

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO EM CARVÃO MINERAL

Leonardo Alfredo Salim

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Leonardo Alfredo Salim

TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO EM CARVÃO MINERAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Rio Claro - SP

2017

LEONARDO ALFREDO SALIM

TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO EM CARVÃO
MINERAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto (orientador)

Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen

Prof. Dr. Antônio Carlos Artur

Rio Claro, 6 de julho de 2017.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U ($4n+2$), ^{232}Th ($4n$) e do ^{235}U ($4n+3$).	9
Figura 2 - Distribuição de urânio em rochas ígneas	14
Figura 3 - Decaimento radioativo do ^{224}Ra , produzindo ^{220}Rn , que por recuo é interceptado pela fase fluida circundante (ar/água subterrânea).....	16
Figura 4 - Atividade relativa em função de unidades de meia vida.....	20
Figura 5 - Localização do município de Figueira nos territórios brasileiro e paranaense	22
Figura 6 - Mapa geomorfológico da região de Figueira	23
Figura 7 - Carta estratigráfica com as unidades do Carbonífero e Permiano da Bacia do Paraná com destaque à Formação Rio Bonito.	25
Figura 8 - Cobertura sedimentar paleozóica da Bacia do Paraná	25
Figura 9 - Mapa geológico da região de Figueira (PR).	26
Figura 10 - Camada de carvão explorada com espessura de aproximadamente 70 cm	28
Figura 11 – Beneficiamento do carvão lavrado	29
Figura 12 - Alpha Guard PQ2000PRO.	30
Figura 13 - Amostra de carvão e cinzas condicionadas para análise	32
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.....	33
Figura 15 – Sistema espectrométrico gama instalado no Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO).	36
Figura 16 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C1.	39
Figura 17 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C2.	39
Figura 18 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C3.....	39

Figura 19 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C4.	40
Figura 20 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C5.	40
Figura 21 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra CZ-1	40
Figura 22 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra CZ-2.	41
Figura 23 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra CZ-3.	41
Figura 24 - Taxa da exalação de Rn no período de análise de cada amostra.....	42
Figura 25 - Teor de urânio e tório de cada amostra analisada	45
Figura 26 - Correlação entre o teor de U, Th e média da concentração de Rn exalado nos ciclos de análise.	46
Figura 27 - Corelação entre o teor de U e o de Rn	46
Figura 28 - Corelação entre o teor de Th e o de Rn	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração média de tório para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.	12
Tabela 2 – Conteúdo de urânio em minerais de rochas	14
Tabela 3 - Concentração média de urânio para alguns tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.	15
Tabela 4 – Energia e probabilidade de emissão das partículas α dos isótopos de radônio	17
Tabela 5 – Atividade relativa em função de unidades de meia vida.	20
Tabela 6 – Atividade relativa em função do tempo para ^{219}Rn , ^{220}Rn e ^{222}Rn	21
Tabela 7 – Concentração de radônio em cada ciclo de análise	38
Tabela 8 - taxa da exalação de Rn no período de análise.	42

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 . Neste estudo foram analisadas amostras de carvão mineral da Companhia Carbonífera do Cambuí, localizada na cidade de Figueira, Paraná, Brasil; e a sua respectiva cinza, resultado de sua queima na usina termoeletrica. As concentrações de radônio nas amostras de carvão variaram de 55,66 a 873 Bq/m³, enquanto que as amostras de cinza variaram de 91 a 2266,66 Bq/m³. Nas amostras de carvão a concentração de urânio e tório variaram respectivamente em 0,44 a 8,42 ppm e 0,64 a 2,37 ppm, e nas amostras de cinza variaram respectivamente em 122,45 a 129,01 ppm e 19,75 a 29,29 ppm. Obtendo-se uma boa correlação entre a concentração de radônio exalado pelas amostras e os teores de ^{238}U e ^{232}Th . Alguns valores de concentração ultrapassaram o valor estipulado de 200 Bq/m³ pelos comitês internacionais, os quais podem gerar riscos para saúde em locais com pouca ou sem ventilação. Os resultados da taxa de exalação com o decorrer do tempo obtiveram boas correlações sendo coerente com a literatura, onde observou um comportamento decrescente, o qual se explica com a diminuição da atividade do gás radônio com o decorrer do tempo.

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 this study, coal samples from the Carbonífera do Cambuí Company were analyzed, located in the city of Figueira, Paraná, Brazil; and its respective ash, the result of its burning in the thermoelectric plant. The radon concentrations in the coal samples ranged from 55.66 to 873 Bq/m³, while the ash samples varied from 91 to 2266.66 Bq/m³. In the coal samples the uranium and thorium concentration varied respectively from 0.44 to 8.42 ppm and from 0.64 to 2.37 ppm, and in the ash samples varied respectively from 122.45 to 129.01 ppm and 19.75 at 29.29 ppm. A good correlation between the radon concentration exhaled by the samples and the contents of ^{238}U and ^{232}Th was obtained. Some concentration values exceeded the stipulated amount of 200 bq / m³ by the international committees, which can generate health risks in places with little or no ventilation. The results of the exhalation rate over time obtained good correlations being consistent with the literature, where it observed a decreasing behavior, which is explained by the decrease of the radon gas activity with the passage of time.

keywords: Radon, Mineral Coal, Exhalation rate, Radiation

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 CONCEITOS BÁSICOS	5
3.1 Quantificação da Radioatividade	6
3.2 Séries radioativas	7
3.3 Ocorrência de tório e urânio nas rochas	10
3.3.1 Tório	10
3.3.2 Urânio	12
3.4 Radônio	16
3.5 Equilíbrio Radioativo Secular	17
3.6 Diminuição da atividade isotópica de radônio	19
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	22
4.1 Geologia Regional	24
4.2 A mineração de carvão em Figueira	28
5. MATERIAIS E MÉTODOS	30
5.1 Determinação da taxa de exalação de radônio	30
5.1.1 Rotina de ensaio.....	31
5.1.2 Análise dos dados	34
5.2 Espectrometria Gama	34
5.2.1 Sistema Espectrométrico.....	35
5.2.2 Calibração do sistema em concentração	36
6 RESULTADOS	37
6.1 Quantificação da exalação de radônio	37
6.2 Concentrações de Urânio e Tório	44
6.3 Correlações dos dados	45

7 CONCLUSÕES	47
8 REFERÊNCIAS.....	49
ANEXO A – ESPECTROSGAMA	56

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 e ^{222}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 progenias 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.

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).

²²⁰Rn e ²²²Rn 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 ²²⁰Rn. Para suas análises é necessário utilizar uma metodologia que os discrimine, para que um não interfira no valor do outro (TOKONAMI, 2010).

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 lá 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 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 materiais radioativos naturais, devido principalmente ao seu conteúdo de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K (BALOGUNA et al., 2003).

Muitos trabalhos já foram realizados para determinar da concentração de radônio em minas de carvão, devido a quantidade de casos de câncer registrados em trabalhadores neste tipo de mina. Fisne et al. (2005) realizou medições de radônio nas minas de carvão subterrâneas Kozlu, Karadon e Uzulmez na Turquia, onde obteve níveis superiores a 1000 Bq/m^3 na frente de lavra. Qureshi et al. (2000) realizou medições em algumas minas de carvão de Balushistan, no Paquistão, onde obteve concentrações que variaram de 121 a 408 Bq/m^3 . Kobal et al. (1990) fez estudos em 10 minas de carvão na Eslovênia onde a concentração de radônio chegou a $0,5 \text{ kBq/m}^3$.

O carvão extraído e beneficiado em Figueira abastece a termelétrica do município, que dista cerca de 6 Km do complexo mineiro. 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 urânio 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.

Pandit et al. (2011) e 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 U^{238} e Th^{232} , elementos que iram gerar os isótopos de radônio. Desta forma uma investigação dos rejeitos da queima do carvão é necessária.

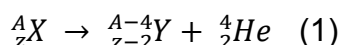
2 OBJETIVOS

- Determinação da taxa de exalação de radônio no carvão e cinza, e criar uma curva que represente a mesma.
- Utilizando espectrometria quantificar a concentração de urânio e tório e correlacionar com a concentração de radônio.

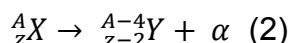
3 CONCEITOS BÁSICOS

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: através 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:



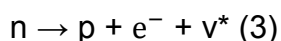
ou



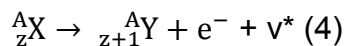
Os núcleos emissores de partícula α são, principalmente, aqueles com grande número de massa, nos quais a repulsão coulombiana entre os prótons é muito grande.

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.

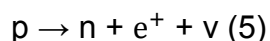
Quando o número de nêutrons é grande comparado ao número de prótons, o núcleo correspondente pode ser instável e o número de nêutrons pode ser diminuído pela transformação de um nêutron num próton (decaimento β^-). Essa transformação é acompanhada da emissão de um elétron (e^-) e de um antineutrino (ν^*):



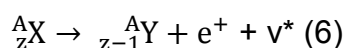
Em um decaimento β^- o número de atômico aumenta de uma unidade, diminuindo o número de nêutrons em uma unidade, permanecendo constante o número de massa.



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 nuclídeos (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 nuclídeos), então, é possível escrever:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

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	Po-210 138d	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 ↓	Bi-212 60.5s	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 abundante 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 concentração de tório em condritos é da ordem de 0,04 ppm, enquanto que nos acondritos é superior a esta. 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 paragéneses 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.

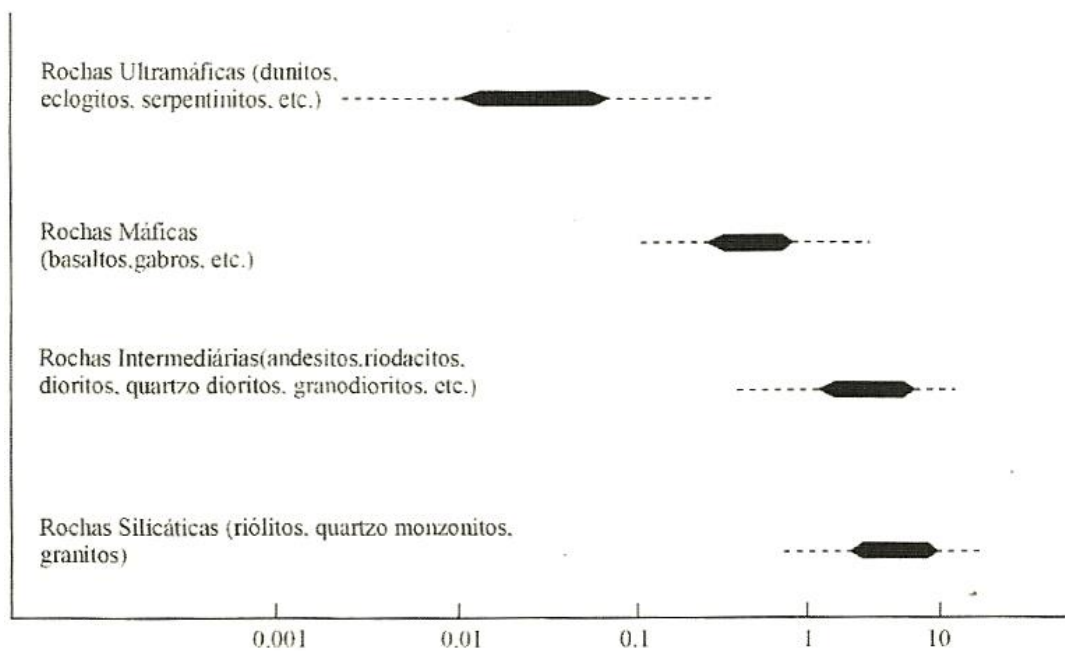
Nas rochas Sedimentares, os arenitos se destacam como os que geralmente apresentam maiores concentrações de urânio, o qual normalmente está disseminado nos minerais ortoquartzíticos; podem também ocorrer nos minerais de quartzo nos grãos mais pesados e resistentes. A Tabela 3 apresenta as concentrações 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
	Fósficas	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
	Paragnaisse	4,5
	Granulito	4,9
	Ortognaisse	3,6
	Cordierita gnaisse	5,8
	Mármore	0,17
	Filito	1,9
	Xisto	2,5
	Rochas máficas	3,2

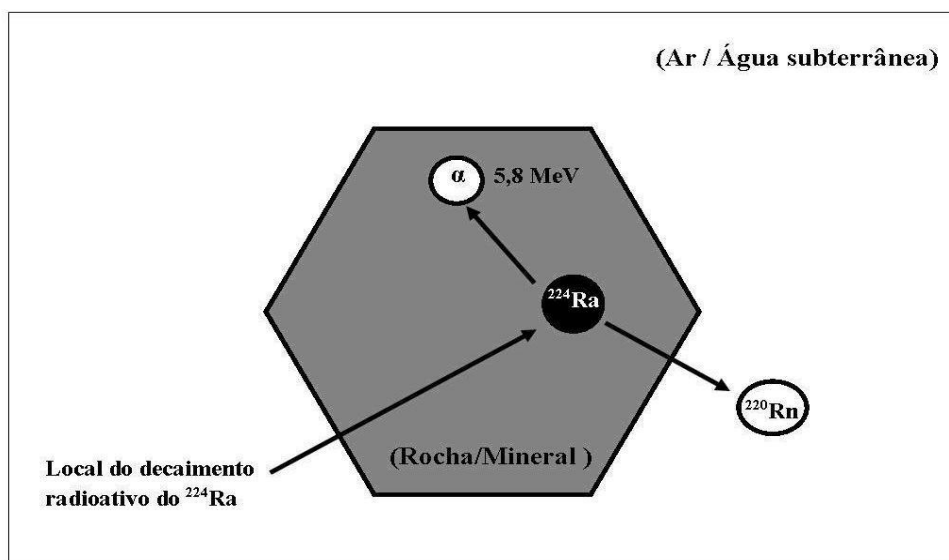
Fonte: Rogers e Adams (1969a).

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 .

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 ^{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).

Figura 3 - Decaimento radioativo do ^{224}Ra , produzindo ^{220}Rn , que por recuo é interceptado pela fase fluida circundante (ar/água subterrânea).



Fonte: Elaborado pelo autor

^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn , com meias-vidas de 3,83 dias, 54,5 segundos e 3,52 segundos respectivamente, são elementos instáveis e decaem por

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 13 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:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (17)$$

Substituindo a equação 10 na 17, obtém-se a expressão:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\frac{0,693}{T_1} \cdot t} \quad (18)$$

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

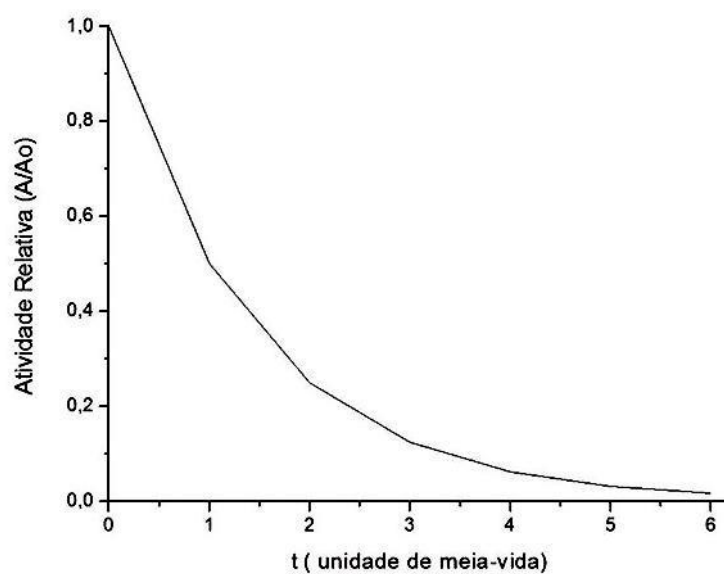
A Tabela 5 apresenta valores de unidades de meia-vida em função da atividade relativa (A_0/A) e a Figura 4 mostra o gráfico obtido a partir dos valores apresentados. O decréscimo da atividade em função do número de meias-vidas representado na Tabela 5 pode ser avaliado para os isótopos de radônio: ^{219}Rn (actínio), ^{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/Ao
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 .

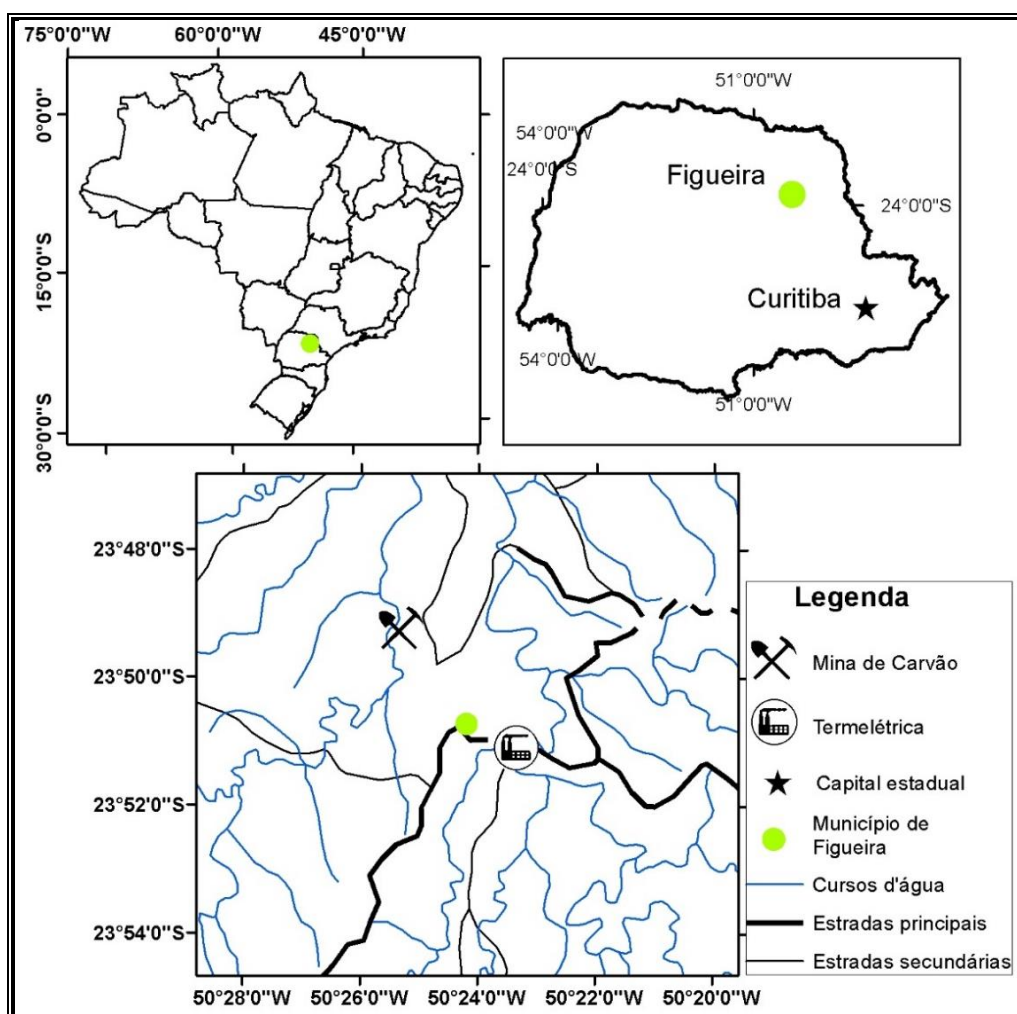
A/A0	Tempo		
	Rn-219	Rn-220	Rn-222
1	0	0	0
0,5	3,52 s	54,5 s	3,83 dias
0,25	7,04 s	109,0 s	7,66 dias
0,125	10,56 s	163,5 s	11,49 dias
0,062	14,08 s	218,0 s	15,32 dias
0,031	17,60 s	272,5 s	19,15 dias
0,016	21,12 s	327,0 s	22,98 dias

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

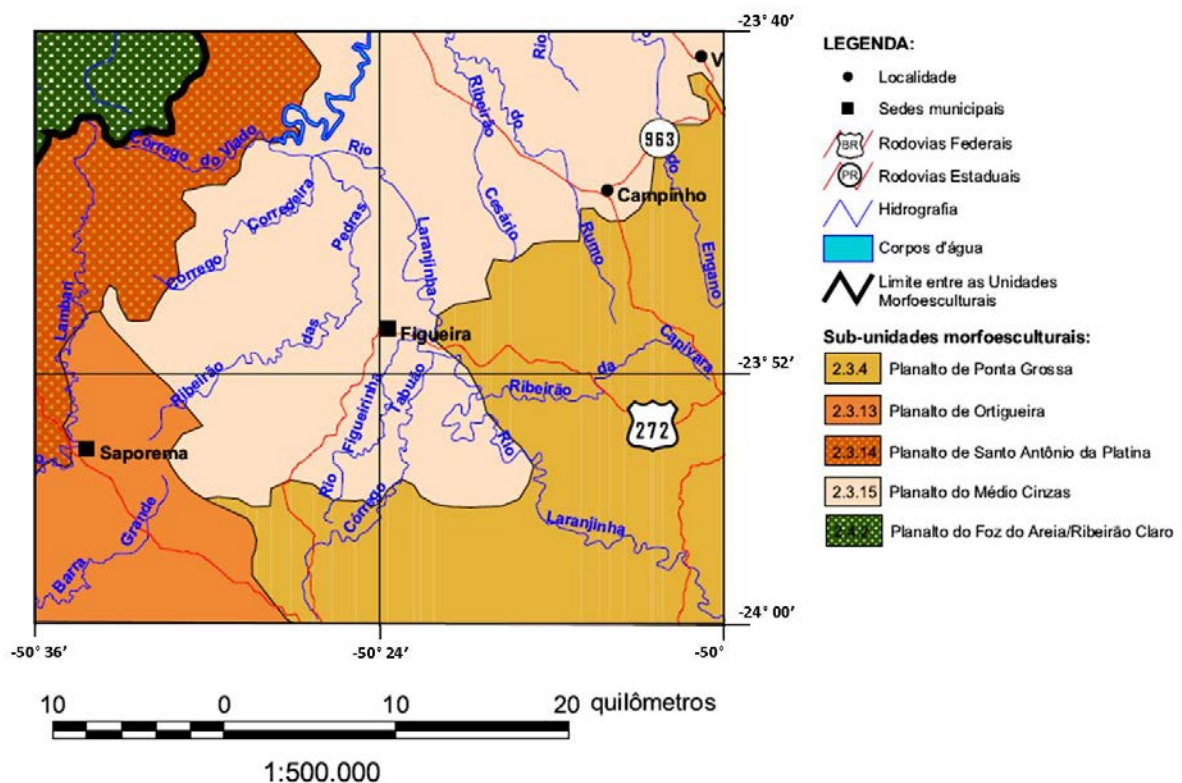


Fonte: Galhardi (2016)

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) e 940 (máxima) m. s. n.

m (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) m. s. n. m. 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 e com alta saturação de alumínio trocável (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-

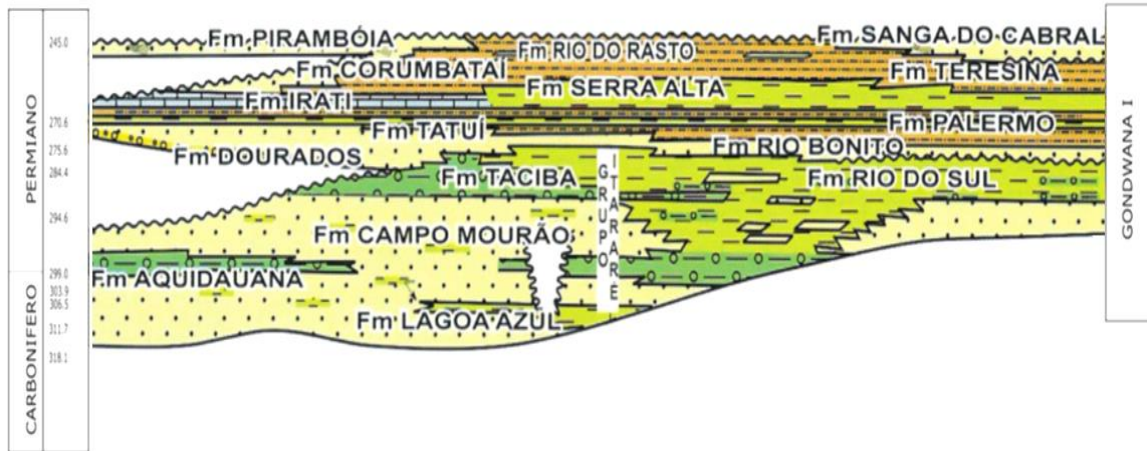
frio (abril a setembro, com temperaturas médias mensais entre 13° e 17°C), tendo assim uma temperatura média anual de 18,5°. A precipitação anual varia entre 1400 mm e 1600 mm. Nos meses mais secos a pluviosidade fica entre 200 mm e 250 mm enquanto que nos meses mais chuvosos a precipitação vai de 500 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).

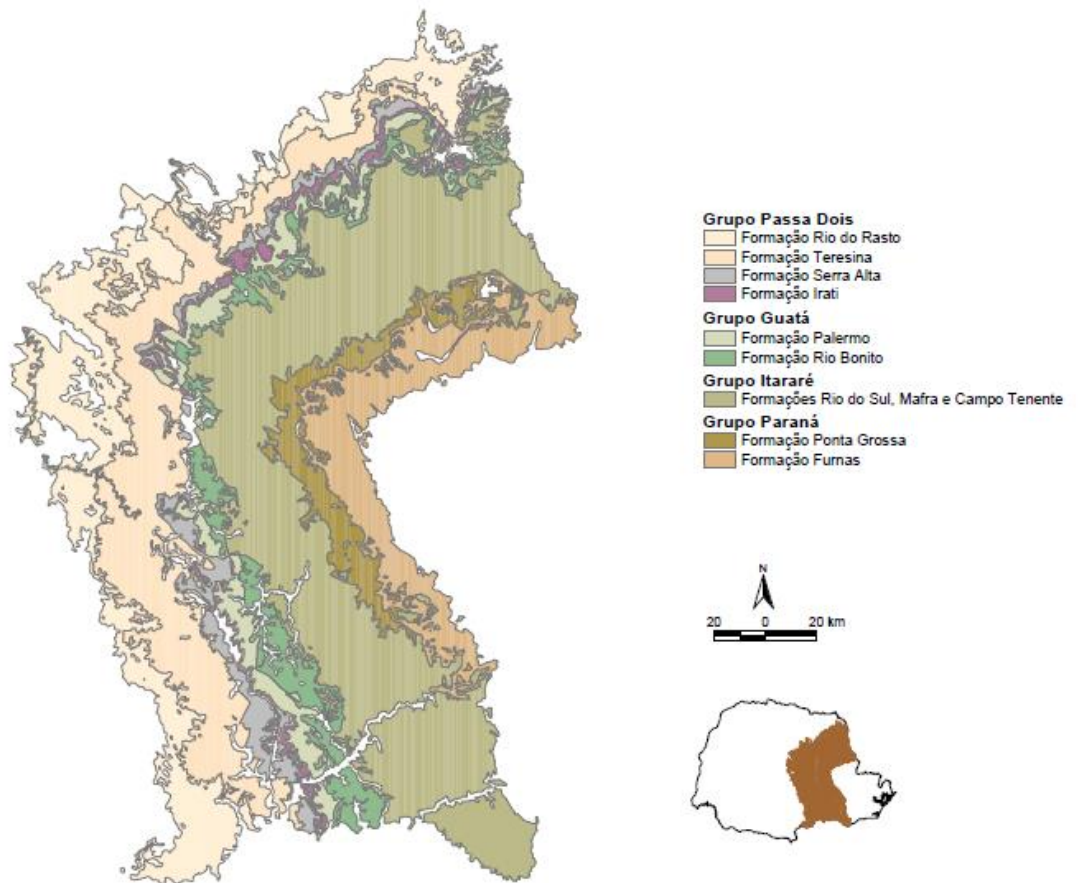
Conforme a proposta apresentada por Milani *et al.* (1997; 2007), a estratigrafia da Bacia do Paraná é composta por seis supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neo-jurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). A área de estudo está contida na Supersequência Gondwana I (Figura 7), 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 8). Ocorrendo também o afloramento da sequência Gondwana III, representada pelo derrame basáltico da Formação Serra Geral (Figura 9).

Figura 7 - Carta estratigráfica com as unidades do Carbonífero e Permiano da Bacia do Paraná com destaque à Formação Rio Bonito.



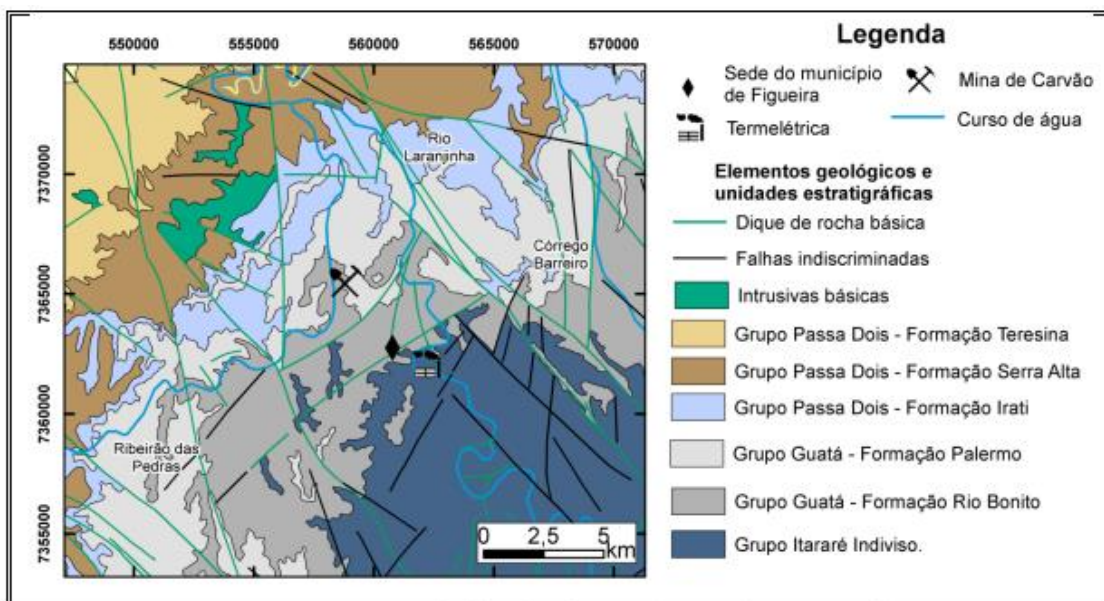
Fonte: Modificado de Milani (2007)

Figura 8 - Cobertura sedimentar paleozóica da Bacia do Paraná



Fonte: Modificado de MINEROPAR (2001)

Figura 9 - Mapa geológico da região de Figueira (PR).



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

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, base 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, topo 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 sequência 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). Nas minas da Carbonífera Cambuí nos arredores de Figueira, o carvão é constituído por detritos vegetais alóctones,

retrabalhados e concentrados por agentes marinhos, tais como ondas (ZACHARIAS ; ASSINE, 2005).

Tomassi (1973) classifica o sistema deposição da Formação Rio Bonito como fluvial na sequência basal e transicional e marinha nas sequências médio e superior.

A Formação Palermo, possui contato transicional com intercalação de camadas com a Formação Rio Bonito. É formada por siltitos cinzas, frequentemente alterados para amarelo-esverdeado. Apresentando camadas arenosas e calcíferas no topo 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, possui aproximadamente 45 metros de espessura. Encontra-se sobrejacente à Formação Palermo, tendo contato concordante gradacional entre elas. Segundo Schneider et al, (1974) pode ser dividida em uma sequência superior (Membro Assistência), formada por folhelhos pirobetuminosos intercalados com calcários, e uma sequência basal (Membro Taquaral), constituído por folhelhos, 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 interlaminações 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 uma pequena intercalação de siltito carbonoso; teor de cinzas na camada variando aproximadamente de 18% a 30% e teor de enxofre variando de 7% a 12%.

Na mina atualmente explorada pela Cambuí, a espessura da camada de carvão varia entre 0,50 m e 0,85 m, e ela se encontra em uma profundidade de 120 m (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 10 - Camada de carvão explorada com espessura de aproximadamente 70 cm



Fonte: Elaborado pelo autor

A lavra do carvão ocorre de forma subterrânea (Figura 11). 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 11). O beneficiamento gera dois tipos de produto: carvão grosso apresentando a granuiometria de 5 a 38 mm com 20% de cinzas e o carvão fino que possui granuiometria entre 0,5 e 5 mm com 20 % de cinzas (SHUQAIR, 2002).

Figura 11 – Beneficiamento do carvão lavado



Fonte: Elaborado pelo autor

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Determinação da taxa de exalação de radônio

Para a medição da exalação do gás radônio foi utilizado o espectrômetro alfa Alpha Guard PQ2000PRO Alpha (Genitron GmbH), seguindo um 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, são quantificados e digitalizados na saída da câmara. Um eletrodo lê as taxas de ionização (pulsos) que são processados por uma unidade pré-amplificadora muito sensível, constituído por três canais independentes em uma rede de processamento digital, permitindo realizar uma diferenciação eficaz entre eventos alfa e efeitos de interferência, e medir 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 ° C), a pressão de ar (a partir de 700 mbar a 1,100 mbar), e a humidade 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/m³ a 2 MBq/m³ de concentração ²²²Rn (GENITRON, 2000). Uma desvantagem deste dispositivo é que detectar emissores alfa, sem discriminação de energia. Por essa razão, vale a pena examinar o quanto ²²⁰Rn presença pode aumentar o resultado da medição de ²²²Rn. Verificou-se por Ishikawa (2004), de que o AlphaGUARD trabalhando no modo de difusão tem uma sensibilidade relativa a ²²⁰Rn sobre o nível de 10%. Desta forma será utilizado o AlphaGUARD operando no modo de difusão para determinar sua sensibilidade para a determinação da concentração de ²²⁰Rn.

5.1.1 Rotina de ensaio

O monitoramento de radônio está sendo realizado em amostra de carvão e de cinzas (resultado da queima do carvão na termoelétrica), que foram coletados no interior da mina Cambuí e em pilhas de rejeito da termoelétrica, respectivamente. Estão sendo utilizados 1,5 e 2 kg de amostra de carvão e cinza, respectivamente.

Para esse estudo, está sendo utilizado o método de detecção ativa, executada 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 emanção das amostras selecionadas estão sendo empregados ciclos de aprisionamento (5, 10, 15, 20, 25, 30 dias) em sistema fechado.

As amostras de carvão e cinzas são condicionadas em recipiente de vidro Pyrex[®] (vidro borossilicatado resistente ao calor e ao ataque químico de compostos agressivos), no formato de garrafão, com rolha de 5 cm de diâmetro para vedação do ar exterior em relação ao interior, num vácuo superior a -400 mm/Hg com limite de -470 mm/Hg (Figura 13). Foram preparados 5 garrafões com carvão, cada um contendo 1,5 kg de amostra (C1, C2, C3, C4 e C5), e 3 garrafões com cinzas, cada um contendo 2kg de amostra (CZ-1, CZ-2 e CZ-3).

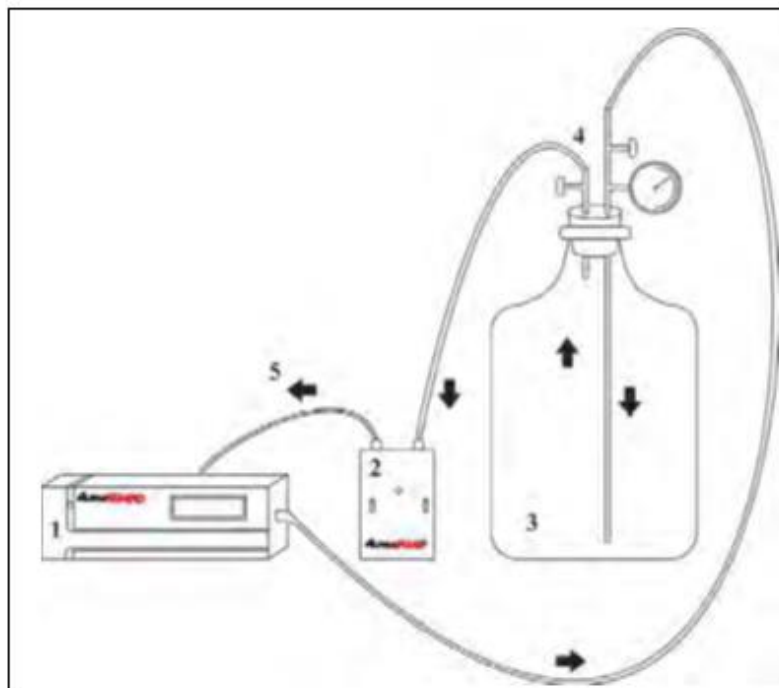
Figura 13 - Amostra de carvão e cinzas condicionadas para análise



Fonte: Elaborada pelo autor

Depois de atingir o período de confinamento proposto, o garrafão é conectado através de tubos de plástico flexível ao equipamento AlphaGUARD e a uma bomba para fazer a circulação do ar para dentro do aparelho. A rotina de ensaio é semelhante a empregada por Amaral (2011). 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 são aprisionadas. A circulação de ar é 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 Amaral (2011):

- Instala-se o sistema conforme visto na Figura 14
- Liga-se o aparelho e anotam-se os dados iniciais do aparelho, observando-se se o nível de marcação do radônio está no zero ou com a taxa de erro bem maior que os números iniciais.
- Aciona-se a bomba que irá ejetar e puxar ar do garrafão para dentro do aparelho em 1 L/min.
- Abrem-se as válvulas para começar a circulação do ar interno entre o garrafão e o aparelho.
- A bomba permanece ligada por 10 minutos, depois é desligada e anotado os dados, após cada 10 minutos decorridos também são coletados os dados, gastando-se um total de 30 minutos para medição. O aparelho é configurado internamente no modo de fluxo em 1 minuto, ou seja, a cada 1 minuto ele faz a

leitura do gás, mas a anotação do tempo só ocorre a cada 10 minutos de medição. É realizada a média das três últimas leituras anotadas de cada ciclo para posterior utilização.

- No final da medição de um ciclo, o sistema é desmontado e o espectrômetro alfa é limpo ejetando-se o ar filtrado através de um filtro de carvão ativo até que os níveis de radônio zerem, só depois, está liberado para a medição de outra amostra.

- Para o preparo de cada ciclo, é ejetado o ar no garrafão para a retirada de qualquer vestígio de gás do ciclo anterior e depois o sistema é fechado, sendo retirado o ar interno até atingir -420 mm/Hg de ar. Em seguida, anotam-se o dia, a hora e a quantidade de vácuo aplicada.

5.1.2 Análise dos dados

Para análise das concentrações de atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn obtidas nas medidas, os dados são transferidos para o *software* DataEXPERT para que a análise gráfica dos dados possa ser realizada. Através dessa análise é possível diferenciar a concentração de cada um dos isótopos de radônio.

5.2 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, tório e potássio na superfície rochosa e solos.

O seu uso seria mais efetivo na detecção e 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, tório e potássio, estes 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. 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).

A preparação das amostras para leituras de espectrometria de raios gama é simples, não-destrutiva e não necessita "spike" podendo os diversos radioelementos de interesse serem analisados simultaneamente.

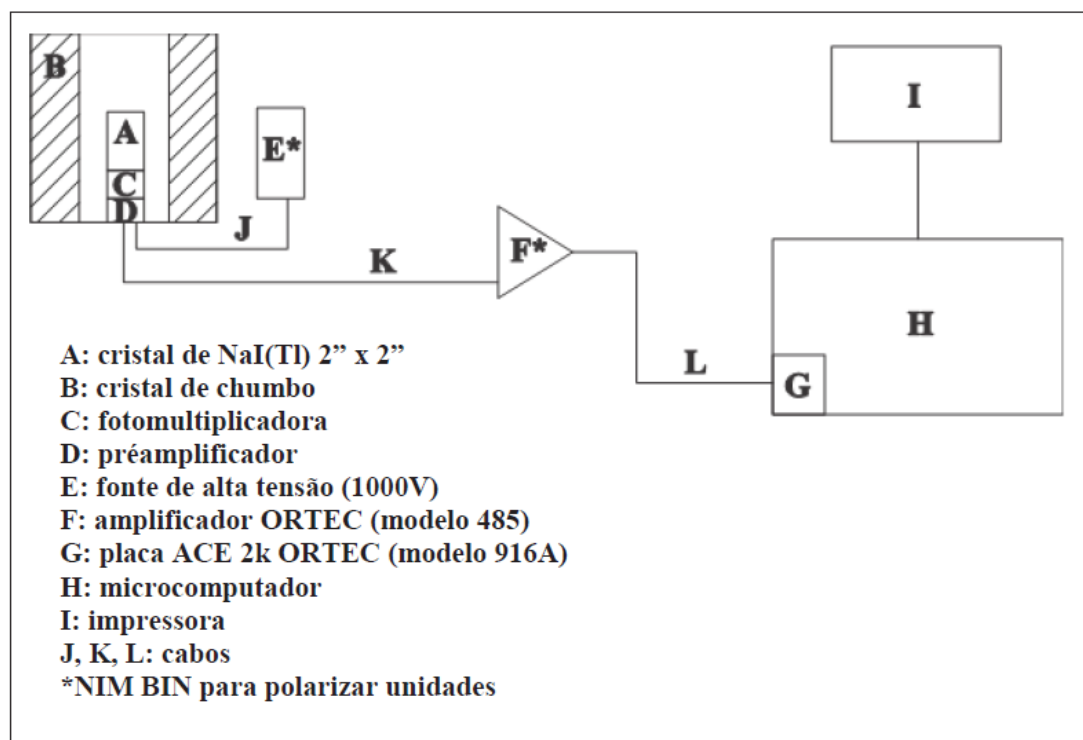
5.2.1 Sistema Espectrométrico

O espectrômetro gama utilizado (Figura 15), pertence ao Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO) do DPM/IGCE/UNESP de Rio Claro, 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).

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 15).

Figura 15 – Sistema espectrométrico gama instalado no Laboratório de Isótopos Instáveis (LABIDRO).



Fonte: Modificado de (DUARTE,2002)

Do pré-amplificador parte um cabo que conduz o sinal ao amplificador, e deste para o 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.

5.2.2 Calibração do sistema em concentração

Duarte (2002) realizou a calibração do sistema espectrométrico para concentração utilizando padrões com concentrações conhecidas dos nuclídeos 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}), que é linear e expressa pelas equações 19 e 20.

$$\log C_U = 1,057(\log I_u) + 2,578 \quad (19)$$

$$\log C_{Th} = 1,075(\log I_{Th}) + 2,578 \quad (20)$$

6 RESULTADOS

6.1 Quantificação da exalação de radônio

A quantificação da exalação do gás radônio foi obtida através do monitoramento da evolução temporal do referido gás em circuito fechado por meio de ciclos pré-definidos de 5, 10, 15, 20, 25 e 32 dias. Os resultados da exalação do gás Rn (Bq/m^3) fornecidos pelas amostras para cada ciclo estão reunidos na Tabela 7.

Pode-se observar que a amostra de C2 foi a que apresentou os valores mais baixos de exalação de radônio entre as estudadas, do primeiro ao último ciclo de monitoramento, onde as concentrações de radônio variaram de 55,66 a 127,66 B Bq/m^3 , e a amostra com maiores concentração foi a CZ-1 que apresentou uma variação de 1616,66 a 2266,66 Bq/m^3 (Tabela 7).

As Figuras 16 à 23 evidenciam a notória variação de comportamento do gás entre as amostras pesquisadas e as consideráveis oscilações da quantidade de exalação do gás radônio com relação aos diferentes ciclos de monitoramento, como também mostra que na maioria dos casos não há uma

estabilização da exalação do gás ao longo dos ciclos. Isso pode ter ocorrido devido aos distintos padrões de microdescontinuidades internas de cada amostra estudada, que podem influenciar diretamente na dinâmica de escape do gás radônio, impossibilitando observar uma nítida semelhança entre as curvas que correlacionam concentração de radônio em função do tempo das amostras de mesmo material.

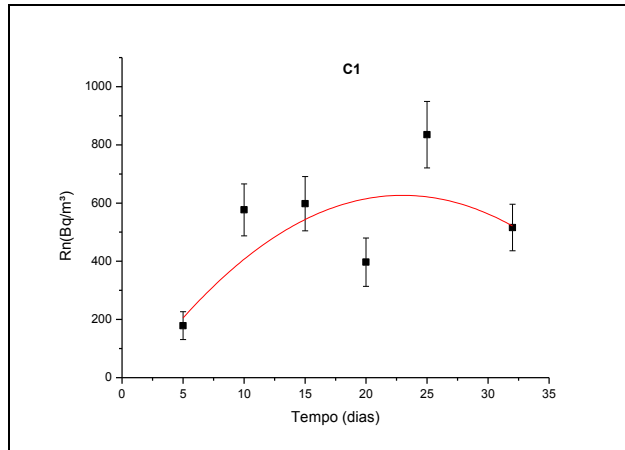
Caso a exalação se permanecesse constante durante todo os ciclos as curvas de evolução da concentração do gás radônio nas amostras estudadas, observadas nas Figuras 16 à 23, também deveriam se tornar constantes e atingir o equilíbrio radioativo após 22,5 dias de confinamento, período no qual o isótopo Rn^{222} , de maior meia-vida, ficaria em equilíbrio com sua progênie. Mas não pode ser observado graficamente, possivelmente porque uma parte do gás produzido não conseguiu escapar da estrutura cristalina para fazer fluido circundante. Mesmo assim é possível observar na maioria das curvas obtidas um aumento na concentração de gás nos primeiros 15 a 20 dias, e posteriormente, um comportamento decrescente ou constante da concentração nos demais dias.

Tabela 7 – Concentração de radônio em cada ciclo de análise

Amostra	5 dias (Bq/m³)	10 dias (Bq/m³)	15 dias (Bq/m³)	20 dias (Bq/m³)	25 dias (Bq/m³)	32 dias (Bq/m³)	Média (Bq/m³)
C1	178,66	576,66	597,66	397,00	835,00	516,00	516,83
C2	55,66	92,33	87,00	107,00	127,66	113,33	97,16
C3	151,66	334,33	123,00	132,66	137,66	306,00	197,55
C4	458,33	673,66	757,00	733,33	791,66	873,00	714,50
C5	134,33	149,66	267,66	128,66	167,33	440,00	214,61
CZ-1	1616,66	2083,33	1866,33	2266,66	1676,66	1740,00	1874,94
CZ-2	996,33	1970,00	1583,33	1406,66	1747,33	1933,00	1606,11
CZ-3	1049,00	1956,66	1446,66	1506,66	2166,66	91,00	1369,44

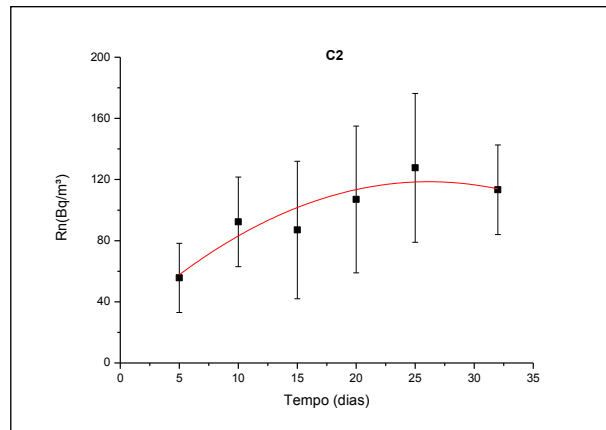
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C1.



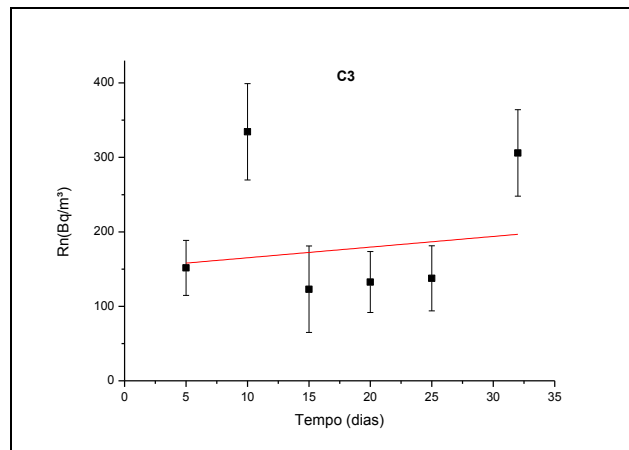
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C2.



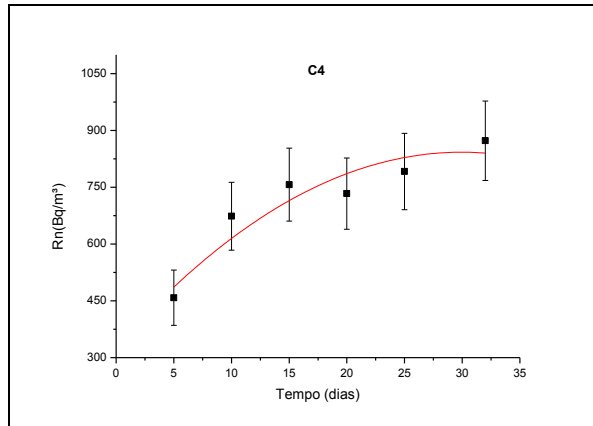
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C3.



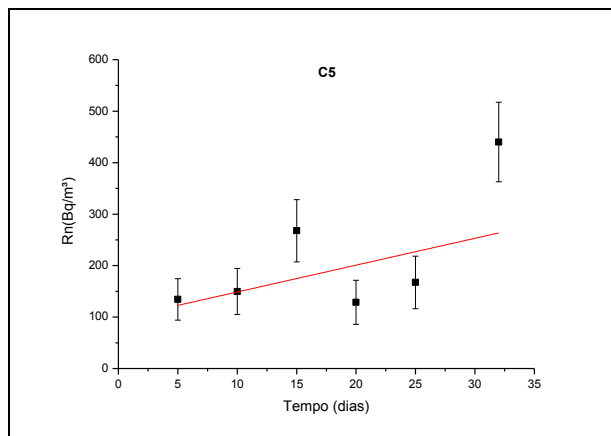
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C4.



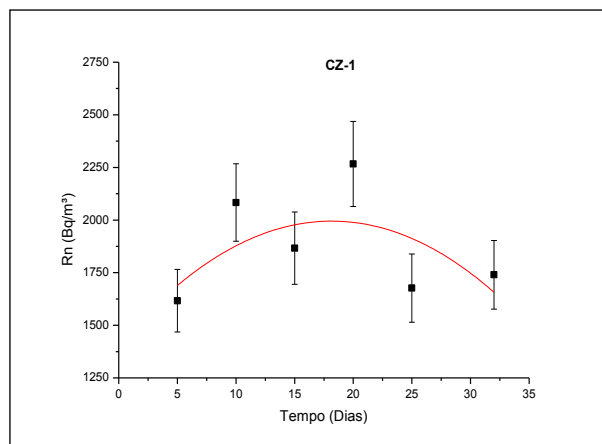
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra C5.



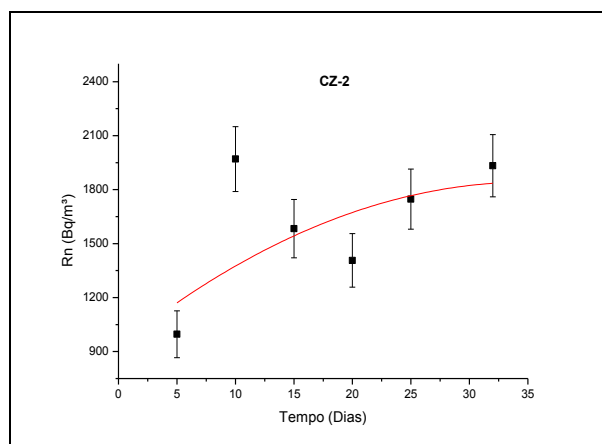
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra CZ-1.



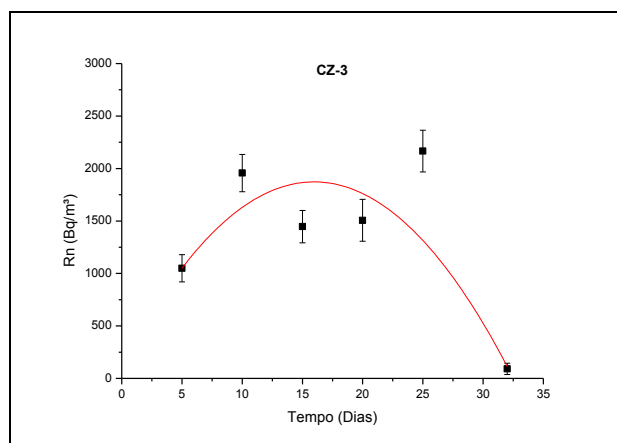
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra CZ-2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Evolução da concentração de Rn vs tempo de contagem da amostra CZ-3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar a taxa de exalação, ou seja, a quantidade de radônio liberado pelas amostras por ciclo, a concentração obtida em cada análise foi dividida pela quantidade de tempo decorrido desde o seu confinamento até o momento de sua análise. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

A Figura 24 mostra que taxa de exalação com o decorrer do tempo é decrescente, onde observamos uma boa correlação entre as variáveis. Este comportamento ocorre devido a meia-vida do Rn^{222} de 3,83 dias, o qual diminui sua atividade com o passar do tempo. Sendo importante lembrar-se da influência do Rn^{220} nos resultados mesmo possuindo uma meia-vida de 54,5

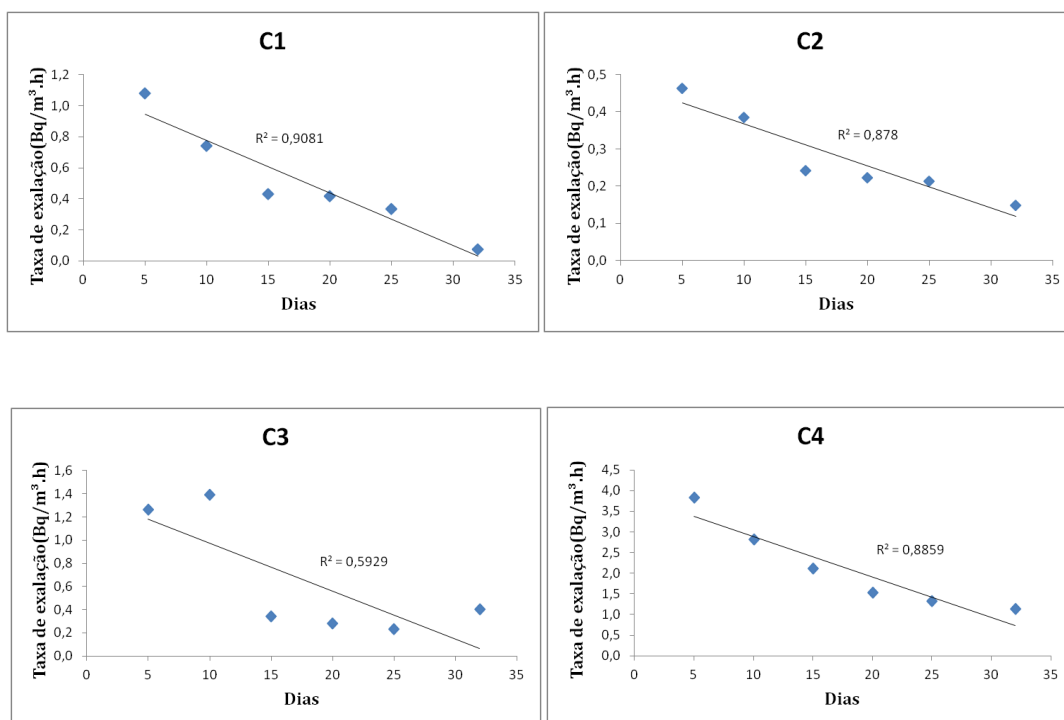
segundos, se algum material possuir grande quantidade de Ra²²⁴ uma grande quantidade de Rn²²⁰ será exalada.

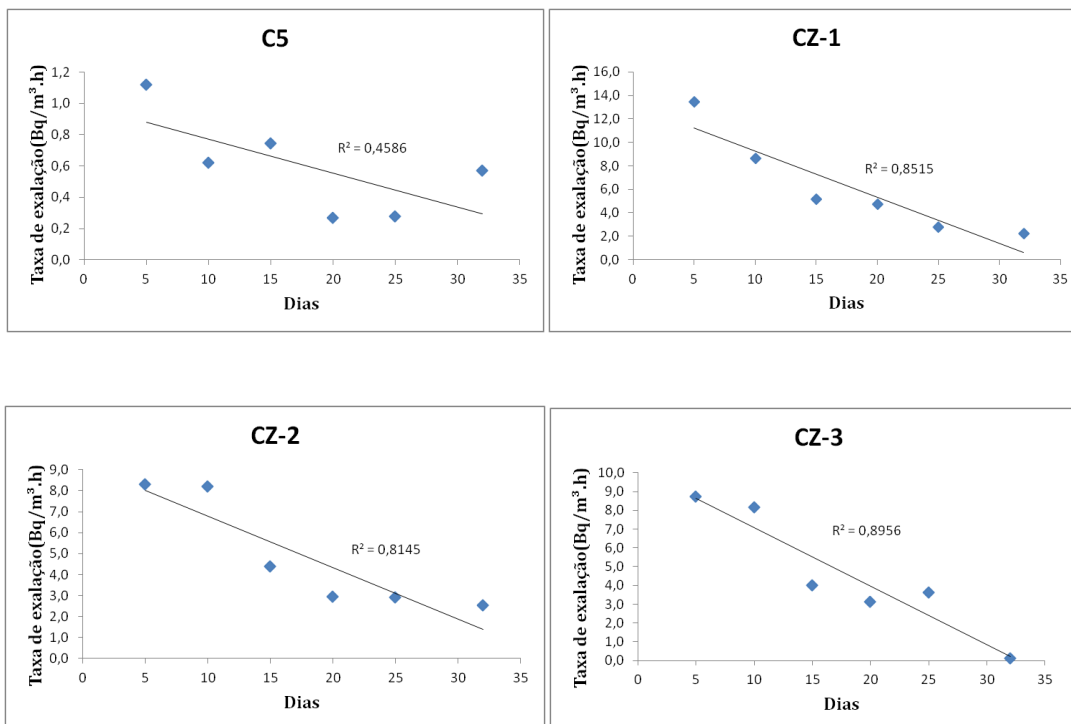
Tabela 8 - taxa da exalação de Rn no período de análise.

Amostra	5 dias (Bq/m ³ .h)	10 dias (Bq/m ³ .h)	15 dias (Bq/m ³ .h)	20 dias (Bq/m ³ .h)	25 dias (Bq/m ³ .h)	32 dias (Bq/m ³ .h)
C1	1,49	2,40	1,66	0,83	1,39	0,67
C2	0,46	0,38	0,24	0,22	0,21	0,15
C3	1,26	1,39	0,34	0,28	0,23	0,40
C4	3,82	2,81	2,10	1,53	1,32	1,14
C5	1,12	0,62	0,74	0,27	0,28	0,57
CZ-1	13,47	8,68	5,18	4,72	2,79	2,27
CZ-2	8,30	8,21	4,40	2,93	2,91	2,52
CZ-3	8,74	8,15	4,02	3,14	3,61	0,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Taxa da exalação de Rn no período de análise de cada amostra.





Fonte: Elaborado pelo autor.

Como citado anteriormente, a *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) e a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) tem como valor de referência limite, considerado normal, 200 Bq/m³. Os resultados da concentração de radônio na amostras, apresentados na Tabela 7, mostram que somente a amostra C2 não ultrapassou em nenhum ciclo o valor estipulado de 200 Bq/m³. Sendo importante resaltar que o gás estava confinado e não escapou. Então é relevante considerar que em um ambiente onde tenha circulação de ar, que o gás seja diluído, diminuindo sua concentração. Apesar desta consideração, as amostras C1 e C4 obtiveram valores altos, os quais devem ser considerados em caso de confinamento em minas subterrâneas com pouca ou sem nenhuma ventilação.

Os valores de obtidos para as amostras de cinza de carvão são 10 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.

6.2 Concentrações de Urânio e Tório

As concentrações de U e Th para as 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 como resultado das análises espectros de energia gama em função do número de contagens, estes espectros estão disponíveis no Anexo A. Analisando os espectros e utilizando as equações 19 e 20 foi possível determinar as concentrações de U e Th, em ppm, de cada amostra, as quais estão apresentadas na Tabela 9.

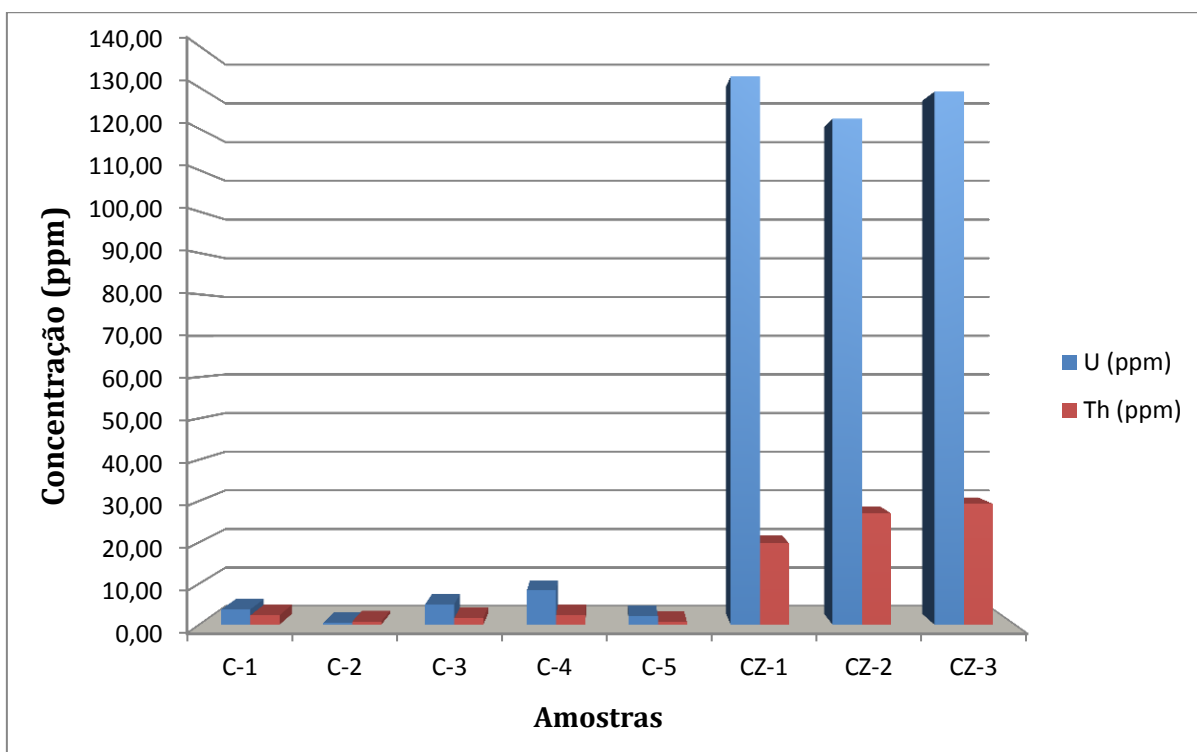
Tabela 9 – Concentrações de U e Th das amostras analisadas

Amostras	U (ppm)	Th (ppm)
C-1	3,72	2,29
C-2	0,44	0,79
C-3	4,93	1,59
C-4	8,42	2,37
C-5	2,12	0,64
CZ-1	132,66	19,75
CZ-2	122,45	27,03
CZ-3	129,01	29,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

O teor de urânio nas amostras de carvão variou de 0,44 a 8,42 ppm e nas amostras de cinza variou de 122,45 a 129,01ppm. O teor de tório nas amostras de carvão variou de 0,64 a 2,37 ppm, enquanto que nas amostras de cinza variou de 19,75 a 29,29 ppm,. Estes resultados estão graficamente representados na Figura 25, na qual observar-se que os teores de urânio e tório encontrados na cinza são bem superiores aos encontrados no carvão. 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 que são os elementos de interesse neste estudo, por gerarem após seu decaimento o gás radônio.

Figura 25 - Teor de urânio e tório de cada amostra analisada

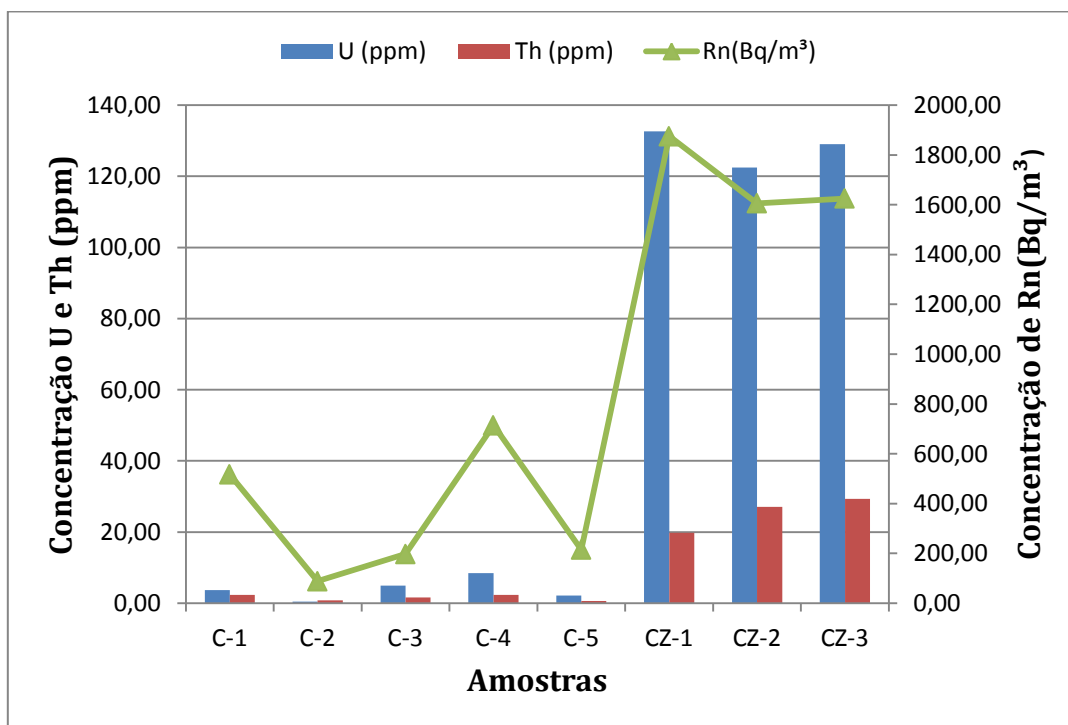


Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 Correlações dos dados

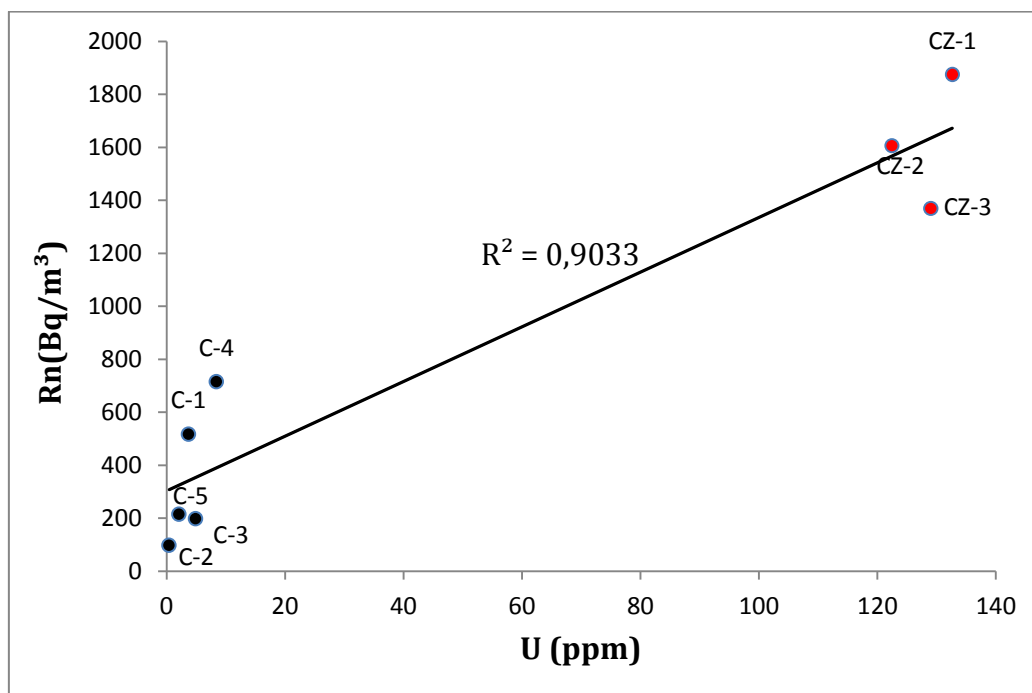
Através dos valores de U e Th obtidos por espectrometria gama, foi possível estabelecer correlações e efetuar considerações entre esses dados e a quantidade de exalação do radônio. Observa-se na Figura 26 os valores de U e Th estão diretamente ligados a média da concentração de radônio dos ciclos de análise. O carvão que possui menor teor de U e Th teve 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”, no caso o U^{238} e Th^{232} gerando suas progênes Rn^{222} e Rn^{220} , respectivamente. Os gráficos apresentados nas Figuras 27 e 28 mostram a boa correlação que os dados obtidos para a concentração de U e Th obtiveram quando correlacionados com a concentração de radônio.

Figura 26 - Correlação entre o teor de U, Th e média da concentração de Rn exalado nos ciclos de análise.



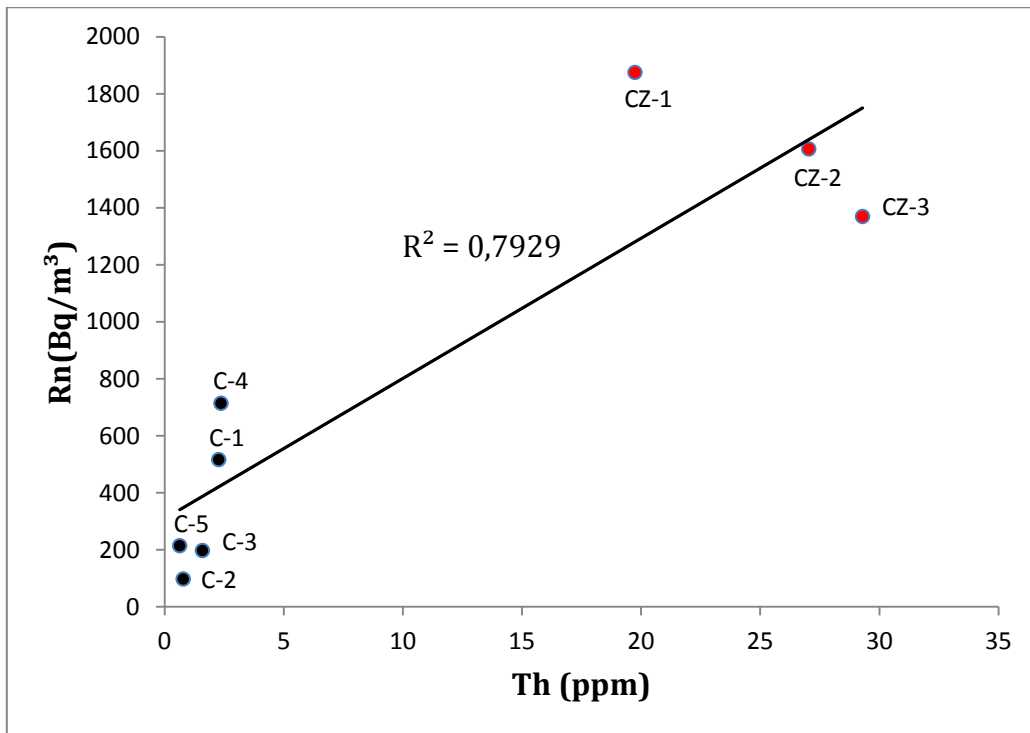
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Corelação entre o teor de U e o de Rn



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Corelação entre o teor de Th e o de Rn



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÕES

A metodologia utilizada permitiu a determinação das concentrações do gás radônio, em amostras de carvão mineral e cinza de carvão, em ciclos de 5, 10, 15, 20, 25 e 32 dias. As concentrações de radônio nas amostras de carvão variaram de 55,66 a 873 Bq/m³, enquanto que as amostras de cinza variaram de 91 a 2266,66 Bq/m³.

Esta diferença entre as concentrações encontradas no carvão e nas cinzas se dá em função da concentração de urânio e tório presentes nas amostras. Nas amostras de carvão a concentração de urânio e tório variaram respectivamente em 0,44 a 8,42 ppm e 0,64 a 2,37 ppm, e nas amostras de cinza variaram respectivamente em 122,45 a 129,01 ppm e 19,75 a 29,29 ppm. Isto reflete na quantidade de gás exalado/produzido pela amostra, sendo comprovado pela boa correlação entre as concentrações de radônio obtidas neste estudo e os teores de urânio e tório obtidos por espectrometria gama.

Os resultados da taxa de exalação com o decorrer do tempo obtiveram

boas correlações sendo coerente com a literatura, onde observou um comportamento decrescente, o qual se explica com a diminuição da atividade do gás radônio com o decorrer do tempo. Alguns valores de concentração ultrapassaram o valor estipulado de 200 bq/m³ pelos comitês internacionais, os quais podem gerar riscos para saúde em locais com pouca ou sem ventilação.

Os resultados também evidenciaram uma variação de comportamento do gás entre as amostras pesquisadas e as consideráveis oscilações da quantidade de exalação do gás radônio com relação aos diferentes ciclos de monitoramento, como também mostra que na maioria dos casos não há uma estabilização da exalação do gás ao longo dos ciclos. Possivelmente esse comportamento observado é devido aos distintos padrões de microdescontinuidades internas de cada amostra estudada. Sugerindo que novas investigações mais sistemáticas devem ser realizadas para identificar as possíveis causas desse comportamento.

8 REFERÊNCIAS

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.

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.

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.

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*, vol. 505, p. 444–448, 2003.

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

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.

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.

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.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), Boletim n°28. Perfil analítico do tório e terras raras. Rio de Janeiro, 1973, 72p.

DUARTE, R. M. 2002. Radioelementos naturais na área do projeto Rio Preto (GO). 2002. 169 f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 2002.

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.

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.

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

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.

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.; 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.

LIESAR, K. H.; HILL, R. Hydrolysis and colloid formation of thorium in water and consequences for its migration behavior – comparison 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 utilise 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.

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

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

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.

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

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.

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.

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.

VAUPOTIČ, J, NÁVÁSI, N. Preliminary study of thoron and radon levels in various indoor environments in Slovenia. *Raiatd. 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

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

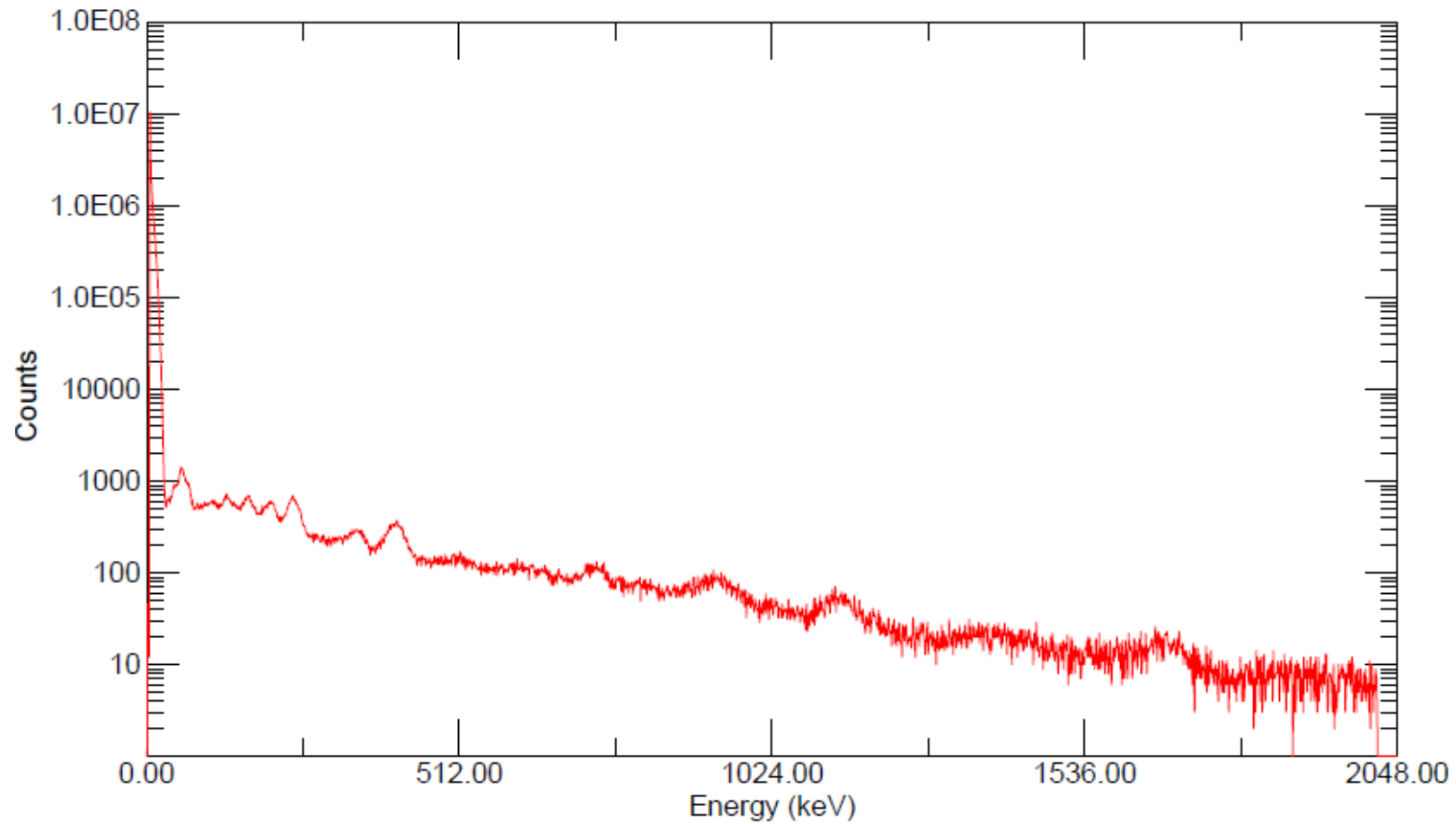
WHO. World Health Organization Handbook on Indoor Radon. A public health perspective. Geneva, 2009.

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.

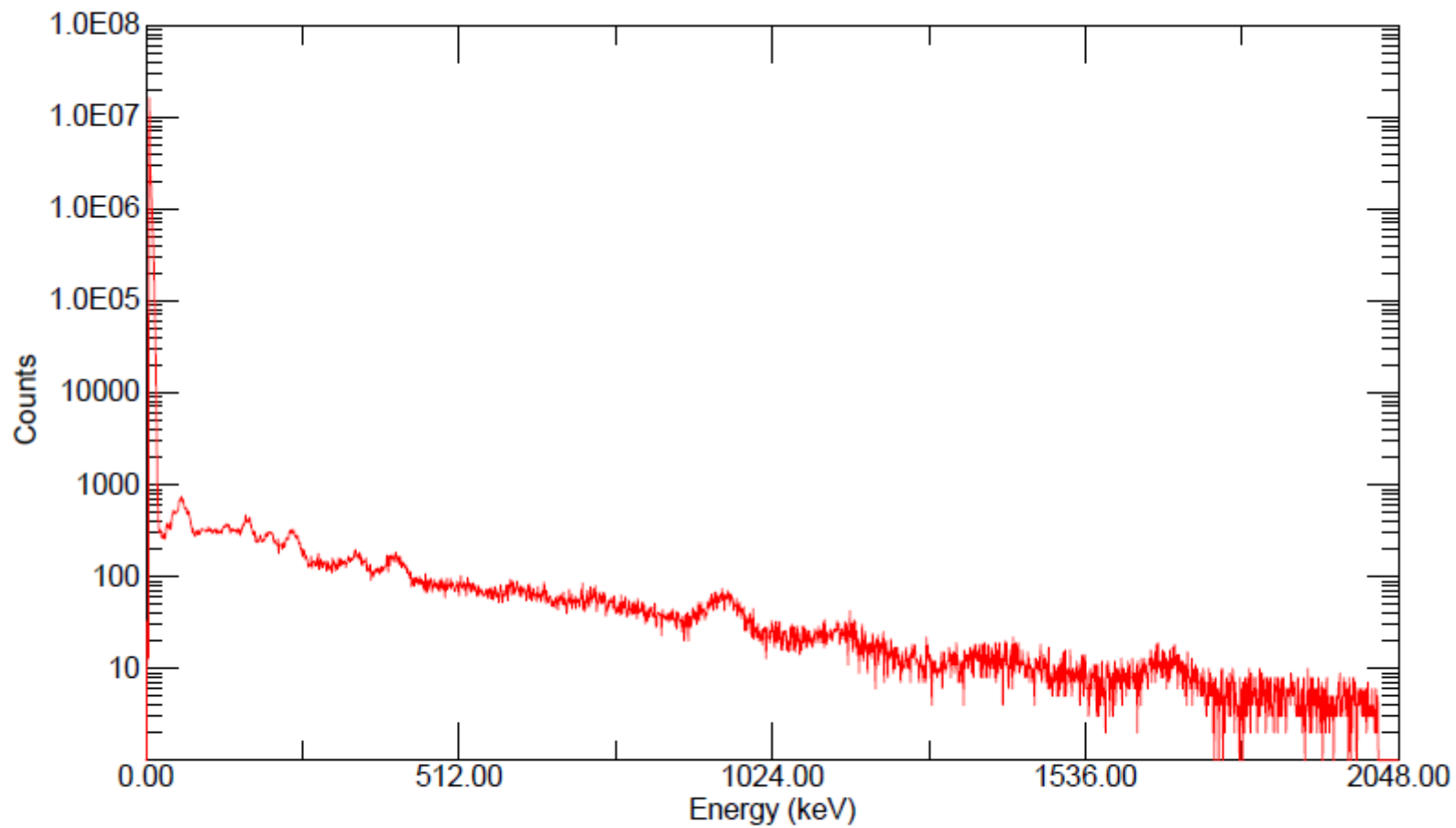
ANEXO A – ESPECTROSGAMA

leonardo-Carvão 1 PÇ-1 09-06-17



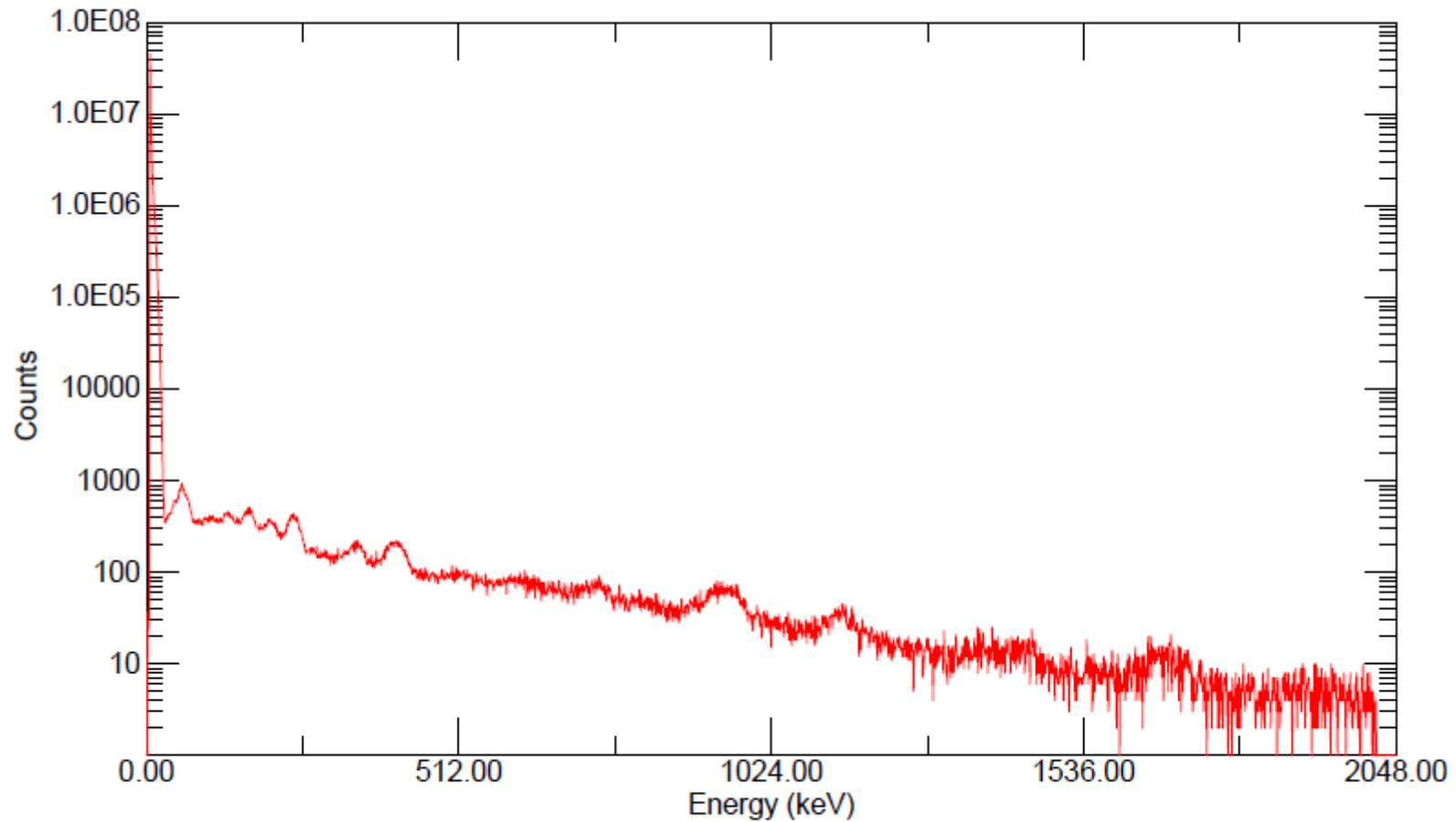
Acquired: 09/06/2017 17:57:51 Real Time: 50674.82 s. Live Time: 50461.28 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Carvão 1 PÇ-1 09-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Carvão 2 PÇ-1 08-06-17



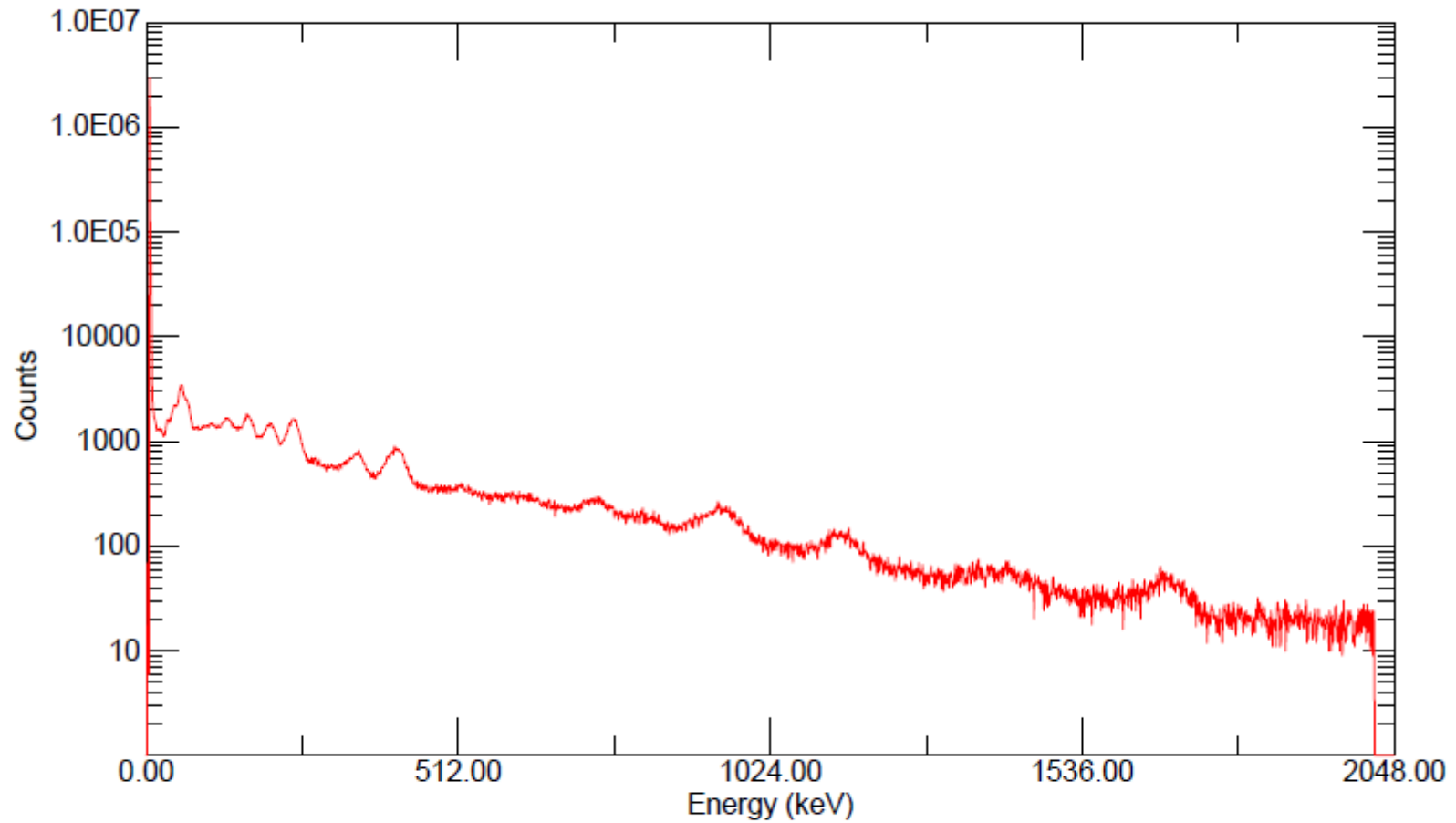
Acquired: 08/06/2017 17:07:23 Real Time: 30871.58 s. Live Time: 30651.52 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Carvão 2 PÇ-1 08-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Carvão 3 PÇ-1 08-06-17



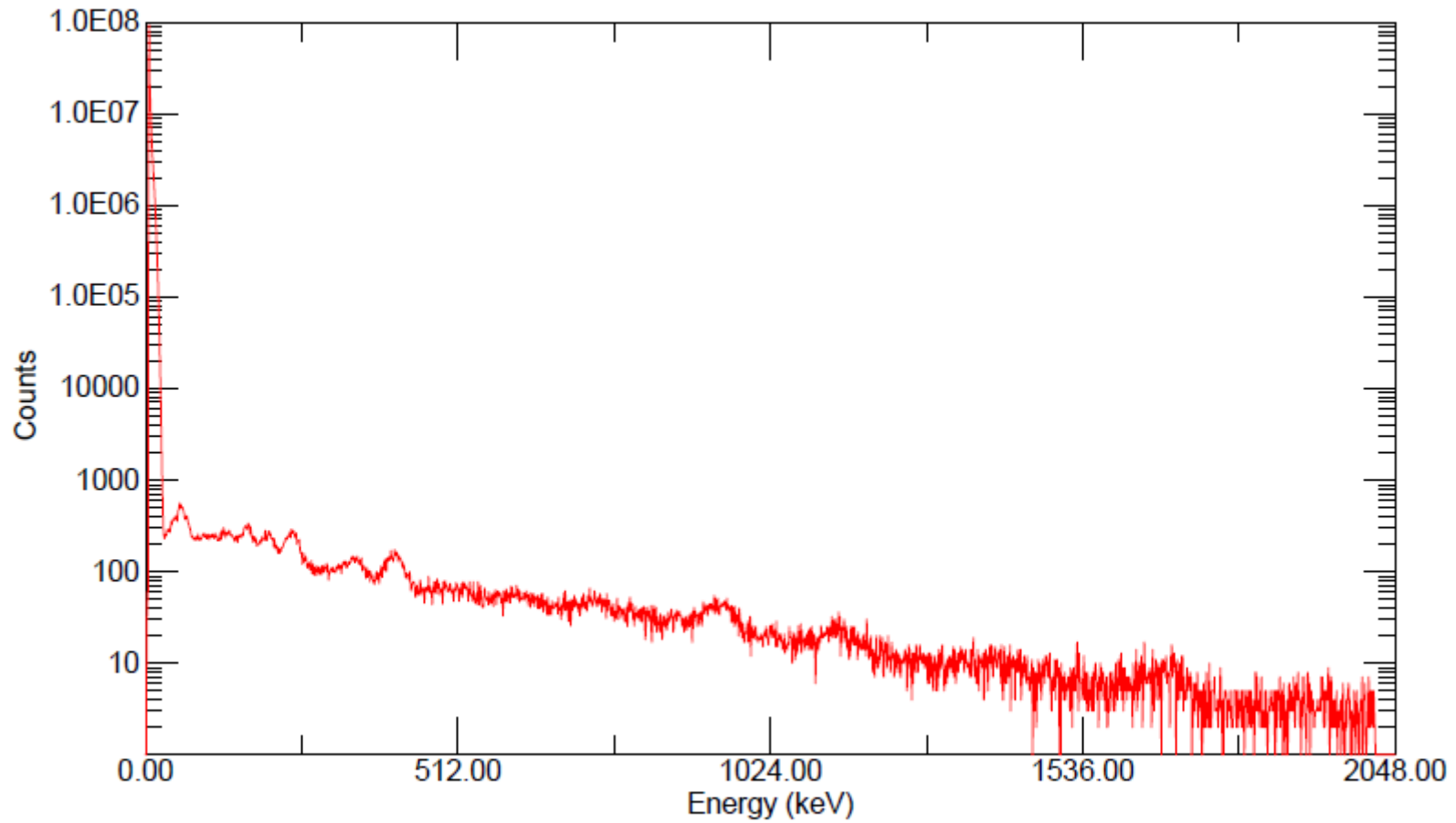
Acquired: 09/06/2017 01:45:37 Real Time: 33362.18 s. Live Time: 32673.60 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Carvão 3 PÇ-1 08-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Carvão 4 PÇ-1 10-06-17



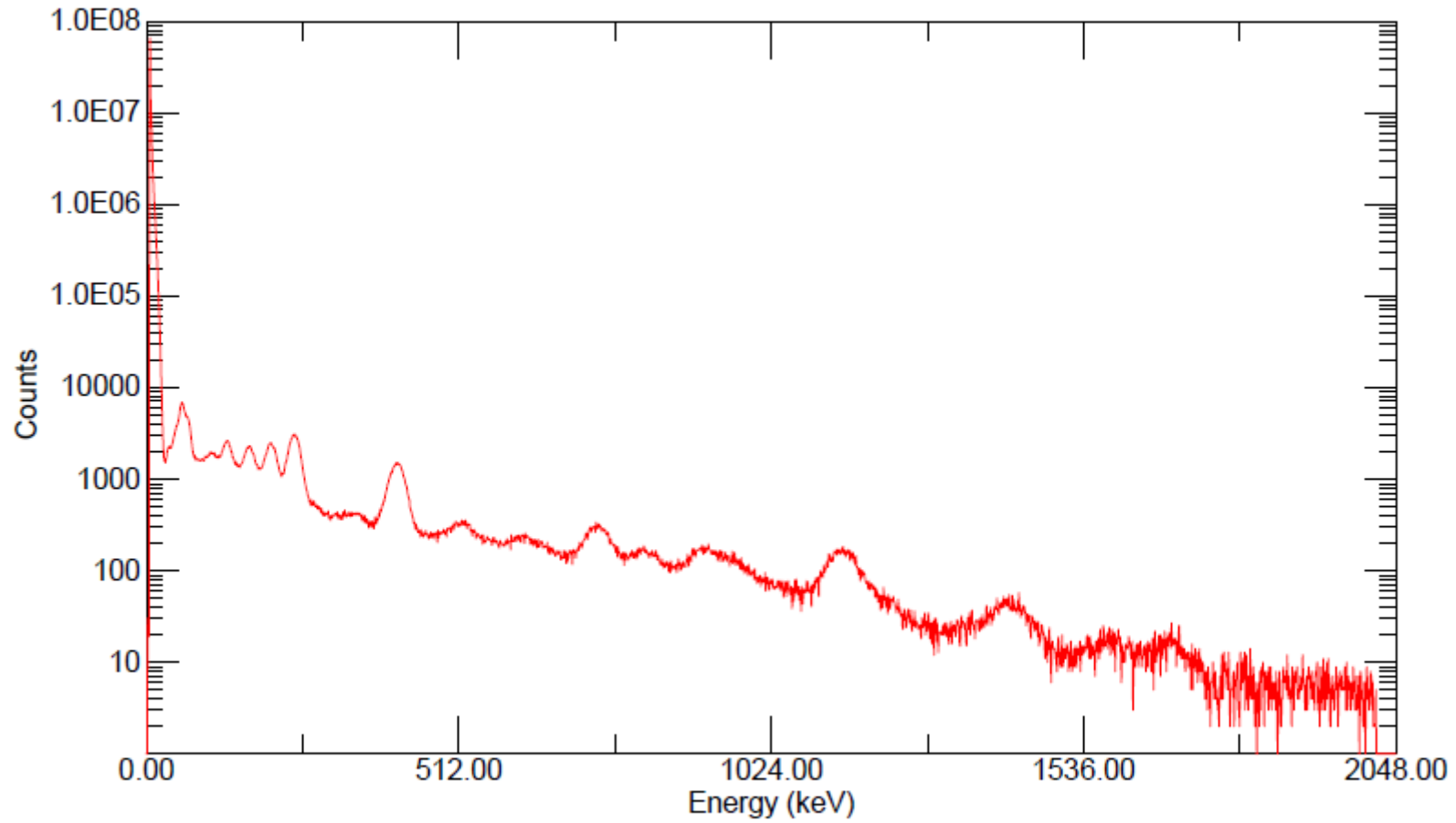
Acquired: 10/06/2017 08:15:32 Real Time: 131533.58 s. Live Time: 131444.08 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Carvão 4 PÇ-1 10-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Carvão 5 PÇ-1 09-06-17



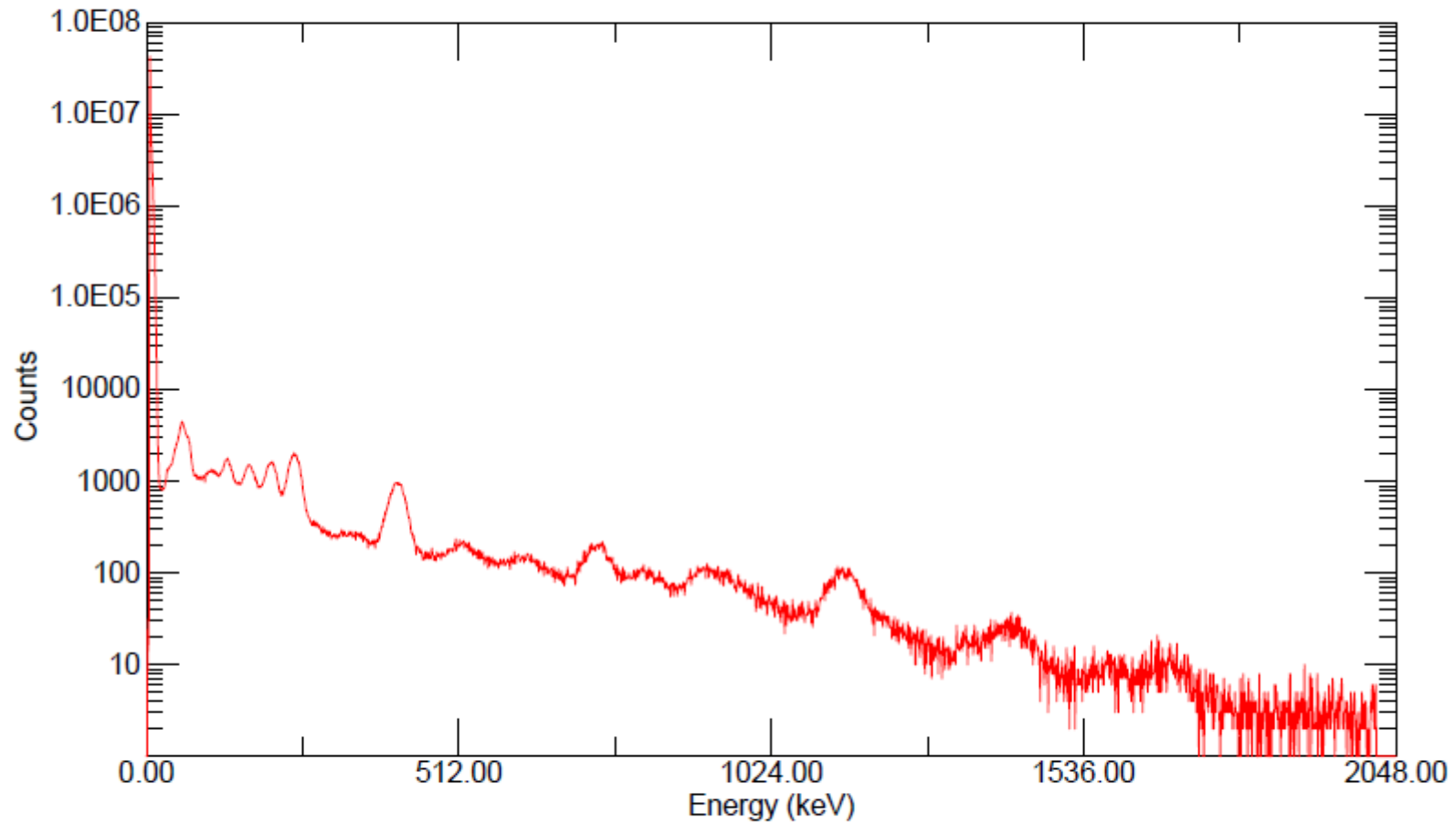
Acquired: 09/06/2017 11:05:02 Real Time: 24596.10 s. Live Time: 23186.18 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Carvão 5 PÇ-1 09-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Cinza 1 PÇ-1 07-06-17



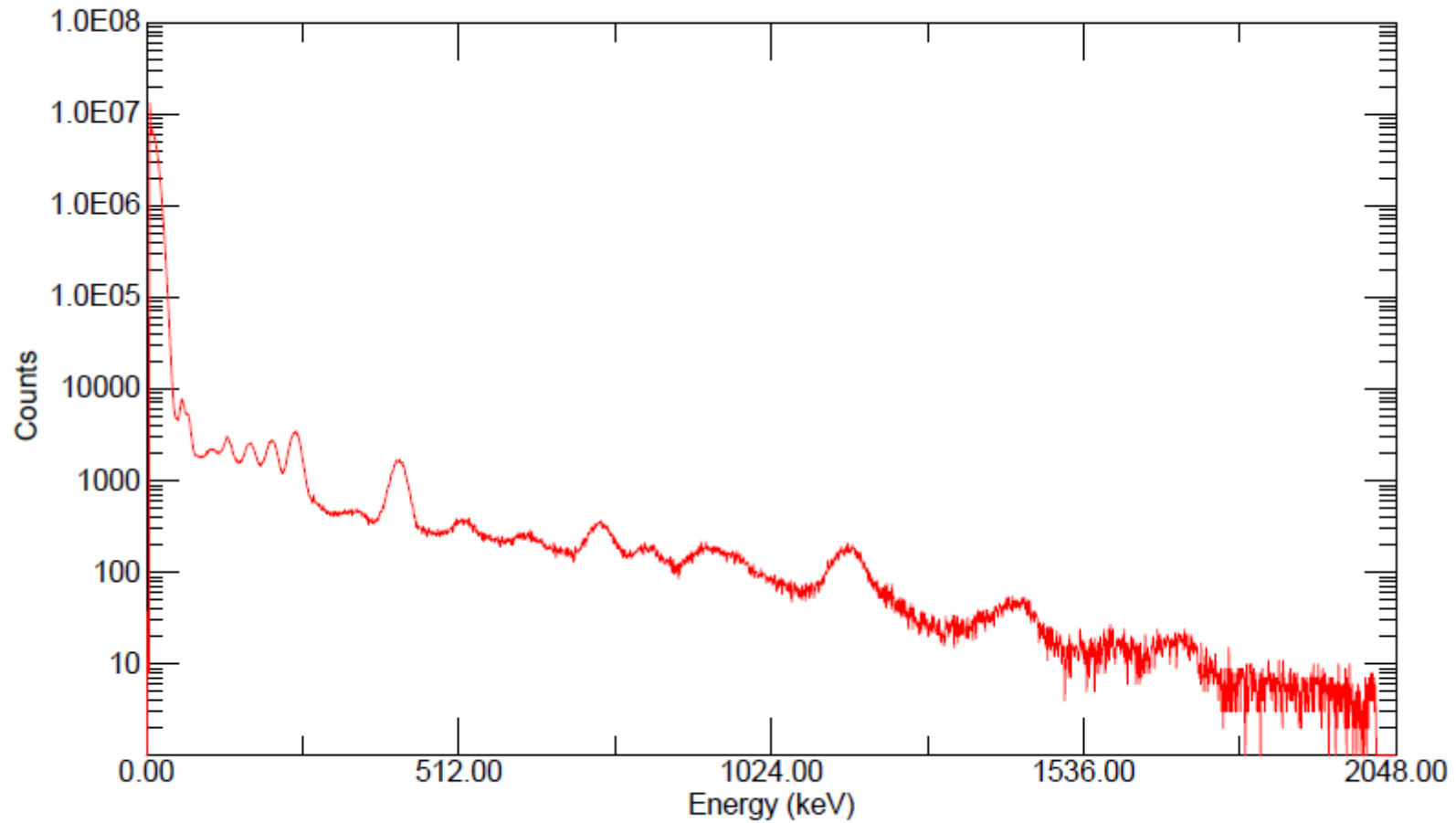
Acquired: 08/06/2017 01:21:31 Real Time: 35700.28 s. Live Time: 34756.88 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Cinza 1 PÇ-1 07-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Cinza 2 PÇ-1 08-06-17



Acquired: 08/06/2017 11:19:39 Real Time: 20615.96 s. Live Time: 20073.54 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Cinza 2 PÇ-1 08-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

leonardo-Cinza 3 PÇ-1 11-06-17



Acquired: 11/06/2017 20:49:59 Real Time: 35512.94 s. Live Time: 34108.64 s.
File: F:\ESPECT~2\ESPECT~1\leonardo-Cinza 3 PÇ-1 11-06-17.Chn Channels: 2048
Detector: #1 TORRE-1

