



**INSTITUTO DE FÍSICA**

**Universidade Federal Fluminense**

# Métodos Analíticos Nucleares Aplicados à Compreensão da Origem e do Transporte de Sedimentos Recentes

CARLA REGINA ALVES CARVALHO

Niterói  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CARLA REGINA ALVES CARVALHO

# Métodos Analíticos Nucleares Aplicados à Compreensão da Origem e do Transporte de Sedimentos Recentes

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação  
em Física da Universidade Federal Flumi-  
nense, como requisito parcial para obtenção  
do Título de Doutor em Física.

Orientador:  
Prof. Dr. Roberto Meigikos dos Anjos

Niterói  
2009

*"I am glad not to have to work with  
such complex problems as sediment transport!"*

*Albert Einstein para seu filho, Hans Albert Einstein,  
sobre suas pesquisas em sedimentologia.*

*À pessoa que sempre me deu apoio incondicional,  
tornando este um sonho possível:  
meu amor Bernardo.*

## **Agradecimentos:**

Concluir mais esta etapa não seria possível sem a contribuição, a amizade e o carinho de muitas pessoas. Este espaço é dedicado a todos vocês que merecem compartilhar comigo esta vitória.

Agradeço aos meus pais Carlos e Sandra pelo apoio e incentivo de sempre, mesmo sem saber ao certo o que eu faço, acham lindo todas as vezes que explico. Aos meus irmãos, sobrinhos e cunhados que me encham de carinho em todos os encontros. Em especial à minha irmã Sheila, pelo carinho nos momentos de aperto na confecção da tese.

Ao meu orientador Roberto Meigikos, por todo o suporte, por me fazer acreditar que tudo isso era possível e por me tornar uma pessoa com a visão crítica de mundo que um pesquisador precisa ter.

À Kita e Leo Macario pela paciência, por não me deixarem desanimar e por me salvarem nos momentos de desespero completo.

Aos professores do Instituto de Geociências Gilberto Tavares e Maria Augusta pela paciência e ajuda essencial.

Agradeço às minhas amigas Júlia Pinagé e Cinthia Carvalho pela amizade e carinho de sempre e pra sempre.

Aos meus amigos Be Coutinho, Newton Sanches, Munique Siqueira, Jan Maurice, Diego Uzêda, Letícia Estellita, Christiano Timbó, Marisa Makler, Dayanne Abreu, Renata Zocattelli, Fernando Stavalle, Mônica Jansen, Eliel Eleutério, Marciano Carneiro, Carlos Galhardo, Camila Gomes, Alexandre Lima, Dayieine, Apô & Dú, Cinthya Chianca e a todos os demais amigos pela amizade, pelas horas do café no Adriano e por todas as noites divertidas seja na Cantareira, no Cine Sanches ou em qualquer outro lugar, jogando Imagem & Ação ou assistindo The Big Bang Theory, obrigada de verdade!

Aos meus queridos facilitadores e amigos Licia Nepomuceno e Paulo Botelho por me ajudarem a mirar meu desejo e me incentivarem a ir buscá-lo. Agradeço também aos meus queridos amigos do “grupo de segunda” pela força e carinho.

Aos amigos do LARA Rodrigo Veiga, Mariana Vezzone e Rafael Saavedra pela ajuda com as amostras e pelas diversas discussões frutíferas no laboratório.

Ao Cap. Marcos Vinícios da Defesa Civil pela ajuda com a coleta de amostras no Rio Mambucaba.

À Rosana Najjar, Cynthia Tarrisse e Fernanda Carneiro do IPHAN e Sylvia Chada do ESEC-Tamoios pela ajuda com a coleta de amostras na Ilha do Algodão.

Às “meninas” da BIF pela amizade, pelo carinho e por conseguirem os artigos mais impossíveis de encontrar.

Aos queridos secretários da pós-graduação João (*in memoriam*), Luana, Valéria e Rafael por, sempre que possível, quebrarem meus galhos.

À Bette pelo carinho e alegria diários.

À CAPES pelo apoio financeiro.

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar os processos de proveniência e transporte de sedimentos ao longo da costa sul do Estado do Rio de Janeiro, utilizando a técnica de espectrometria da radiação gama natural, através de medições de concentrações de tório, urânio e potássio. A partir destas medidas, foi realizado um estudo estatístico de diagramas eTh/eU e eTh/K, os quais refletem tanto as propriedades mineralógicas quanto a história dos mecanismos de transporte dos sedimentos.

A principal área estudada encontra-se na região denominada Costa Verde, compreendida entre a faixa costeira desde a Praia Brava (23°00'S e 44°28'W) até a Praia de São Gonçalo (23°02'S e 44°37'W), na Baía da Ilha Grande. Os principais resultados mostram as diferentes origens dos sedimentos costeiros estudados e apontam a grande influência do Rio Mambucaba nesta mistura. Além disso, a distribuição dos minerais pesados ao longo desta área pôde ser mapeada e descrita por um modelo geográfico, que reflete a importância do transporte de sedimentos pelos rios, até a planície costeira, onde ocorre a deposição. Contudo, foi possível constatar também a grande influência da ação de ondas e correntes marinhas na geomorfologia da região, uma vez que apenas determinados locais apresentaram maiores concentrações dos minerais pesados. Finalmente, os resultados mostram que um detector do tipo NaI pode ser bastante eficaz neste tipo de estudo. Em termos de medição em laboratório, quando as concentrações dos radionuclídeos não são extremamente baixas, é possível utilizar este tipo de detector, muito mais viável economicamente que um detector com melhor resolução do tipo HPGe, além de ser mais fácil a sua manutenção. Em contrapartida, esta técnica confirmou-se uma boa ferramenta auxiliar aos estudos geofísicos tradicionais, em alguns casos podendo até mesmo substituí-los de forma confiável, com menos recursos financeiros.



## **Abstract**

This work aims to study the provenance and transport processes of sediment along the Southern Coast of Rio de Janeiro State, using the natural gamma radiation technique, through measurements of thorium, uranium and potassium concentrations. Such measurements enabled a statistical study of eTh/eU and eTh/K cross plots, which reflect the mineralogical properties of sediments, as well as its history of transport and sedimentation.

The area of interest is located within the Ilha Grande bay, in the so-called Costa Verde or the Brazilian Green Coast, covering the coastal strip from Brava (23°00'S e 44°28'W) to São Gonçalo beaches (23°02'S e 44°37'W). The results show the different origins of the coastal sediments studied and showed the influence of the Rio Mambucaba to this mixture. Moreover, the distribution of heavy minerals along this area could be mapped and described by a geographical model, reflecting the importance of fluvial transport of sediments to the coast, where they are deposited. On the other hand, it was possible to verify the importance of waves and currents to the region geomorphology as well, since higher concentrations of heavy minerals were only observed at specific locations. Finally, the results have shown that the NaI detector can be rather efficient for this kind of study. In what concerns laboratory measurements, provided concentrations are not extremely low, it is possible to use such kind of detector, more economically viable than a higher resolution detector as the HPGe and easier to maintain. This technique proved to be an important auxiliary tool to standard geophysical methods and, in some cases, being able to substitute these needing less financial resources.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	p. IX
<b>Lista de Tabelas</b>	p. XII
<b>1 Introdução</b>	p. 1
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	p. 4
2.1 Radioatividade . . . . .	p. 4
2.1.1 Decaimento Alfa ( $\alpha$ ) e Beta ( $\beta$ ) . . . . .	p. 5
2.1.2 Radiação Eletromagnética . . . . .	p. 8
2.1.3 Interação da Radiação com a Matéria . . . . .	p. 10
2.1.4 Emissores Naturais de Radiação $\gamma$ . . . . .	p. 14
2.2 Radioatividade em Geologia . . . . .	p. 18
2.2.1 Propriedades Geoquímicas do Urânio e do Tório . . . . .	p. 18
2.2.2 Ciclo Geoquímico do Urânio e do Tório . . . . .	p. 19
2.2.3 As relações eTh/eU e eTh/K . . . . .	p. 20
<b>3 Materiais e Métodos</b>	p. 23
3.1 Aspectos Geológicos . . . . .	p. 23
3.1.1 Contexto Geológico e Geotectônico . . . . .	p. 24
3.1.2 Geomorfologia . . . . .	p. 26
3.1.3 Hidrodinâmica . . . . .	p. 27
3.1.4 Cobertura Sedimentar . . . . .	p. 29
3.2 Coleta e Preparação das Amostras . . . . .	p. 30
3.3 Aparato Experimental . . . . .	p. 35
3.4 Calibração do Sistema de Aquisição e Análise dos Dados . . . . .	p. 39
<b>4 Análise e Discussão dos Resultados</b>	p. 43

4.1	Descrevendo o Método . . . . .	p.43
4.1.1	Granulometria . . . . .	p.44
4.1.2	Amostras Superficiais . . . . .	p.46
4.1.3	Testemunhos . . . . .	p.54
4.2	Distribuição de Th e U . . . . .	p.63
4.3	Distribuições de Th e K . . . . .	p.64
4.4	Diagramas eTh/K x eTh/eU . . . . .	p.66
4.5	Modelo para o transporte de sedimentos . . . . .	p.69
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	p.75
	<b>Anexo A</b>	p.77
	<b>Anexo B</b>	p.81
	<b>Anexo C</b>	p.85
	<b>Referências Bibliográficas</b>	p.93

# ***Lista de Figuras***

2.1	Esquema de decaimento do $^{40}\text{K}$ . . . . .	p. 7
2.2	Esquema de decaimento do $^{60}\text{Co}$ . . . . .	p. 10
2.3	Esquema do Espalhamento Compton . . . . .	p. 12
2.4	Predominância dos processos de interação . . . . .	p. 13
2.5	Série do $^{232}\text{Th}$ . . . . .	p. 17
2.6	Série do $^{238}\text{U}$ . . . . .	p. 17
2.7	Ambiente de Sedimentação . . . . .	p. 21
2.8	Carta Mineralógica . . . . .	p. 22
2.9	Diagrama Cruzado - eTh/K versus eTh/eU . . . . .	p. 22
3.1	Foto de Satélite: Baía da Ilha Grande . . . . .	p. 23
3.2	Mapa Geológico: Serra da Bocaina e Baía da Ilha Grande . . . . .	p. 25
3.3	Mapa Topográfico e Batimétrico: Baía da Ilha Grande . . . . .	p. 28
3.4	Locais de Coleta das Amostras . . . . .	p. 30
3.5	Sistemática para a Coleta de Amostras . . . . .	p. 32
3.6	Coleta das Amostras no Rio Mambucaba . . . . .	p. 33
3.7	Eficiência Geométrica . . . . .	p. 34
3.8	Foto da Blindagem com Detector NaI(Tl) . . . . .	p. 36
3.9	Foto da Blindagem <i>ultra low-background</i> com Detector de HPGe . . . . .	p. 36
3.10	Ilustração do Detector NaI(Tl) . . . . .	p. 37
3.11	Ilustração do Detector de HPGe . . . . .	p. 38
3.12	Espectro de raios $\gamma$ típico - HPGe . . . . .	p. 42
4.1	Tamanho do grão X densidade específica . . . . .	p. 45
4.2	Concentrações X Frações Granulométricas . . . . .	p. 46
4.3	Praia da VRM . . . . .	p. 49
4.4	Praia da VHM . . . . .	p. 50

4.5	Praias Comportadas . . . . .	p. 51
4.6	Praias Comportadas . . . . .	p. 52
4.7	Praias com Dispersão . . . . .	p. 53
4.8	Foto do Testemunho B . . . . .	p. 56
4.9	Foto do Testemunho A . . . . .	p. 59
4.10	Foto do Testemunho D . . . . .	p. 60
4.11	Testemunho VHM . . . . .	p. 61
4.12	Testemunho VRM . . . . .	p. 62
4.13	Variação da razão eTh/eU x Posição . . . . .	p. 63
4.14	Diagrama ThxK . . . . .	p. 65
4.15	Diagrama eTh/K por eTh/eU . . . . .	p. 68
4.16	Ciclo de Sedimentação . . . . .	p. 70
4.17	Diagrama eTh/K por eTh/eU - Rio Mambucaba . . . . .	p. 71
4.18	Esquema da Concentração de Minerais Pesados . . . . .	p. 72
4.19	Modelo de Transporte de Sedimentos . . . . .	p. 73
1	Foto dos Sedimentos da Praia Brava . . . . .	p. 81
2	Foto dos Sedimentos da Praia Vermelha . . . . .	p. 81
3	Foto dos Sedimentos da Praia do Condomínio das Goiabas . . . . .	p. 82
4	Foto dos Sedimentos da Praia de Mambucaba (Vila Histórica) . . . . .	p. 82
5	Foto dos Sedimentos da Praia de Mambucaba (Ponta do Bosque) . . . . .	p. 82
6	Foto dos Sedimentos da Praia de Mambucaba (Vila Residencial) . . . . .	p. 83
7	Foto dos Sedimentos da Praia do Coqueiro . . . . .	p. 83
8	Foto dos Sedimentos da Prainha . . . . .	p. 83
9	Foto dos Sedimentos da Praia de Tarituba . . . . .	p. 84
10	Foto dos Sedimentos da Praia de São Gonçalo . . . . .	p. 84
1	Foto da Praia de Mambucaba (Vila Residencial). . . . .	p. 85
2	Foto da Praia de Mambucaba (Vila Residencial). . . . .	p. 85
3	Foto da Praia do Coqueiro. . . . .	p. 86
4	Coleta na Praia do Coqueiro. . . . .	p. 86
5	Foto da foz do Rio Mambucaba (2005). . . . .	p. 87

6	Foto da Praia de Mambucaba (Vila Histórica). . . . .	p. 87
7	Foto da Coleta no Rio Mambucaba (2005). . . . .	p. 88
8	Foto da Coleta no Rio Mambucaba (2005). . . . .	p. 88
9	Foto do Rio Mambucaba (2007). . . . .	p. 89
10	Foto do Rio Mambucaba (2007). . . . .	p. 89
11	Foto da Coleta no Rio Mambucaba (2007). . . . .	p. 90
12	Foto do Rio São Gonçalo. . . . .	p. 90
13	Foto do Rio São Gonçalo. . . . .	p. 91
14	Foto da Prainha. . . . .	p. 91
15	Foto da Praia de Tarituba. . . . .	p. 92
16	Foto da coleta do testemunho na Praia de Mambucaba (Vila Histórica). . . . .	p. 92

## ***Lista de Tabelas***

2.1 Faixa de Frequência da Radiação Eletromagnética . . . . .	p.9
3.1 Informações sobre as coletas . . . . .	p.31

# 1 *Introdução*

O período Quaternário<sup>1</sup> é caracterizado pela ocorrência de drásticas flutuações no nível do mar, as quais resultaram na formação dos atuais depósitos de sedimentos arenosos. Alguns autores, tais como Martin *et al.*(1998) e Angulo & Lessa (1997), têm proposto um modelo de curvas relativas para tais variações do nível do mar nos últimos 7 mil anos em várias regiões da costa brasileira. Contrariamente ao que aconteceu em outras regiões do mundo, principalmente na costa atlântica dos Estados Unidos e na Europa, estes modelos têm revelado que a atual costa brasileira esteve completamente submersa há cerca de 5100 anos AP<sup>2</sup> (onde o nível do mar alcançou de 4 a 5 metros acima do presente nível), emergindo deste então. Adicionalmente, mapeamentos geológicos sistemáticos e datações (utilizando-se principalmente a técnica de radiocarbono) de depósitos costeiros têm permitido distinguir diversas gerações de construções de planícies costeiras após a ocorrência de vários episódios de transgressões marinhas durante o Quaternário [MARTIN *et al.*, 1980, ANDRADE *et al.*, 2003]. Estas alterações no nível do mar resultaram em um processo de retrabalhamento de depósitos aluviais e coluviais, através da ação de ondas e correntes marinhas, de tal forma que este mecanismo tem grande participação na concentração de minerais mais densos que micas e feldspatos [ANJOS *et al.*, 2006, ANJOS *et al.*, 2007].

Atualmente, a costa sudeste do Estado do Rio de Janeiro é formada principalmente por depósitos de origem terciária e quaternária. Estes sedimentos recentes podem ser encontrados em uma faixa extensa, como ocorre no norte do Estado, ou representar apenas um cordão estreito de litoral, cercado por formações graníticas, como ocorre no Sul do Estado. Os sedimentos, produzidos pela erosão das rochas devido à ação do intemperismo, são transportados principalmente por ação dos ventos e rios para o litoral e, assim, depositados nas praias pela ação das ondas e correntes.

---

<sup>1</sup>Definido como o período mais recente da era Cenozóica que congrega as épocas Pleistoceno e Holoceno, sendo esta última a mais recente, representando os últimos 10.000 anos.

<sup>2</sup>Antes do presente



A história dos depósitos Quaternários possui estreita ligação com ocorrências minerais de valor econômico, uma vez que em algumas circunstâncias favoráveis estes minerais pesados podem ser encontrados em altas concentrações, permitindo a sua exploração comercial. Uma das principais motivações para a realização deste trabalho foi a partir de um estudo anterior, realizado pelo nosso grupo de pesquisa, onde foram analisadas as concentrações de tório, urânio e potássio de sedimentos ao longo de uma grande extensão da costa brasileira [ANJOS *et al.*, 2006]. A partir dos resultados encontrados na planície costeira do norte do Estado do Rio de Janeiro [ANJOS *et al.*, 2006, ANJOS *et al.*, 2007], foi possível desenvolver um modelo geográfico para o transporte litorâneo de sedimentos em torno da foz do rio Paraíba do Sul. Este modelo comprovou a existência de duas fontes principais de sedimentos, responsáveis para a formação de depósitos de minerais pesados nesta região: o próprio Rio Paraíba do Sul e o depósito Terciário, conhecido como Grupo Barreiras.

Este resultado inicial, além de confirmar as principais características do mapeamento geológico de depósitos Quaternários costeiros, revelou que a técnica de espectrometria da radiação  $\gamma$  natural, quando associada a estudos estatísticos das correlações entre Th/U e Th/K, pode ser usada como uma importante ferramenta de investigação para a compreensão da origem e do transporte de sedimentos. Além disso, esta técnica possui vantagens, podendo ser considerada como uma forma mais fácil de realizar medidas que os métodos tradicionais de análise de minerais pesados, uma vez que efeitos de tamanho ou de densidade de grãos dos sedimentos podem ser negligenciados.

Com base nestas análises, elevadas concentrações de minerais pesados foram encontradas ao redor do Rio Mambucaba, localizado no sul do Estado do Rio de Janeiro, na região conhecida popularmente como Costa Verde. Diferentemente do complexo deltáico do Rio Paraíba do Sul, esta faixa de sedimentos recentes representa apenas uma pequena área cercada por formações graníticas. Nesse contexto, um novo e mais detalhado estudo desta região através da técnica de espectrometria gama mostrou-se interessante. Este estudo permitiria melhorar a compreensão dos mecanismos geológicos envolvidos na origem e no transporte de sedimentos, que resultaram na formação destas elevadas concentrações de minerais pesados ao redor da foz do Rio Mambucaba, contribuindo para a compreensão da formação da zona da Costa Verde.

Assim, esta tese de doutorado apresenta um estudo das distribuições das concentrações de tório, urânio e de potássio sobre esta área, bem como a correlação entre esses

---

elementos, para fornecer informações sobre a composição mineral e proveniência de seus sedimentos. Conseqüentemente, também possui o objetivo de avaliar a existência de novos depósitos de minerais pesados. Adicionalmente, serão utilizados neste estudo dois diferentes tipos de detectores de radiação gama, com o propósito de avaliar seu uso nesta técnica, visando obter técnicas baratas e confiáveis para aplicação por jovens pesquisadores.

Para tanto, no Capítulo 2 será descrita a fundamentação teórica, abrangendo aspectos como a radioatividade e a geologia sedimentar. No Capítulo 3, serão descritos os principais materiais e métodos utilizados para a coleta, preparação e análise das amostras. No Capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos, além da interpretação e discussão dos mesmos. E finalmente, no Capítulo 5, as principais conclusões obtidas.

## 2 *Fundamentação Teórica*

Este capítulo tem como objetivo introduzir a base teórica necessária ao tema em questão. De forma que, inicialmente, serão definidas as características dos decaimentos radioativos e, posteriormente, a relação entre a radioatividade natural e a geologia.

### 2.1 Radioatividade

Ao se definir o fenômeno da radioatividade, pode-se dizer que núcleos podem realizar transformações nucleares espontâneas, que resultam na formação de novos elementos e na emissão de radiação. Tais transformações, também chamadas de decaimento radioativo, podem ocorrer por mecanismos diferentes como emissão de partículas  $\alpha$  e emissão de partículas  $\beta^-$  e  $\beta^+$ , podendo ou não acompanhar emissão de radiação  $\gamma$ . A maneira pela qual cada decaimento ocorre, depende, basicamente, da instabilidade nuclear do nuclídeo em questão. Esta instabilidade é determinada pela razão próton-nêutron e o nuclídeo poderá emitir radiação para se aproximar de uma curva de estabilidade. O nuclídeo emissor de radiação é denominado radionuclídeo.

A taxa de decaimento de um radionuclídeo define sua atividade, que é geralmente expressa em duas unidades: *Curie* (Ci) ou *Becquerel* (Bq). O *Curie* foi definido como uma estimativa da atividade de 1g de  $^{226}\text{Ra}$  e, por razões históricas, ainda é utilizado sendo definido como  $3.7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo [CEMBER, 1996]. O *Becquerel* é a unidade no Sistema Internacional (SI), definida como 1 desintegração por segundo. Assim, a relação entre estas unidades é dada por:

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq} \quad (2.1)$$

De acordo com a lei do decaimento radioativo, a atividade de uma amostra é proporcional ao número de radionuclídeos presentes na amostra:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.2)$$

$$N(t) = N_0(t).e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

onde:

$N(t)$  = Número de radionuclídeos num tempo  $t$ ;

$N_0(t)$  = Número inicial de radionuclídeos;

$\lambda$  = Constante de decaimento radioativo;

$t$  = tempo.

A partir desta equação, pode-se calcular a chamada meia-vida de um determinado radionuclídeo, ou seja, o tempo necessário para que sua atividade atinja metade do valor inicial e, também, é possível determinar a relação de equilíbrio entre núcleos de uma série radioativa de decaimentos. Como exemplo, as séries do  $^{232}\text{Th}$  e do  $^{238}\text{U}$ , que serão discutidas em detalhe posteriormente.

### 2.1.1 Decaimento Alfa ( $\alpha$ ) e Beta ( $\beta$ )

Núcleos pesados apresentam certa instabilidade devido à repulsão coulombiana entre os prótons do núcleo e, assim, tendem a emitir partículas  $\alpha$  (partículas pesadas carregadas) para se aproximar da estabilidade mais rapidamente. A partícula  $\alpha$  é um núcleo de  $^4\text{He}$  com carga positiva emitido do núcleo do radionuclídeo. Após a emissão, o número atômico ( $Z$ ) e o número de massa ( $A$ ) são reduzidos de 2 e 4 unidades, respectivamente. O esquema do decaimento é dado por:



Como exemplo de decaimento  $\alpha$ , temos o caso do  $^{210}\text{Po}$  que faz parte do final da série radioativa do  $^{238}\text{U}$ :



Em geral, os radionuclídeos que decaem naturalmente por emissão  $\alpha$  possuem número atômico acima de 82. Nos núcleos pesados, as forças eletrostáticas repulsivas aumentam mais rápido do que as forças nucleares de coesão e, desta forma, a magnitude da força eletrostática pode vencer a força nuclear. Além disso, a partícula emitida tem que ter energia suficiente para ultrapassar a barreira de potencial na superfície do núcleo. Segundo cálculos teóricos, a partícula  $\alpha$  deve ter energia cinética acima de 3.8 MeV, o que pode ser observado experimentalmente para o  $^{232}\text{Th}$  que, dentre os elementos de número atômico alto, emite a partícula  $\alpha$  com mais baixa energia, 3.93 MeV [CEMBER, 1996].

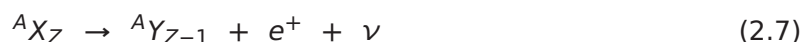
O decaimento por emissão de partícula  $\beta$  ocorre em radionuclídeos com excesso de nêutrons ou de prótons com o objetivo de aproximar-se da estabilidade nuclear. No primeiro caso, onde há excesso de nêutrons, esse decaimento é chamado de  $\beta^-$ , onde um elétron é ejetado no instante da transformação de um nêutron em um próton no núcleo. Para garantir a conservação do momento angular e da energia, a reação também emite um neutrino, uma partícula sem carga e com massa aproximadamente nula, assim a expressão do decaimento apresenta a forma:



O anti-neutrino, por conta de suas características, possui probabilidade de interação muito pequena, o que torna difícil a sua detecção. O núcleo  $^A Y_{Z+1}$  apresenta energia de recuo menor do que a necessária para ionizar significativamente o meio, assim, a fonte de ionização principal do meio neste tipo de decaimento são os elétrons rápidos. Em geral, os núcleos que decaem via emissão  $\beta^-$  populam estados excitados e são acompanhados de emissões de raios  $\gamma$  [KNOLL, 1979].

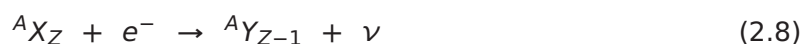
Radionuclídeos com excesso de prótons sofrem um processo inverso chamado de decaimento  $\beta^+$ . Um próton é transformado em um nêutron no núcleo e um pósitron (partícula com as mesmas características do elétron, porém com carga positiva) é ejetado. Por causa

das leis de conservação, um neutrino também é emitido neste decaimento:



Pósitrons gerados neste tipo de decaimento são rapidamente aniquilados por elétrons livres, desaparecendo cerca de  $10^{-6}$ s após sua geração e dando origem a dois raios  $\gamma$ . É importante notar que na emissão  $\beta^-$ , o neutrino foi denotado como  $\bar{\nu}$  e na emissão  $\beta^+$  como  $\nu$ . Entretanto, o  $\bar{\nu}$  é chamado formalmente de anti-neutrino, pois para que haja a conservação do momento angular nas duas expressões fica claro que devem possuir spins opostos.

Ainda no caso dos radionuclídeos com excesso de prótons há outro tipo de processo que compete com a emissão  $\beta^+$ : a captura eletrônica. Este processo consiste na captura de um elétron orbital pelo núcleo que se junta a um próton para originar um nêutron. Como a camada K é mais próxima do núcleo, a probabilidade do elétron capturado pertencer a ela é muito maior do que a camadas mais externas e, por este motivo, a captura eletrônica também é chamada de captura K. A expressão para esse tipo de decaimento é:



Após a captura eletrônica, um raio X característico é emitido quando elétrons das outras camadas preenchem a lacuna deixada na que estava ocupada pelo elétron capturado. Além disso, o núcleo formado pode popular um estado excitado de energia necessitando emitir raios  $\gamma$  para atingir o estado fundamental. Como exemplo, é possível citar o  ${}^{40}\text{K}$  que pode decair por  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  ou por captura eletrônica:

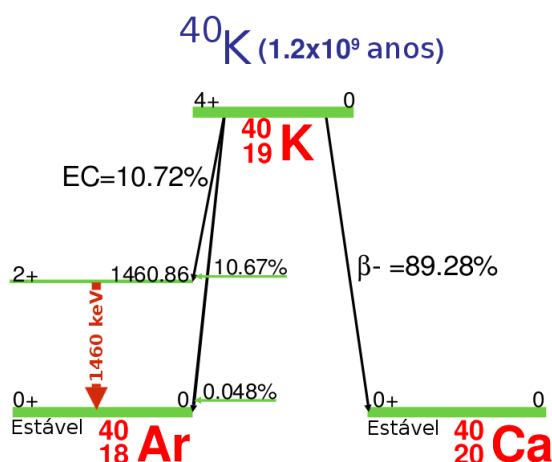


Figura 2.1: Esquema de decaimento radioativo do  ${}^{40}\text{K}$  [INL, 2005].

Através da emissão  $\beta^-$  o núcleo decai para o estado fundamental do  $^{40}\text{Ca}$ . Através da emissão  $\beta^+$  e da captura eletrônica o núcleo pode decair para o estado excitado do  $^{40}\text{Ar}$  de energia 1.46 MeV seguido por uma emissão  $\gamma$ , atingindo assim, seu estado fundamental. A transição pode ocorrer para o estado fundamental do  $^{40}\text{Ar}$  diretamente, mas esse processo ocorre com menor probabilidade [ADAMS & GASPARINI, 1970].

### 2.1.2 Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética possui um espectro de frequências que varia desde as ondas de rádio, passando pelo infra-vermelho, pela faixa visível, pelo ultravioleta e até chegar aos raios X e raios  $\gamma$ . A chamada energia radiante é uma forma de propagação de energia no espaço que não envolve massa. Sua natureza foi discutida ao longo de muito tempo, pois suas propriedades não podiam ser descritas por nenhum modelo clássico. Com a teoria ondulatória foi possível explicar alguns fenômenos, como difração e interferência, mas o espectro atômico, o efeito fotoelétrico e a intensidade da emissão de um corpo negro só puderam ser explicadas após a proposta de Max Planck, em 1900, enunciando que um corpo não absorve nem emite energia de maneira contínua, mas sim de forma discreta. Assim, em 1905, Albert Einstein propôs em seu trabalho sobre efeito fotoelétrico em superfícies metálicas (Prêmio Nobel de Física de 1921), que a interação de uma onda eletromagnética com a matéria se daria por um padrão discreto. Tanto a emissão do elétron quanto o espalhamento da radiação incidente são manifestações da natureza corpuscular da luz, e só podem ser explicadas se assumirmos que a radiação é absorvida e emitida em números inteiros de *quanta*, ou seja, em quantidades inteiras de fótons. Assim, cada fóton possui uma energia  $E$ , que é função da frequência característica da radiação:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (2.9)$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $6.6255 \times 10^{-27}$  erg  $\cdot$  s),  $\nu$  é a frequência da radiação,  $c$  é a velocidade da luz e  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação.

A energia dos raios X e dos raios  $\gamma$  também é expressa em múltiplos de elétrons-volt (eV), normalmente keV ou MeV. Um eV é equivalente à energia necessária para acelerar uma partícula carregada de uma unidade de carga elétrica numa diferença de potencial de 1 volt. Assim, podemos converter a constante de Planck para  $4.1357 \times 10^{-15}$  eV  $\cdot$  s.

Classicamente os raios  $X$  e  $\gamma$  são diferentes de acordo com a faixa de frequência de cada um, como pode ser observado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Faixa de frequência e comprimentos de onda da radiação eletromagnética.

	$\nu$ ( $s^{-1}$ )	$\lambda$ (cm)	Energia
raio $X$	$10^{17} - 10^{19}$	$10^{-7} - 10^{-9}$	40 eV - 40 keV
raio $\gamma$	$10^{19} - 10^{21}$	$10^{-9} - 10^{-11}$	40 keV - 4 MeV

Além disto, os raios  $X$  e os raios  $\gamma$  possuem origens diferentes. Os raios  $\gamma$  são a radiação proveniente do núcleo atômico, enquanto que os raios  $X$  são originados na nuvem eletrônica. Entretanto, há um *overlap* nas faixas de energia, quando os raios  $\gamma$  possuem energias mais baixas e raios  $X$  energias superiores às faixas especificadas. Características mais detalhadas destes dois tipos de radiação eletromagnética podem ser compreendidas a partir dos itens que se seguem.

### Emissão de raios $\gamma$

A emissão de radiação  $\gamma$  é uma das maneiras do núcleo de se livrar do excesso de energia que ele possui devido ao decaimento radioativo ou a reações nucleares induzidas, ou seja, é uma radiação de origem nuclear, pois o núcleo precisa se reorganizar. Como mencionado anteriormente, após o decaimento por emissão  $\beta$  é comum que o núcleo gerado se encontre num estado excitado de energia. A desexcitação ocorre com a emissão de raio  $\gamma$  com energia igual à diferença de energia entre os estados inicial e final. O  $^{60}\text{Co}$ , por exemplo, decai conforme o esquema da figura 2.2.

### Emissão de raios $X$

Um átomo pode estar com os elétrons orbitais fora de sua configuração normal após algum processo de excitação. Uma tendência natural é o rearranjo dos elétrons, ocupando as lacunas deixadas em camadas mais internas com elétrons de camadas mais externas, fazendo com que o átomo retorne ao seu estado de mais baixa energia. A energia liberada neste processo ocorre através da emissão de raios  $X$ , chamados de raios  $X$  característicos, e seu valor é dado pela diferença de energia entre os estados final e inicial. Essa energia liberada pode ser transferida a um outro elétron orbital que pode ser expelido do átomo (*Efeito Auger*). A energia do *elétron Auger* é dada pela diferença de energia entre os dois



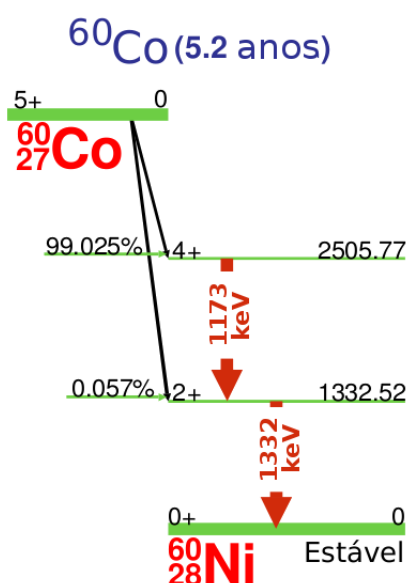


Figura 2.2: Esquema de decaimento radioativo do  $^{60}\text{Co}$  [INL, 2005].

níveis que geraram o raio X menos a energia de ligação do elétron expelido e, desta forma, produzem um espectro discreto de energia.

Outra forma de produção de raios X é a partir da interação de elétrons rápidos com a matéria. Quando elétrons se aproximam do campo nuclear, a interação produz um desvio na trajetória e como consequência, ocorre perda de energia na forma de radiação de freamento (*Bremsstrahlung*). Tal perda é diretamente proporcional à energia do elétron incidente e ao número de prótons no núcleo [ADAMS & GASPARINI, 1970]. A radiação emitida encontra-se na faixa de raios X e raios  $\gamma$  de baixa energia, resultando num espectro contínuo por conta da natureza estatística da perda de energia do elétron no processo. A radiação emitida após o freamento também pode arrancar elétrons de camadas do átomo, o que gera a superposição das linhas provenientes de raios X característicos com o espectro contínuo de *Bremsstrahlung*.

### 2.1.3 Interação da Radiação com a Matéria

Fisicamente, a interação da radiação com um material pode provocar três efeitos: excitação atômica ou molecular, ionização ou ativação do núcleo. A excitação se dá quando elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente em forma de fótons ou raios X característicos. A ionização ocorre quando elétrons são removidos de seus orbitais pela radiação incidente e resultam em elétrons livres de alta energia, íons positivos ou radicais livres no caso da quebra de ligações químicas.

Finalmente, a ativação do núcleo ocorre quando a radiação incidente possui energia superior à energia de ligação dos nucleons, podendo provocar reações nucleares, onde há um núcleo residual e emissão de radiação. Neste último caso, podemos citar como exemplo a absorção de nêutrons térmicos (nêutrons de baixa energia) que, dependendo da natureza do material irradiado e da probabilidade de captura do nêutron pelo núcleo, pode deixar o núcleo num estado excitado.

Conhecer os processos de interação da radiação com a matéria é um fator de grande relevância na operação de detectores de radiação e, com esse objetivo, é possível separar as radiações em dois grupos:

- Radiação de partículas carregadas: Partículas carregadas pesadas ( $\alpha$ ) e Elétrons rápidos;
- Radiação sem carga: Nêutrons, Raios X e Raios  $\gamma$ ;

As radiações constituídas por partículas carregadas ao interagirem com a matéria, são ditas diretamente ionizantes e podem converter parte de sua energia cinética em radiação eletromagnética de *Bremsstrahlung*, como resultado da interação entre os campos do núcleo e seus elétrons e da partícula incidente, como mencionado anteriormente. As radiações que não possuem carga são chamadas de radiações indiretamente ionizantes, pois transferem sua energia para elétrons. E estes, por sua vez, provocam ionizações na matéria [TAUHATA *et al.*, 2003].

No presente estudo, os dados foram obtidos através da análise de amostras utilizando espectrometria de raios  $\gamma$ . A detecção de raios  $\gamma$  depende diretamente de sua interação com a matéria, podendo assim, transferir total ou parcialmente a energia do fóton incidente a elétrons do material absorvedor, no caso o detector. Por esta razão, os três processos mais importantes de interação da radiação eletromagnética com a matéria serão descritos a seguir.

### **Absorção Fotoelétrica**

No processo de absorção fotoelétrica os raios  $\gamma$  incidentes interagem com o meio absorvedor de forma que o fóton transfere totalmente sua energia ao átomo que expelle um

elétron orbital (fotoelétron) com energia cinética  $E_c$  dada por:

$$E_c = h\nu - E_b \quad (2.10)$$

onde  $h\nu$  é a energia do fóton incidente e  $E_b$  é a energia de ligação do elétron orbital. Ao emitir um fotoelétron, a lacuna deixada na camada é ocupada rapidamente por um elétron livre que pode ser capturado do meio ou por elétrons de camadas externas, emitindo raios X característicos.

A absorção fotoelétrica é o processo predominante para energias baixas e sua ocorrência aumenta para absorvedores de número atômico alto. Essa dependência com o número atômico justifica o uso de materiais como o chumbo para confeccionar blindagens para raios  $\gamma$ .

### Espalhamento Compton

O espalhamento Compton ocorre quando um raio  $\gamma$  incidente interage com um elétron livre ou muito pouco ligado do absorvedor e é espalhado com um ângulo  $\theta$  em relação à sua direção original. Parte da energia do fóton é transferida para o elétron, inicialmente em repouso, chamado de elétron de recuo. A energia do fóton espalhado de um ângulo  $\theta$  ( $h\nu'$ ) pode ser obtida a partir das equações de conservação de energia e momento para o seguinte esquema:

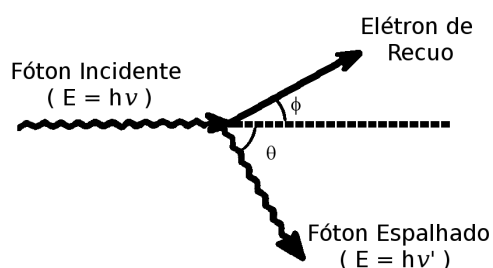


Figura 2.3: Esquema do espalhamento Compton para identificar os símbolos da conservação de energia e de momento.

A energia  $h\nu'$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.11)$$

Onde  $m_0c^2$  é a energia de repouso do elétron (0,511 MeV). De acordo com a expressão

observa-se que para pequenos ângulos de espalhamento, pouca energia é transferida ao elétron. Além disso, a energia do fóton após a interação diminui à medida que o ângulo de espalhamento aumenta, atingindo seu mínimo para  $\theta = 180^\circ$ , onde ocorre o retroespalhamento.

### Produção de Pares

Este processo é uma das formas predominantes de absorção da radiação eletromagnética de alta energia, pois quando a energia do raio  $\gamma$  incidente no material é o dobro da energia de repouso do elétron (1,022 MeV) a produção de pares passa a ser energeticamente possível.

Neste tipo de interação o raio  $\gamma$  dá origem a um par elétron-pósitron, transferindo toda energia excedente ao par em forma de energia cinética. O pósitron gerado é aniquilado no meio e surgem dois fótons como produto secundário desta interação.

Os três processos de interação da radiação eletromagnética com a matéria descritos acima são de grande importância para estudos que envolvam a detecção de raios  $\gamma$ . Entretanto, a probabilidade de ocorrência destes processos apresenta uma dependência com o número atômico do absorvedor e com a energia do fóton incidente. Na figura 2.4 é possível observar essa dependência e as regiões de predominância dos processos.

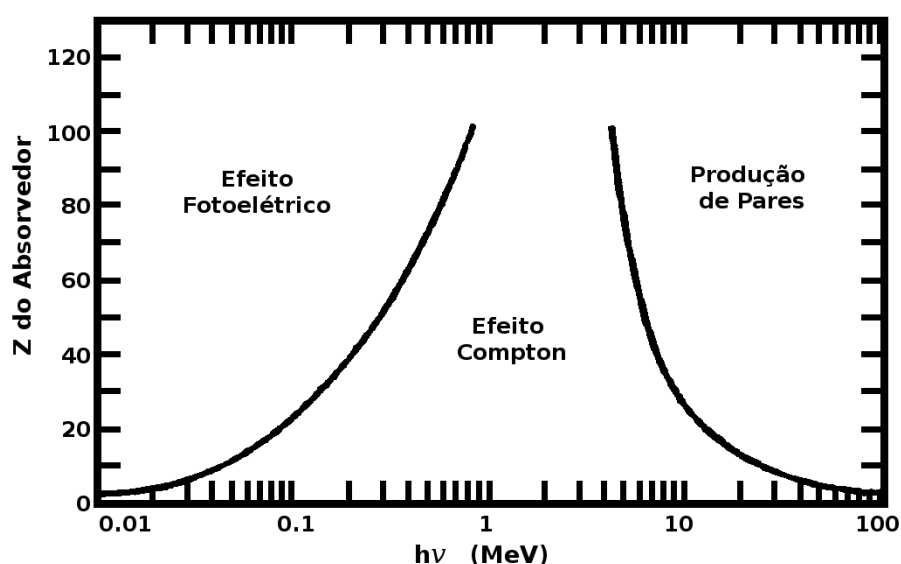


Figura 2.4: Região de predominância dos três principais tipos de interação da radiação  $\gamma$  com a matéria [KNOLL, 1979].

### 2.1.4 Emissores Naturais de Radiação $\gamma$

Os elementos naturais instáveis ou isótopos radioativos podem ser classificados em dois tipos: primordiais ou secundários, onde os primordiais são aqueles com meia-vida muito longa e existem desde a nucleossíntese e os secundários são os de meia-vida curta que só podem ser detectados no presente porque estão constantemente sendo formados.

O potássio (K) é um elemento bastante abundante na crosta terrestre e seu isótopo  $^{40}\text{K}$  é um grande contribuinte para a radiação  $\gamma$  proveniente de radioisótopos primordiais [ADAMS & GASPARINI, 1970]. O caráter geoquímico de um elemento é muito influenciado pela configuração eletrônica de seus átomos e, neste sentido, o potássio é caracterizado geoquimicamente como elemento *litófilo*<sup>1</sup> que, por suas afinidades, participa com cerca de 2%, na composição de mais de três centenas de minerais. Por este motivo, o potássio é o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre, representando cerca de 2,4% de sua massa [LIDE, 1994, NASCIMENTO & LOUREIRO, 2004].

A distribuição de K nas rochas é irregular, dependendo de sua formação, enquanto nos granitos o teor médio é de 4,5%, nos *basaltos*<sup>2</sup> dos fundos oceânicos é sempre inferior a 0,3%. A maioria dos minerais que possuem K é insolúvel e o metal é obtido com grande dificuldade e, por este motivo não são considerados como minério [LIDE, 1994]. Os átomos de K são os principais constituintes dos feldspatos (pertencentes à classe dos silicatos), sendo incorporados à estrutura cristalina dos fragmentos de rochas. Uma característica importante do K é que a sua concentração é igual em sedimentos que possuem a mesma origem (rocha fonte), o que produz uma espécie de relação radioativa com a própria fonte [KOGAN, 1969]. Esta relação direta é uma importante ferramenta para estudos geológicos como origem e transporte de sedimentos [ANJOS *et al.*, 2005].

Outros emissores naturais de radiação  $\gamma$  importantes para este estudo são o Tório (Th) e o Urânio (U), que também são elementos litófilos. O Th é encontrado em quantidades pequenas na maioria das rochas e solos, onde é aproximadamente três vezes mais abundante do que o U e é quase tão comum quanto o chumbo (Pb). O Th é extraído comercialmente do mineral *monazita*<sup>3</sup>, que contém de 3 a 9% de  $\text{ThO}_2$  [LIDE, 1994]. Suas propriedades físicas estão diretamente associadas ao teor de óxido no composto. Quando puro, o Th é um metal

<sup>1</sup>[litos=rocha; phylos=próximo/amigo] [WINGE, 2001]. Representa a classe geoquímica de elementos que tem alta afinidade com o oxigênio, e se combinam com O e Si para formar silicatos [DURRANCE, 1986].

<sup>2</sup>Rocha vulcânica escura de grão fino, constituinte principal da crosta oceânica.

<sup>3</sup>Monazita é um fosfato de metais de terras raras e de tório, que se concentra nas areias, em razão de sua resistência ao intemperismo químico e à alta densidade relativa em associação com outros minerais resistentes e pesados, como a magnetita, a ilmenita, o rutilo e o zircão [COELHO *et al.*, 2005].

branco prateado, mas em presença do ar perde seu brilho natural e escurece lentamente tornando-se cinza e, posteriormente, preto. São conhecidos vinte e cinco isótopos do Th, com massa atômica desde 212 até 236, todos instáveis.

O U é considerado mais abundante do que o mercúrio (Hg) e a prata (Ag) ocorrendo em diversos minerais e também sendo encontrado em areias monazíticas, de onde é extraído comercialmente. É um metal pesado de aspecto cinza a branco prateado, muito semelhante à coloração do níquel, e quando exposto ao ar fica coberto por uma camada de óxido. Existem dezesseis isótopos do U, todos radioativos. Dentre eles, o mais abundante é  $^{238}\text{U}$ , que representa cerca de 99% do U natural [LIDE, 1994].

$^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  são radioisótopos que decaem para importantes emissores  $\gamma$  secundários, formando assim, uma série de decaimentos. As séries de decaimentos que mais contribuem para a radiação  $\gamma$  terrestre são:  $^{232}\text{Th}$  (Série do Tório),  $^{235}\text{U}$  (Série do Actínio) e  $^{238}\text{U}$  (Série do Urânio), decaindo para diversos filhos até atingir um elemento estável, que no caso destas três séries são isótopos do Pb [ADAMS & GASPARINI, 1970].

Em uma série radioativa, onde um elemento radioativo 1 decai para um filho radioativo 2 que, por sua vez também é radioativo, a lei de decaimento deve ser representada de maneira mais elaborada do que as equações (2.2) e (2.3). Tomando como exemplo o esquema:



Temos que  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são as constantes de decaimento dos elementos radioativos 1 e 2, respectivamente. Como a taxa de perda por decaimento é proporcional à quantidade de elemento presente na amostra, a taxa de decaimento de um filho é dada pela diferença entre sua taxa de perda e sua produção:

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2 \quad (2.13)$$

onde  $N_1$  e  $N_2$  representam o número de átomos de cada tipo num tempo qualquer. Partindo da condição para  $t = 0$ , onde  $N_1 = N_1^0$  e, conseqüentemente para um tempo  $t$  qualquer  $N_1 = N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t}$ , obtem-se:

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1^0 \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} - N_2 \lambda_2 \quad (2.14)$$

que apresenta a seguinte solução geral:

$$N_2 = N_1^0 \lambda_1 \left[ \frac{(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] + N_2^0 \cdot e^{-\lambda_2 t} \quad (2.15)$$

A atividade do filho,  $N_2 \lambda_2$ , é dada por:

$$N_2 \lambda_2 = N_1 \lambda_1 \left[ \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] + N_2^0 \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2 t} \quad (2.16)$$

Um parâmetro importante para a determinação do equilíbrio entre as atividades dos radionuclídeos pai e filho é a razão:

$$\left( \frac{N_2 \lambda_2}{N_1 \lambda_1} \right) = \left[ \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \quad (2.17)$$

onde na expressão foi utilizada a condição inicial  $N_2^0 = 0$  em  $t = 0$ . A razão das atividades é nula para  $t = 0$ , é igual a 1 para um tempo intermediário  $t$  que representa o ponto de máximo de atividade do núcleo filho e é máxima para valores muito grandes de  $t$ . Como é possível observar a razão das atividades depende fortemente da meia-vida dos núclídeos envolvidos. Assim, se a meia vida do núcleo pai é menor do que a meia-vida do núcleo filho ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ), a razão diminui a medida que o tempo passa, gerando um estado permanente de *desequilíbrio*. Entretanto, quando  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ , a diminuição na atividade do núcleo pai não é perceptível enquanto os núcleos filhos passam por várias meias-vidas. Este estado é chamado de *equilíbrio secular*. Neste caso, a expressão anterior se torna:

$$\left( \frac{N_2 \lambda_2}{N_1 \lambda_1} \right) = (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.18)$$

Para tempos muito maiores do que a meia-vida do núcleo filho, a razão é igual a 1. Então, numa série radioativa de decaimentos o *equilíbrio secular* implica:

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3 = \dots = N_n \lambda_n \quad (2.19)$$

É importante notar que se um ou mais dos núcleos filhos produzidos na série foi perdido de uma amostra geológica, por qualquer processo que não seja o decaimento radioativo, a equação acima não pode ser considerada válida e o *desequilíbrio* existe [IVANOVICH & HARMON, 1992].

As séries radioativas de maior interesse para este trabalho são  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$ . A série do  $^{232}\text{Th}$  inclui radionuclídeos  $\alpha$  e  $\beta$  emissores que estão presentes na natureza, pois a meia-vida do  $^{232}\text{Th}$  é muito longa ( $t_{1/2} = 1.39 \times 10^{10}$  anos), e termina no núcleo estável  $^{208}\text{Pb}$ .

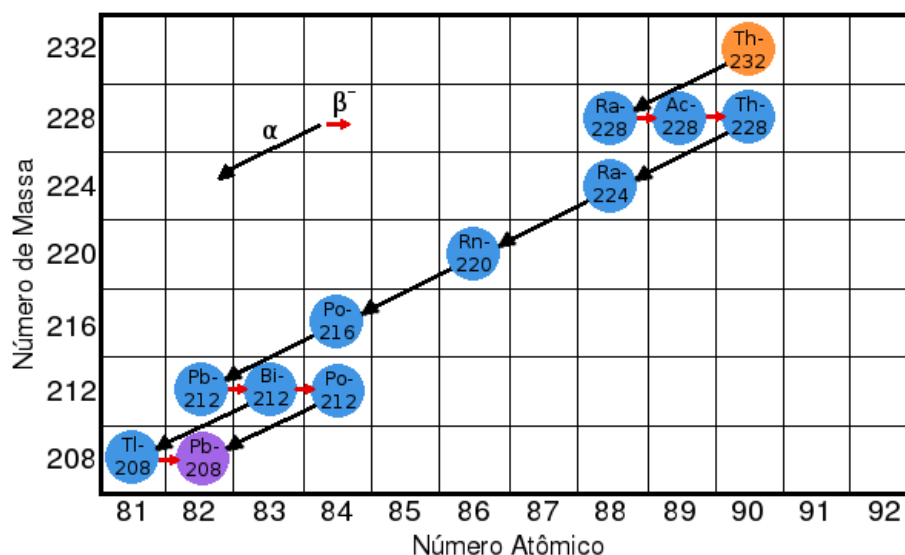


Figura 2.5: Esquema da Série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$ .

A série do  $^{238}\text{U}$  é a maior série radioativa conhecida e possui 17 elementos ao todo. Ela se inicia no  $^{238}\text{U}$ , núcleo mais pesado existente na natureza e com meia-vida de  $4.47 \times 10^9$  anos, e termina no isótopo estável mais leve do chumbo:  $^{206}\text{Pb}$ .

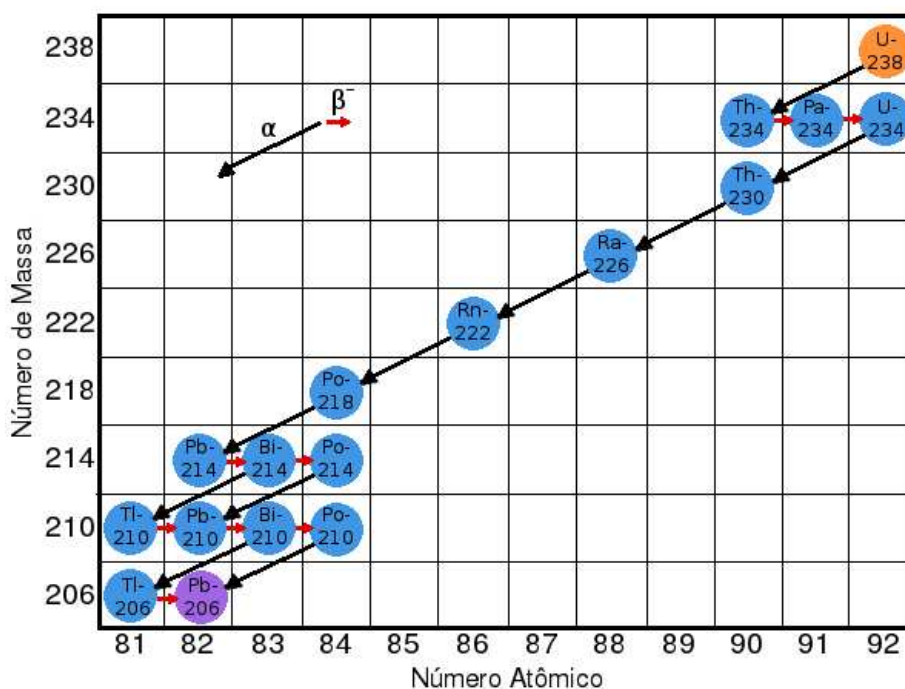


Figura 2.6: Esquema da Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ .



Nas figuras 2.5 e 2.6 é possível observar a sequência de decaimentos  $\alpha$ , onde o nuclídeo é diminuído de duas unidades no seu número atômico e de quatro unidades no seu número de massa, e os decaimentos  $\beta^-$ , onde o nuclídeo aumenta seu número atômico de uma unidade, transformando-se em outro nuclídeo com mesmo número de massa. Na cor laranja está representado o núcleo pai, na cor azul estão representados os núcleos filhos e, em lilás, encontra-se o elemento estável no final da série.

## 2.2 Radioatividade em Geologia

A radioatividade natural tem sido utilizada de diversas formas em estudos geológicos, pois todas as rochas possuem, elementos radioativos em sua composição mineral, umas em maior e outras em menor quantidade. Desta forma, é possível mapear como varia a intensidade da radioatividade natural numa determinada área. Para tanto, existem diversas técnicas que envolvem detectores de radiação para utilização *in situ*, como análises com detectores portáteis ou detectores de grande porte em aeronaves e ainda, análises em laboratório, onde amostras são coletadas do seu local de origem.

A radioatividade de alguns minerais permite sua identificação e também, pode ser utilizada como traçador de processos geológicos. Assim, ao se estudar a mobilidade dos radio-nuclídeos nos minerais e rochas, de acordo com suas propriedades geoquímicas, obtém-se uma ferramenta fundamental para compreender um pouco da complexa história geológica.

### 2.2.1 Propriedades Geoquímicas do Urânio e do Tório

O urânio é um membro do grupo dos actínídeos<sup>4</sup> e pode existir em quatro estados de valência:  $U^{3+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $U^{5+}$  e  $U^{6+}$ . Geralmente, encontra-se na natureza nas formas  $U^{4+}$  e na forma  $U^{6+}$ . Entretanto, o estado  $U^{5+}$  é formado durante a oxidação do  $U^{4+}$  para  $U^{6+}$ , mas é oxidado rapidamente só sendo preservado em ambientes com baixo *potencial redox*<sup>5</sup>. Em condições de extrema oxidação,  $U^{6+}$  é considerado a forma estável e é o estado de valência mais favorável para a dissolução de U, por formar o complexo solúvel  $UO_2^{2+}$  (íon uranila) que possui papel importante no transporte de U. A permanência do U na rocha fonte depende de sua localização mineralógica na rocha, pois se estiver agregado com minerais solúveis, como a forma  $UO_2$  (uraninita), ou em regiões intergranulares da

<sup>4</sup>Conjunto ou série de elementos após o actínio na Tabela Periódica, com números atômicos que vão do tório (Z = 90) ao laurêncio (Z = 103).

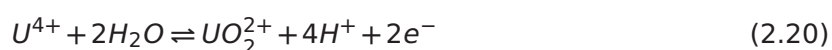
<sup>5</sup>Tendência do elemento químico em adquirir elétrons com a finalidade de ser reduzido, ou seja, de diminuir seu número de oxidação.

rocha será facilmente removido. Por outro lado, se o urânio estiver agregado a qualquer mineral resistente à dissolução, como o *zircão*<sup>6</sup>, permanecerá na rocha. [DURRANCE, 1986, IVANOVICH & HARMON, 1992].

Assim como o urânio, o tório também é membro do grupo dos actínídeos com fortes características de elemento litófilo. O Tório ocorre em apenas um estado de oxidação, Th<sup>4+</sup>, que independe do potencial redox do ambiente e é bastante insolúvel em água, podendo ser encontrado em alguns minerais que contém Zr (zircônio) e U em sua composição. Por causa de seu tamanho e da sua carga iônica, Th<sup>4+</sup> possui uma grande tendência a formar íons complexos com cloreto, fluoreto, carbonato e outros. A formação de silicatos, fosfatos e compostos orgânicos também é possível, sendo estes compostos capazes de reter Th em algumas condições específicas de pH [DURRANCE, 1986].

### 2.2.2 Ciclo Geoquímico do Urânio e do Tório

No estado de oxidação 4+ tanto U quanto Th são praticamente imóveis quimicamente em ambientes próximos à superfície a baixas temperaturas. Como dito anteriormente, U pode ser mobilizado por oxidação ao seu estado 6+ de acordo com a seguinte equação química:



Para compreender a mobilidade do U na natureza é necessário entender como ocorre sua dissolução na superfície e em águas subterrâneas. De acordo com Durrance (1986), sete fatores influenciam a concentração de U na natureza: 1) Quantidade de U na rocha fonte, no sedimento ou no solo, e a facilidade com a qual este pode ser dissolvido; 2) Proximidade entre a fonte de U e a água; 3) Grau de isolamento hidráulico, ou seja, o grau de facilidade de diluição da água local; 4) Efeitos climáticos, como efeitos de evapotranspiração; 5) pH e estado de oxidação da água; 6) Disponibilidade de agentes que podem aumentar a solubilidade do U, ou de agentes que podem se ligar ao U formando minerais insolúveis; 7) Presença de materiais absorvedores: matéria orgânica, Fe<sup>3+</sup>, argilas, etc.

Em ambientes redutores, o U<sup>4+</sup> forma complexos *hidróxidos*<sup>7</sup>. Os complexos do tipo hidróxido uranoso têm pouca mobilidade em água natural para quase todos os valores de pH. Entretanto, para valores de pH acima de 7 (soluções básicas), a formação de U(OH)<sub>5</sub><sup>-</sup>

<sup>6</sup>Mineral silicato de zircônio: ZrSiO<sub>4</sub> [WINGE, 2001].

<sup>7</sup>Grupos inorgânicos que contém hidroxilas OH<sup>-</sup>.

faz com que a concentração de U aumente. O mesmo ocorre para valores de pH abaixo de 4 (soluções ácidas), onde a formação de fluoretos ( $F^-$ ) é significativa e aumenta bastante a solubilidade do U.

Nos ambientes oxidantes, os complexos compostos de  $UO_2$  são muito mais solúveis do que os complexos uranosos. Os compostos mais importantes neste tipo de ambiente são  $UO_2^{2+}$  e  $UO_2(OH)^+$ , que aumentam a solubilidade do U com o aumento da temperatura, e também  $(UO_2)_2(OH_2^{2+})$  e  $(UO_2)_3(OH_5^+)$  que se tornam mais importantes a medida que a quantidade de U dissolvido aumenta. Outros complexos com uranila, como sulfatos, carbonatos e fosfatos, também são importantes na determinação da solubilidade do U. O íon uranila é estável para valores de pH abaixo de 5.

Outro fator importante no ciclo geoquímico do U e do Th é a mobilização e o transporte destes elementos através de sedimentos, onde o movimento depende das propriedades físicas e da velocidade de escoamento do meio transportador. Por causa da sua baixa solubilidade, o transporte de Th se dá quase que exclusivamente por meio do transporte de sedimentos [IVANOVICH & HARMON, 1992].

### 2.2.3 As relações eTh/eU e eTh/K

A formação de uma camada sedimentar está associada com a fragmentação da rocha fonte, seguida do transporte, da redistribuição e da sedimentação. Como as quantidades de urânio, tório e potássio nos solos está intimamente ligada ao teor de radioatividade da rocha fonte, o estudo das concentrações destes elementos nos sedimentos, pode fornecer informações sobre o processo de sedimentação [KOGAN, 1969]. Além disto, através da determinação das razões entre as concentrações de Th, U e K também é possível determinar as fácies<sup>8</sup> geoquímicas e obter indicações sobre a mineralogia dos sedimentos [ANJOS *et al.*, 2006].

A razão eTh/eU é usada para apontar fácies geoquímicas de acordo com a indicação do potencial redox. Uma vez que o comportamento do Th é invariante em diferentes potenciais redox e há mobilidade do U em ambientes oxidantes, gerando diminuição das concentrações de U nos sedimentos, e tendência de sua fixação em ambientes redutores. Sendo assim, as razões eTh/eU podem ser utilizadas com a finalidade de indicar as condições de oxidação de um determinado ambiente deposicional. Em geral, valores de eTh/eU

<sup>8</sup>Termo geral para indicar o aspecto/aparência (a "face") de uma rocha, por exemplo, caracterizando um tipo ou grupo de rochas em estudo [WINGE, 2001].

menores que 2 indicam que o ambiente promoveu uma fixação de U, ou seja, indicam um ambiente redutor. Desta forma, é possível dizer que os sedimentos possuem características que sugerem origem marinha. Por outro lado, valores maiores que 7 indicam um ambiente com forte oxidação e perda de U, sugerindo que os sedimentos possuem origem continental [ADAMS & WEAVER, 1958]. Uma representação gráfica para a razão  $eTh/eU$  pode ser observada na figura 2.7.

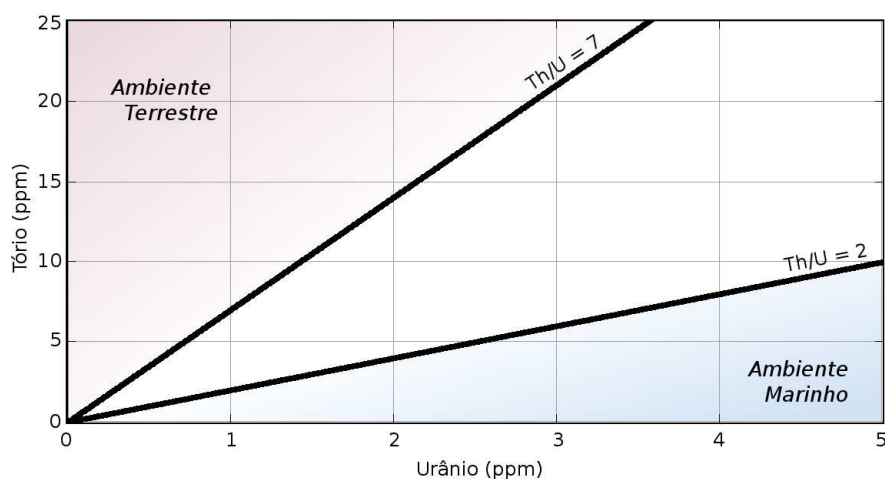


Figura 2.7: Determinação do ambiente de sedimentação a partir da razão  $eTh/eU$  encontrada nos sedimentos.

Atualmente, a razão  $eTh/K$  é bastante utilizada para ajudar no reconhecimento de associações de argilominerais e na discriminação de micas e feldspatos em rochas graníticas [SCHLUMBERGER, 2005, MACFARLANE *et al.*, 1989]. Como tanto o Th (por adsorção) quanto o K (composição química) estão associados com os argilominerais, o valor de  $eTh/K$  expressa o teor de K como um indicador do tipo de argilomineral. A Figura 2.8 representa uma carta mineralógica utilizada para determinar o tipo de mineral a partir de concentrações de Th e K medidas por espectrometria da radiação  $\gamma$  natural.

Na figura 2.9 é possível visualizar um diagrama cruzado que pode ser construído a partir das duas informações descritas anteriormente, a razão  $Th/K$  versus a razão  $Th/U$ .

Neste diagrama, produzido por Anjos *et al.* (2006), tanto as variações na composição mineral, quanto a indicação do ambiente de sedimentação podem ser observadas.

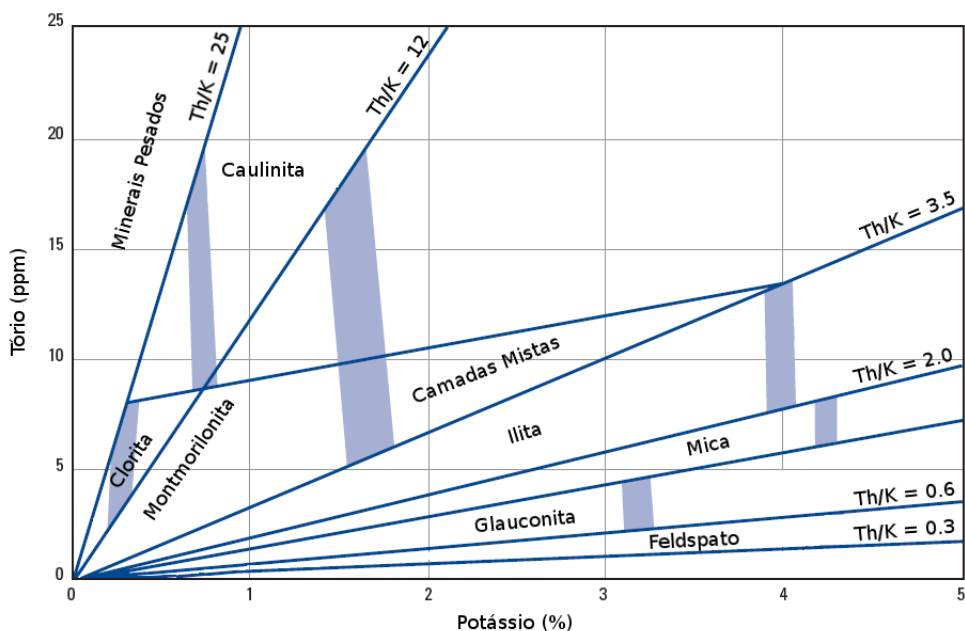


Figura 2.8: Carta mineralógica com as associações de argilomineral a partir da razão eTh/K adaptada de Schlumberger (2005).

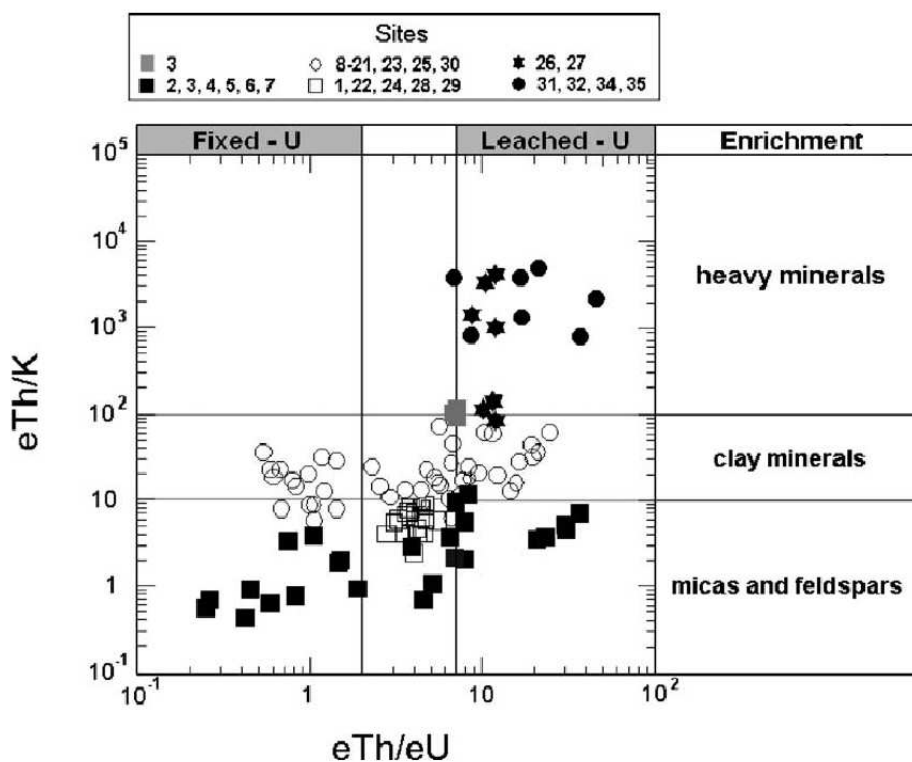


Figura 2.9: Diagrama cruzado das eTh/K versus eTh/eU obtido por Anjos et al. (2006).

## 3 *Materiais e Métodos*

Este capítulo se propõe a apresentar detalhadamente a região objeto do presente estudo e, em seguida, a descrever o aparato experimental e os métodos de análise utilizados na aquisição de dados.

### 3.1 Aspectos Geológicos

A região de interesse para a realização deste estudo pertence ao município de Angra dos Reis, litoral sul do estado do Rio de Janeiro, como observado na figura 3.1.



Figura 3.1: Região da Baía da Ilha Grande e seu entorno. (Modificado de INPE (2008)).

Compreendendo a faixa costeira desde a Praia Brava (23°00'S e 44°28'W) até a Praia de São Gonçalo (23°02'S e 44°37'W) na Baía da Ilha Grande.

A seguir, serão descritos alguns aspectos geológicos da região com o objetivo de compreender a formação geológica local, a geomorfologia, a hidrodinâmica na parte interna da baía e ainda como se dá a distribuição dos sedimentos na região costeira.

### 3.1.1 Contexto Geológico e Geotectônico

No contexto tectônico, a Baía da Ilha Grande situa-se na porção sudoeste da chamada Faixa Ribeira Central que se desenvolveu durante a *Orogênese Brasileira*<sup>1</sup> (650-480 Ma) e cuja evolução tectônica está relacionada à convergência litosférica e consequente formação do supercontinente Gondwana que existiu até o Cretáceo (~ 150 Ma), ao final da Era Mesozóica [MEDEIROS, 2006]. A quebra da porção ocidental do Gondwana e a abertura do Atlântico Sul levaram a diversos processos, como o soerguimento da Serra do Mar que gerou um aumento no fornecimento de sedimentos nas margens continentais resultando no desenvolvimento das bacias de Santos e Campos [COBBOLD *et al.*, 2001, ALMEIDA & CARNEIRO, 1998].

Dentre os compartimentos tectônicos pertencentes à região da Baía da Ilha Grande e à Serra da Bocaina é possível destacar o *Terreno Ocidental*, o *Terreno Oriental* e o *Domínio Paraíba do Sul* [EIRADO *et al.*, 2006]. O Terreno Oriental é constituído por ortognaisses<sup>2</sup> com predominância de alguns minerais como hornblenda, biotita e minerais máficos. O Terreno Ocidental é composto por metassedimentos como gnaisses<sup>3</sup> ricos em quartzitos e outros minerais como granada e biotita. As rochas dos Terrenos Oriental e Ocidental são muito presentes e aflorantes em toda a região costeira da Baía da Ilha Grande. O Domínio Paraíba do Sul é formado por paragnaisses<sup>4</sup> e por outros tipos de rochas metamórficas, como xistos pelíticos, gonditos e mármore que ocorrem apenas na região da Serra da Bocaina.

---

<sup>1</sup>Orogênese é o conjunto de processos tectônicos pelos quais vastas regiões da crosta são deformadas e elevadas, e está relacionado com o processo de formação de uma cadeia de montanhas e com a tectônica compressional de placas [WINGE, 2001].

<sup>2</sup>Rocha metamórfica de origem ígnea.

<sup>3</sup>Tipo de rocha metamórfica resultante da deformação de sedimentos provenientes de rocha sedimentar ou de granitos. Exemplo: Pão-de-açúcar.

<sup>4</sup>Rocha metamórfica de origem sedimentar. Assim como no caso do prefixo *orto*, o prefixo *para* é aplicado antecedendo o nome da rocha metamórfica.

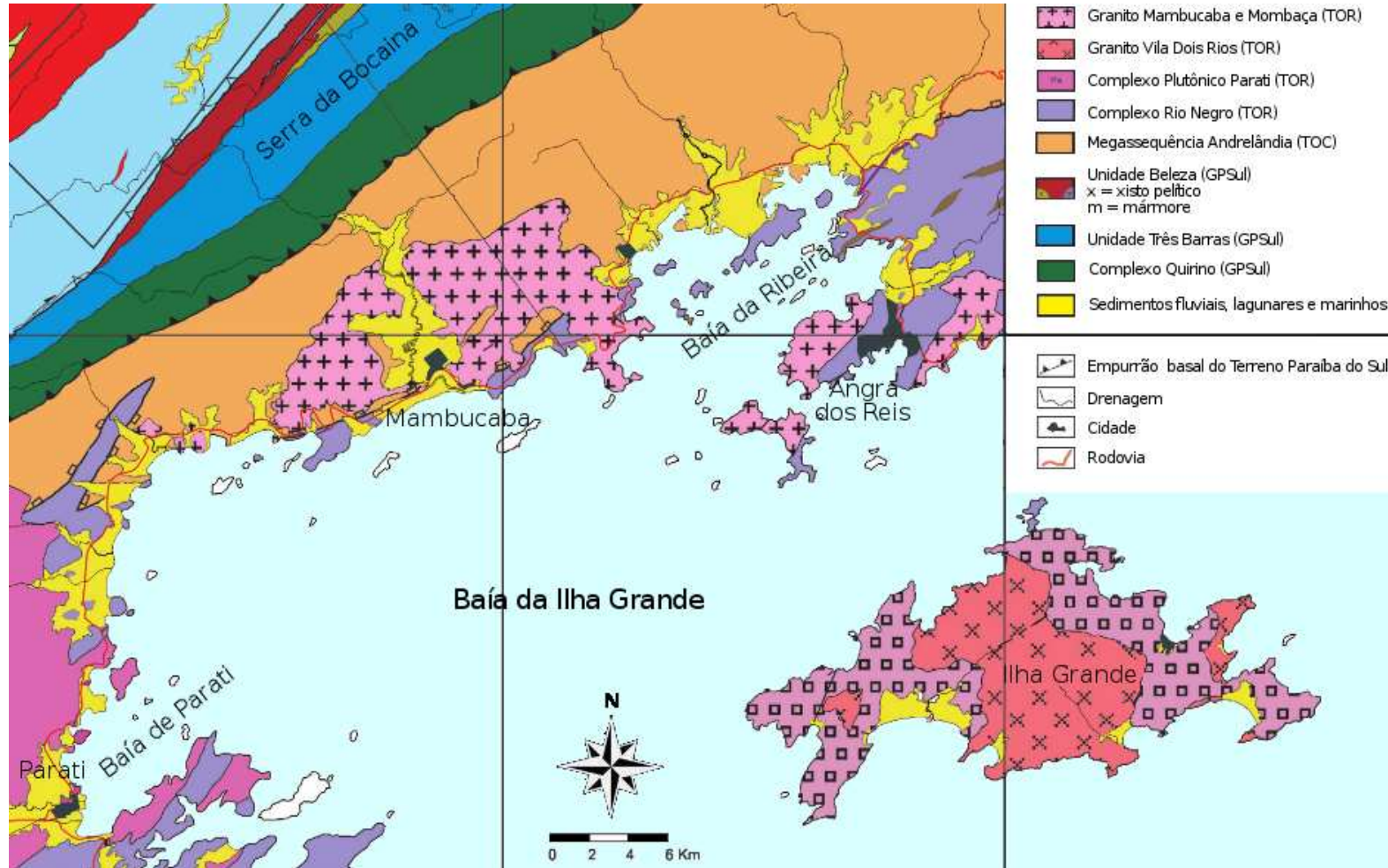


Figura 3.2: Mapa Geológico da Região da Serra da Bocaina e da Baía de Ilha Grande. Na legenda é possível observar algumas formações geológicas pertencentes ao Terreno Oriental (TOR), ao Terreno Ocidental (TOC) e ao Grupo Paraíba do Sul (GPSul) (Modificado de Eirado (2006)).



Em todos os compartimentos mencionados ocorre o afloramento de granitóides (rochas com aspecto de granito). Os granitóides são rochas ígneas de origem plutônica, ou seja, rochas que se cristalizam em profundidade e perdem calor de forma muito lenta, formando assim, cristais bem definidos e, normalmente, de grandes dimensões [MEDEIROS, 2006, WINGE, 2001, MACHADO, 2003].

### 3.1.2 Geomorfologia

A caracterização geomorfológica da região é, em linhas gerais, dada pelo domínio da Serra do Mar e pela presença de estreitas planícies costeiras. As escarpas<sup>5</sup> da Serra do Mar encontram-se muito próximas à linha de costa. Os maiores valores de altitude do Planalto da Bocaina, se encontram muito mais próximos da costa no Rio de Janeiro do que em São Paulo [MARTIN *et al.*, 1980]. A linha de costa da Baía da Ilha Grande é bastante recortada e marcada por costões rochosos que se intercalam com as planícies fluvio-marinhas [MEDEIROS, 2006].

A Serra do Mar tem sua origem atribuída a um processo tectônico dado pelo soerguimento da área plataformal e continental durante uma grande transgressão marinha no Cretáceo Superior (~ 70 Ma) a efeito da compensação isostática entre a bacia de afundamento e a área soerguida que sofreu alívio de carga devido à erosão [ALMEIDA & CARNEIRO, 1998].

A geomorfologia da área emersa da região é caracterizada por distintos domínios de formas de relevo, detalhados a seguir, conforme subdivisão realizada por [MEDEIROS, 2006]. O *Planalto da Serra da Bocaina* está localizado entre as escarpas sul e norte da Serra do Mar, com altitude média de 1400m e máxima de 2000m (Pico do Frade). Possui um relevo suave com a presença de colinas e vales fluviais que desaguam na Baía da Ilha Grande. A *Escarpa Sul da Serra do Mar* é um domínio com encostas bastante íngremes e vales fluviais encaixados. A drenagem das escarpas e a orientação dos canais é controlada por processos associados ao alto gradiente, como movimentos de massa. A altitude da escarpa varia desde cerca de 1100m até a linha de costa. As *Planícies Costeiras* desta região são bastante estreitas e são resultado de processos de sedimentação fluvial e marinha. Estas superfícies tiveram suas áreas expandidas, com algumas regiões tornando-se emersas em função da regressão subsequente ao clímax da transgressão holocênica, há cerca de 5100 anos, por este motivo podem ser observados atualmente alguns depósitos marinhos emersos nas planícies costeiras [DIAS *et al.*, 1990, MAHIQUES, 1987].

<sup>5</sup>Porção de relevo na forma de despenhadeiros ou penhascos verticalizados.

A área submersa da Baía da Ilha Grande foi estudada por Mahiques (1987), que propõe a divisão da sua fisiografia de fundo em três porções limitadas pela Ilha Grande. São elas porção Oeste, Canal Central e porção Leste. Entretanto, para este trabalho, a porção Oeste possui maior relevância. Essa área submersa apresenta profundidades superiores a 20m chegando a 40m, onde um canal faz a interface com o mar aberto. Na Enseada de Parati e da Baía da Ribeira encontram-se as áreas mais rasas, com cerca de 10m de profundidade. Em seu trabalho, Mahiques (1987) ressalta que atualmente existe uma ausência de aporte sedimentar em volumes significativos na Baía da Ilha Grande, o que faz com que sua atual topografia de fundo seja reflexo da conformação batimétrica originada durante o último evento regressivo-transgressivo.

Na figura 3.3 pode ser observado um mapa batimétrico bastante detalhado da Baía da Ilha Grande elaborado por Dias *et al.* (1990) na escala 1:80.000 e com intervalo de 1 m entre as linhas batimétricas.

De acordo com esta figura, as profundidades não se encontram distribuídas de forma homogênea, sendo a parte oeste menos acidentada do que o restante da baía. Além disto, a parte oeste é marcada pela presença de um banco arenoso junto à barra oeste e uma ampla área de morfologia aplainada é observada ao norte deste.

### 3.1.3 Hidrodinâmica

Os trabalhos elaborados por Signorini (1980) e Ikeda & Stevenson (1980), que estudam a circulação na região da Baía da Ilha Grande, a definem como um sistema estuarino conectado ao oceano nas extremidades leste e oeste, indicando a existência de uma circulação predominante no sentido horário entrando pela porção Oeste, passando pelo Canal Central e retornando ao oceano pela porção Leste.

A maré tem pouca influência sobre a circulação da Baía da Ilha Grande com relação aos demais efeitos responsáveis por esta circulação. O período natural de oscilação da maré no sistema Ilha Grande-Sepetiba é próximo a seis horas e os gradientes de densidade, resultado da mistura entre águas marinhas e continentais, atuantes sobre a região são pouco eficientes na geração de correntes, enquanto o vento atuante sobre a plataforma continental adjacente exerce influência significativa sobre a circulação no interior das baías [MEDEIROS, 2006, FRAGOSO, 1999].

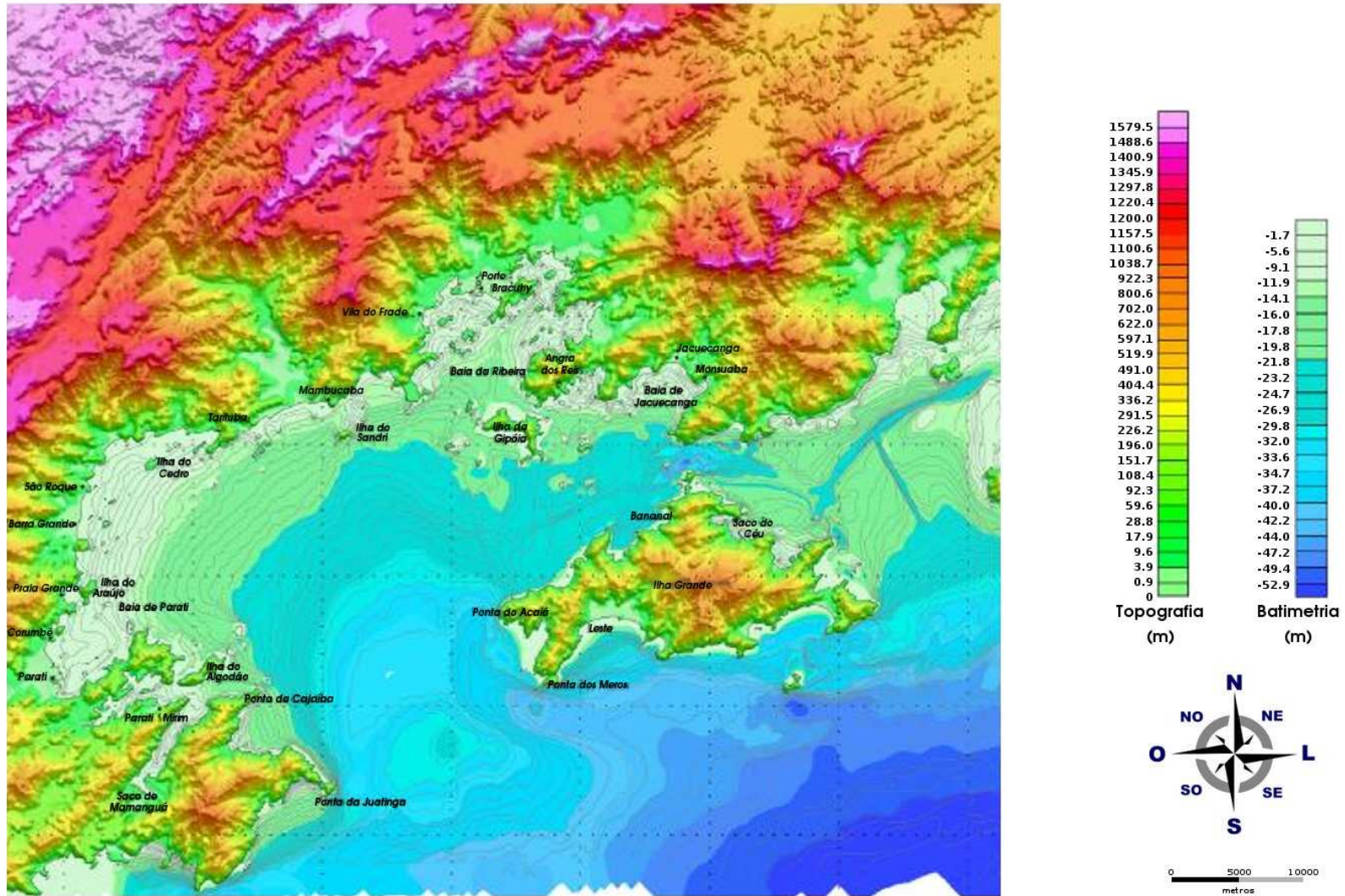


Figura 3.3: Mapa Topográfico e Batimétrico da Baía de Ilha Grande (Modificado de Dias *et al.* (1990)).

As ondas que chegam à Baía da Ilha Grande são, predominantemente, oriundas do quadrante S-SE, esta direção é privilegiada por conta da configuração geográfica da linha de costa. As ondas oriundas de outras direções são total ou parcialmente barradas, de forma que na região de interesse para este estudo, o entorno da região de Mambucaba as ondas de S-SE tem maior ação. Estudos realizados por Ceccopieri (2001) nesta região, mostraram que a média anual das alturas significativas das ondas é cerca de 1,8 m, onde os valores mínimos e máximos são 1,3 m no verão (dezembro) e 2,4 m no inverno (junho), respectivamente.

#### **3.1.4 Cobertura Sedimentar**

A compartimentação fisiográfica da Baía da Ilha Grande é refletida na existência de fácies sedimentares distintas, sendo areias muito finas transgressivas na parte Oeste, siltes modernos em áreas abrigadas e no Canal Central e areias relíquias grossas a médias na parte Leste. Com relação ao grau de selecionamento, predominam na parte leste sedimentos moderadamente selecionados. No Canal Central, os sedimentos apresentam baixo grau de seleção e na parte oeste o padrão é mais complexo, apresentando uma faixa moderada a bem selecionada bordada por sedimentos pobremente selecionados [MAHIQUES & FURTADO, 1989].

Na parte leste da Baía, desde a parte externa da Baía de Sepetiba até o sul da Ilha Grande, o mapa faciológico elaborado por Dias *et al.* (1990) indica a ocorrência de areias grossas a médias, que correspondem a areias relíquias. Areias muito finas, subarcoseanas de coloração cinza, grãos subarredondados a subangulosos, bem polidos e com elevados teores de mineirais pesados penetram pela parte oeste da Baía e são amplamente distribuídos nesta área. Os sedimentos que permanecem na parte Oeste são constituídos, predominantemente, por areias muito finas com algumas contribuições de sedimentos siltosos, o que indica as baixas condições de retrabalhamento desta região. As lamas (silte + argila) se encontram principalmente nas áreas de pouca energia como na enseada de Parati [MEDEIROS, 2006].

A fração emersa dos sedimentos é representada pelas planícies costeiras que, nesta região, são muito estreitas e resultam de processos de sedimentação fluvial e marinha, associadas ao baixo curso e desembocadura de canais fluviais.

## 3.2 Coleta e Preparação das Amostras

As amostras para a realização deste trabalho foram obtidas em duas missões de campo para Angra dos Reis (RJ). A primeira viagem, em Agosto de 2005, resultou na coleta de 328 amostras ao longo da costa desde a Praia Brava até a Praia de São Gonçalo, como mencionado anteriormente, e também às margens do Rio Mambucaba, na planície que corta o bairro Perequê. A segunda missão de campo teve como objetivo complementar as primeiras amostras coletadas e, além disto, coletar amostras na parte superior do Rio Mambucaba, na região do encontro dos rios do Funil e Guaripu, com o objetivo de investigar a contribuição do seu aporte fluvial na distribuição de sedimentos na costa. Nesta viagem, realizada em Agosto de 2007, foram coletadas 233 amostras. Amostras da Ilha do Algodão, que se localiza a cerca de 1km a frente da foz do Rio Mambucaba, também foram coletadas. O total de amostras coletadas para a realização deste estudo foi 565 amostras. Os locais de coleta podem ser observados na figura 3.4:



Figura 3.4: Locais de Coleta das Amostras na Região de Angra.

Dentre as amostras coletadas, uma parte é formada por amostras superficiais e outra por testemunhos. Os testemunhos foram extraídos de duas maneiras: 6 com tubos de PVC (Cloreto de Polivinila) de 4 polegadas e 2 tubos de PVC de 2 polegadas, em 2005, e 3 foram extraídos com o uso de um trado, em 2007, com a finalidade de conseguir amostras de profundidades maiores em alguns locais.

A extração com tubos de PVC foi realizada da seguinte forma: os tubos foram previamente cortados de forma que ficassem com 1m de comprimento, em seguida os tubos foram batidos verticalmente no solo, com o auxílio de um martelo de borracha. Após o

enterramento do tubo, o mesmo foi puxado cuidadosamente e sua base fechada com uma tampa, também de PVC, para manter a areia aprisionada no tubo. Enquanto a extração de testemunho com o auxílio do trado foi realizada de forma diferente, já que esta é uma ferramenta que possui uma espécie de coletor na ponta que é preenchido de material a medida que um eixo central é girado. O coletor é um cilindro que possui cerca de 15cm de altura e 10cm de diâmetro. O eixo central que pode ser aumentado com o uso de extensores, atingindo assim, maiores profundidades. Uma visualização desta ferramenta pode ser observada na figura 16 do Anexo C.

Na tabela 3.1 podem ser observadas informações sobre a localização e a extensão das praias estudadas e das demais regiões amostradas para este trabalho, além da quantidade de amostras por local.

Tabela 3.1: Informações sobre a localização, extensão e quantidade de amostras das praias e demais regiões estudadas.

Local	GPS	Extensão (m)	Amostras Superficiais	Testemunhos	Total
Praia Brava	23°00'24"S 44°28'52"W	950	12	-	12
Praia Vermelha	23°01'30"S 44°29'56"W	380	15	-	15
Praia do Condomínio das Goiabas	23°01'31"S 44°30'36"W	340	22	-	22
Praia de Mambucaba (Vila Histórica)	23°01'35"S 44°31'05"W	600	23	4	105
Ponta do Bosque	23°01'34"S 44°31'25"W	750	35	-	35
Praia de Mambucaba (Vila Residencial)	23°01'46"S 44°32'13"W	3480	65	5	201
Praia do Coqueiro	23°02'09"S 44°33'21"W	1100	23	1	30
Prainha	23°02'50"S 44°34'21"W	1200	18	-	18
Praia de Tarituba	23°02'40"S 44°35'43"W	480	16	-	16
Praia de São Gonçalo	23°02'32"S 44°37'01"W	2600	15	-	15
Rio Mambucaba (Região 1)	23°01'20"S 44°32'23"W	6954	51	1	56
Rio Mambucaba (Região 2)	22°57'03"S 44°34'21"W	3150	33	-	33
Ilha do Algodão	23°01'40"S 44°32'10"W	-	4	-	4

As amostras superficiais das praias foram coletadas de forma a se obter uma boa representatividade, para isso, foi adotada uma sistemática para a coleta. Tais amostras foram coletadas a três distâncias distintas, perpendicularmente à linha de costa. O mesmo procedimento foi realizado longitudinalmente pela praia com intervalos aproximadamente iguais.

Um exemplo desta sistemática pode ser observado na figura 3.5. Cada amostra superficial, contendo cerca de 300 g de massa, foi coletada respeitando a mesma metodologia a fim de ser possível a comparação entre os dados.



Figura 3.5: Sistemática para a coleta das amostras na Praia Vermelha, onde foram coletadas 15 amostras superficiais.

Como mencionado anteriormente, as amostras do Rio Mambucaba foram coletadas na planície do bairro Perequê e no encontro dos rios do Funil e Guaripu, estes locais serão denominados de Região 1 e Região 2, respectivamente. Na planície, região 1, além das 51 amostras da margem, também foi extraído um testemunho dentro do rio próximo à foz. Enquanto que, na região 2 foram coletadas 33 amostras da margem. Na figura 3.6 podem ser observadas as regiões de coleta de amostras. As amostras da margem também continham cerca de 300g de massa.

O tratamento de todas as amostras, no laboratório, foi basicamente o mesmo: inicialmente as amostras foram secas em uma estufa à temperatura de 110°C. Esse procedimento dura, em média, 24 horas. Este é o tempo necessário para que a massa não varie mais, garantindo que toda a água fora retirada da amostra. Realizar este procedimento para todas as amostras garante que os dados possam ser intercomparados. Após a secagem, as amostras foram peneiradas com a finalidade de obter apenas sua fração arenosa (< 2 mm) e, em seguida, as mesmas foram acondicionadas em potes cilíndricos com diâmetro de 6,6 cm e altura de 2,3 cm. Este pote foi escolhido em razão de apresentar



Figura 3.6: Regiões de coleta das amostras no Rio Mambucaba. A região 1 foi amostrada durante o trabalho de campo de 2005 e a região 2, durante o campo de 2007.

geometria adequada ao detector, ou seja, mesmo diâmetro e espessura tal que o efeito de auto-absorção das amostras não fosse significativa. O teste de auto-absorção foi realizado com o auxílio de um *becker* com o diâmetro da base igual ao diâmetro do recipiente utilizado. Para esse teste, camadas com cerca de 1,1 cm de Dicromato de Potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) foram acrescentadas ao *becker* e a quantidade de contagens líquidas registrada durante o mesmo tempo. O Dicromato de Potássio foi escolhido para o teste por apresentar matriz semelhante à matriz de sedimentos e por possuir energia da radiação  $\gamma$  em torno dos valores estudados neste trabalho. A figura 3.7, apresenta a curva da eficiência geométrica para a energia da radiação  $\gamma$  proveniente do potássio, onde pode ser observada a variação do número de contagens líquidas em função da altura da coluna de Dicromato de Potássio.

Neste gráfico, pode ser observado também que a partir de um certo valor de altura, a auto-absorção começa a se tornar relevante, onde maiores quantidades de amostra não representam grande aumento no número de contagens líquidas. Entretanto, para a faixa de energia da radiação  $\gamma$  de interesse neste trabalho, os efeitos de auto-absorção não são significativos, como mencionado anteriormente.

Desta forma, é possível escolher uma quantidade não muito grande de amostra que produza um número de contagens líquidas razoável, ou seja, com o pote escolhido, o volume de cada amostra produz um número de contagens líquidas que permite uma redução no tempo de aquisição. Este fator foi muito importante para este trabalho, dada a grande



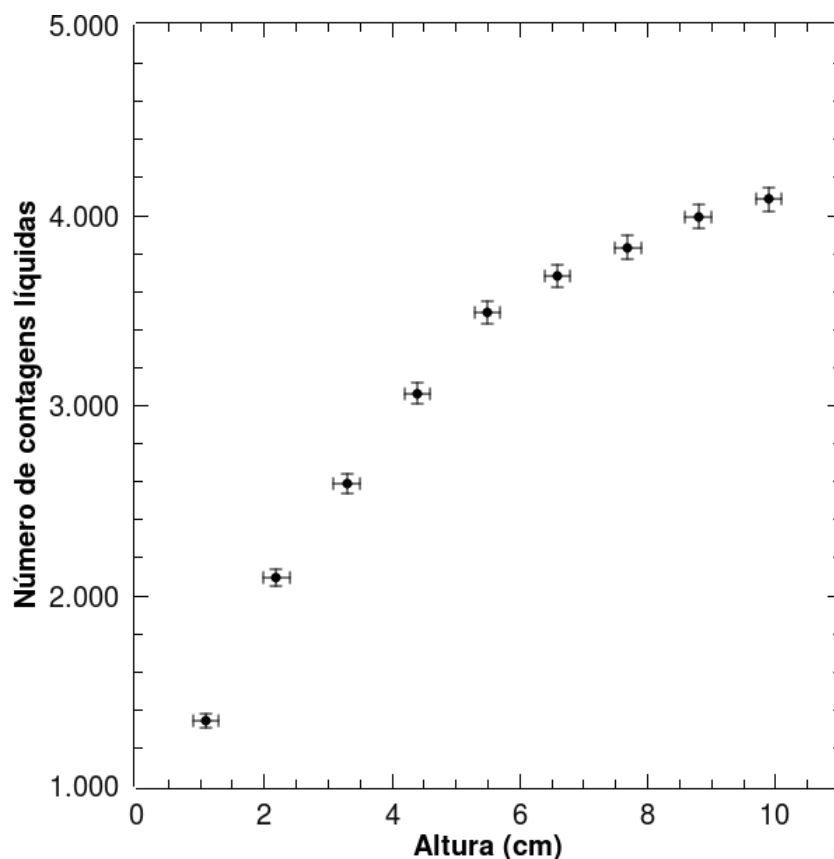


Figura 3.7: Gráfico contendo o resultado do teste realizado para verificar a eficiência geométrica do frasco de medida e a auto-absorção das amostras.

quantidade de amostras analisadas. Em seguida, os potes foram pesados e lacrados.

Em geral, é importante que as amostras sejam armazenadas por um período superior a 45 dias para que os elementos radioativos gasosos, filhos das séries de decaimento de  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  de meia-vida curta, atinjam o equilíbrio secular e, portanto, não produzam alterações significativas nos cálculos das concentrações dos elementos em estudo.

É importante mencionar, que as amostras de testemunhos extraídas com PVC passaram por um processo que antecedeu a secagem na estufa, pois estas tiveram que ser retiradas do tubo e separadas em embalagens individuais. A retirada dessas amostras ocorre após a abertura do testemunho, que ocorre a partir de dois cortes longitudinais diametralmente opostos no comprimento do mesmo. Assim, após a abertura do testemunho, são selecionadas e identificadas fatias de amostras a cada 3cm, em média, com o auxílio de uma trena. A partir deste momento, as amostras estão prontas para iniciar a secagem na estufa e, em seguida, passar pelos procedimentos comuns a todas as outras amostras, como descrito anteriormente.

### 3.3 Aparato Experimental

O arranjo experimental mais indicado para as medidas de concentrações  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{40}\text{K}$ , é aquele capaz de detectar o decaimento da radiação  $\gamma$  destes elementos. Este tipo de radiação pode ser detectada através de sua interação com cristais cintiladores ou com semicondutores. Neste sentido, o Laboratório de Radioecologia (LARA) do IF-UFF possui dois tipos de detectores usados para a espectroscopia da radiação  $\gamma$ : um constituído de um cristal cintilador inorgânico de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI(Tl)) associado a uma fotomultiplicadora e outro de um material semiconductor composto por germânio hiper-puro (HPGe).

Em linhas gerais, o aparato experimental é composto de uma blindagem de chumbo, um detector com sua eletrônica associada e um sistema de aquisição de dados, que consiste em uma placa de aquisição inserida num micro-computador gerenciada por um software específico. O detector fica posicionado no interior da blindagem, bem como a amostra a ser medida.

A função da blindagem é minimizar as contagens proveniente da radiação  $\gamma$  de fundo e, conseqüentemente, evidenciar o conteúdo das amostras. Suas paredes são, normalmente, compostas de uma camada externa de chumbo e de uma camada interna de cobre. Sua tampa possui uma espessa camada de chumbo também revestida com cobre. A camada de cobre minimiza os efeitos do *Backscattering* que ocorre nas paredes da blindagem.

Para realizar as medições de radiação  $\gamma$  das amostras deste estudo, foram utilizados dois arranjos experimentais. O primeiro deles composto por uma blindagem de chumbo construída no LARA com um detector NaI(Tl) portátil em seu interior. A blindagem é um cilindro contituída de discos removíveis de chumbo, com espessura de 12cm. O modelo portátil possui uma base com eletrônica extremamente compacta, que combina fonte, pré-amplificador e uma placa de aquisição multicanal conectados ao micro-computador por um cabo USB. O outro aparato é composto de uma blindagem *ultra low-background*, constituída de 15cm de chumbo, sendo que 2,5cm da parte mais interna contém chumbo com menores contribuições para as contagens de fundo do que a parte externa. Além disso, seu interior possui ainda 1mm de estanho e 1,6mm de cobre com alta pureza e com quase nenhuma contribuição para o fundo. Esta blindagem possui, nesta montagem, um detector de HPGe com 55% de eficiência em seu interior. Os arranjos experimentais com o detector NaI(Tl) e o detector de HPGe podem ser observados nas figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.



Figura 3.8: Foto da blindagem de chumbo com o detector NaI(Tl) em seu interior.

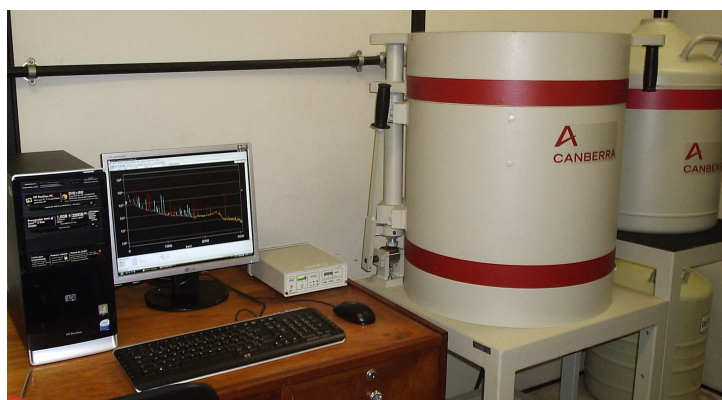


Figura 3.9: Foto da blindagem *ultra low-background* com o detector de HPGe em seu interior e o reservatório de nitrogênio líquido acoplado.

O detector NaI(Tl) utilizado neste trabalho é o modelo 905-4W da EG&G ORTEC acoplado com uma base que estabiliza a deriva do detector, diminuindo a sensibilidade que os detectores NaI(Tl) apresentam na posição do centróide do fotopico com mudanças de temperatura no ambiente.

No interior do material cintilador ocorrem vários processos sucessivos, que resultam na obtenção de pulsos elétricos proporcionais à energia depositada no detector pela radiação. Inicialmente, a radiação interage com o cristal do detector cintilador, como descrito na seção 2.1.3. Essa interação produz excitações e ionizações que tendem a retornar ao estado original por decaimento, as quais produzem radiação na faixa da luz visível. A radiação nesta faixa de frequência é absorvida por efeito fotoelétrico no fotocátodo de uma fotomultiplicadora que multiplica os elétrons livres produzidos até que tenham intensidade suficiente para produzir pulsos elétricos com altura de até centenas de milivolts. Essa multiplicação ocorre da seguinte maneira: os elétrons são acelerados por uma diferença de

potencial da ordem de 1000 V e em seguida focalizados nos dinodos, que então emitem de 2 a 3 novos elétrons. Este processo ocorre várias vezes promovendo um ganho significativo de corrente. Por exemplo, para uma fotomultiplicadora típica de dez estágios, o ganho de corrente é da ordem de  $10^7$  [RIBAS, 2002, KNOLL, 1979, REGAN, 1997]. Na figura 3.10 é possível observar alguns detalhes do funcionamento desse detector e alguns processos de interação da radiação com a matéria que ocorrem durante seu funcionamento.

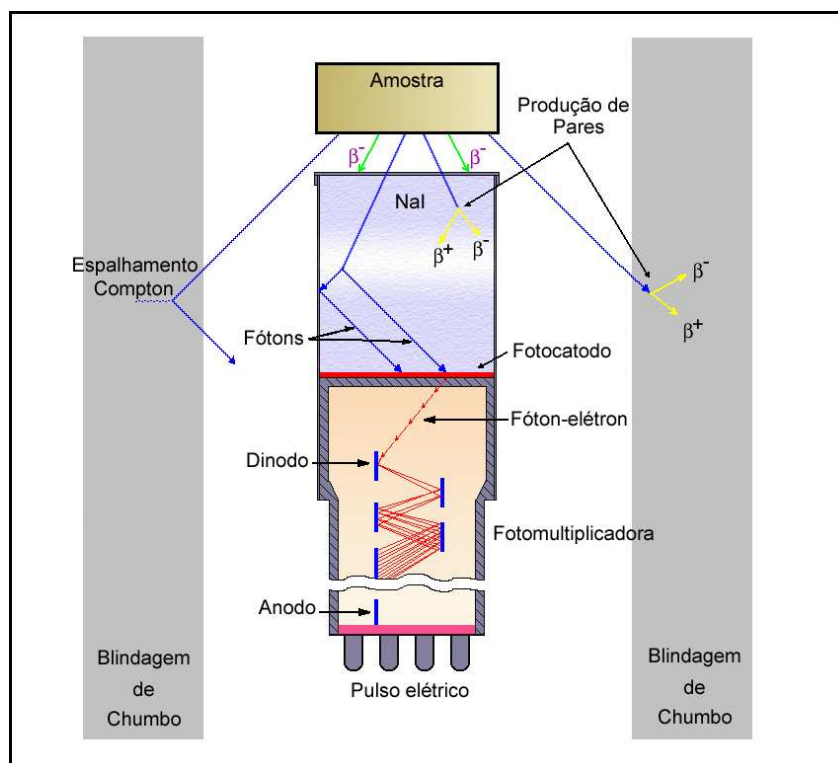


Figura 3.10: Esquema do detector NaI(Tl) com a ilustração de alguns processos de interação da radiação com a matéria durante seu funcionamento.

O detector de HPGe utilizado foi o modelo GX5522 da CANBERRA, acoplado a uma blindagem de *ultra low-background* para detecção da radiação  $\gamma$ . Este é um detector semicondutor e a condução nesses materiais está relacionada à energia de excitação dos elétrons, ou seja, quanto maior a temperatura maior será a energia dos elétrons para superar o *gap* de energia e, com isso, mais elétrons serão promovidos da banda de valência à banda de condução. O material semicondutor é utilizado para detectar radiação, pois ao interagir com o material semicondutor esta provoca a excitação dos elétrons que saem da banda de valência para a banda de condução, e sob a influência de um campo elétrico, resultam no pulso que é detectado.

Como o germânio possui um *gap* relativamente pequeno, existe grande probabilidade de haver excitação térmica, gerando ruído térmico no detector. Para reduzir este efeito, o

detector deve ser operado a baixas temperaturas, geralmente atingidas com a utilização de nitrogênio líquido, pois sua temperatura é de 77 K [CANBERRA, 2003, REGAN, 1997, KNOLL, 1979]. Na figura 3.11 observa-se uma ilustração dos componentes deste detector.

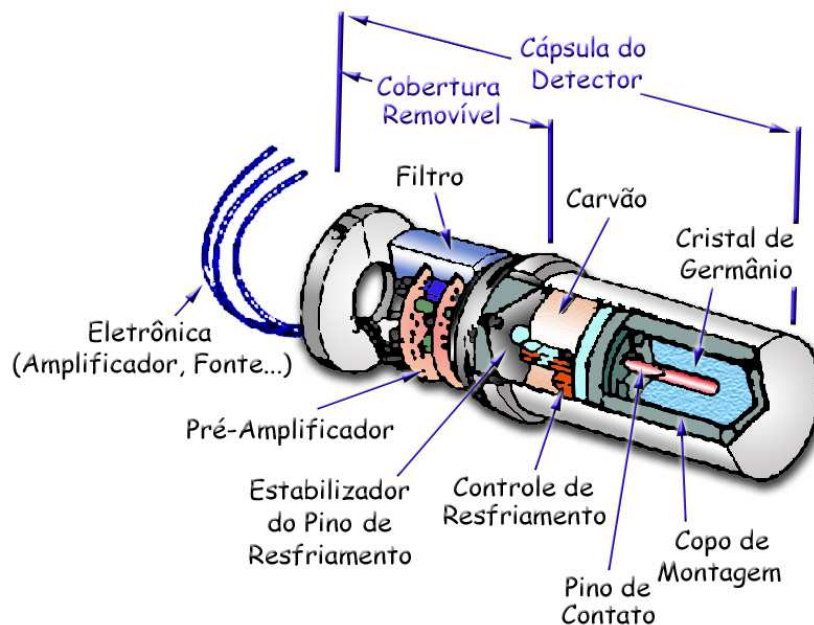


Figura 3.11: Ilustração dos componentes internos do detector de HPGe.

A principal diferença entre os dois detectores citados é a resolução em energia, que significa a capacidade do detector de distinguir, num espectro de energia, dois fotopicos que possuem energias bastante próximas. A resolução de um detector é normalmente medida através da razão entre a largura do fotopico na metade de sua altura (*Full Width at Half Maximum* - FWHM) e a posição em energia do seu centróide [ORTEC, 1984]. Em geral, este valor é determinado para o pico de 1332 keV do  $^{60}\text{Co}$ . Para detectores HPGe este valor é tipicamente da ordem de 0,1 - 0,2%, enquanto que para um detector NaI(Tl) fica em torno de 6%. Assim, quanto menor o valor melhor é a resolução em energia, o que torna detectores HPGe muito úteis na identificação de diferentes energias com alta precisão, permitindo a análise de espectros extremamente complexos [RIBAS, 2002, CARVALHO, 2005]. A resolução dos detectores utilizados é de 5% para o detector NaI(Tl) e 0,17% para o HPGe.

Grande parte das amostras analisadas neste estudo foram medidas com o NaI(Tl), já que o HPGe por adquirido na etapa final deste trabalho. Mesmo com baixa resolução, o detector de NaI(Tl) é adequado para este tipo de trabalho porque possui alta eficiência na determinação das concentrações de K, Th e U em amostras naturais como rochas e sedimentos. A acurácia da calibração em energia depende das possíveis interferências de cada nuclídeo nas regiões de cada pico de interesse [GRASTY *et al.*, 1991, CHIOZZI *et al.*, 2000,

ANJOS *et al.*, 2006].

### 3.4 Calibração do Sistema de Aquisição e Análise dos Dados

A calibração do sistema foi realizada utilizando material de referência da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) para medidas de K, U e Th: RGK-1, RGU-1 e RGTh-1, respectivamente [IAEA, 1987]. O padrão de potássio (RGK-1) é um sulfato de potássio extra puro com 44,8% de K e, com quantidades de urânio e tório menores do que 0,001 e 0,01 ppm (partes por milhão), respectivamente. O padrão de urânio (RGU-1) é composto de minério de urânio diluído em sílica a concentração de 400 ppm de U. As quantidades de K (menor que 20 ppm) e Th (menor que 1 ppm) neste padrão são desprezíveis. O padrão de tório (RGTh-1) é composto de minério de tório diluído em sílica à concentração de 800 ppm, contendo alguma quantidade de U (6,3 ppm) e K (0,02%).

O procedimento adotado para a calibração e para a realização das medidas foi o descrito por Grasty *et al.* (1991) e por Chiozzi *et al.* (2000). A calibração em energia foi realizada na faixa de 0,5 a 3 MeV. As seguintes emissões de fótons foram identificadas como pico de energia no espectro:  $^{40}\text{K}$  (1460,8 keV),  $^{214}\text{Bi}$  (609,3, 1120,3 e 1764,5 keV) e  $^{208}\text{Tl}$  (583,2 e 2614,5 keV).

A obtenção das atividades absolutas de K, Th e U das amostras de sedimentos teve que ser realizada em duas etapas para medidas feitas no NaI(Tl), pois a baixa resolução em energia deste detector exige que sejam levadas em consideração as superposições que ocorrem nos picos de interesse nos espectros de energia  $\gamma$ . Para isso, é utilizado um método de deconvolução, onde uma matriz de sensibilidade é construída para o sistema de aquisição em função das concentrações dos padrões nas regiões de interesse (janelas de energia, denominadas (ROI<sup>6</sup>)) [ADAMS & GASPARINI, 1970, RYBACK, 1971, CHIOZZI *et al.*, 2000].

As regiões de interesse para a determinação das concentrações de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  são baseadas na medida da radiação  $\gamma$  do  $^{214}\text{Bi}$  (1764,5 keV) e do  $^{208}\text{Tl}$  (2614,5 keV) pertencentes às séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , respectivamente. Uma vez que o equilíbrio radioativo nas amostras pode ser assumido, a concentração destes elementos pode ser determinada através da medida da radiação proveniente de seus filhos.

A ROI do  $^{40}\text{K}$  é delimitada diretamente pelo seu decaimento (1460,8 keV). Os valores

---

<sup>6</sup>Region of Interest - termo bastante utilizado neste tipo de análise

das contagens numa certa *ROI* *i* de um padrão *j*, onde *i, j* = 1, 2 e 3 e representam os padrões de K, U e Th, respectivamente, temos que a contagem líquida  $C_{ij}$  é dada por:

$$C_{ij} = S_{in}A_{nj} \quad (3.1)$$

onde:

$C_{ij}$  = Matriz que contém o número de contagens na *ROI* *i* dos padrões descontando o número de contagens na mesma *ROI* do espectro de fundo;

$S_{in}$  = Matriz de sensibilidade que é determinada para o sistema de aquisição;

$A_{nj}$  = Matriz que contém as concentrações de cada nuclídeo *n* em cada padrão *j*;

Para obter a matriz de sensibilidade (*S*) para o sistema de aquisição é necessário escrever o produto matricial  $[C] = [S][A]$  da forma  $[S] = [C][A]^{-1}$ , pois assim é possível determinar a matriz *S* a partir da contagem líquida em cada *ROI* de cada padrão e da concentração de cada nuclídeo na composição de cada padrão.

Após a obtenção da matriz *S* calibrada, as atividades absolutas de K, U e Th numa dada amostra podem ser determinadas a partir de:

$$A_K = S^{-1}C_K \quad (3.2)$$

$$A_U = S^{-1}C_U \quad (3.3)$$

$$A_{Th} = S^{-1}C_{Th} \quad (3.4)$$

Nas medidas realizadas com o detector HPGe, as atividades absolutas foram obtidas através da comparação da intensidade nos picos de interesse, descritos acima, com sua intensidade nos respectivos padrões de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  calibrados. Este procedimento, chamado de método relativo, só é válido para amostras e padrões preparados na mesma geometria volumétrica e medidos no mesmo sistema de aquisição. A atividade absoluta é dada por:

$$\frac{A_A}{A_P} = \frac{\sum C_A - \sum C_{fundo}}{\sum C_P - \sum C_{fundo}} \quad (3.5)$$

onde:

$A_A$  = Atividade absoluta da amostra;

$A_P$  = Atividade absoluta do padrão;

$\sum C_A$  = Número de contagens no *ROI* da amostra;

$\sum C_P$  = Número de contagens no *ROI* do padrão;

$\sum C_{fundo}$  = Número de contagens no *ROI* do espectro de fundo.

Uma descrição mais detalhada do método relativo e de suas vantagens pode ser encontrada em Carvalho (2005).

Uma vez obtida a atividade absoluta de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  numa amostra, suas concentrações são expressas em atividade por unidade de massa seca ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Com base nas considerações de abundância relativa dos elementos na natureza, as concentrações de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  são expressas em concentrações equivalentes, ou seja, K em porcentagem (%) e U e Th em partes por milhão (ppm). Portanto, se faz necessária uma correlação entre estas unidades e a atividade específica das amostras, sendo que cada 1% de potássio natural corresponde a uma atividade específica de  $^{40}\text{K}$  igual a  $317 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . E a atividade específica de uma amostra contendo 1 ppm de  $^{232}\text{Th}$  e 1 ppm de U natural correspondem, respectivamente, a 4,08 e  $13,0 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

As atividades absolutas das amostras medidas no HPGe foram determinadas diretamente a partir das contagens na *ROI*. Na figura 3.12 pode ser observado um espectro típico de amostra analisada do detector HPGe, onde nota-se que os picos de interesse são bem separados devido à sua boa resolução.

Amostras com pouca quantidade de minerais pesados tiveram sua atividade absoluta de  $^{40}\text{K}$  estimadas com precisão. Entretanto, regiões com grande quantidade de  $^{232}\text{Th}$  tiveram a determinação de  $^{40}\text{K}$  comprometida, pois o  $^{228}\text{Ac}$ , pertencente à sua série de decaimento, decai por emissão  $\gamma$  com 1459,2 keV, gerando uma superposição na faixa de energia do  $^{40}\text{K}$ . Esta superposição gera um aumento nas incertezas dos valores de atividade do potássio, à medida que resultam em valores não relevantes. Sendo assim, amostras enriquecidas com minerais pesados dificultam ou até impossibilitam a determinação adequada da sua concentração de  $^{40}\text{K}$ .

As incertezas associadas às medições realizadas neste trabalho, foram determinadas a partir da propagação dos erros em todos os parâmetros envolvidos, tais como a determi-



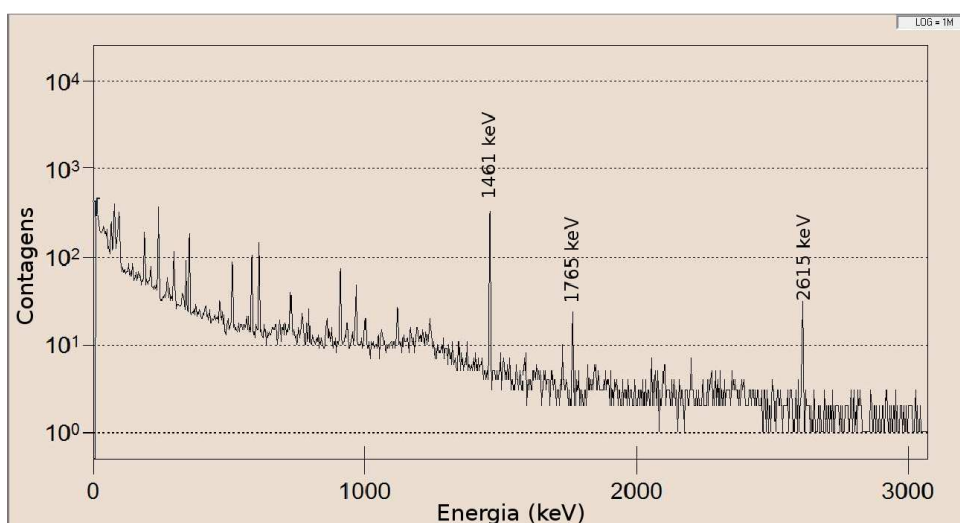


Figura 3.12: Espectro de raios  $\gamma$  típico de uma das amostras analisadas neste trabalho, medida no HPGe.

nação do número de contagens numa *ROI*, a massa e o volume das amostras, a calibração e o sistema de aquisição, etc.

Deste modo, para este trabalho, as incertezas nas medidas ficaram em torno de 5% para amostras medidas no detector NaI(Tl) e foram menores que 1% para amostras medidas no HPGe.

O limite inferior de detecção (LID) também é um parâmetro muito importante na determinação das atividades, pois representa a menor atividade de um radionuclídeo que pode ser detectável numa amostra, onde há confiança de que a atividade realmente exista. O cálculo do LID foi, inicialmente, desenvolvido por Pasternack e Harley em 1971 e, atualmente é bastante utilizado em diversos trabalhos. [HASL (1997)].

Em linhas gerais, o cálculo consiste em estabelecer um intervalo de confiança para os valores de atividade medidos e, usualmente, admiti-se 5% de chance de resultados falso positivos para amostras que não contém atividade. Uma descrição mais detalhada do cálculo do LID pode ser obtida em Carvalho (2005).

Nos sistemas de aquisição utilizados no presente trabalho, os valores determinados para LID foram 0,09% para  $^{40}\text{K}$ , 0,74 ppm para  $^{238}\text{U}$  e 2,43 ppm para  $^{232}\text{Th}$  para a aquisição no NaI. Enquanto no HPGe o LID para  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  foram 0,01%, 0,05 ppm e 0,74 ppm, respectivamente.

## **4 Análise e Discussão dos Resultados**

O presente capítulo tem como finalidade explicar o método analítico utilizado e discutir os resultados obtidos com a análise e com o estudo estatístico realizado neste trabalho.

### **4.1 Descrevendo o Método**

De acordo com Kogan (1969), a formação dos sedimentos ocorre por meio da fragmentação da rocha fonte, seguida do transporte, da deposição e da sedimentação. Conseqüentemente, as propriedades mineralógicas dos sedimentos, no caso do presente estudo, areias de praia, refletem associações com a formação geológica original, uma vez que estas passaram por tais processos e foram depositadas nas praias por ação de vários fatores, dentre eles ondas e correntes marinhas.

Como visto nos capítulos anteriores, os sedimentos possuem em sua composição, elementos naturalmente radioativos, que possibilitam a sua detecção através da análise radiométrica.

Entretanto, em alguns trabalhos presentes na literatura sobre o estudo de transporte de sedimentos [de MEIJER *et al.*, 2001, ASADOV *et al.*, 2001, van WIJNGAARDEN *et al.*, 2002], este se apresenta como um problema complexo e, para ser adequadamente tratado por técnicas que utilizam a espectrometria  $\gamma$  convencional (baseada somente em medidas de concentrações de radionuclídeos naturais), devem ser levados em conta parâmetros adicionais, tais como a granulometria dos sedimentos, variações temporais e espaciais durante o processo de coletas de amostras. Isto deve-se ao fato de que nas praias os minerais pesados são concentrados preferencialmente em pontos bem localizados, normalmente na zona de espraiamento. Porém, como as praias constituem ambientes dinâmicos, as concentrações dos elementos podem variar no tempo e no espaço. Além disso, o dese-

quilíbrio da série do U pode representar a *diagênese*<sup>1</sup> durante o enterramento, ou seja, pode ocorrer a dissolução seletiva de alguns minerais pesados instáveis durante o enterramento [MORTON & HALLSWORTH, 1999]. Esse fenômeno, geralmente observado em testemunhos, pode induzir uma flutuação nas razões eTh/eU em função do tempo e da profundidade.

#### 4.1.1 Granulometria

As amostras coletadas na Praia de Mambucaba (Vila Histórica), após terem suas concentrações de eTh, eU e K determinadas, foram homogeneizadas e preparadas para a análise granulométricas de sedimentos grosseiros de acordo com o método descrito por Suguio (1973).

A análise granulométrica tem como principais objetivos caracterizar e classificar os sedimentos com mínima subjetividade, permitindo assim alguma correlação. Desta forma, esta análise foi bastante útil para comparar as duas coletas em momentos distintos de um mesmo local. Além disto, foi possível observar que as maiores concentrações de eTh e eU são encontradas nas menores frações, isso significa que os minerais pesados foram isolados nas frações finas.

A concentração de minerais pesados nas frações granulométricas menores, está de acordo com o resultado obtido por de Meijer (1998), que observou a correlação entre o tamanho dos grãos e a densidade específica para alguns minerais. Esse resultado pode ser observado na figura 4.1.

---

<sup>1</sup>refere-se aos processos geológicos de baixa temperatura, como desidratação, cimentação, compactação, dissolução, reações minerais e outros que sucedem à deposição de sedimentos.

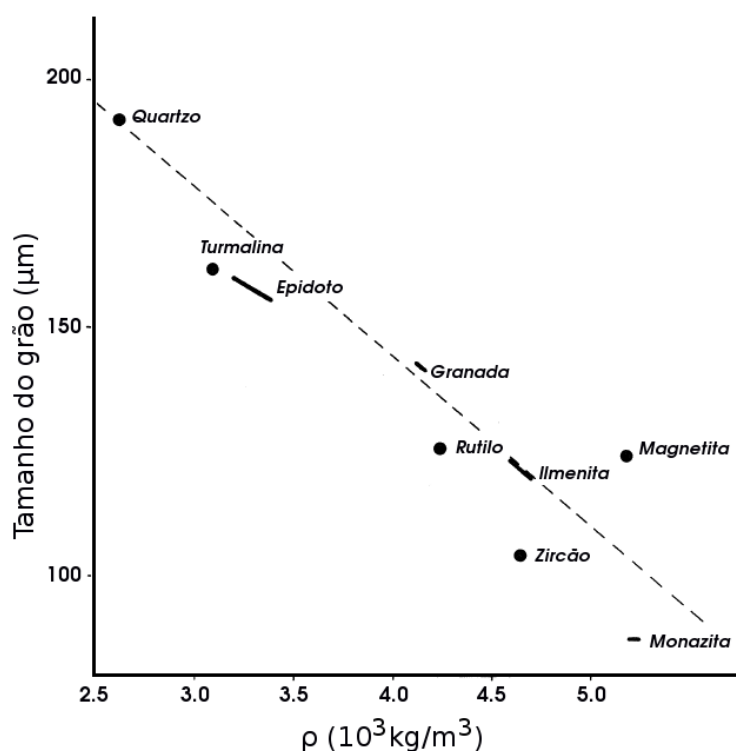


Figura 4.1: Tamanho do grão para vários minerais em função da densidade específica (Modificado de de Meijer (1998).)

De acordo com a comparação entre os resultados das análises granulométricas, é possível observar na figura 4.2 que para a Praia de Mambucaba (Vila Histórica), ao se obter as frações mais finas com maior concentração de eTh e eU, as concentrações de K, consequentemente, apresentam maiores incertezas, por causa da interferência na faixa de energia da emissão  $\gamma$  do potássio, que está muito próxima a um dos filhos do tório, como mencionado na seção 3.4. Outra informação que pode ser obtida desta figura é que a análise granulométrica foi realizada para a mesma praia com as amostras coletadas em 2005 e com as amostras coletadas em 2007. Desta forma foi possível observar que embora as concentrações de eTh e eU nas amostras de 2005 sejam maiores, em ambas as coletas estes elementos apresentam a mesma tendência de comportamento. E as razões de eTh/eU apresentam praticamente nenhuma variação de uma amostragem para a outra em cada fração, o que sugere que as razões eTh/eU não variaram muito no tempo para frações isoladas. Este resultado mostra que as razões eTh/eU podem representar uma boa ferramenta para estudos de proveniência, uma vez que demonstram sofrer pouca variação ao longo do tempo. Uma cuidadosa caracterização granulométrica das amostras foi realizada a fim de evitar possíveis influências do tamanho dos grãos nos cálculos das razões eTh/eU. Todas as praias aqui estudadas possuem caracterização granulométrica de areia média, de forma que se há alguma influência do tamanho do grão nas razões eTh/eU, esta pode ser descon-

siderada nos presentes resultados. Maiores detalhes da análise granulométrica realizada nas amostras deste estudo, podem ser observados no Anexo A.

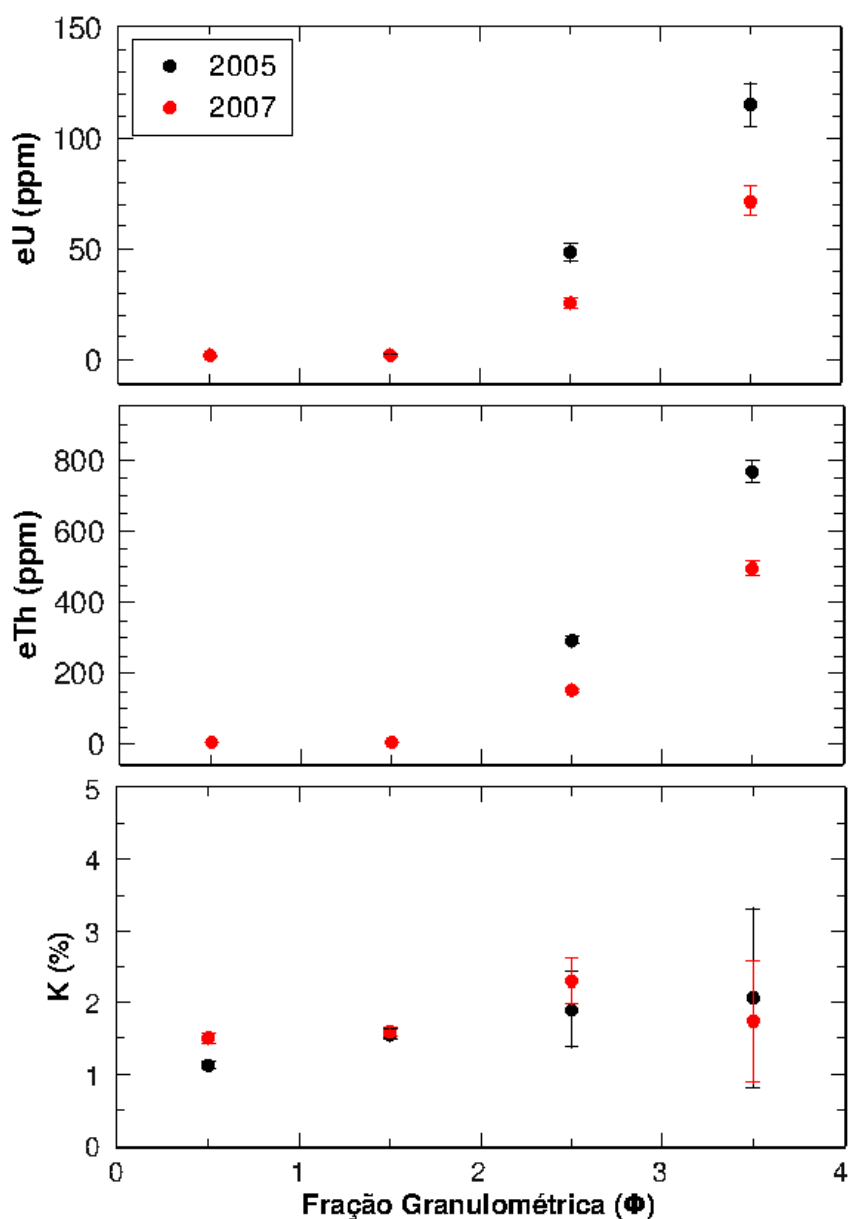


Figura 4.2: Concentrações de urânio, tório, potássio e razão eTh/eU em função das frações granulométricas das amostras da Praia de Mambucaba (Vila Histórica). Os pontos em preto e vermelho representam as amostras de 2005 e 2007, respectivamente.

#### 4.1.2 Amostras Superficiais

Os gráficos das concentrações individuais de Tório, Urânio e Potássio para cada praia apresentam características que podem, inicialmente, ser separadas em dois grupos: distribuição bem comportada por toda a praia, onde as amostras coletadas a diferentes distâncias da face de praia apresentam certa homogeneidade e praias com grande dispersão,

caso onde os teores do mesmo elemento estudado variam desde a face de praia até a região mais distante da mesma, ou seja, locais onde apenas ondas mais potentes, como ondas de tempestade, seriam capazes de depositar sedimentos.

Nas figuras 4.3 (a), (b) e (c) é possível observar as concentrações individuais de U, K e Th, respectivamente. Em cada um dos gráficos observa-se a concentração do elemento em função da extensão da praia e, também, em função da distância da face de praia. Onde os pontos identificados na legenda pelas cores preta (1), verde (2) e azul (3), representam amostras coletadas desde a região mais próxima da linha d'água até a posição mais afastada. Sendo 1 a região mais próxima, 2 a intermediária e 3 a mais afastada.

A partir das figuras 4.3 pode ser observado que as concentrações individuais dos elementos não apresentam uma variação significativa, ou seja, a distribuição superficial tanto em função da extensão da praia, quanto em função da distância perpendicular à linha d'água, apresenta uma tendência homogênea. Enquanto que, na figura 4.4 (a), (b) e (c), é fácil observar que há concentrações maiores de Th e U nas regiões mais afastadas da face de praia, identificadas pelos números 3 e 4 na legenda, enquanto o oposto ocorre com a concentração de K, cujos valores são mais altos na face de praia, regiões identificadas pelos números 1 e 2 na legenda, quando comparados a locais mais distantes da mesma.

Este comportamento se deve ao fato desta praia estar bastante exposta à incidência de ondas oriundas de S-SE, como mencionado anteriormente no item 3.1.3 acerca da hidrodinâmica da região.

Desta forma, ondas mais intensas, como ondas de tempestade, são capazes de suprir a praia de minerais pesados, os depositando na região de pós-praia, enquanto em condições mais calmas o depósito contínuo de minerais leves, ricos em K, ocorre na face de praia.

Nos gráficos (a) e (c) das figuras 4.3 e 4.4, pode-se observar uma característica interessante acerca das concentrações de tório e urânio: as concentrações de tório apresentam o mesmo comportamento que as concentrações de urânio em função distância da face de praia. As linhas utilizadas para ligar os pontos na figura 4.4 são apenas para facilitar a visualização e ressaltar o comportamento das concentrações.

Os gráficos (d) das figuras 4.3 e 4.4 mostram que mesmo com concentrações individuais de U, K e Th contendo comportamentos distintos, as razões  $eTh/eU$  para as amostras superficiais das duas praias não sofre variações significativas em função da extensão da praia ou em função da distância da face de praia.

As figuras 4.5 e 4.6 (a), (b) e (c) apresentam, em detalhe, as concentrações de tório, urânio e potássio, respectivamente, nas praias onde não há muita variação em função da distância da face de praia. Estas praias são as que se encontram em locais mais protegidos e que podem ser classificadas da seguinte forma: são praias mais afastadas, que não estão na direção preferencial das ondas mais intensas e, além disso não aparentam sofrer influência dos sedimentos ricos em minerais pesados trazidos pelo Rio Mambucaba. Este grupo é constituído pelas praias Brava, Vermelha, Mambucaba (Vila Residencial), do Coqueiro, Prainha, Tarituba e São Gonçalo.

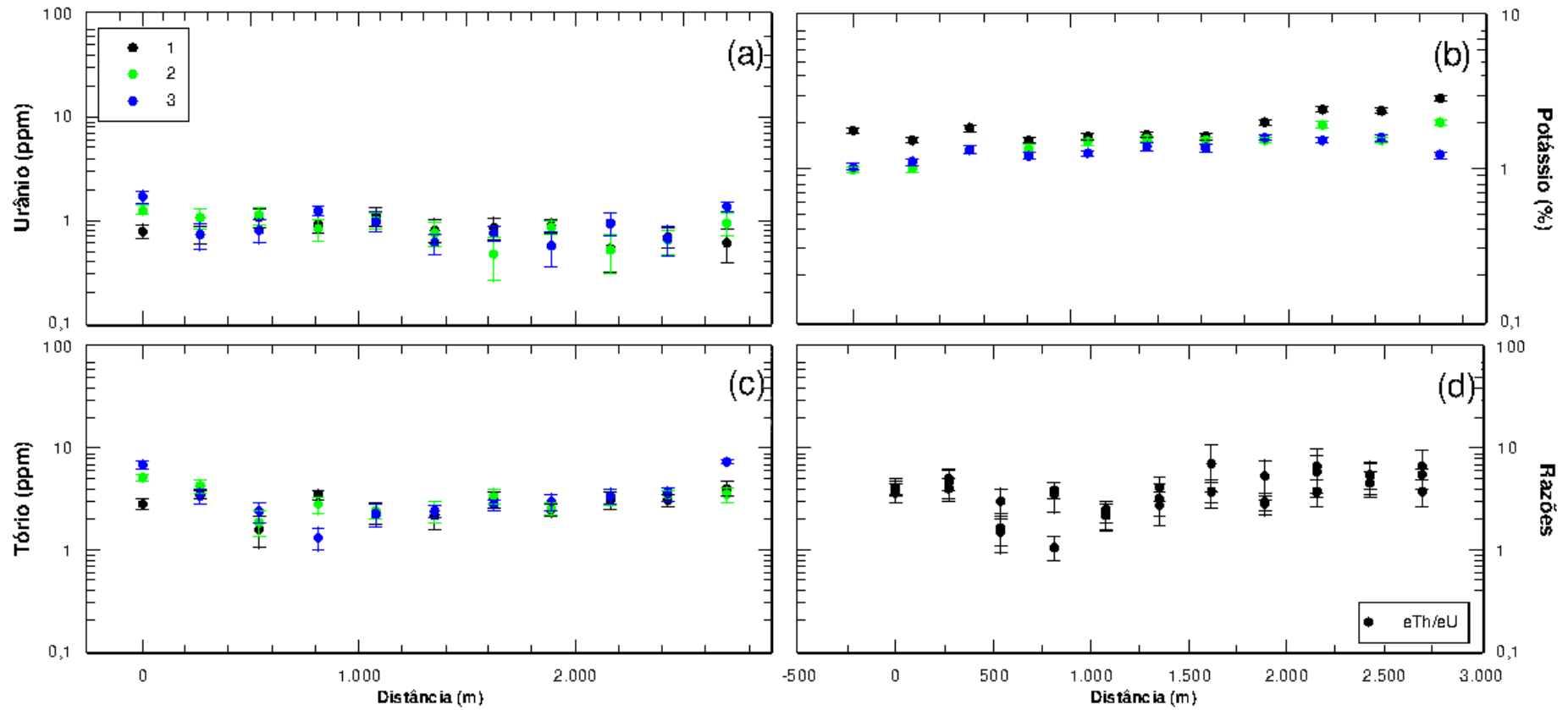


Figura 4.3: Valores de  $eTh$ ,  $eU$ ,  $K$  e razões  $eTh/K$  e  $eTh/eU$  na Praia de Mambucaba (Vila Residencial). Os pontos em preto, verde e azul nos gráficos (a), (b) e (c) representam, respectivamente, amostras da região próxima (1), intermediária (2) e afastada da face de praia (3). No gráfico (d) observa-se a razão  $eTh/eU$ .



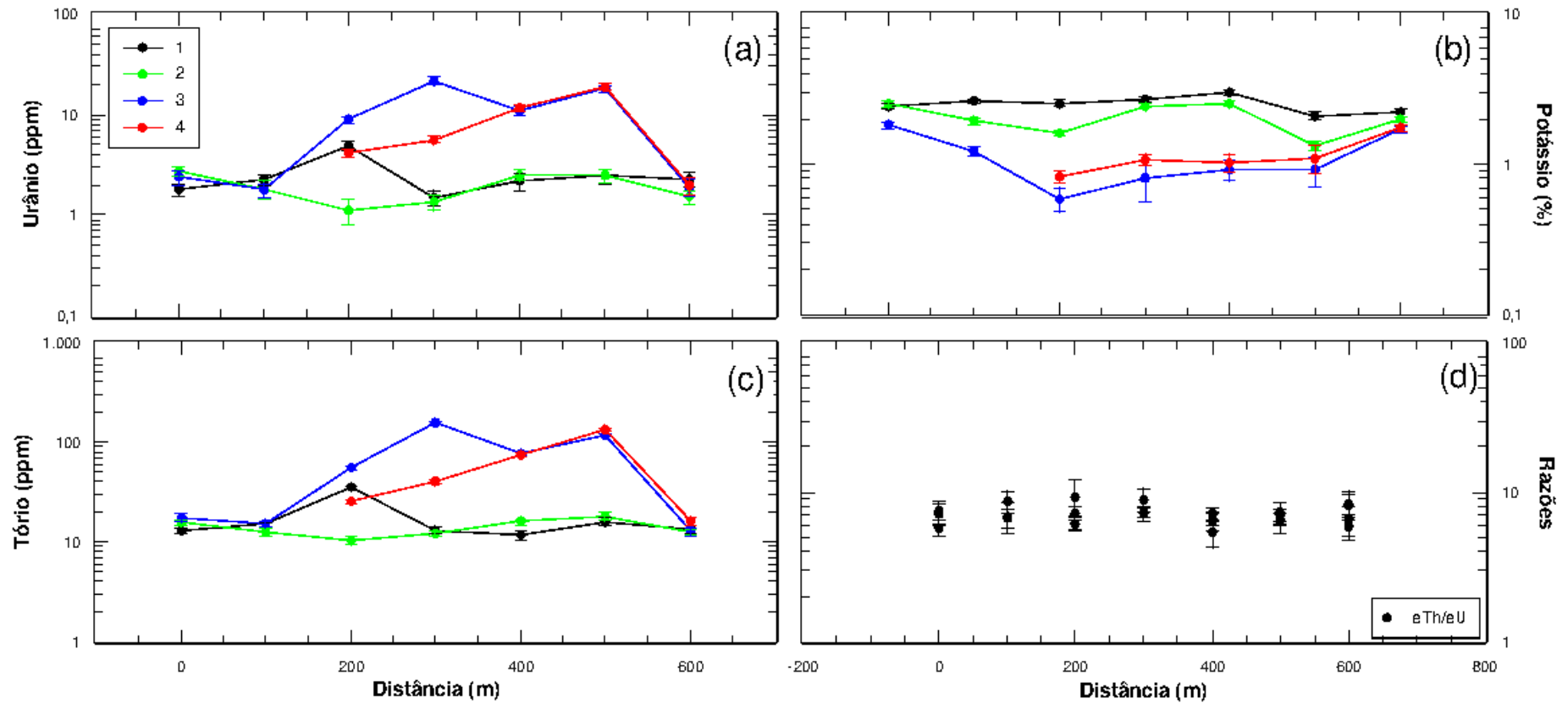


Figura 4.4: Valores de  $eTh$ ,  $eU$ ,  $K$  e razões  $eTh/K$  e  $eTh/eU$  na Praia de Mambucaba (Vila Histórica). Os pontos em preto, verde, azul e vermelho nos gráficos (a), (b) e (c) representam, as regiões de coleta em função da distância da face de praia, desde a mais próxima (1) até a mais afastada (4). Na figura (d) observa-se a razão  $eTh/eU$ .

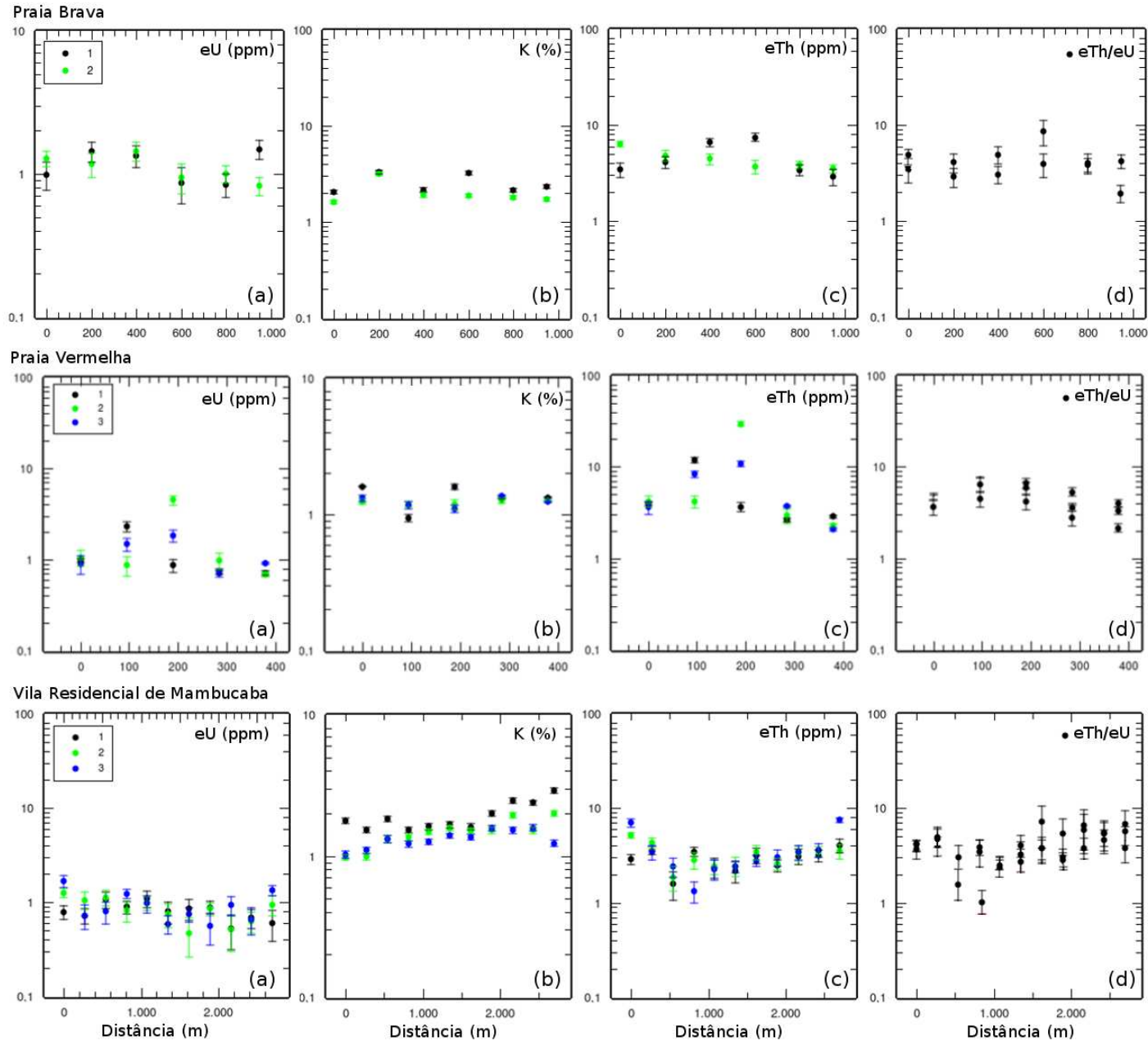


Figura 4.5: Visão geral das praias que apresentam comportamento com variação suave nas concentrações de eU, K e eTh, primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. Na quarta coluna observa-se a variação da razão eTh/eU para cada praia.

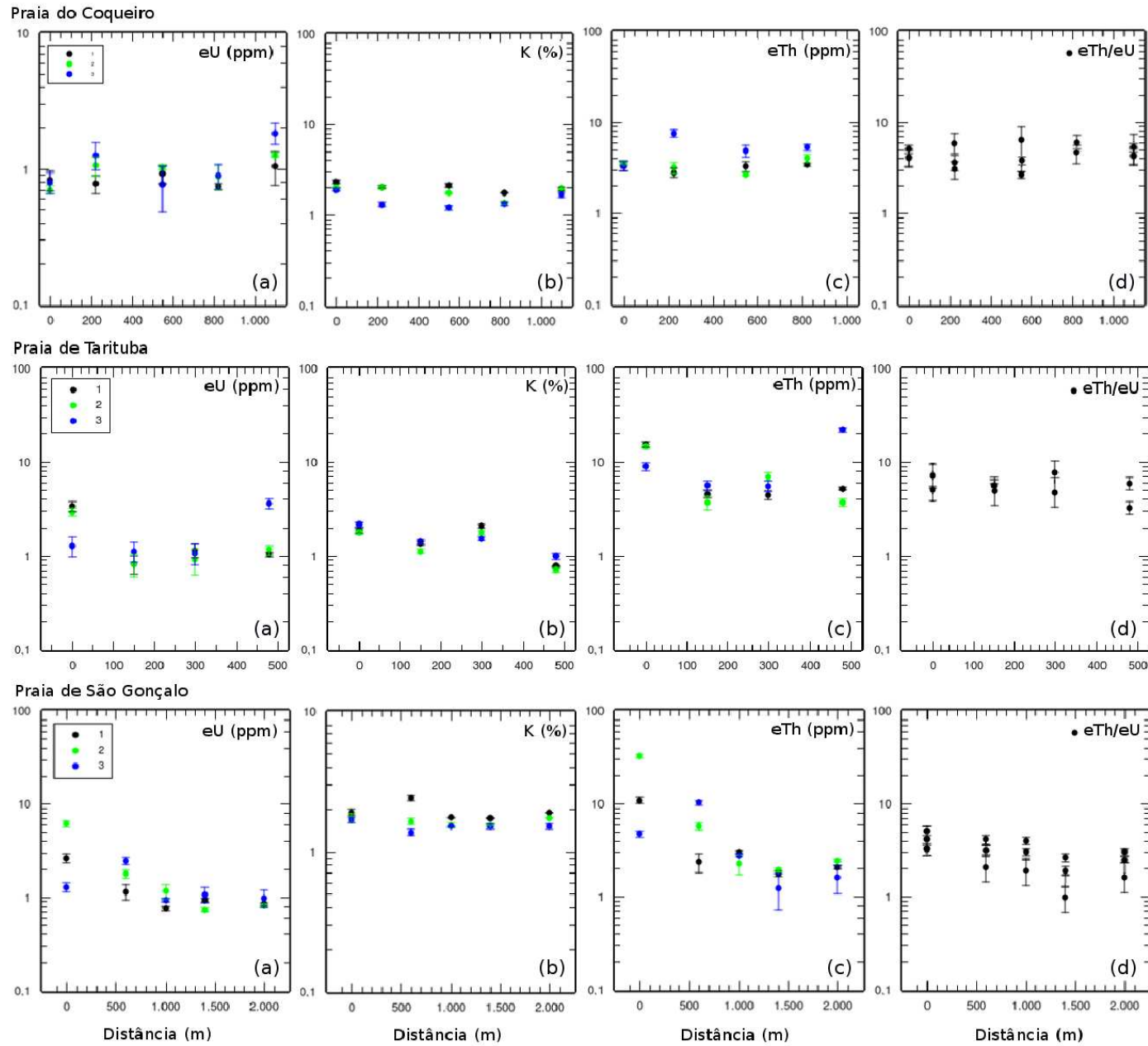


Figura 4.6: Visão geral das praias que apresentam comportamento com variação suave nas concentrações de eU, K e eTh, primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. Na quarta coluna observa-se a variação da razão eTh/eU para cada praia.

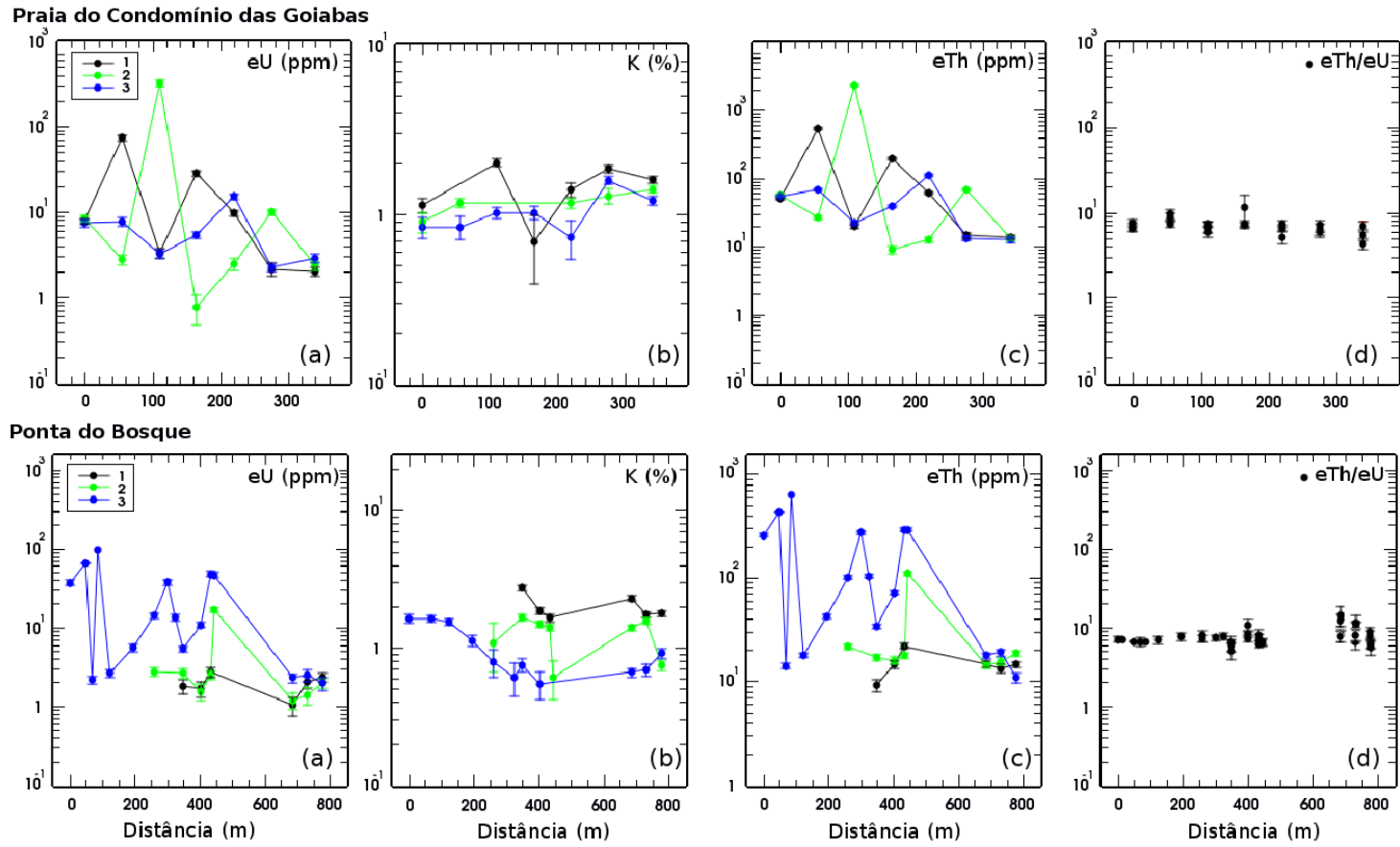


Figura 4.7: Visão geral das praias que apresentam comportamento com grande variação nas concentrações de eU, K e eTh, primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. Na quarta coluna observa-se a variação da razão eTh/eU para cada praia.

É possível verificar, de acordo com as figuras 4.7(a), (b) e (c), que há uma nítida diferença na dinâmica dessas praias, quando comparadas às praias do grupo definido anteriormente. Desta forma, as praias estudadas podem ser separadas em dois grupos com dinâmicas distintas, onde a Praia de Mambucaba (Vila Histórica), do Condomínio das Goiabas e a extremidade da Praia de Mambucaba (Vila Residencial) próxima à foz, apresentam grande influência da incidência de ondas e uma concentração maior de minerais pesados que pode ter sido transportada pelo Rio Mambucaba que apresenta competência para tal aporte sedimentar. Com o objetivo de adotar uma notação mais simples, a região pertencente à Praia de Mambucaba (Vila Residencial) próxima à foz do Rio Mambucaba será chamada de Ponta do Bosque, pois se encontra próxima a um dos acessos do Hotel do Bosque à Praia de Mambucaba.

Apesar da não homogeneidade na distribuição das concentrações individuais de Tório, Urânio e Potássio nas praias das figuras 4.4 e 4.7, é possível observar nos gráficos (d) dessa figuras que as razões de  $eTh/eU$  são bem comportadas em todas as praias, de forma que é possível determinar valores médios para cada praia a fim de observar, de forma mais geral, o comportamento das praias.

### 4.1.3 Testemunhos

A avaliação das concentrações de minerais pesados em testemunhos pode nos fornecer informações sobre sua variação em função do tempo e do enterramento, ou seja da profundidade. Ao longo deste trabalho, foram coletados 10 testemunhos, sendo que 7 destes foram extraídos com tubo de PVC e os demais foram extraídos com o uso de um trado para atingir maiores profundidades, obtendo assim mais informação sobre as camadas de deposição. Os testemunhos extraídos em tubo de PVC, apresentam algumas vantagens quando comparados àqueles extraídos com o trado: é possível observar as diversas camadas depositadas no momento da abertura do tubo, além da separação ser otimizada de forma a não perder nenhuma amostra. No caso do trado utilizado, era coletada por vez uma quantidade de amostra cerca de 4 vezes maior do que a quantidade que pôde ser separada do tubo de PVC. Isto gerou uma perda de resolução nos dados, pois embora fosse possível alcançar profundidades maiores, cada amostra representava uma variação de profundidade maior do que com o tubo de PVC.

A fotografia do testemunho aberto pode ser comparada com as concentrações dos elementos analisados, de forma que as características visuais do perfil podem ser associadas a

altas ou baixas concentrações de determinado elemento. Um exemplo pode ser observado na figura 4.8, onde as concentrações mais altas de Th e U estão associadas à coloração mais escura dos sedimentos. Isto se deve ao fato dos átomos de Th e U se associarem a minerais de coloração escura [KOGAN, 1969]. Este testemunho foi extraído na praia de Mambucaba do lado da Vila Residencial.

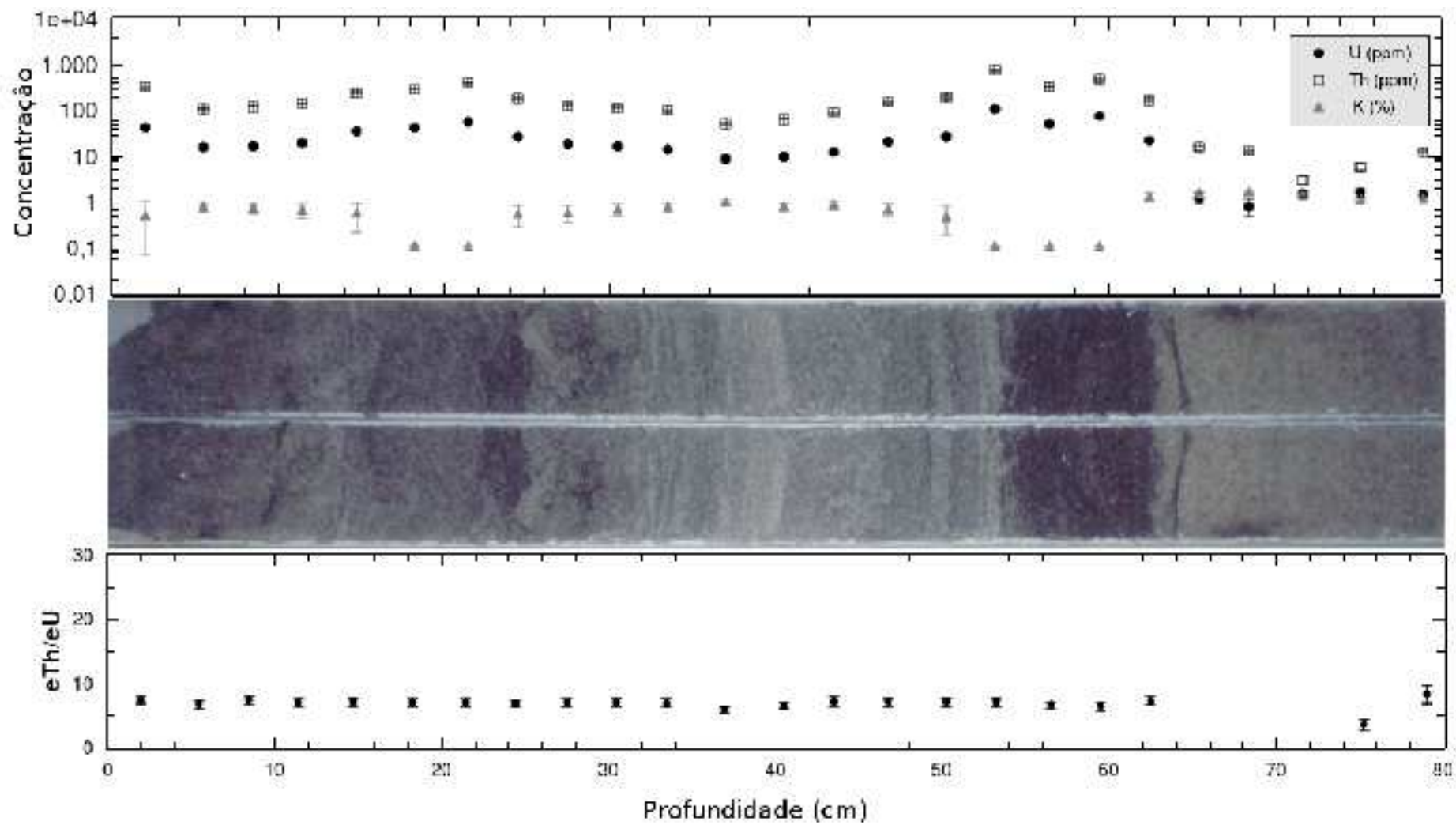


Figura 4.8: Foto do testemunho B e gráficos das concentrações de Th, U e K e da razão eTh/eU.

É possível notar que as distribuições verticais de eTh, eU e K variam de maneira significativa em função da profundidade. Este comportamento pode ser explicado a partir das condições de maré, por exemplo. As ondas são capazes de atingir a zona de pós-praia gerando a concentração de minerais pesados. A presença de camadas intercaladas de sedimentos claros e escuros, delimita a deposição de minerais leves e pesados, como pode ser observado nos valores das concentrações de eTh e eU que aumentam nas camadas de coloração mais escura e diminuem nas camadas de coloração mais clara, onde as concentrações de K aumentam. As camadas de coloração diferente sugerem que a deposição de minerais leves e pesados ocorre em diferentes ciclos na dinâmica da praia.

Um possível mecanismo que explica o desenvolvimento destas camadas pode ser a mobilização através de ondas de tempestade dos minerais pesados depositados pelo rio e por outras fontes possíveis. Estes minerais pesados então, podem ser concentrados na região de pós-praia através da ação constante das ondas e dos ventos. As camadas escuras podem representar episódios nos quais a praia foi atingida por ondas de tempestade. Sob certas condições, quando a onda atinge a base da face de praia é possível que esta forneça minerais pesados para as praias preferencialmente às frações leves. Em outras condições, os minerais leves são os únicos que podem ser transportados. Desta forma, tal comportamento pode explicar a existência de camadas alternadas de minerais pesados e leves [da SILVA, 1979].

A figura 4.9 mostra outro testemunho coletado na mesma praia, sob as mesmas condições, que apresenta o mesmo comportamento que o anterior: regiões mais escuras com maiores concentrações de Th e U e apresentando as menores concentrações de K.

Entretanto, ao se observar o testemunho da figura 4.10 é possível notar que a espessura das camadas é bem mais fina e que há uma quantidade muito maior de camadas intercaladas, indicando eventos com intervalo de tempo mais curto entre si. Este resultado sugere que este testemunho exhibe um comportamento diferente dos outros dois.

O local de extração deste tubo foi a foz do Rio Mambucaba, de forma que a variação de maré diária seria capaz de produzir as camadas intercaladas de minerais leves e pesados. É importante ressaltar que as concentrações de Th e U para nestas amostras são, de uma forma geral, menores do que nos dois anteriores. Isso indica que não houve uma concentração muito grande de minerais pesados, o que é mais uma indicação de que estas camadas não foram produzidas por eventuais ondas de tempestade.



Com o objetivo verificar a variação das concentrações nos testemunhos em função da profundidade, para um mesmo local, as amostras coletadas com o trado no segundo trabalho campo foram comparadas com aquelas da primeira coleta. Sendo assim, nas figuras 4.11 e 4.12 é possível notar, após uma primeira observação, que houve uma perda de resolução com relação à profundidade das amostras. Na figura 4.11 (a) observa-se que as concentrações individuais de Th, U e K parecem variar suavemente com a profundidade, enquanto na 4.11 (b) ocorre uma variação mais clara. Os mesmos detalhes podem ser observados na figura 4.12 (a) e (b).

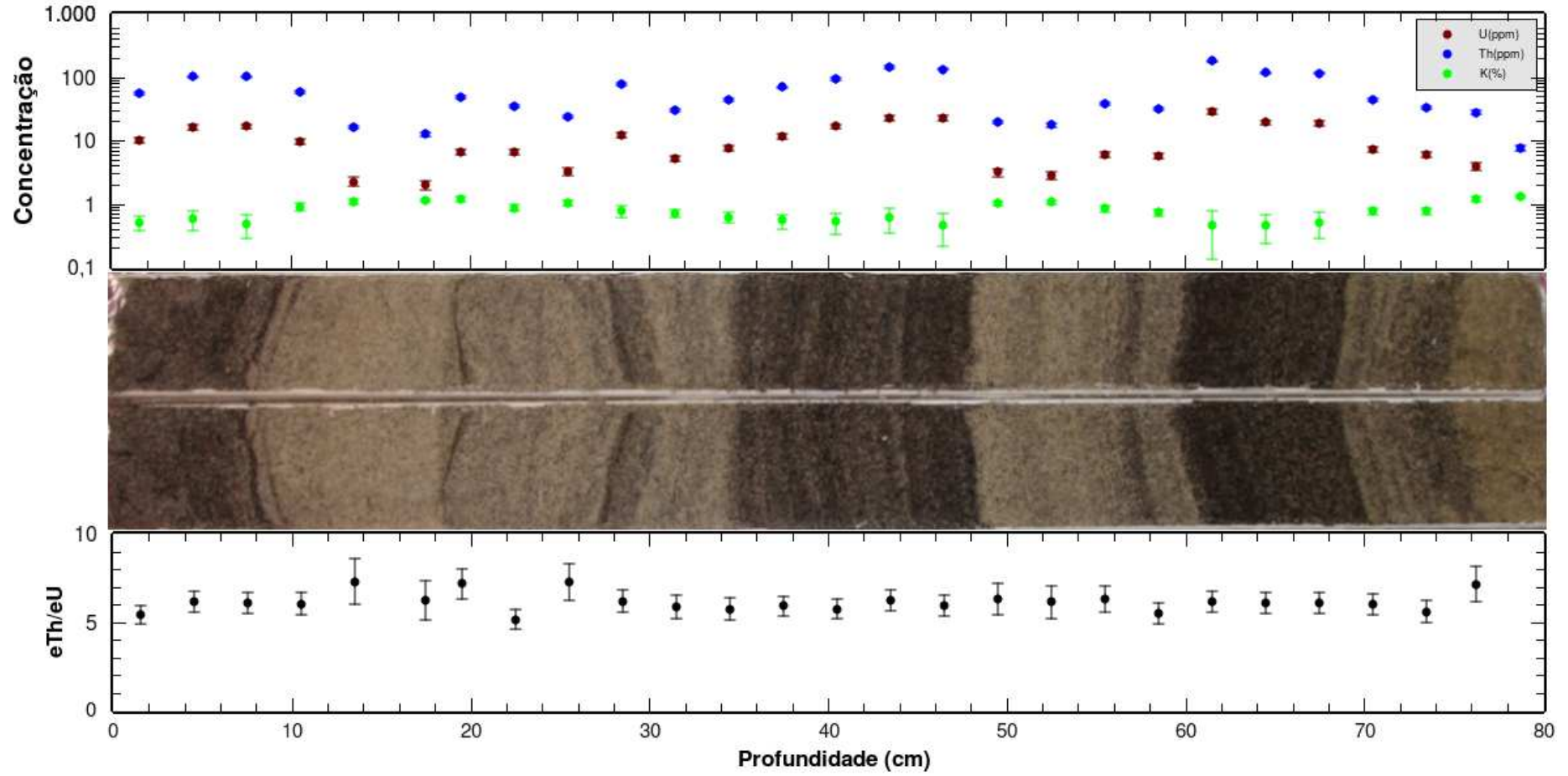


Figura 4.9: Foto do testemunho A e gráficos das concentrações de Th, U e K e da razão eTh/eU.

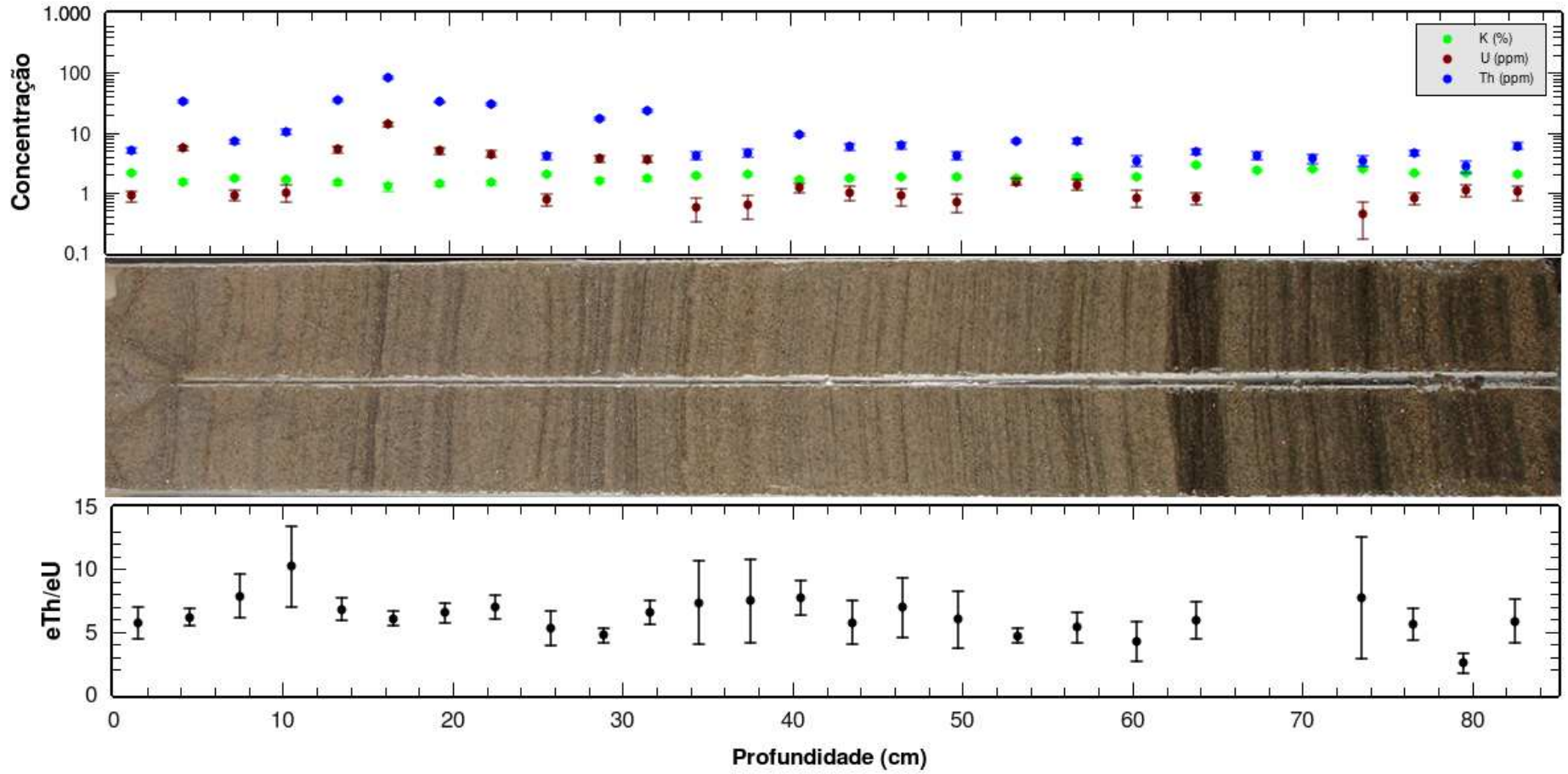


Figura 4.10: Foto do testemunho D e gráficos das concentrações de Th, U e K e da razão eTh/eU.

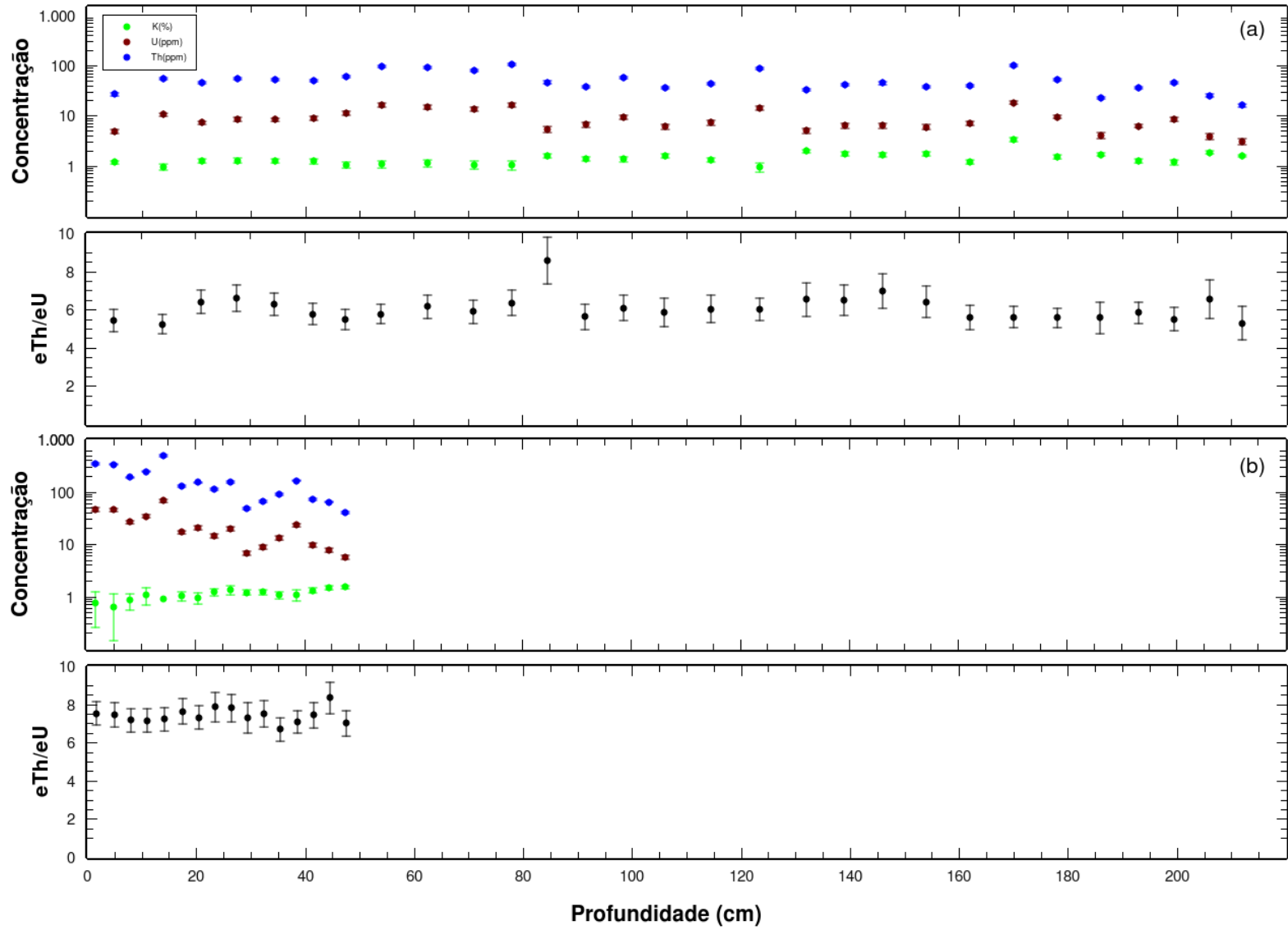


Figura 4.11: Comparação entre testemunhos extraídos no mesmo local na Praia de Mambucaba (Vila Histórica). (a) Extração com trado (2007) e (b) Extração com tubo de pvc (2005).

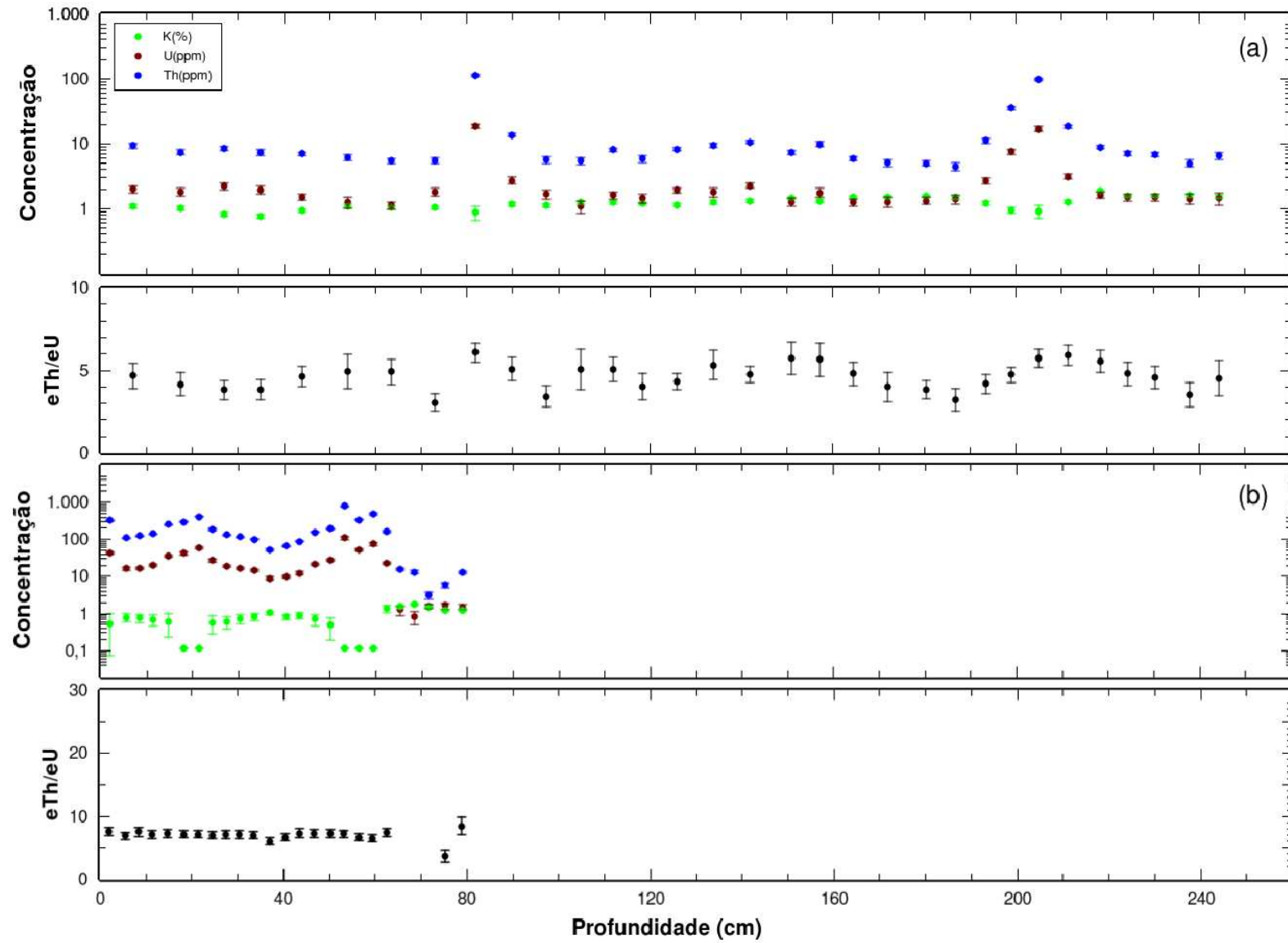


Figura 4.12: Comparação entre testemunhos extraídos no mesmo local na Praia de Mambucaba (Vila Residencial). (a) Extração com trado (2007) e (b) Extração com tubo de pvc (2005).

As concentrações de Th, U e K dos testemunhos de 2005 (figuras 4.11 (b) e 4.12 (b)) são significativamente superiores às dos testemunhos de 2007 para a mesma faixa de profundidade. Isto pode indicar que os sedimentos dos testemunhos de 2005 tenham sido retirados e retrabalhados e, nos dois anos seguintes, a deposição se deu de forma mais homogênea. Entretanto, não foi observada uma alteração significativa das razões eTh/eU devido aos efeitos do tempo e profundidade. De forma que, a espectrometria de radiação  $\gamma$  natural pode ser considerada uma boa ferramenta avaliação de sedimentos.

## 4.2 Distribuição de Th e U

A partir das figuras anteriores, é possível obter os valores médios das razões eTh/eU, os quais são apresentados na figura 4.13. Observa-se mais claramente um aumento global razões nas proximidades da foz do Rio Mambucaba e também na praia de Tarituba. Entretanto, nas outras praias esta razão fica praticamente constante ( $4,0 \pm 0,9$ ).

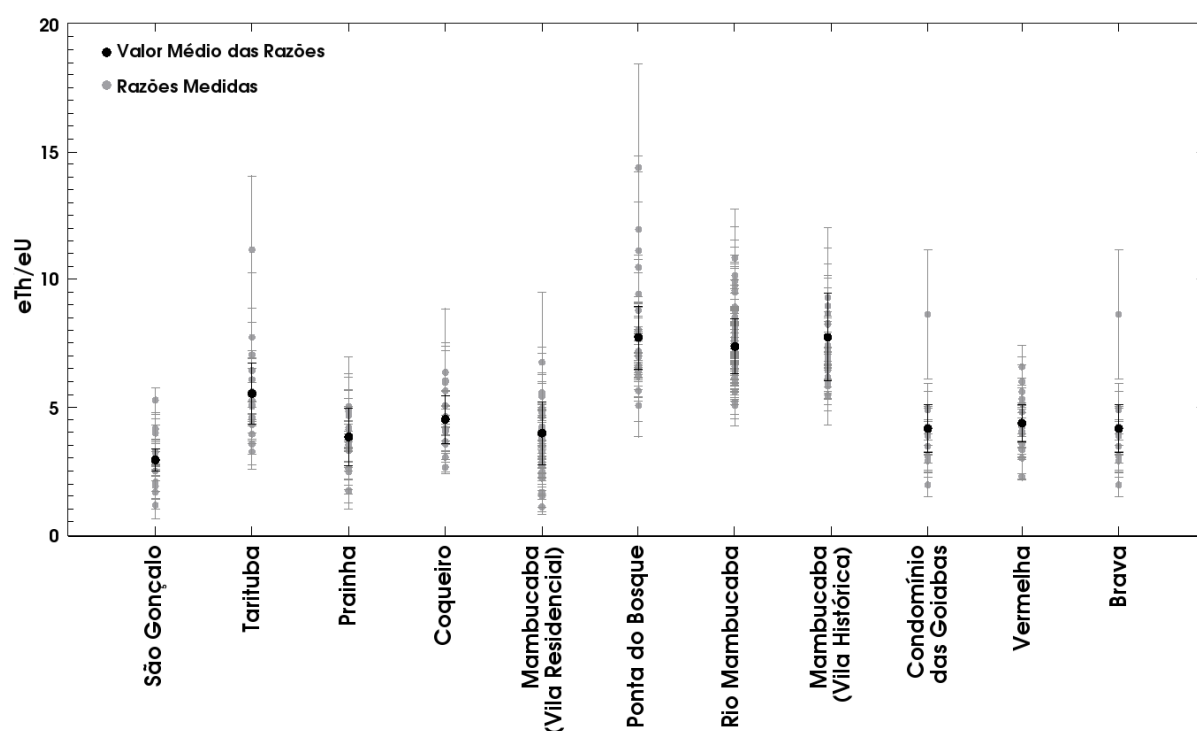


Figura 4.13: Curva de variação das razões eTh/eU em função da posição. Os pontos na cor cinza representam as razões eTh/eU calculadas a partir dos valores de tório e urânio obtidos para cada local e os pontos na cor preta representam a média das razões eTh/eU para cada local.

O valor médio da razão eTh/eU na foz do rio é de aproximadamente 7. O mesmo valor foi encontrado para as regiões de depósito no entorno da foz do rio. Este resultado sugere que os sedimentos provenientes de ambientes com forte oxidação e, conseqüente perda

de urânio, podem estar depositados na região do delta. Estes sedimentos são provavelmente de origem continental e a incidência de ondas e suas direções parecem mobilizar os sedimentos em suspensão no fundo, que são depositados na superfície das praias.

Um aumento no valor médio da razão  $eTh/eU$  da praia de Tarituba sugere a influência de outros rios existentes na região. Estes rios podem transportar sedimentos de origem possivelmente continental e, por ser uma região bem protegida por pontas rochosas, denominada Saco de Tarituba, ocorreria um aumento destes sedimentos na praia.

A consequência das variações nas relações de  $eTh/eU$  serão aprofundadas no item 4.4.

### **4.3 Distribuições de Th e K**

Conforme descrito na seção 2.2.3, as concentrações de Th, U e K estão intimamente ligadas com a composição mineral de rochas e sedimentos. A figura 4.14 apresenta um diagrama das concentrações de Th em função das de K para amostras de sedimentos coletadas na superfície das praias estudadas.

A partir desta figura, é possível distinguir duas principais associações minerais nos sedimentos, as quais podem ser classificadas por grupos com distintos valores de relações de  $eTh/K$ : uma com altos valores de Th e baixos valores de K (típicos de associações de minerais pesados) e outra com baixos valores de Th e altos de K (típicos de micas e feldspatos).

Assim, a partir da figura 4.14, pode-se observar as associações existentes nas diversas praias analisadas. Foi identificada uma concentração de minerais pesados nos seguintes locais: Praia do Condomínio das Goiabas, Praia de Mambucaba (Vila Histórica) e na Ponta do Bosque. Outras praias mais distantes da influência do Rio Mambucaba, apresentam caracterização mineral composta principalmente por micas e feldspatos.

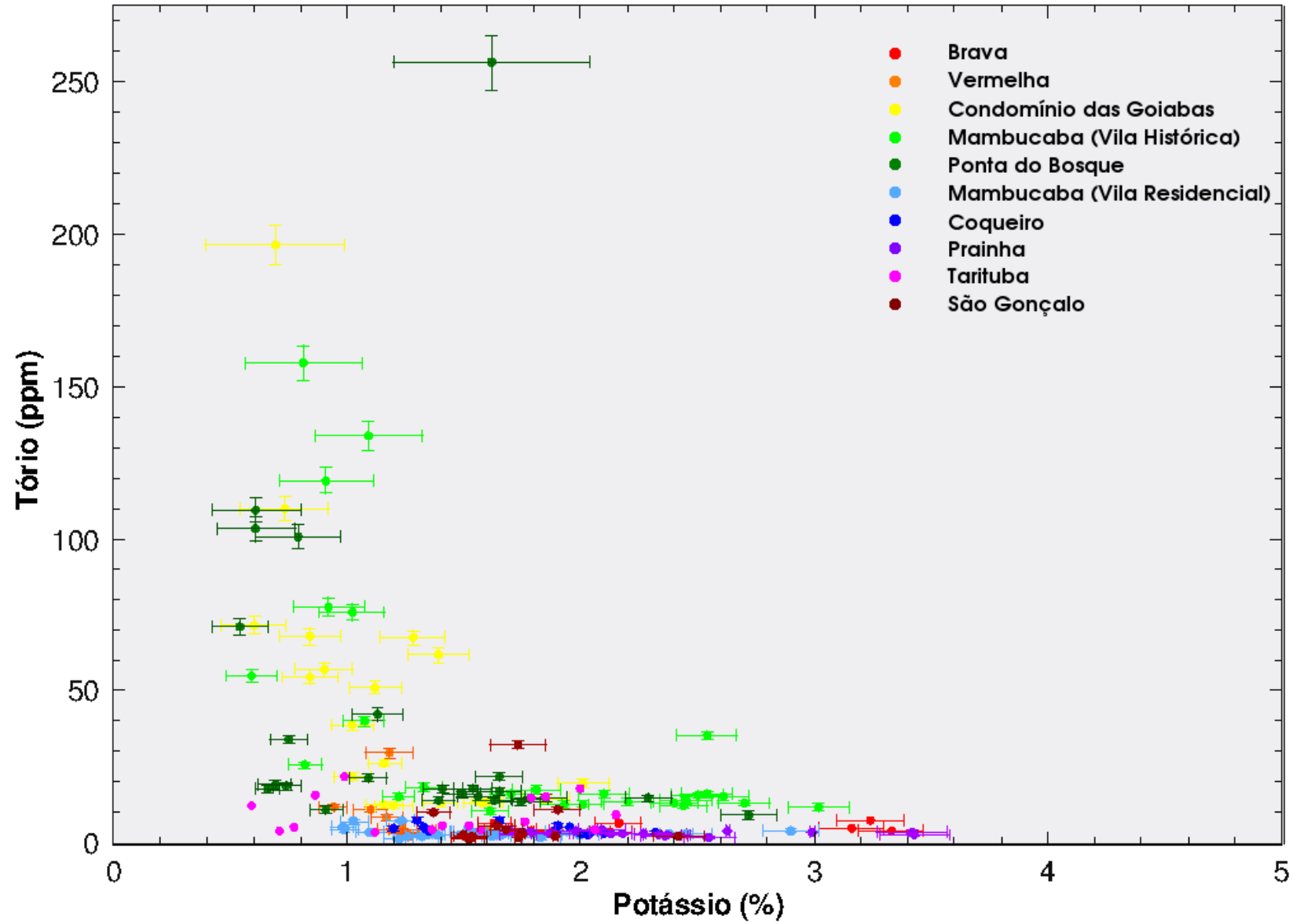


Figura 4.14: Diagrama ThxK dos sedimentos superficiais mostrando os tipos de minerais encontrados em função da concentração de tório e de potássio em sua composição.



## 4.4 Diagramas eTh/K x eTh/eU

Uma outra maneira de interpretar os resultados obtidos até este momento, é analisando-se uma diagrama composto pelos valores da razão eTh/K e da razão eTh/eU contrapostos. Esse diagrama permite obter de forma geral tantos as principais características da composição mineral dos sedimentos quanto indícios de sua origem e principais mecanismos envolvidos no seu transporte até a praia.

Como mencionado anteriormente, as diversas análises realizadas por Adams & Weaver (1958), demonstraram a utilidade das razões eTh/eU como indicador das condições do potencial redox. Esses dois elementos são normalmente associados geoquimicamente e, enquanto que o tório possui apenas um estado de valência que é insolúvel, o urânio possui dois estados de valência, no qual o mais baixo também é insolúvel, mas o mais alto é solúvel e pode ser removido da solução. Uma vez que o comportamento do tório é invariante com o potencial redox, as razões eTh/eU podem ser usadas para identificar as condições de oxidação de um ambiente deposicional. Desta forma, valores eTh/eU < 2 sugerem enriquecimento de urânio e, conseqüentemente, ambientes redutores que promoveram sua fixação (sedimentos de origem marinha). Por outro lado, valores eTh/eU > 7 indicam ambientes oxidantes que promoveram a perda de urânio, possivelmente por lixiviação (sedimentos de origem continental).

A consideração simultânea das razões eTh/eU e eTh/K revela padrões que podem ser facilmente interpretáveis [DOVETON & PRENSKY, 1992]. A partir das razões eTh/eU da figura 4.15 e dos valores diagnósticos sugeridos por Adams & Weaver (1958), observa-se uma tendência de valores de médios a altos em torno do Rio Mambucaba, nas praias do Condomínio das Goiabas, de Mambucaba (Vila Histórica) e na Ponta do Bosque que estão representados pelos pontos em amarelo, verde claro e verde escuro, respectivamente. Estes valores observados no entorno da foz do rio são consistentes com um ambiente oxidante terrestre de sedimentos aluvionares, uma vez que os valores encontram-se entre 5 e 15. Este resultado, com grande variabilidade, provavelmente reflete que se trata de uma região de mistura, típica de um complexo deltáico, juntamente com sedimentos de origem continental que ficaram mais expostos à oxidação. Enquanto nas outras praias mais afastadas da foz do Rio Mambucaba, os sedimentos apresentam características de ambiente deposicional de águas rasas. Esta também de uma região de mistura, com valores de eTh/eU preferencialmente entre 1 e 5. Entretanto, tais valores apontam para uma

maior influência de sedimentos provenientes de um ambiente marinho do que de origem continental.

Adicionalmente, algumas das amostras das praias de Tarituba e São Gonçalo, representadas pelos pontos em rosa e vinho, respectivamente, encontram-se com razões  $eTh/eU$  acima de 7 o que sugere a presença de sedimentos de origem continental, implicando a influência de outros processos.

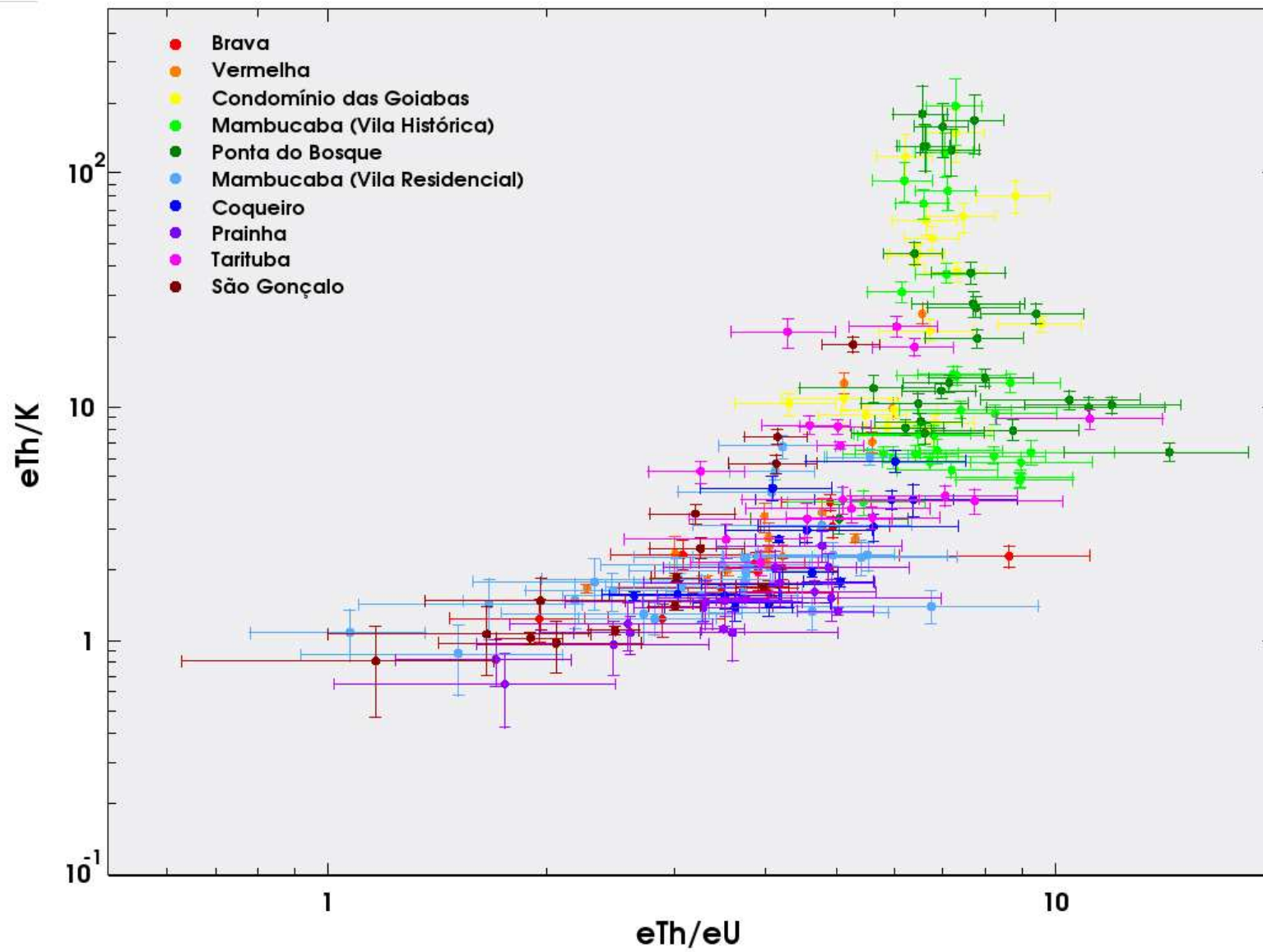


Figura 4.15: Diagrama de  $eTh/K$  por  $eTh/eU$  das amostras coletadas na superfície das praias.

Ao observar a indicação das razões de eTh/K da figura 4.15, que está associada à composição mineral, nota-se que os pontos referentes às praias do Condomínio das Goiabas e de Mambucaba (Vila Histórica e Ponta do Bosque), apresentam composição mineral diferente das outras praias mais afastadas da foz do Rio Mambucaba.

É possível notar também, que alguns dados referentes à praia de Tarituba apresentam valores eTh/K próximos à faixa de minerais pesados, se misturando aos valores dessa região do gráfico, embora esta praia seja isolada da região da foz do Rio Mambucaba. Durante a coleta de amostras foi possível observar que o aporte sedimentar neste local pode ter outras influências, como o Rio São Gonçalo que corta a Praia de São Gonçalo, dois riachos que desembocam na Praia de Tarituba e além disso a própria erosão dos costões rochosos que existem nesta região.

## 4.5 Modelo para o transporte de sedimentos

De acordo com os principais registros geológicos sobre depósitos Quaternários, estes depósitos são compostos de sedimentos que foram originados num embasamento cristalino de rochas Pré-Cambrianas, que são consideradas as fontes primárias de depósitos de minerais pesados. Entretanto, a composição de associações a minerais pesados não é controlada apenas pela composição mineral da fonte. O sinal original de proveniência pode ser alterado por diversos processos que ocorrem durante o ciclo de sedimentação, ilustrados na figura 4.16.

A concentração de minerais pesados é afetada, em geral, por três processos: *Separação Física* que ocorre como resultado das condições hidrodinâmicas atuantes durante os processos transporte e a deposição, e controla a abundância relativa e absoluta dos minerais pesados. *Abrasão Mecânica* ocorre durante o transporte e gera a diminuição de tamanho dos grãos por uma combinação da quebra e do arredondamento. *Dissolução* gera perda parcial ou total de minerais pesados numa certa quantidade de condições geoquímicas em vários estágios do ciclo de sedimentação, desde o intemperismo na fonte, exposição sub-aérea em ambientes deposicionais não marinhos, durante a compactação e, finalmente durante o intemperismo no afloramento [MORTON & HALLSWORTH, 1999].

Este modelo pode ser confirmado pela figura 4.17, onde o diagrama contendo as razões eTh/K versus eTh/eU das regiões 1 e 2 de coleta de amostras do Rio Mambucaba e também da Ilha do Algodão, mostra que a distribuição de sedimentos ao longo do Rio

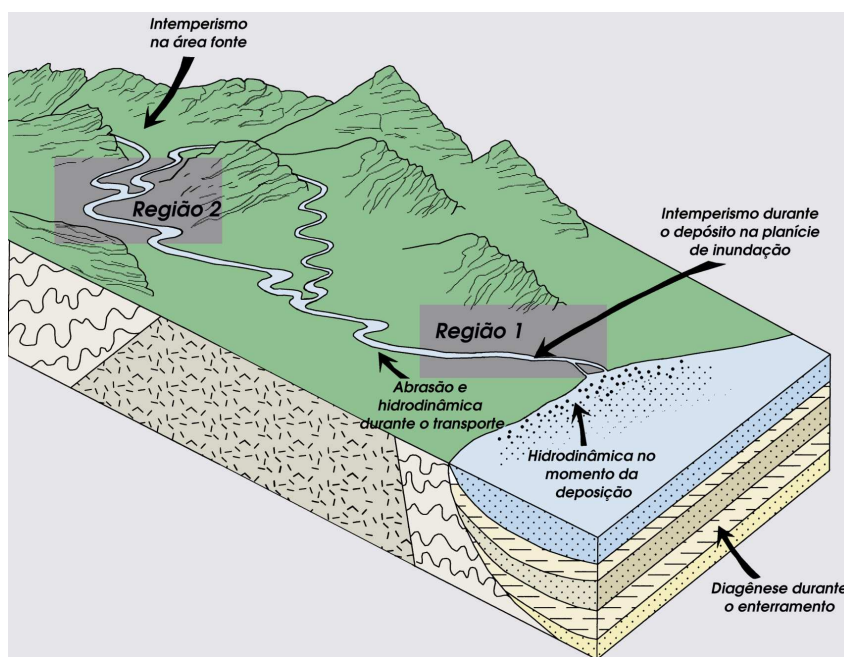


Figura 4.16: Diagrama esquemático do ciclo de sedimentação mostrando alguns processos que controlam a associação de minerais pesados (Modificado de Morton & Hallsworth (1999)).

Mambucaba pode ser inicialmente interpretada como um sistema constituído de sedimentos quartzo-feldspáticos na região 2, ocorrendo um enriquecimento de argilominerais e um aumento de sedimentos associados à minerais pesados na região 1, próximo à foz do rio. Nesta figura as regiões 1 e 2 estão representadas pelos pontos em preto e em vermelho, respectivamente. Além desse resultado, os sedimentos coletados da Ilha do Algodão são também preferencialmente formados de sedimentos quartzo-feldspáticos combinados com ambientes marinhos de águas rasas, uma vez que os valores  $eTh/K$  são menores que 2 e as razões  $eTh/eU$  estão entre 2 e 6.

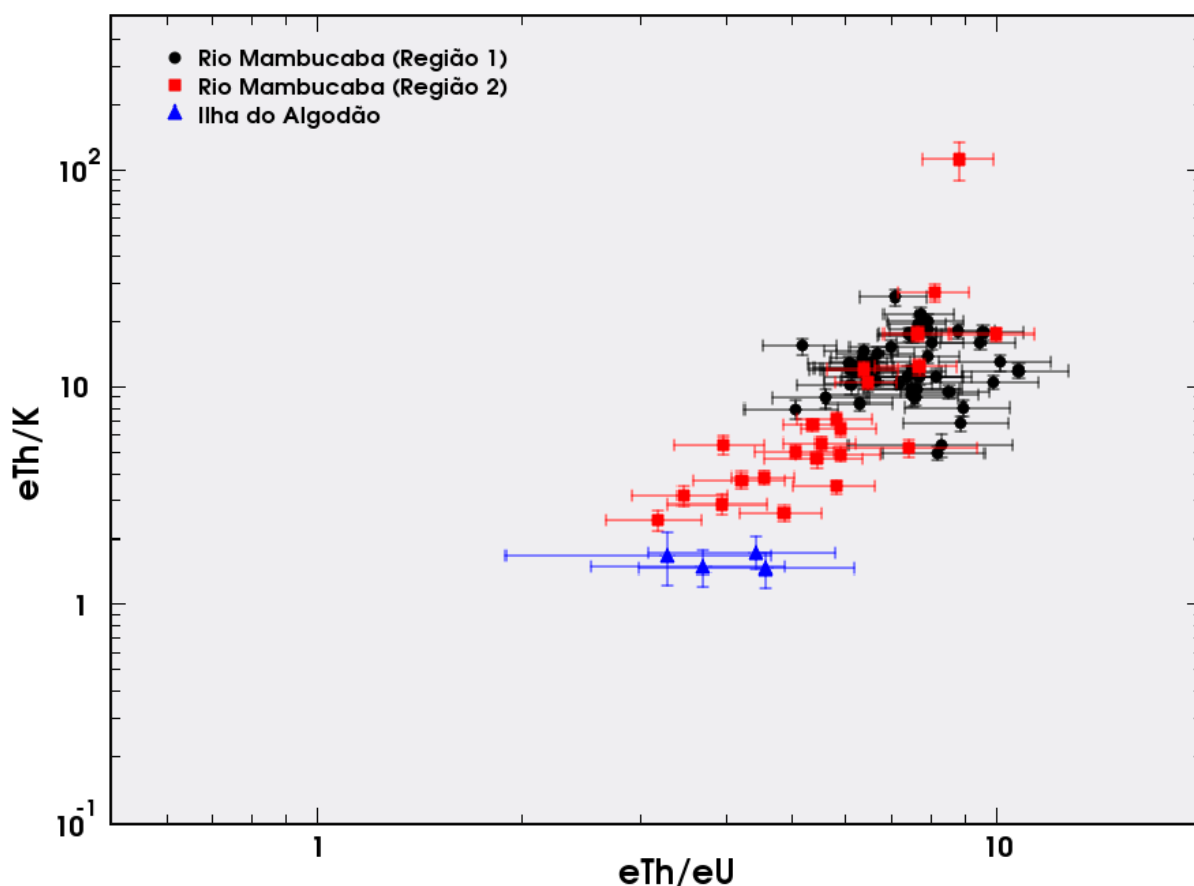


Figura 4.17: Diagrama dos sedimentos coletados nas duas regiões do Rio Mambucaba e também na Ilha do Algodão, mostrando características do ambiente de sedimentação e da composição mineral.

Adicionalmente, a ação das correntes marinhas e ondas na região faz com que esses sedimentos de origem aluvial e coluvial na zona costeira no entorno do complexo deltáico do Rio Mambucaba, sejam retrabalhados, promovendo a concentração de minerais pesados nas praias de Mambucaba (Vila Histórica e Ponta do Bosque) e do Condomínio das Goiabas, como pode ser observado na figura 4.15

Uma ilustração do processo de concentração em função da influência da incidência de ondas na região pode ser observado na figura 4.18.

Este processo de concentração está identificado pela figura 4.18 (A). Outro efeito parece estar ocorrendo na 4.18 (B), onde as praias de Tarituba e São Gonçalo se encontram. De certa forma, a região conhecida como Saco de Tarituba está isolada da incidência direta de ondas oriundas do mar. Isso se deve à presença de diversas ilhas na região, além da proteção oferecida pela Ponta Grande da Timbuíba. Desta forma, os rios e riachos existentes na região têm o papel de transportar os sedimentos até a região costeira e a concentração destes sedimentos se dá por conta do isolamento da região.

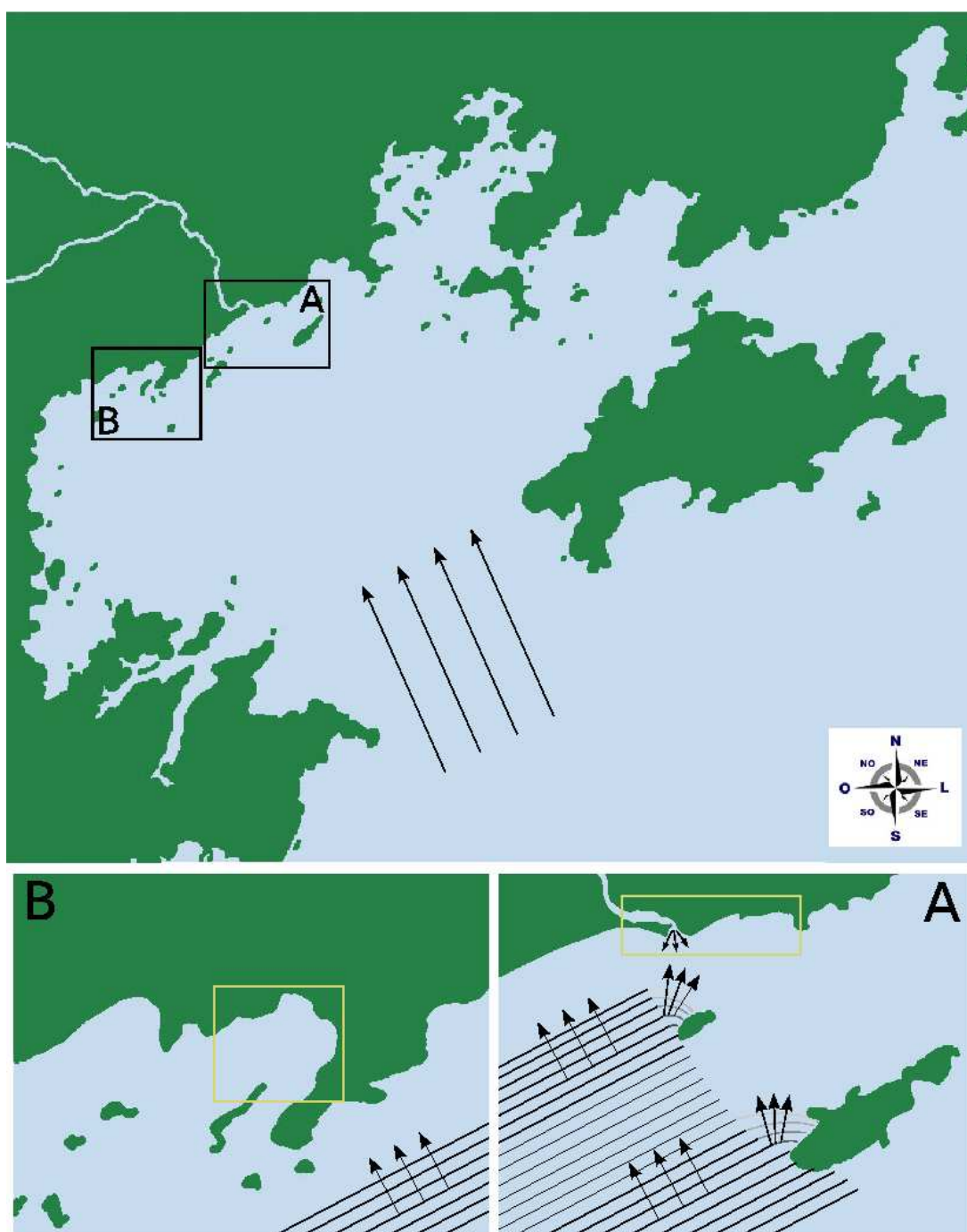


Figura 4.18: Esquema de concentração de minerais pesados. A região A mostra como ocorre a concentração do entorno do Rio Mambucaba e a região B identifica os processos que atuam no Saco de Tarituba.

Um modelo de distribuição de sedimentos pôde ser elaborado a partir dos resultados deste trabalho. Apenas com as concentrações de Th, U e K e suas razões  $eTh/eU$  e  $eTh/K$  foi possível descrever os possíveis mecanismos que atuam na concentração local de minerais pesados. Este modelo considera que os minerais são trazidos pelos rios, dependendo de sua competência e aporte sedimentar, e posteriormente são depositados na região costeira e nela retrabalhados dependendo da incidência de ondas e correntes marinhas na região.

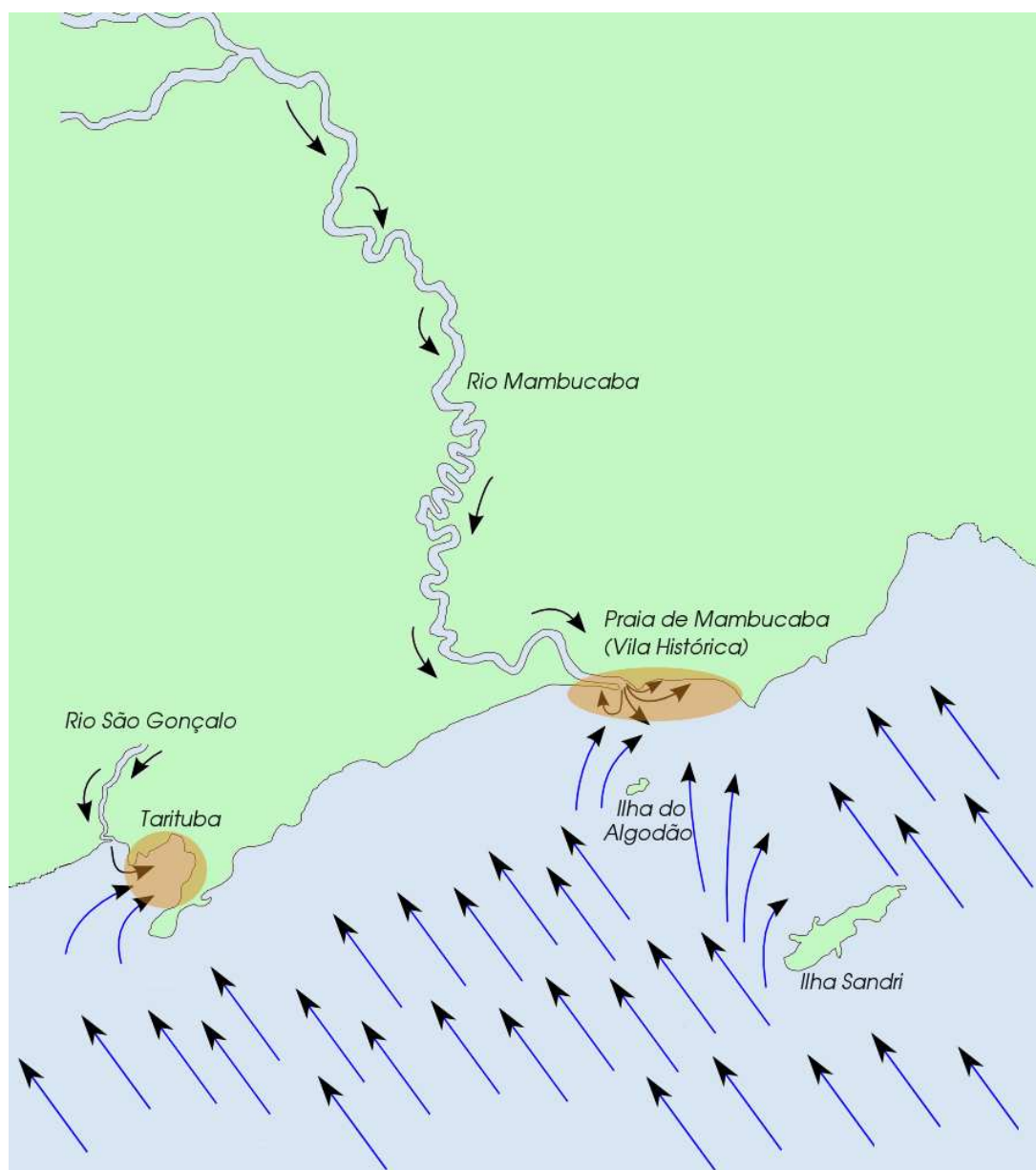


Figura 4.19: Modelo de Transporte de sedimentos e concentração de Minerais Pesados.

Como pode ser observado na figura 4.19, as setas de cor preta representam o transporte de sedimentos através dos rios que desembocam na costa e, as setas azuis representam a influência das ondas e correntes provenientes do mar. As ilhas existentes nas proximidades da foz do Rio Mambucaba mudam a direção das ondas, causando uma interferência destas na região da deposição, de forma que observa-se uma região preferencial de deposição por conta da superposição das componentes que saem do rio e das ondas. Desta forma, pode-se dizer que a concentração de minerais pesados ocorre a leste de Mambucaba e que a direção do transporte de sedimentos é de oeste para leste nesta região.

Outro processo ocorre na região do Saco de Tarituba: as ondas provenientes do mar



também são desviadas por ilhas existentes na região, de modo que diminuem sua intensidade e, além disso a geomorfologia local facilita a deposição de sedimentos vindos da foz do Rio São Gonçalo na Paraia de Tarituba. Outro processo que justifica um aumento nas concentrações de minerais pesados nesta região é a possível erosão dos costões rochosos que formam o Saco de Tarituba.

## 5 Conclusões

A radiação gama natural proveniente de depósitos arenosos da costa litorânea do sul do Estado do Rio de Janeiro foi investigada neste trabalho, com o objetivo maior de compreender os principais mecanismos dos processos de sua origem e os meios de transporte e distribuição para a sua formação. Para tanto, concentrações de tório, urânio e potássio foram estimadas utilizando-se a técnica de espectrometria gama. De posse dos resultados, um estudo estatístico de diagramas das relações  $eTh/eU$  e  $eTh/K$  foi desenvolvido, refletindo tanto as principais propriedades mineralógicas quanto os principais modos para a formação de depósitos de sedimentos recentes presentes na Baía da Ilha Grande.

Alguns trabalhos anteriores na literatura [de MEIJER *et al.*, 2001, ASADOV *et al.*, 2001, van WIJNGAARDEN *et al.*, 2002] relatam a complexidade deste tipo de estudo, apontando a necessidade do uso de parâmetros adicionais, como por exemplo a granulometria, para que fosse possível descrever de forma apropriada através do emprego da espectrometria  $\gamma$  convencional (basedada somente em medidas de concentrações de radionuclídeos naturais). Todavia, os testes de confiabilidade da técnica usada neste trabalho revelaram que as relações de  $eTh/eU$  não eram significativamente modificadas através da ação do tempo de permanência dos sedimentos na costa, da profundidade de amostragem, tamanho ou densidade dos sedimentos e, portanto, a espectrometria  $\gamma$  natural, quando associada ao estudo estatístico das correlações entre  $eTh$ ,  $eU$ ,  $K$ ,  $eTh/eU$  and  $eTh/K$ , torna-se uma ferramenta eficaz no estudo de depósitos de sedimentos recentes presentes na costa brasileira.

Adicionalmente, os resultados mostraram que um detector do tipo NaI(Tl) também é eficaz neste tipo de estudo. Em termos de medidas de laboratório, quando as concentrações dos radionuclídeos não são extremamente baixas, é possível trocar de detector, não sendo necessária, por exemplo, a utilização de nitrogênio líquido no caso de um detector com melhor resolução do tipo HPGe. Isto sem contar que, enquanto é possível montar um sistema de detecção com cerca de 5 mil dólares para um NaI(Tl), é necessário ao menos uma ordem de grandeza maior de gasto para a aquisição de um HPGe. Para jovens pes-

quisadores, que estão tentando montar um laboratório em começo de carreira, este é um dado extremamente relevante! Em contrapartida, esta técnica confirmou-se como uma boa ferramenta auxiliar a estudos geofísicos tradicionais, sendo que em alguns casos pode até mesmo substituir esta técnica de forma confiável, também incluindo o uso de menores recursos financeiros.

Aplicando-se, então, este método analítico nuclear em estudos geológicos da costa sul fluminense foi possível investigar de forma detalhada a existência áreas com concentrações elevadas de minerais pesados na região da foz do Rio Mambucaba. Esta motivação que surgiu a partir de um estudo anterior realizado pelo nosso grupo [ANJOS *et al.*, 2006]. Como resultado atual, foi possível constatar que esta região, embora possua grandes concentrações de minerais pesados, não se trata de um depósito economicamente viável à exploração comercial, tais como os depósitos ao norte do Estado do Rio de Janeiro, nas regiões de Guaxindiba e Buena, ou mesmo os antigos locais de extração de Guarapari, na região sul do Estado do Espírito Santo. Contudo, trata-se de uma região propícia ao acúmulo de minerais pesados provenientes da Serra do Mar, devido aos efeitos da ação das ondas e correntes na geomorfologia local.

Ao estudar as correlações entre as razões de  $eTh/eU$  e  $eTh/K$  foi possível construir um modelo geográfico para o transporte de sedimentos numa extensa região da Baía da Ilha Grande, também conhecida como Costa Verde. Neste modelo, pôde-se observar a importância dos rios que transportam os sedimentos até a planície costeira, onde ocorre a deposição. Contudo, também foi possível constatar a grande influência da ação de ondas e correntes marítimas na geomorfologia da região, uma vez que apenas alguns locais apresentaram maiores concentrações dos minerais pesados.

Como trabalhos futuros, podem ser destacados estudos da ocupação Pré-Histórica desta região, unindo-se este método com técnicas de datação via radiocarbono. É sabido que durante o período Quaternário houve drásticas flutuações do nível do mar. Com isso, a costa brasileira submergiu, atingindo aproximadamente 5 metros em relação ao nível atual, há cerca de 5 mil anos atrás. Desde então, vem sofrendo um processo de emersão. Este fato influenciou seguramente a ocupação Pré-histórica da região costeira por grupos de caçadores-coletores, construtores de sítios denominados Sambaquis. Nosso grupo vem trabalhando no sentido de unir a técnica de espectrometria  $\gamma$  com a datação de radiocarbono, com o objetivo compreender melhor este tipo de ocupação. Dentro deste contexto, o trabalho aqui realizado pode dar continuidade a este tema.

# Anexo A

## Análise Granulométrica

- Praia Brava

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	54,8366	31,5	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	112,2427	64,4	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	5,4534	3,1	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	0,0208	<0,1	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0036	<0,1	Silte + Argila

- Praia Vermelha

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	51,3743	29,8	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	112,6709	65,1	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	6,9749	4,1	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	0,0440	<0,1	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0056	<0,1	Silte + Argila

- Praia do Condomínio das Goiabas

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	10,6947	6,1	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	113,2444	64,4	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	48,2321	27,4	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	3,1000	1,8	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0259	<0,1	Silte + Argila

- Praia de Mambucaba (Vila Histórica)

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	3,1279	2,1	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	72,7828	48,9	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	55,8541	37,5	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	15,9664	10,7	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,5376	0,4	Silte + Argila

- Praia de Mambucaba (Ponta do Bosque)

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	13,3674	7,6	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	121,0681	69,1	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	34,3845	19,6	Areia fina
60 < d < 125	4 a 3	4,7712	2,7	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	1,1962	0,7	Silte + Argila

- Praia do Coqueiro

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	3,2787	2,1	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	118,6521	75,5	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	34,4413	21,9	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	0,3256	<0,1	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0058	<0,1	Silte + Argila

- Prainha

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	1,4192	0,7	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	98,5241	54,8	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	76,7543	42,7	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	2,6706	1,5	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0028	<0,1	Silte + Argila

- Praia de Tarituba

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	18,7162	10,4	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	117,1625	65,0	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	40,9025	22,7	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	2,0469	1,1	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0031	<0,1	Silte + Argila

- Praia de São Gonçalo

Tamanho do grão ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	Massa (g)	Frequência (%)	Caracterização Granulométrica
1000 < d < 2000	0 a -1	-	-	Areia Muito Grossa
500 < d < 1000	1 a 0	14,8618	8,5	Areia Grossa
250 < d < 500	2 a 1	147,4564	84,6	<b>Areia Média</b>
125 < d < 250	3 a 2	11,3494	6,5	Areia fina
63 < d < 125	4 a 3	0,1055	0,1	Areia Muito Fina
d < 63	fundo	0,0022	<0,1	Silte + Argila

## **Anexo B**

### **Fotos dos Sedimentos**

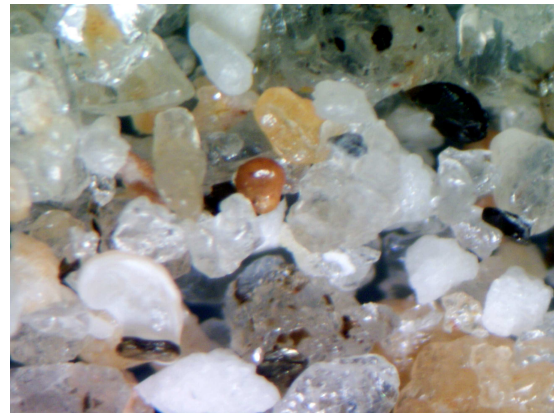
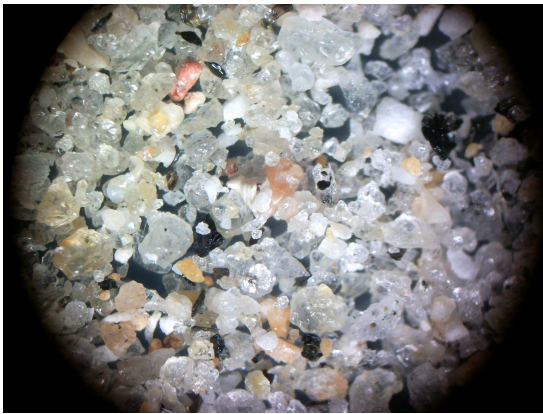


Figura 1: Foto dos Sedimentos da Praia Brava

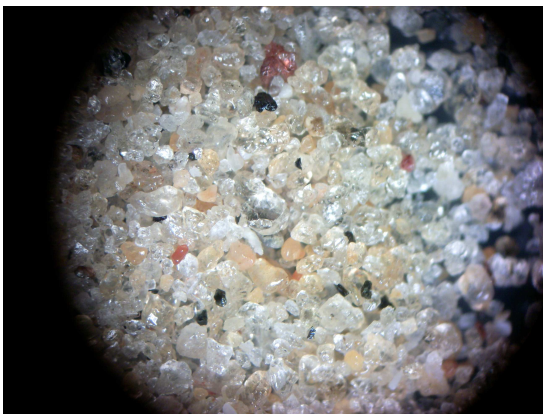


Figura 2: Foto dos Sedimentos da Praia Vermelha



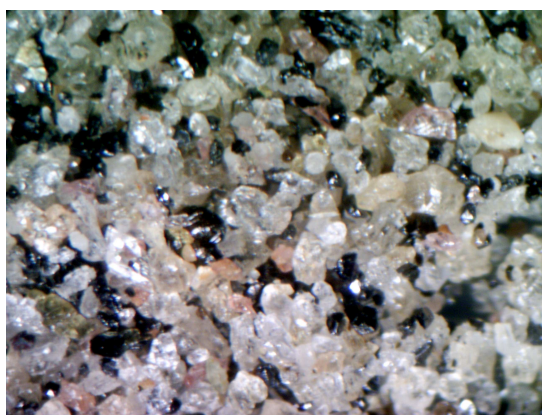


Figura 3: Foto dos Sedimentos da Praia do Condomínio das Goiabas



Figura 4: Foto dos Sedimentos da Praia de Mambucaba (Vila Histórica)

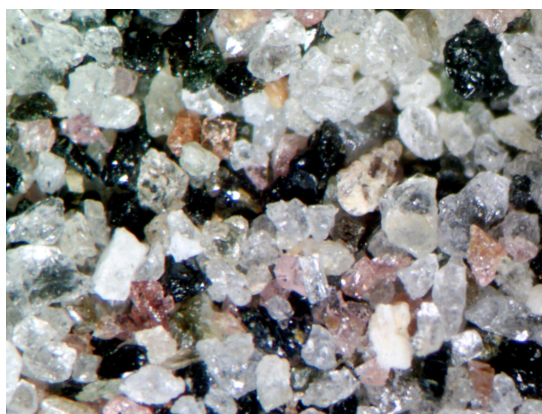


Figura 5: Foto dos Sedimentos da Praia de Mambucaba (Ponta do Bosque)



Figura 6: Foto dos Sedimentos da Praia de Mambucaba (Vila Residencial)



Figura 7: Foto dos Sedimentos da Praia do Coqueiro

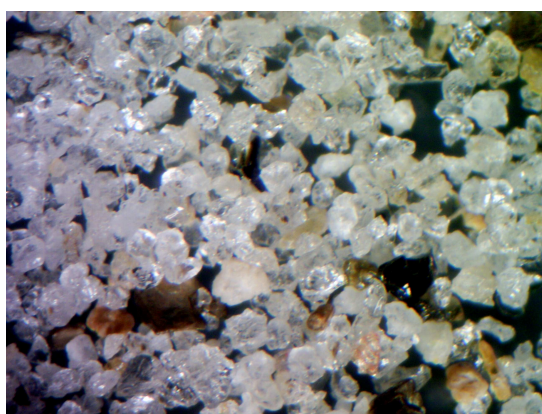


Figura 8: Foto dos Sedimentos da Prainha

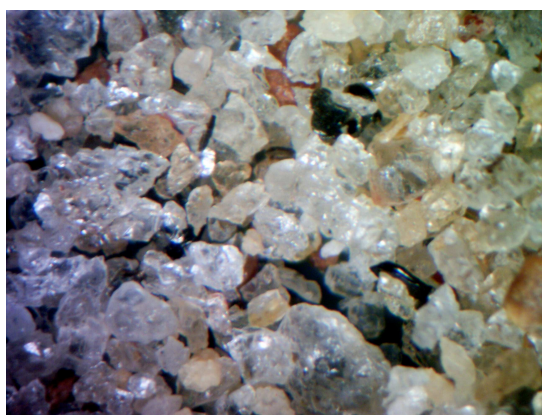


Figura 9: Foto dos Sedimentos da Praia de Tarituba

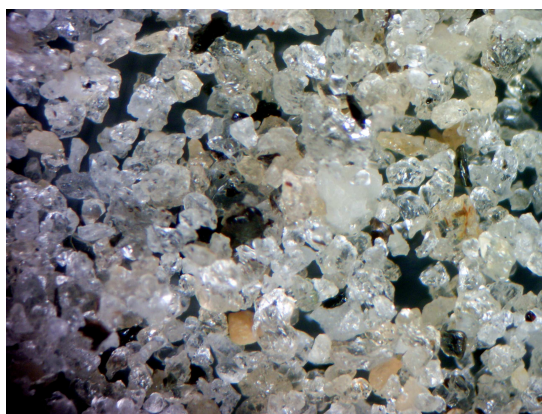


Figura 10: Foto dos Sedimentos da Praia de São Gonçalo

## **Anexo C**

### **Fotos**



Figura 1: Foto da Praia de Mambucaba (Vila Residencial).



Figura 2: Foto da Praia de Mambucaba (Vila Residencial).



Figura 3: Foto da Praia do Coqueiro.



Figura 4: Coleta na Praia do Coqueiro.



Figura 5: Foto da foz do Rio Mambucaba (2005).



Figura 6: Foto da Praia de Mambucaba (Vila Histórica).



Figura 7: Foto da Coleta no Rio Mambucaba (2005).



Figura 8: Foto da Coleta no Rio Mambucaba (2005).



Figura 9: Foto do Rio Mambucaba (2007).



Figura 10: Foto do Rio Mambucaba (2007).





Figura 11: Foto da Coleta no Rio Mambucaba (2007).



Figura 12: Foto do Rio São Gonçalo.



Figura 13: Foto do Rio São Gonçalo.



Figura 14: Foto da Prainha.



Figura 15: Foto da Praia de Tarituba.

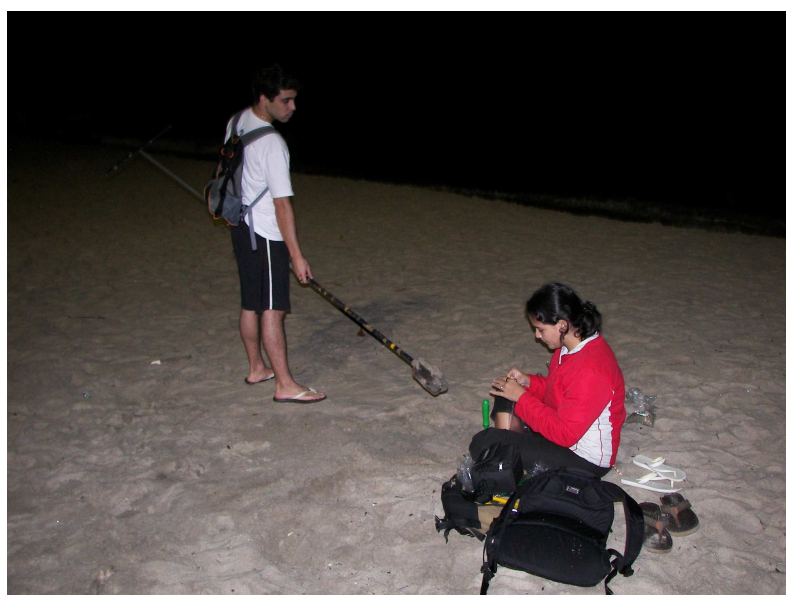


Figura 16: Foto da coleta do testemunho na Praia de Mambucaba (Vila Histórica).

## **Referências Bibliográficas**

- [ADAMS & GASPARINI, 1970] Adams, J. A. S.; Gasparini, P., *Methods in Geochemistry and Geophysics: Gamma-ray Spectrometry of Rocks*. Elsevier. Netherlands: 1970.
- [ADAMS & WEAVER, 1958] Adams, J. A. S.; Weaver, C. E., *Thorium to uranium ratios as indicators of sedimentary processes: exemple of concept of geochemical facies*. Bulletin of American Association of Petrology and Geology, 42, p.387-430, 1958.
- [ALMEIDA & CARNEIRO, 1998] Almeida, F. F. M.; Carneiro, C. D. R., *Origem e Evolução da Serra do Mar*. Revista Brasileira de Geociências, 28(2), p.135-150, 1998.
- [ANGULO & LESSA, 1997] Angulo, R. J. & Lessa, G. *The Brazilian sea level curves: acritical review with emphasis on the curves from Paranaguá and Cananéia region*. Marine Geology, 140, p.141-166, 1997.
- [ANDRADE *et al.*, 2003] Andrade, A. C. S.; Dominguez, J. M. L.; Martin, L.; Bittencourt, A. C. S. P. *Quaternary evolution of the Caravelas strandplain – Southern Bahia State – Brazil*. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 75, p.357–382, 2003.
- [ANJOS *et al.*, 2005] Anjos, R. M.; Veiga, R.; Soares, T.; Santos, A. M. A.; Aguiar, J. G.; Frascá, M. H. B. O.; Brage, J. A. P.; Uzêda, D.; Mangia, L.; Facure, A.; Mosquera, B.; Carvalho, C.; Gomes, P. R. S., *Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites*. Radiation Measurements, 39, p.245-253, 2005.
- [ANJOS *et al.*, 2006] Anjos, R. M.; Veiga, R.; Macario, K.; Carvalho, C.; Sanches, N.; Bastos, J.; Gomes, P. R. S., *Radiometric analysis of Quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast*. Marine Geology, 229, p.29-43, 2006.
- [ANJOS *et al.*, 2007] Anjos, R. M.; Veiga, R.; Carvalho, C.; Macario, K.; Gomes, P. R. S., *Geological provenance of Quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast*. Nuclear Physics A, 787, p.642c–647c, 2007.
- [ASADOV *et al.*, 2001] Asadov, A.; Krofcheck, D.; Gregory, M., *Application of  $\gamma$ -ray spectrometry to the study of grain size distribution of beach and river sands*. Marine Geology, 179, p.203-211, 2001.
- [CANBERRA, 2003] Canberra, *Germanium Detectors, User's Manual*. USA: Canberra Industries Inc., 2003.
- [CARVALHO, 2005] Carvalho, C., *Acúmulo e distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{40}\text{K}$  em plantas tropicais*. 143p., Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.
- [CECCOPIERI, 2001] Ceccopieri, W. B. *Estudos integrados do fundo marinho da Baía da Ilha Grande, RJ*. 112p., Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2001.
- [CEMBER, 1996] Cember, H., *Introduction to Health Physics*. 3rd Edition. USA: McGraw-Hill, 1996. 733p.
- [CHIOZZI *et al.*, 2000] Chiozzi, P.; De Felice, P.; Fazio, A.; Pasquale, V.; Verdoya, M., *Laboratory application of NaI(Tl)  $\gamma$ -ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics*. Applied Radiation & Isotopes, 53(1-2), p.127-132, 2000.
- [COBBOLD *et al.*, 2001] Cobbold, P. R.; Meisling, K. E.; Mount, V. S., *Reactivation of an Obliquely Rifted Margin, Campos and Santos Basins, Southeastern Brazil*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 85(11), p.1925-1944, 2001.

- [COELHO *et al.*, 2005] Coelho, F. S.; Couceiro, P. R.; Lopes, A. L.; Fabris, J. D., *Óxidos de Ferro e Monazita de Areias de Praia do Espírito Santo*. Química Nova, 28(2), p.233-237, 2005.
- [da SILVA, 1979] da Silva, M. A. M., *Provenance of heavy minerals in beach sands, southeastern Brasil: from Rio Grande to Chuí (Rio Grande do Sul State)*. Sedimentary Geology, 24, p.133-148, 1979.
- [de MEIJER, 1998] de Meijer, R. J., *Heavy minerals: from Edelstein to Einstein*. Journal of Geochemical Exploration, 62, p.81-103, 1998.
- [de MEIJER *et al.*, 2001] de Meijer, R. J.; James, I. R.; Jennings, P. J.; Koeyers, J. E., *Cluster analysis of radionuclide concentrations in beach sand*. Applied Radiation and Isotopes, 54, p.535-542, 2001.
- [DIAS *et al.*, 1990] Dias, G. M. T.; Pereira, M. A.; Dias, I. M., *Mapa geológico-geomorfológico da Baía da Ilha Grande e zona costeira adjacente, escala 1:80.000. Texto explicativo*. Laboratório de Geologia Marinha. Publicação Interna, LAGEMAR/UFF.
- [DURRANCE, 1986] Durrance, E. M., *Radiactivity in Geology: principles and applications*. England: John Wiley & Sons, 1986.
- [DOVETON & PRENSKY, 1992] Doveton, J. H. & Prenskey, S. E., *Geological applications of wireline logs: a synopsis of developments and trends*. Log Anal., 33(3), p. 286-303, 1992.
- [EIRADO *et al.*, 2006] Eirado, L. G.; Heilbron, M.; Almeida, J., *Os Terrenos Tectônicos da Faixa da Ribeira na Serra da Bocaina e na Baía da Ilha Grande, Sudeste do Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, 36(3), p.426-436, 2006.
- [FRAGOSO, 1999] Fragoso, M. R. *Estudo numérico da circulação marinha na região das baías de Sepetiba e Ilha Grande (RJ)*. 109p., Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- [GRASTY *et al.*, 1991] Grasty, R. L.; Mellander, H.; Parker, M., *Airborne gamma-ray spectrometer surveying*. IAEA Technical Reports Series no. 323, 1991.
- [HASL (1997)] Environmental Measurements Laboratory, *HASL 300 - Procedures Manual*, 28th Edition, U.S. Department of Energy, 1997.  
Disponível em: <http://www.eml.doe.gov/publications/procman/> Acesso em: 26/Fev/2009.
- [HEILBRON *et al.*, 1995] Heilbron, M.; Valeriano, C. M.; Valladares, C. S.; Machado, N., *A Orogênese Brasileira no Segmento Central da Faixa da Ribeira, Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, 25(4), p.249-266, 1995.
- [IAEA, 1987] International Atomic Energy Agency, *Preparation and certification of IAEA gamma spectrometry reference materials RGU-1, RGth-1 and RGK-1*. IAEA, Vienna, IAEA/RL/148, 1987.
- [IKEDA & STEVENSON, 1980] Ikeda, Y.; Stevenson, M., *Determination of the circulation and short period fluctuation in Ilha Grande Bay (RJ), Brazil*. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 29(1), p.89-98, 1980.
- [INL, 2005] Idaho National Laboratory, *Gamma Ray Spectrometry: Spectrum Catalogs*. USA, 2005.  
Disponível em: <http://www.inl.gov/gammaray/catalogs/catalogs.shtml>  
Acesso em: 15/Dez/2008.
- [INPE, 2008] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, *Catálogo de Imagens CBERS*. São Paulo, 2008.  
Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>  
Acesso em: 06/Fev/2009.

- [IVANOVICH & HARMON, 1992] Ivanovich, M.; Harmon, R. S., *Uranium-Series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine & Environmental Sciences*. 2nd Edition. Oxford: Clarendon Press, 1992. 910p.
- [KNOLL, 1979] Knoll, G. F., *Radiation Detection and Measurement*. New York: John Wiley & Sons, 1979. 816p.
- [KOGAN, 1969] Kogan, R. M.; Nazarov, I. M.; Fridman, Sh. D., *Gamma Spectrometry of Natural Environmental Formations*. Moscow: Moskva Atomizdat, 1969. 337p.
- [LEDERER & SHIRLEY, 1978] Lederer, C. M.; Shirley, V. S. (Editors), *Table of Isotopes*. 7th Edition. New York: John Wiley & Sons, 1978. 1523p.
- [LIDE, 1994] Lide, D. R. (Editor), *Handbook of Chemistry and Physics*. 75th Edition. USA: CRC Press Inc., 1994. 1600p.
- [MACFARLANE *et al.*, 1989] Macfarlane, P. A.; Whittemore, D. O.; Townsend, M. A.; Doveton, J. H.; Hamilton, V. J.; Coyle III, W. G.; Wade, A.; Macpherson, G. L.; Black, R. D., *The Dakota Aquifer Program Annual Report, FY89*. Appendix B. Kansas Geological Survey, 1989.  
Disponível em: <<http://www.kgs.ku.edu/Dakota/vol3/fy89/contents.htm>>  
Acesso em: 10/Fev/2009.
- [MACHADO, 2003] Machado, F. B., *Banco de Dados do Museu "Heinz Ebert"*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, 2003.  
Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/index.html>>  
Acesso em: 14/Fev/2009.
- [MAHIQUES, 1987] Mariques, M. M., *Considerações sobre os sedimentos de superfície de fundo da Baía da Ilha Grande, estado do Rio de Janeiro*. 139p., Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 1987.
- [MAHIQUES & FURTADO, 1989] Mariques, M. M.; Furtado, V. V., *Utilização de análise dos componentes principais na caracterização dos sedimentos de superfície do fundo da Baía da Ilha Grande (RJ)*. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 37(1), p.1-19, 1989.
- [MARTIN *et al.*, 1980] Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J. M.; Bittencourt, A. C. S. P.; Vilas-Boas, G. S., *Le Quaternaire marin brésilien (Littoral pauliste, sud fluminense et bahianais)*. Cah. ORSTOM, Sér. Géol., 11(1), p.96-125, 1980.
- [MEDEIROS, 2006] Medeiros, M. F., *Estudo da sequência sedimentar holocênica das baías da Ribeira e Paraty (Baía da Ilha Grande - RJ) através de métodos sísmicos e análise de testemunhos*. 126p., Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.
- [MORTON & HALLSWORTH, 1999] Morton, A. C.; Hallsworth, C. R., *Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones*. *Sedimentary Geology*, 124, p.3-29, 1999.
- [NASCIMENTO & LOUREIRO, 2004] Nascimento, M.; Loureiro, F., *Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas*. 66p., Série Estudos e Documentos, 61 - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.
- [ORTEC, 1984] EG&G ORTEC. *Experiments in Nuclear Science AN34, Laboratory Manual*. Tennessee: EG&G ORTEC, 1984.
- [ORTEC, 2005] ORTEC, *digiBASE, User's Manual*. USA: Advanced Measurement Technology Inc., 2005.
- [REGAN, 1997] Regan, P.H., *2nd Year Radiation Detection & Measurement*. Lecture Notes, 1997.
- [RIBAS, 2002] Ribas, R.V., *Instrumentação Nuclear*. São Paulo: IF-USP, 2002.

- [RYBACK, 1971] Ryback, L., *Radiometric techniques*. In: Wainerdi, R. E.; Uken, E. A., *Modern Methods of Geochemical Analysis*. New York: Plenum Press, p.271-318, 1971.
- [SCHLUMBERGER, 2005] Schlumberger, *Log Interpretation Charts 2005*.  
Disponível em: <[http://http://www.slb.com/content/services/resources/books/log\\_charts/lithology.asp?>](http://http://www.slb.com/content/services/resources/books/log_charts/lithology.asp?>)  
Acesso em: 10/Fev/2009.
- [SIGNORINI, 1980a] Signorini, S.R., *A study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba. Part I, A study of the circulation based on experimental field data*. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 29(1), p.41-55, 1980.
- [SIGNORINI, 1980b] Signorini, S.R., *A study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba. Part II, An assessment to the tidally and wind-driven circulation using finite element numerical model*. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo, 29(1), p.57-68, 1980.
- [SUGUIO, 1973] Suguio, K., *Introdução à Sedimentologia*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1973.
- [TAUHATA et al., 2003] Tauhata, L.; Salati, I.; Di Prinzio, R.; Di Prinzio, A., *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. 5a Ed., Rio de Janeiro, IRD/CNEN, 2003.
- [van WIJNGAARDEN et al., 2002] , van Wijngaarden, M.; Venema, L. B.; de Meijer, R. J.; Zwolsman, J. J. G; Van Os, B.; Gieske, J. M. J., *Radiometric sand–mud characterisation in the Rhine–Meuse estuary Part A. Fingerprinting*. *Geomorphology*, 43, p.87-101, 2002.
- [WINGE, 2001] Winge, M. (Editor), *Glossário Geológico Ilustrado*. Instituto de Geociências - Universidade de Brasília, 2001.  
Disponível em: <<http://www.unb.br/ig/glossario/>>  
Acesso em: 02/Fev/2009.

"Há dois tipos de conhecimento:  
ou sabemos nós mesmos  
ou sabemos onde obter informação."  
Samuel Johnson, XVIII

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)