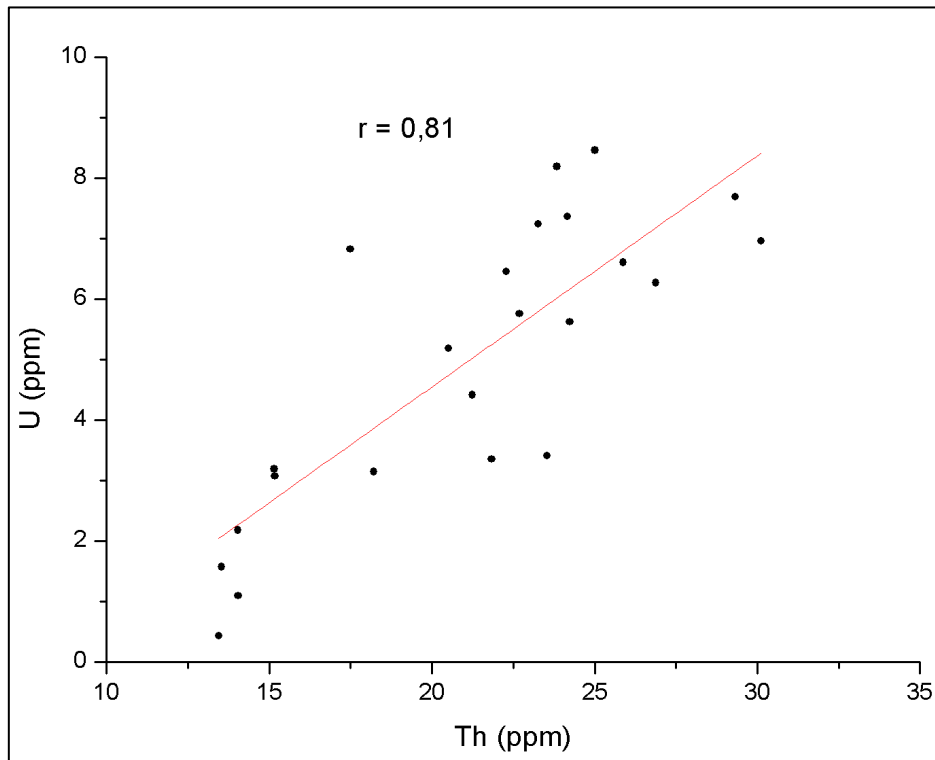


Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo Cumberland et al.(2016), a presença de MO pode influenciar a mobilidade e destino do U pelo grau de absorção de MO em superfícies minerais (por exemplo, óxidos e hidróxidos de Fe e Si). Sua presença influencia na sorção de compostos de U (VI) em óxidos de ferro. Estudos que examinam U, OM e Fe em um sistema de vários componentes, mostraram que a absorção de UO_2 em vários minerais de Fe pode ser reforçada na presença de OM e com baixo pH. (PAYNE et al., 1996; LENHART e HONEYMAN, 1999;). As ligações U-MO são relativamente fortes e podem facilitar a mobilização U ou a imobilização, dependendo das condições ambientais (CUMBERLAND et al.,2016).

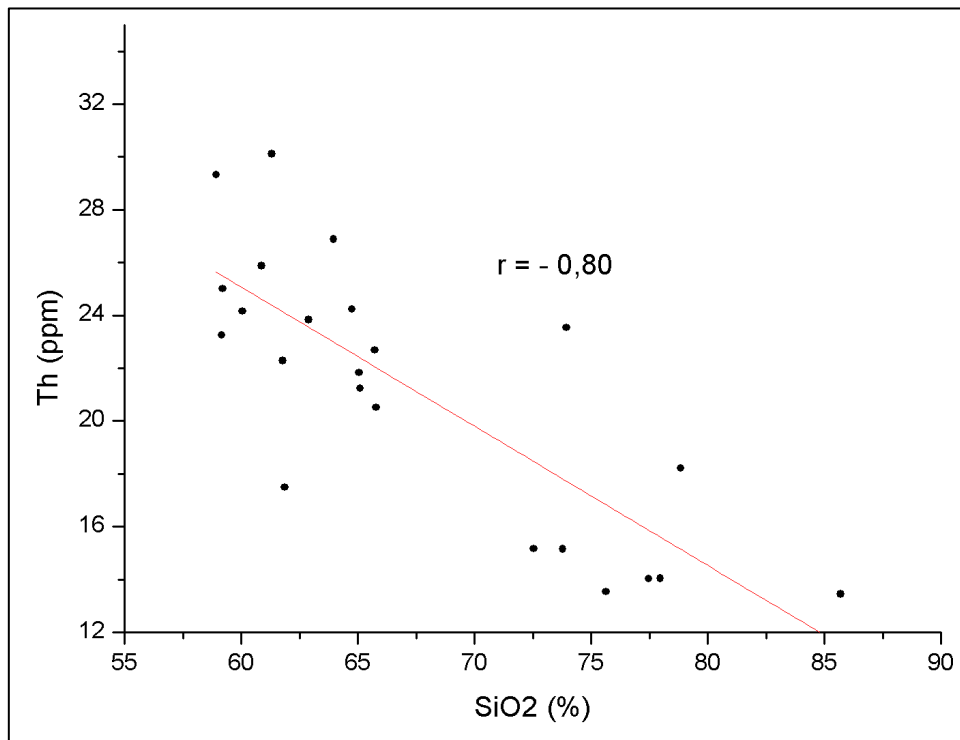
O Th por ter uma baixa mobilidade química acaba concentrando mais que o U, apesar disso, ambos possuem uma ótima correlação (Figura 89), tanto que seu acúmulo, de acordo com os dados obtidos, é parecido com o do U: ambiente com baixo teor de sílica, aluminoso, úmido, argiloso e com presença de matéria orgânica, estas relações podem ser observadas nas Figuras 90 a 94. Da mesma forma que o U não se tem uma clara relação entre a MO e o Th, estas conclusões de ambiente propício para concentração é baseado nos dados obtidos no trabalho.

Figura 89 - Relação entre teores de U e Th no solo.



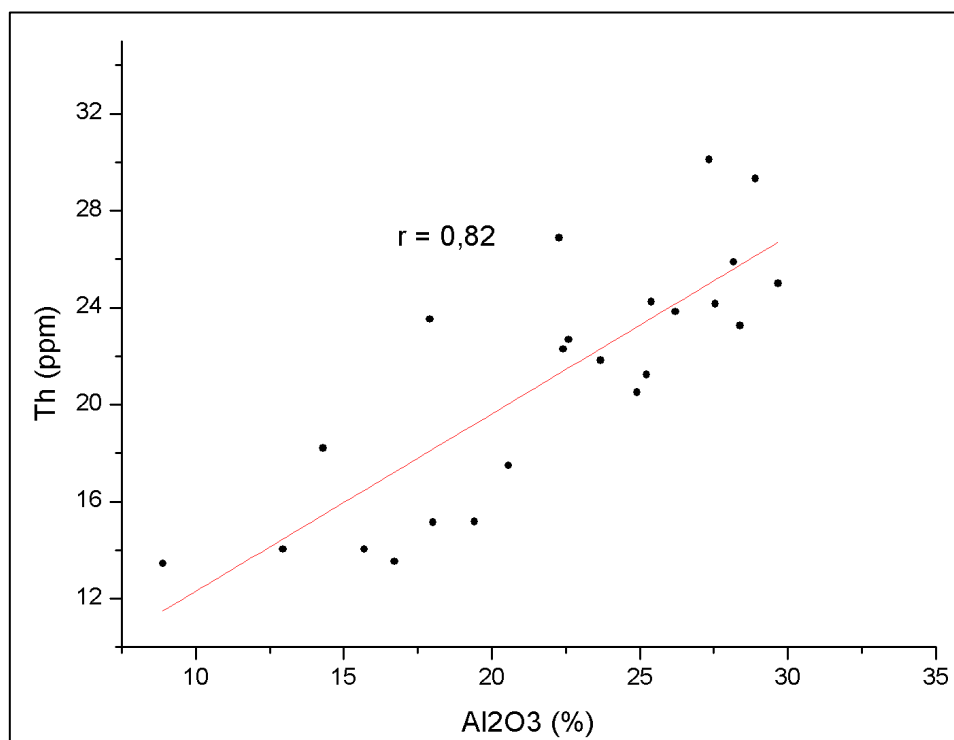
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 90 - Relação entre teores de Th e SiO_2 no solo.



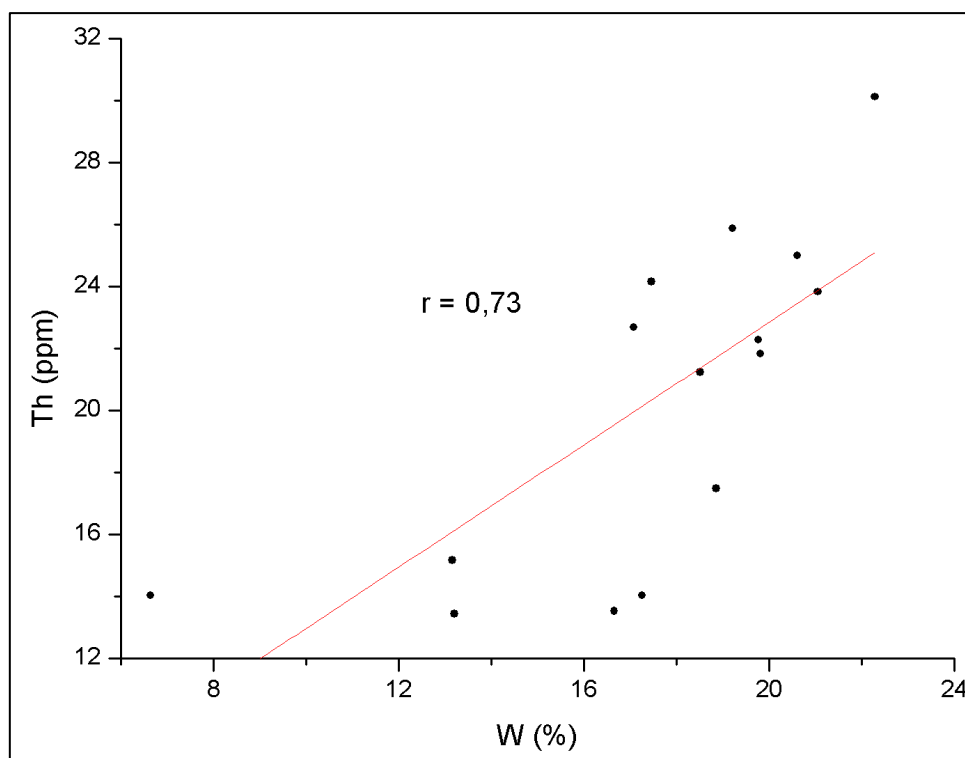
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 91 - Relação entre teores de Th e Al_2O_3 no solo.



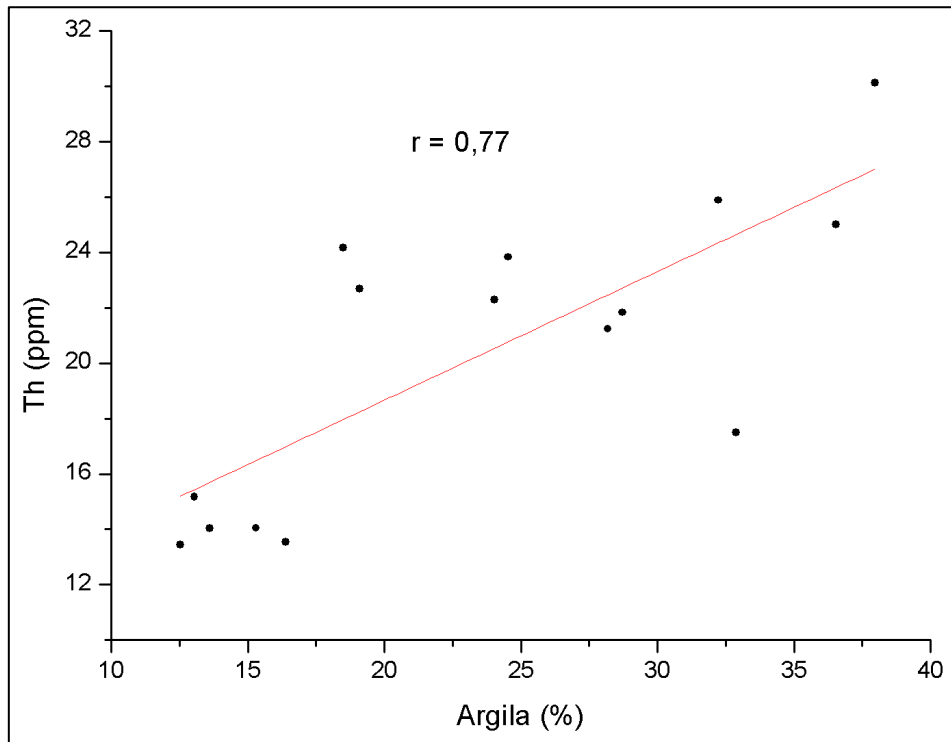
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 92 - Relação entre teores de Th e umidade no solo.



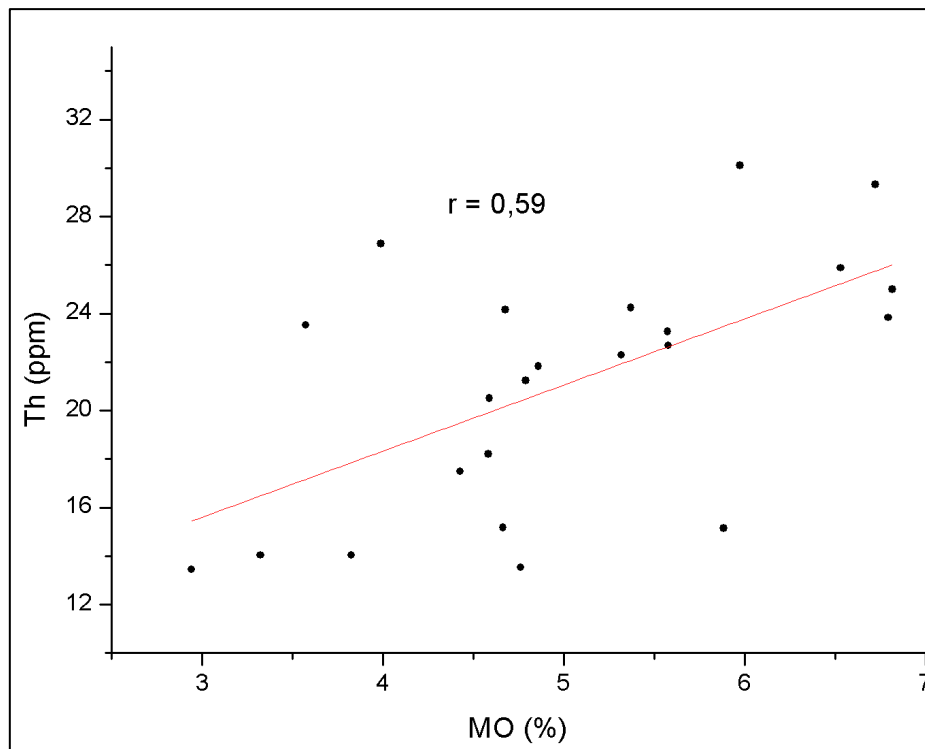
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 93 - Relação entre teor de Th e porcentagem de argila no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 94 - Relação entre teores de Th e MO no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor

6.3.4 Concentração de Rn no solo

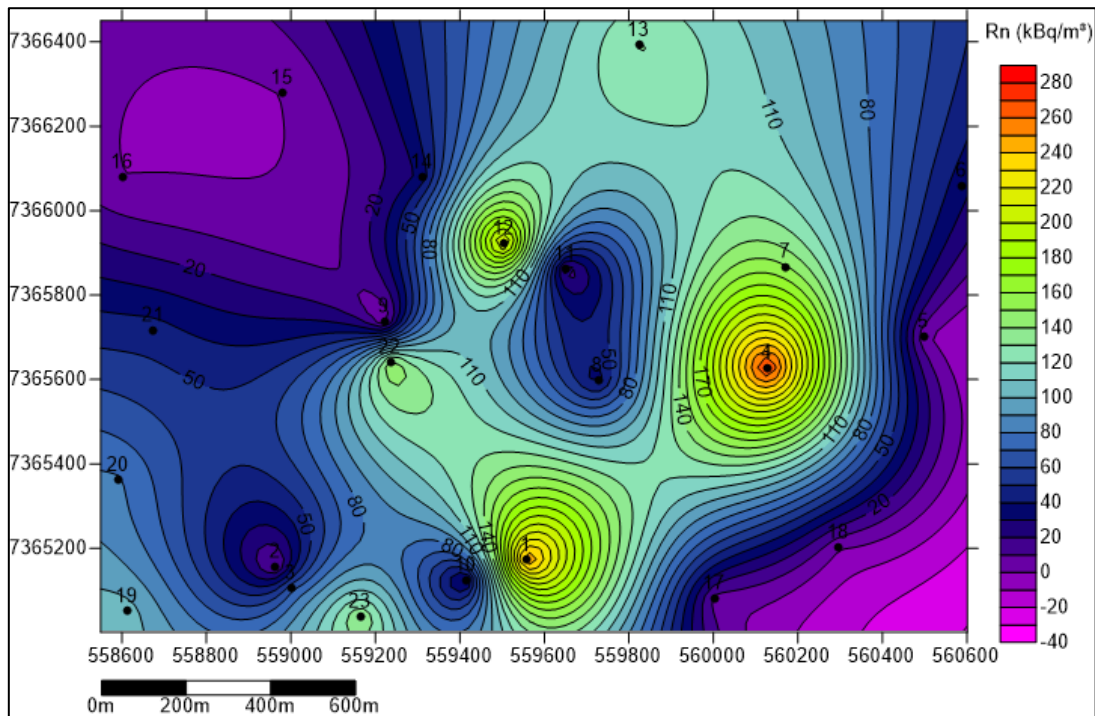
Os resultados das análises da concentração de radônio no solo apresentaram uma considerável variação, o que de fato era esperado em virtude dos diferentes parâmetros que influenciam as concentrações de radônio: concentração de U no solo, teor de umidade, permeabilidade, clima, propriedades físicas e químicas do solo, estação do ano dentre outros. Desta forma, as concentrações de Rn nas amostras variaram de 0,04 a 276,48 (kBq/m³), onde a menor concentração foi obtida no ponto 9 e a maior o ponto 4 (Tabela 19). A distribuição de Rn na área estudada está ilustrada na Figura 95.

Tabela 19 – Resultados das análises da concentração de radônio no solo.

Ponto	Coordenadas			Rn
	X	Y	Z	(kBq/m ³)
1	559557	7365172	596	254,00
2	558964	7365157	562	5,82
3	559000	7365106	563	67,07
4	560128	7365628	581	276,48
5	560499	7365702	562	1,89
6	560589	7366059	557	33,79
7	560172	7365867	567	150,53
8	559727	7365597	562	35,33
9	559221	7365738	582	0,04
10	559415	7365125	589	22,66
11	559650	7365862	565	12,10
12	559505	7365923	580	217,89
13	559824	7366393	570	131,07
14	559311	7366080	564	33,54
15	558980	7366279	551	0,34
16	558601	7366080	537	0,20
17	560003	7365082	577	6,43
18	560297	7365202	574	0,94
19	558612	7365051	542	104,96
20	558592	7365362	537	81,33
21	558675	7365717	537	44,29
22	559235	7365641	580	149,50
23	559165	7365038	570	141,31

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 95 - Distribuição de Rn no solo na área estudada



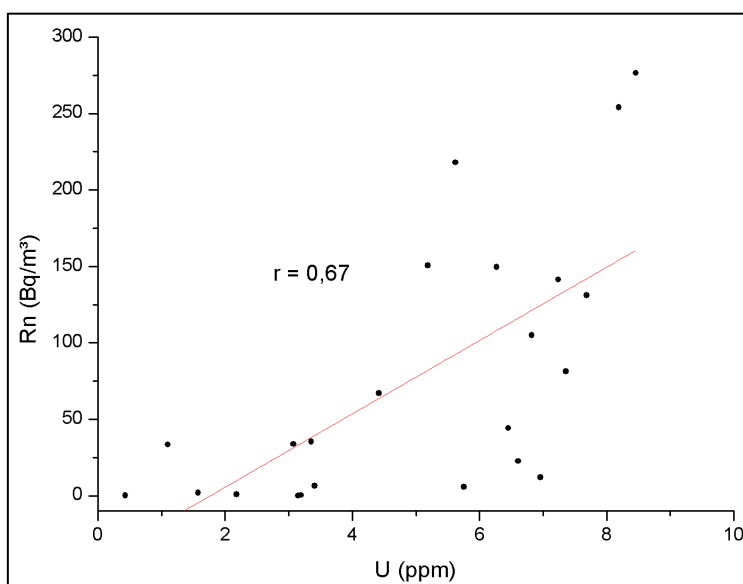
Fonte: Elaborada pelo autor

De modo geral, sabe-se que rochas com elevados teores de U possuem elevado potencial de geração de Rn, que, em função de fatores físicos e geoquímicos, podem contribuir nas concentrações deste elemento em seus solos derivados. Assim, como esperado, foi encontrada uma correlação direta moderada entre os dois (Figura 96). As correlações apresentadas no Anexo A mostram que a concentração de gás radônio possuiu as mesmas tendências das propriedades física e química do solo observadas para o U. Os resultados obtidos para a concentração de radônio não apresentaram uma boa correlação com os outros dados obtidos neste estudo, provavelmente isto ocorreu por que o gás radônio sofre influência de diversos parâmetros distintos.

Um fator a ser considerado é o grau de saturação do solo. Na literatura muito se fala da influência da umidade no transporte de gás Rn, por diminuir sua distância percorrida (ASHER-BOLINDER, *et al*, 1993), Mas observou-se que pelos resultados presentes nas tabelas 16, 18 e 19, mesmo as amostras possuindo teores de urânio e umidade próximos a diferença entre a concentração de radônio é de aproximadamente 20 vezes, relação observada entre as amostras 1 e 11. Essa diferença é explicada pelo grau de saturação

da amostra, em que na amostra 1 obteve 38,10% e a do amostra 11 é de 81,44%.

Figura 96 - Relação entre teores de Rn e U no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da concentração de Rn (Tabela 19) , levando em consideração o critério Sueco (AKERBLON,1987), mostram que 7 pontos são classificados como baixo risco ($Rn < 10 \text{ kBq/m}^3$), 5 são classificados com médio risco ($10 \text{ kBq/m}^3 < Rn < 50 \text{ kBq/m}^3$) e 11 são classificadas como alto risco ($Rn > 50 \text{ kBq/m}^3$) (Tabela 20) . Comparando-o com o critério Alemão (KEMSKI *et al.*,200), 7 amostras são classificadas como baixo risco ($Rn < 10 \text{ kBq/m}^3$), 8 são classificadas com médio risco ($10 \text{ kBq/m}^3 < Rn < 100 \text{ kBq/m}^3$) e 8 são classificadas como alto risco ($Rn > 100 \text{ kBq/m}^3$) (Tabela 20). Quando comparado com o critério Italiano (BERTOLO; VERDI, 2001), 9 pontos são classificadas com baixo risco ($Rn < 25 \text{ kBq/m}^3$) e 14 pontos são classificados com risco médio-alto (Tabela 20).

É importante destacar que todos os pontos analisados são em locais aberto e com grande fluxo de ar. Assim quando o gás é exalado do solo é misturado no ar, diminuindo sua concentração. Por serem localizados em plantações e locais próximos à pilhas de rejeito, os locais são pouco frequentados.

Tabela 20 – Concentração de radônio obtida comparada com os limites da literatura.

	Akerblon (1987)	Kemski <i>et al.</i> (2001)	Bertolo e Verdi (2001)
Ponto	(kBq/m ³)	(kBq/m ³)	(kBq/m ³)
1	254,00	254,00	254,00
2	5,82	5,82	5,82
3	67,07	67,07	67,07
4	276,48	276,48	276,48
5	1,89	1,89	1,89
6	33,79	33,79	33,79
7	150,53	150,53	150,53
8	35,33	35,33	35,33
9	0,04	0,04	0,04
10	22,66	22,66	22,66
11	12,10	12,10	12,10
12	217,89	217,89	217,89
13	131,07	131,07	131,07
14	33,54	33,54	33,54
15	0,34	0,34	0,34
16	0,20	0,20	0,20
17	6,43	6,43	6,43
18	0,94	0,94	0,94
19	104,96	104,96	104,96
20	81,33	81,33	81,33
21	44,29	44,29	44,29
22	149,50	149,50	149,50
23	141,31	141,31	141,31

Baixo	Médio	Alto
-------	-------	------

Fonte: Elaborada pelo autor

7 CONCLUSÃO

Com base na metodologia empregada para a determinação da taxa de exalação de radônio foi possível observar o comportamento do gás em amostras de carvão, cinza, siltito e tufo vulcânico coletadas na mina Amado Simões PI-08. Observou-se em todas as amostras que as concentrações do gás radônio após 180 horas de análise permaneceram em um regime contante, caracterizando que após esse tempo de análise o gás radônio entrou em equilíbrio radioativo. As concentrações de urânio das amostras confirmaram a relação direta com a concentração e taxa de exalação de radônio, sendo importante destacar a influência dos parâmetros físicos da amostra (porosidade, umidade, etc.), pois eles podem dificultar ou facilitar o processo de exalação do gás radônio na amostra.

As concentrações de radônio nas amostras de carvão, cinza, siltito e tufo vulcânico variaram de 282,92 a 3620 Bq/m³, ultrapassando o valor estipulado de 200 Bq/m³, desta forma, aconselha-se o monitoramento de ambientes onde há exposição aos mesmos. No interior da mina Amado Simões onde essas matérias estão presentes, as concentrações de radônio variaram de 7,2 a 770,5 Bq/m³, sendo alguns valores superiores ao permitido, justificando-se a importância do planejamento do fluxo de ar do interior da mina. Os resultados obtidos neste estudo mostram que o planejamento do fluxo de ar da Companhia Carbonífera do Cambuí é eficaz, pois o maior valor foi obtido na saída de ar viciado retirado do interior da mina pelos ventiladores e exaustores em uma região onde não tem fluxo de trabalhador, e as menores concentrações foram encontradas próximas aos ventiladores e exaustores em regiões de grande fluxo de trabalhadores.

O estudo das rochas do interior da mina mostrou que a maior taxa de exalação de radônio vem das rochas encaixantes (siltito e tufo) e não do carvão mineral, o que foi possível ser comprovado pelos resultados obtidos nos ambientes de maior e menor camada de carvão. Considerando que estas rochas são rejeitas no processo de beneficiamento do carvão, isso remete em um problema radiológico ao local de descarte destas rochas.

Esperava-se que as maiores concentrações fossem obtidas nos painéis desativados, devido a menor circulação de ar, o que dificulta a mistura

do gás, resultando assim em uma maior concentração do mesmo, mas isto não foi observado. Os resultados mostraram que a principal forma de escape do gás radônio no interior da mina são as fraturas geradas pelas detonações. Sendo este um ambiente com grande fluxo de trabalhadores, deve-se ter uma atenção especial no planejamento do fluxo de ar. Aconselha-se instalação de um maior número de ventiladores e exaustores neste ambiente para redirecionar os gases liberados.

A concentrações de radônio nas amostras de solo variaram de 0,04 a 276,48 (kBq/m³), a qual obteve correlação com a concentração de U, que variou de 0,43 a 8,46 ppm. Observou-se a tendência do radônio se acumular em ambientes com maior concentração de urânio, úmidos, aluminosos, argilosos e com presença de matéria orgânica. Apesar desta tendência não foram observadas uma correlações representativa com os parâmetros físicos e químicos obtidos neste trabalho, o que de fato era esperado em virtude dos diferentes parâmetros que influenciam na taxa de exalação do radônio. Desta forma propõem-se uma melhor investigação deste e outros parâmetros para poder compreender melhor o comportamento do gás radônio em diferentes tipos de solo.

Considerando a importância da atividade mineira no Brasil, novos estudos do gás radônio são de grande importância para determinar o grau de exposição que os trabalhadores estão expostos nas minas brasileiras, além disso a conscientização das pessoas do perigo da inalação e ingestão de radônio é de extrema importância.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil, 3. ed. – Brasília: Aneel, 2008. 236 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *A Situação da Produção de Carvão Mineral no Estado do Paraná em Relação a Nota Técnica no 034/2011*. ANEEL, 2011.

ÅKERBLOM, G. Investigations and mapping of radon risk areas. *Geology for Environmental Planning*, v. 2, p. 96 - 106, 1987.

AMARAL, P.G.Q. Caracterização radiométrica e de exalação de Radônio em rochas ornamentais silicáticas beneficiadas no Estado do Espírito Santo. 377f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2011.

ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal*. v.7,p. 317-336,1999.

ARBUZOV, S. I.; MASLOV, S. G.; VOLOSTNOV, A. V.; ARKHIPOV; V. S. Modes of Occurrence of Uranium and Thorium in Coals and Pe of Northern Asia. *Solid Fuel Chemistry*, v. 46, n. 1, p 52–66, 2012.

ARTUR, A. C.; BONOTTO, D. M. ; AMARAL, P. G. Q. ; GALEMBECK, T. M. B. Metodologia para a quantificação da exalação do gás radônio em rochas ornamentais.. *Geociências (São Paulo. Online)*, v. 32, p. 166-180, 2013.

ASHER-BOLINDER, S. *et al.* A Preliminary Evaluation of Environmental Factors Influencing Day-to-day and Seasonal Soil Gas Radon Concentration. *Field Studies of Radon in Rocks, Soils and Water*. p. 23-31, Flórida, 1993.

BALOGUNA, F.A.; MOKOBIAB, C.E.; FASASIA, M.K.; OGUNDAREC, F.O. Natural radioactivity associated with bituminous coal mining in Nigeria. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v. 505, p. 444–448, 2003.

BARESCUT, J. ; LARIVIERE, D.; STOCKI,T.; PANDIT, G.G. Natural radionuclides from coal fired thermal power plants – estimation of atmospheric release and inhalation risk. *Radioprotection*. v. 46, nº 6, p.S173–S179, 2011.

BERTOLO, A.; VERDI, L. Validation of a Geographic Information System for the Evaluation of the Soil Radon Exhalation Potential in South-tyrol and Veneto (Italy). *Radiation Protection Dosimetry*, v. 97, n. 4, p. 321 – 324, Nuclear Technology Publishing, 2001.

BETEJTIN, A. *Curso de Mineralogia*. Moscou: Editorial Mir, 1970.720p.

BHANGARE,R.C.; AJMAL ,P.Y.; SAHU, S.K.; PANDIT, G.G.; PURANIK, V.D. Distribution of trace elements in coal and combustion residues from five thermal power plants in India. *International Journal of Coal Geology*. v. 86, p. 349–356, 2011.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS. C; VIDOTTI, R.M.; GOLÇALVES, J. H.(Editores) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM*, 2003. 647p.

BONOTTO, D. M. Aplicações hidrogeoquímicas dos isótopos naturais das séries do U (4n+2) e Th (4n) no Morro de Ferro, Poços de Caldas (MG). 1986. 377f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

BONOTTO, D. M. . Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani. 1. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2004. v. 1. 251p .

BONOTTO, D. M. Groundwater toxicity due to natural dissolved radionuclides belonging to the U and Th decay series. In: Mathis H. Lefebvre; Matheo M.

Roux. (Org.). Progress on drinking water research. 1 ed. New York: Nova Science Publishers, 2008. v.1, p.199-240.

BONOTTO, D. M; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R.; FAGUNDES, J. C.; FILHO, C. R. A. F. Weathering processes and dating of soil profiles from São Paulo State, Brazil, by U-isotopes disequilibria. *Applied Radiation and Isotopes*. v.119, p. 6–15, 2016.

BRUGGEMAN .C; MAES N. Uptake of uranium(VI) by pyrite under boom clay conditions: influence of dissolved organic carbono. *Environ. Sci. Technol.* , v. 44 (11), p. 4210 – 4216, 2010.

CAMPANER, V. P. e SILVA, W. L. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. *Quim. Nova*, v. 32, n. 1, p. 146-152, 2009.

CAMPANER, V. P. Dispersão geoquímica elementar e isotópica na atmosfera e no solo em área com atividade minerária e termoelétrica a carvão. 2013. 142 f. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

CAMPANER, V.P.; LUIZ-SILVA, W.; MACHADO, W. Geochemistry of acid mine drainage from a coal mining area and processes controlling metal attenuation in stream waters, southern Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, v. 86, p. 539-554, 2014.

CHEN, J.; et al. Preliminary Results of simultaneous radon and thoron tests in Ottawa. *Radiat. Prot. Dosim.* vol. 130, n.2, p. 253-256, 2008.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. *Posição Regulatória 3.01/007*. Níveis de Intervenção de Ação para Exposição Crônica. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

Copel, 2018. Disponível em:
<<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot>

[%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F49AF98E12E67716B032574A20048B955>](#).

Acessado em: 2 fev. 2018.

CUMBERLAND, S. A.; DOUGLAS, G.; GRICE K.; MOREAU J. W. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes. *Earth-Science Reviews*. V.159, p. 160–185, 2016.

DAEMON, R. F; PAIVA, I. B; TAVARES, J. R. P.; MARQUEZAN, R. G. *Jazida de Figueira, aspectos da mineralização de urânio*. In: Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, vol. 5, p. 2099–2109, 1982.

DEL CLARO, F. *Avaliação da concentração de radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), Boletim nº28. Perfil analítico do tório e terras raras. Rio de Janeiro, 1973, 72p.

DOI, K.; HIRONO, S.; SAKAMAKI, Y. Uranium mineralization by groundwater in sedimentary rocks, Japan. *Economic Geology*, v. 70, p. 628-646, 1975.

FERNANDES, H. M.; PIRES DO RIO, M. A.; VEIGA, L. H. S.; AMARAL, E. C. S. *Environmental radiological problems associated to non-uranium mining and milling industries*. Proc. do ENAN/ENFIR. Poços de Caldas, 1997.

FLUES, M.; CAMARGO, I. M. C.; SILVA, P. S. C.; MAZZILLI, B. P. Radioactivity of coal and ashes from Figueira coal power plant in Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 270, n. 3, p. 597–602, 2006.

FRANCIS, A. J. Microbial dissolution and stabilization of toxic metals and radionuclides in mixed wastes. *Experientia*, v. 46, p. 840-851, 1990.

FRONDEL, C. Mineralogy of thorium. *U.S. Geol. Surv. Profess. Papers*, p.300-567, 1956.

GALHARDI, J. A. 2016. Geoquímica de radionuclídeos naturais e biomonitoramento em área de mineração de carvão no sul do Brasil 190f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de Estadual de São Paulo, São Paulo, 2016.

GASCOYONE, M. *Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences*. Oxford: Clarendon Press, cap.2, p.34-62, 1992.

GENITRON. ALPHA GUARD PQ2000/MC50 - *Multiparameter Radon Monitor*. Frankfurt: Genitron Instruments, 2000.

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 18:1111-1116, 1987.

GOLDSCHMIDT, V. M. *Geochemistry*. Oxford: Clarendon Press, 1954,730p.

GRANDSTAFF, D. E. A Kinetic study of the Dissolution of Uraninite. *Economic Geology*, v. 71, p, 1493-1506, 1976.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. *ICRP 65 Protection Against Radon-222 at Home and at Work*. Oxford: Pergamon Press, 1993.

ISHIKAWA, T. Effects of thoron on a radon detector of pulse-ionisation chamber type. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 4, p. 327–330, 2004

IVANOVICH, M.; MURRAY, A. Spectroscopic Methods. In: IVANOVICH, M., HARMON, R.S. (Ed.) *Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*. Oxford: Clarendon Press, 1992. cap. 5, p. 127 – 73.

KOVACS, T. Thoron measurements in hungary. *Radiat. Prot. Dosim.* v. 141, n.4, p. 328-334, 2010.

KOVLER. K; PEREVALOV. A; STEINER.V; METZGER .L.A. Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 e scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. *Journal of Environmental Radioactivity* v. 82, p. 321-334, 2005.

KREBS, A.S.J. & ALEXANDRE, N.Z. *Situação atual dos recursos hídricos da bacia carbonífera, face às atividades de lavra, beneficiamento e uso do carvão mineral e de outras atividades antrópicas.* In: IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Bahia, p. 60-65,1998.

LANGMUIR, D. Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 42, p. 547–69, 1978.

LANGMUIR, D.; HERMAN, J. S. The mobility of thorium in natural waters at low temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta, Great Britain*, v.44, p.1753-1766, 1980.

LARA, E. G. Radônio nos Gases do Solo [manuscrito]: *Distribuições e Correlações com Litologias e Pedologias da RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte – 2013.*

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo.* Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, São Paulo. 84pp, 1996.

LIESAR, K. H.; HILL, R. Hydrolisys and colloid formation of thorium in water ans consequences for its migration behavior – comparisom with uranium. *Radiochimica Acta*, Munique, v.56, p. 37-45, 1992.

MILANI, E. J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental.*

1997. 225 fl. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. Rio de Janeiro: *Boletim Geociências da Petrobrás*, vol. 15(2), p. 265-287, 2007.

MINEROPAR. Atlas Geomorfológico do estado do Paraná escala base 1:250.000. modelos reduzidos 1:500.000, 2006

MINEROPAR. Atlas geológico do estado do Paraná, 2001

MOREIRA-NORDEMANN, L. M. *Etude de la vitesse d' alteration des roches au moyen de l uranium utilize comme traceus naturel. Application a deux bassins du Bresil* . 1977. 162f. Tese (Doutorado), Université Pirre et Marie Curie, Paris, 1977.

MORRONE, N; DAEMON,R.F. jazida de Urânio de Figueira, Paraná.In: Principais Depósitos Minerais do Brasil, v.1. Recursos minerais energéticos. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1985. P. 133-142.

MOURA, C.L. *Radioatividade natural e emissão de ²²²Rn em rochas ornamentais provenientes de diferentes séries magnéticas utilizadas como revestimento interno*. 2005. Tese (Doutorado em Geologia Regional)- Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

PERNA, A. F. N. *Taxa de exalação de radônio-222 de concreto e argamassa de cimento usados na construção civil*. 2016. Dissertação (Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

PERTLIK, F.; ROGER, J. J. N.; ADAMS, J. A.S. Uranium. In: HandBook of Geochemistry WEDWPOHL, K. H (ed.), Berlim: Springer Velag, 1974. p. 92.0192.08

PETRI, S.; FÚLFARO, V. J. Geologia do Brasil. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1983, p. 119-134 e p. 187.

PETROPOULOS, N.P.; ANAGNOSTAKIS, M.J.; SIMOPOULOS, S.E. Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results. *Science of the Total Environment*. 272(1-3): 109-118, 2001.

PICCIOTTO, E. F. Distribution de la radioactivité dans les roches éruptives. *Soc. Belge Géol. Bull.*, v.59, p.170-178. 1950.

PRIKRYL, J. D.; JAIN, A.; TURNER, D. R.; PABALAN, R. T. Uranium(VI) sorption behavior on silicate mineral mixtures. *J. Contam. Hydrol.*, v. 47, p. 241–253, 2001.

REDDY, M. S.; et al. Thoron levels in the dwellings of Hyderabad city, Andhra Pradesh, India. *J. Environ. Radioact.* v.73, p.21-28, 2004.

RODRIGUES, R.; QUADROS, L.P. 1976. Mineralogia das argilas e teor de boro das formações paleozóicas da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29., Ouro Preto. Anais... Ouro Preto, Sociedade Brasileira de Geologia. v.2, p. 351-379.

ROGERS, J.J.W.; ADAMS, J.A.S. Thorium. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) *Handbook of Geochemistry*. New York: Springer-Verlag, 1969a. v.4, cap. 90.

ROGERS, J.J.W.; ADAMS, J.A.S. Uranium. In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) – *Handbook of Geochemistry*. New York: Springer-Verlag, 1969b. v.4, cap. 92.

SAHU, S.K., TIWARI, M.; BHANGARE, R. C.; PANDIT, G.G. Enrichment and particle size dependence of polonium and other naturally occurring radionuclides in coal ash. *Journal of Environmental Radioactivity*. v.138, p. 421-426, 2014.

SAPHYMO. The Reference in Professional Radon Measurement – AlphaGUARD. 2014. Manual do Usuário , Saphymo. Disponível em: http://www.radtech.it/Data/Sites/1/media/documents/products/ag_pm_gb_12_14_4dpi_ebook.pdf. Acessado em: janeiro de 2016.

SBARANI, E. 2006. Contribuição a interpretação paleoambiental dos depósitos de carvão do município de figueira - PR, através da integração de dados petrográficos e estratigráficos. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

SELINUS, O. Essentials of medical geology :impacts of the natural environment on public health. Amsterdam; Boston: Elsevier Academic Press, 2005. 812p.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. A.; NOGUEIRA, A. A. 1974. *Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná*. In: Anais do XXVIII Congr. Bras. Geo., Porto Alegre, v.1, p.41-65, 1974.

SHANG, B., et al. Thoron levels in traditional Chinese residential dwellings. *Radiat. Environ. Biophys.* v.44, p.193-199, 2005.

SHUQAIR, M. S. S.. *Estudo da contaminação do solo e água subterrânea por elementos tóxicos originados dos rejeitos das minas de carvão de Figueira no Estado do Paraná*. 2002. 117 fl. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Espaciais e Nucleares. Uiversidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

STEINHÄUSLER, F. Environmental ^{220}Rn : A Review. *Eviron. Int.* 22(1), 1111-1123, 1996.

SUHANA. J; RASHIDA. M. Naturally occurring radionuclides in particulate emission from a coal fired power plant: A potential contamination?. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. V.4, p. 4904–4910, 2016.

TOKONAMI, S. Why is ^{220}Rn (thoron) measurement important? *Radiat. Prot. Dosim.*v.141, p. 335-339, 2010.

TOMMASI, E. Geologia do flanco sudeste da Bacia do Paraná – Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. In: *XXVII Congresso Brasileiro de Geologia*, Aracaju, 1973, v.3, p.179-188.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiations. V. 1. New York: UNSCEAR, 2010.

VAUPOTIČ, J, NÁVÁSI, N. Preliminary study of thoron and radon levels in various indoor environments in Slovenia. *Radiat. Prot. Dosim.*v.141, p.383-385, 2010.

VEIGA, L. H. S.; MELO, V.; KOIFMAN, S.; AMARAL, E. C. S. High radon exposure in a Brazilian underground coal mine. *J. Radiol. Prot.*, vol. 24, p. 295–305, 2004.

VEIGA, L. H. S.; L. H. S.; AMARAL, E. C. S.; COLIN, D.; KOIFMAN, S. A retrospective mortality study of workers exposed to radon in a Brazilian underground coal mine. *Radiat Environ Biophys*, vol. 45, p. 125–134, 2006.

VIEIRA, A. J. Geologia do centro e nordeste do Paraná e Centro Sul de São Paulo. In: *XXVII Congresso Brasileiro de Geologia*, São Paulo, 1973, v.3, p. 259-277

Vodyanitskii Y.N. Chemical aspects of uranium behavior in soils: a review. *Eurasian Soil Sci.*, v.44 (8), p. 862-873, 2011.

WARD, S.H. Gamma-ray spectrometry in geologic mapping and uranium exploration. *Econ. Geol.*, v.75, p. 840 – 49, 1981.

WHO. World Health Organization Handbook on Indoor Radon. A public health perspective. Geneva, 2009.

YAMADA, Y., et al. Radon-thoron discriminative measurements in Gansu Province, China, and their implication for dose estimates. *J. Toxicol. Environ. Health A*. v.69, p.123-734, 2006.

ZACHARIAS, A. A. & ASSINE, M. L. Modelo de preenchimento de vales incisos por associações de fácies estuarinas, Formação Rio Bonito no Norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 35(4), p. 573-583, 2005.

ANEXO A – CORRELAÇÃO PEARSON DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SOLO

	U	Th	k	SiO2	Al2O3	Fe2O3	TiO2	K2O	MgO	SO3	ZrO2	P2O5	CaO	MnO	ZnO	Rb2O	Z	Ph	T	Rn	(ρ)	(W)	(pd)	(ps)	(e)	(n)	(Sr)	Granulo	A.G	A.M	A.F	A.T	Silte	Argila	Finos	MO
U	1,00	0,81	0,32	-0,93	0,89	0,77	0,30	0,14	0,33	0,21	-0,20	-0,51	-0,23	-0,59	0,38	0,51	0,24	-0,30	0,06	0,67	-0,32	0,65	-0,46	0,00	0,47	0,46	0,23	-0,18	-0,25	-0,39	-0,65	-0,48	0,28	0,71	0,65	0,72
Th	0,81	1,00	0,42	-0,80	0,82	0,51	0,37	0,19	0,32	0,16	-0,13	-0,46	-0,27	-0,41	0,37	0,52	0,38	-0,38	0,11	0,45	-0,09	0,73	-0,30	-0,35	0,23	0,26	0,50	-0,36	-0,36	-0,48	-0,61	-0,40	0,19	0,77	0,62	0,59
k	0,32	0,42	1,00	-0,30	0,11	0,33	-0,46	0,90	0,86	0,30	-0,36	-0,45	0,38	-0,19	0,57	0,65	0,16	-0,20	0,21	0,20	-0,27	0,60	-0,41	-0,44	0,32	0,35	0,26	0,34	0,05	-0,66	-0,84	-0,65	0,81	0,43	0,84	0,04
SiO2	-0,93	-0,80	-0,30	1,00	-0,95	-0,84	-0,26	-0,15	-0,37	-0,20	0,31	0,49	0,19	0,63	-0,41	-0,54	-0,15	0,20	0,02	-0,58	0,26	-0,73	0,44	0,01	-0,41	-0,44	-0,33	0,12	0,20	0,48	0,60	0,43	-0,17	-0,78	-0,61	-0,69
Al2O3	0,89	0,82	0,11	-0,95	1,00	0,65	0,44	-0,05	0,15	0,06	-0,15	-0,32	-0,31	-0,59	0,27	0,40	0,30	-0,20	-0,10	0,60	-0,11	0,66	-0,30	-0,03	0,27	0,30	0,41	-0,27	-0,29	-0,43	-0,47	-0,34	0,01	0,75	0,48	0,76
Fe2O3	0,77	0,51	0,33	-0,84	0,65	1,00	-0,01	0,22	0,46	0,29	-0,49	-0,61	-0,08	-0,56	0,42	0,49	-0,21	-0,12	0,05	0,40	-0,43	0,54	-0,53	0,16	0,52	0,55	0,03	0,08	-0,06	-0,33	-0,54	-0,35	0,19	0,63	0,53	0,40
TiO2	0,30	0,37	-0,46	-0,26	0,44	-0,01	1,00	-0,69	-0,64	-0,20	0,56	-0,02	-0,40	-0,03	-0,30	0,34	0,24	-0,06	-0,15	0,30	-0,09	0,16	-0,13	0,11	0,16	0,15	0,07	-0,41	-0,23	0,20	0,09	0,15	-0,20	0,07	-0,10	0,31
K2O	0,14	0,19	0,90	-0,15	-0,05	0,22	-0,69	1,00	0,92	0,23	-0,38	-0,35	0,47	-0,13	0,53	0,72	0,01	-0,07	0,17	0,06	-0,26	0,40	-0,35	-0,43	0,25	0,29	0,09	0,39	0,18	-0,55	-0,68	-0,59	0,79	0,20	0,68	-0,05
MgO	0,33	0,32	0,86	-0,37	0,15	0,46	-0,64	0,92	1,00	0,31	-0,52	-0,55	0,36	-0,38	0,61	0,79	-0,05	-0,12	0,16	0,12	-0,42	0,60	-0,55	-0,34	0,44	0,50	0,10	0,26	0,04	-0,62	-0,76	-0,75	0,66	0,48	0,76	0,12
SO3	0,21	0,16	0,30	-0,20	0,06	0,29	-0,20	0,23	0,31	1,00	-0,27	-0,42	-0,15	-0,09	0,72	0,35	-0,22	-0,59	0,67	-0,08	-0,03	0,15	-0,07	-0,04	0,06	0,07	0,09	0,24	0,29	0,02	-0,17	-0,07	0,30	-0,09	0,15	0,13
ZrO2	-0,20	-0,13	-0,36	0,31	-0,15	-0,49	0,56	-0,38	-0,52	-0,27	1,00	0,24	-0,01	0,23	-0,57	-0,40	0,29	0,15	-0,15	0,04	-0,10	-0,16	-0,03	-0,17	0,06	0,01	-0,18	0,01	0,10	0,00	-0,03	-0,22	0,39	-0,39	0,02	0,11
P2O5	-0,51	-0,46	-0,45	0,49	-0,32	-0,61	-0,02	-0,35	-0,55	-0,42	0,24	1,00	0,03	0,50	-0,46	-0,51	0,30	0,33	-0,15	-0,11	0,57	-0,53	0,66	0,18	-0,56	-0,63	0,04	0,06	-0,02	0,05	0,53	0,46	-0,42	-0,32	-0,49	-0,19
CaO	-0,23	-0,27	0,38	0,19	-0,31	-0,08	-0,40	0,47	0,36	-0,15	-0,01	0,03	1,00	0,30	-0,01	0,05	-0,16	0,63	-0,15	-0,22	0,07	0,04	0,04	-0,25	-0,11	-0,07	0,14	0,49	0,48	-0,01	-0,23	-0,25	0,41	-0,14	0,19	-0,21
MnO	-0,59	-0,47	-0,19	0,63	-0,59	-0,56	-0,03	-0,13	-0,38	-0,09	0,23	0,50	0,30	1,00	-0,17	-0,34	-0,10	0,22	0,14	-0,50	0,59	-0,59	0,68	-0,05	0,64	-0,69	0,06	0,25	0,60	0,59	0,60	0,63	-0,25	0,71	-0,62	-0,57
ZnO	0,38	0,37	0,57	-0,41	0,27	0,42	-0,30	0,53	0,61	0,72	-0,57	-0,46	-0,01	-0,17	1,00	0,69	-0,02	-0,46	0,53	0,09	-0,03	0,32	-0,13	-0,10	0,08	0,12	0,25	0,35	-0,08	-0,28	-0,10	0,31	0,06	0,25	0,15	
Rb2O	0,51	0,52	0,65	-0,54	0,40	0,49	-0,34	0,72	0,79	0,35	-0,40	-0,51	0,05	-0,34	0,69	1,00	0,00	-0,31	0,28	0,25	-0,35	0,55	-0,46	-0,20	0,39	0,43	0,08	0,11	0,03	-0,45	-0,63	-0,58	0,56	0,37	0,62	0,33
Z	0,24	0,38	0,16	-0,15	0,30	-0,21	0,24	0,01	-0,05	-0,22	0,29	0,30	-0,16	-0,10	-0,02	0,00	1,00	-0,29	0,03	0,41	-0,03	0,15	-0,06	-0,07	0,13	0,05	0,08	-0,32	-0,46	-0,53	-0,17	-0,12	0,06	0,30	0,23	0,36
Ph	-0,30	-0,38	-0,20	0,20	-0,20	-0,12	-0,06	-0,07	-0,12	-0,59	0,15	0,33	0,63	0,22	-0,46	-0,31	-0,29	1,00	-0,60	-0,13	0,20	-0,03	0,17	-0,13	-0,21	-0,19	0,21	0,39	0,35	0,10	0,08	-0,09	-0,08	-0,06	-0,10	-0,12
T	0,06	0,11	0,21	0,02	-0,10	0,05	-0,11	0,17	0,16	0,67	-0,15	-0,15	-0,15	0,14	0,53	0,28	0,03	-0,60	1,00	-0,16	-0,05	-0,19	0,03	0,07	0,01	-0,02	-0,24	-0,10	-0,08	0,07	0,01	0,11	0,21	-0,26	-0,02	-0,14
Rn	0,67	0,45	0,20	-0,58	0,60	0,40	0,30	0,06	0,12	-0,08	0,04	-0,11	-0,22	-0,50	0,09	0,25	0,41	-0,13	-0,16	1,00	-0,39	0,45	-0,46	0,36	0,55	0,51	0,00	0,06	-0,28	-0,35	-0,45	-0,30	0,26	0,43	0,45	0,47
(ρ)	-0,32	-0,09	-0,27	0,26	-0,11	-0,43	-0,09	-0,26	-0,42	-0,03	-0,10	0,57	0,07	0,59	-0,03	-0,35	-0,03	0,20	-0,05	-0,39	1,00	-0,37	0,95	-0,06	-0,97	-0,96	0,59	0,20	0,34	0,31	0,43	0,44	-0,48	-0,17	-0,44	-0,19
(W)	0,65	0,73	0,60	-0,73	0,66	0,54	0,16	0,40	0,60	0,15	-0,16	-0,53	0,04	-0,59	0,32	0,55	0,15	-0,03	-0,19	0,45	-0,37	1,00	-0,63	-0,36	0,51	0,58	0,52	0,11	-0,09	-0,59	-0,76	-0,77	0,41	0,76	0,76	0,73
(pd)	-0,46	-0,30	-0,41	0,44	-0,30	-0,53	-0,13	-0,35	-0,55	-0,07	-0,03	0,66	0,04	0,68	-0,13	-0,46	-0,06	0,17	0,03	-0,46	0,95	-0,60	1,00	0,07	-0,97	-0,99	0,32	0,12	0,30	0,43	0,60	0,60	-0,53	-0,38	-0,61	-0,39
(ps)	0,00	-0,35	-0,44	0,01	-0,03	0,16	0,11	-0,43	-0,34	-0,04	-0,17	0,18	-0,25	-0,05	-0,10	-0,20	-0,07	-0,13	0,07	0,36	-0,06	-0,36	0,07	1,00	0,10	0,07	-0,42	0,11	-0,07	0,31	0,38	0,38	-0,40	-0,16	-0,38	-0,18
(e)	0,47	0,23	0,32	-0,41	0,27	0,52	0,16	0,25	0,44	0,06	0,06	-0,56	-0,11	-0,64	0,08	0,39	0,13	-0,21	0,01	0,55	-0,97	0,51	-0,97	0,10	1,00	0,99	-0,45	-0,15	-0,34	-0,39	-0,51	-0,52	0,46	0,32	0,52	0,37
(n)	0,46	0,26	0,35	-0,44	0,30	0,55	0,15	0,29	0,50	0,07	0,01	-0,63	-0,07	-0,69	0,12	0,43	0,05	-0,19	-0,02	0,51	-0,96	0,58	-0,99	0,07	0,99	1,00	-0,38	-0,10	-0,31	-0,39	-0,55	-0,55	0,48	0,35	0,55	0,37
(Sr)	0,23	0,50	0,26	-0,33	0,41	0,03	0,07	0,09	0,10	0,09	-0,18	0,04	0,14	0,06	0,25	0,08	0,08	0,21	-0,24	0,00	0,59	0,52	0,32	-0,42	-0,45	-0,38	1,00	0,31	0,30	-0,16	-0,25	-0,24	-0,06	0,44	0,24	0,43
Granulo	-0,18	-0,36	0,34	0,12	-0,27	0,08	-0,41	0,39	0,26	0,24	0,01	0,06	0,49	0,25	0,32	0,11	-0,32	0,39	-0,10	0,06	0,20	0,11	0,12	0,11	-0,15	-0,10	0,31	1,00	0,75	0,02	-0,07	-0,05	0,21	-0,17	0,04	-0,11
A.G	-0,25	-0,36	0,05	0,20	-0,29	-0,06	-0,23	0,18	0,04	0,29	0,10	-0,02	0,48	0,60	0,35	0,03	-0,46	0,35	-0,08	-0,28	0,34	-0,09	0,30	-0,07	-0,34	-0,31	0,30	0,75	1,00	0,45	0,20	0,25	0,04	-0,46	-0,26	-0,23
A.M	-0,39	-0,48	-0,66	0,48	-0,43	-0,33	0,20	-0,55	-0,62	0,02	0,00	0,05	-0,01	0,59	-0,08	-0,45	-0,53	0,10	0,07	-0,35	0,31	-0,59	0,43	0,31	-0,39	-0,39	-0,16	0,02	0,45	1,00	0,70	0,77	-0,46	-0,70	-0,77	-0,54
A.F	-0,65	-0,61	-0,84	0,60	-0,47	-0,54	0,09	-0,68	-0,76	-0,17	-0,03	0,53	-0,23	0,60	-0,28	-0,63	-0,17	0,08	0,01	-0,45	0,43	-0,76	0,60	0,38	-0,51	-0,55	-0,25	-0,07	0,20	0,70	1,00	-0,80	-0,69	-1,00	-0,56	
A.T	-0,48	-0,40	-0,65	0,43	-0,34	-0,35	0,15	-0,59	-0,75	-0,07	-0,22	0,46	-0,25	0,63	-0,10	-0,58	-0,12	-0,09	0,11	-0,30	0,44	-0,77	0,60	0,38	-0,52	-0,55	-0,24	-0,05	0,25	0,77	1,00	-0,78	-0,72	-1,00	-0,59	
Silte	0,28	0,19	0,81	-0,17	0,01	0,19	-0,20	0,79	0,66	0,30	0,39	-0,42	0,41	-0,25	0,31	0,56	0,06	-0,08	0,21	0,26	-0,48	0,41	-0,53	-0,40	0,46	0,48	-0,06	0,21	0,04	-0,46	-0,80	-0,78	1,00	0,13	0,78	0,21
Argila	0,71	0,77	0,43	-0,78	0,75	0,63	0,07	0,20	0,48	-0,09	-0,39	-0,32	-0,14	-0,71	0,06	0,37	0,30	-0,06	-0,26	0,43	-0,17	0,76	-0,38	-0,16	0,32	0,35	0,44	-0,17	-0,46	-0,70	-0,69	-0,72	0,13	1,00	0,72	0,69
Finos	0,65	0,62	0,84	-0,61	0,48	0,53	-0,10	0,68	0,76	0,15	0,02	-0,49	0,19	-0,62	0,25	0,62	0,23	-0,10	-0,02	0,45	-0,44	0,76	-0,61	-0,38	0,52	0,55	0,24	0,04	-0,26	-0,77	-1,00	-1,00	0,78	0,72	1,00	0,58
MO	0,72	0,59	0,04	-0,69	0,76	0,40	0,31	-0,05	0,12	0,13	0,11	-0,19	-0,21	-0,57	0,15	0,33	0,36	-0,12	-0,14	0,47	-0,19	0,73	-0,39	-0,18	0,37	0,37	0,43	-0,11								