



**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**Departamento de Ciências da Terra**

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA NA PASSAGEM  
AALENIANO-BAJOCIANO NOS PERFIS DA  
MURTINHEIRA E DA SERRA DA BOA VIAGEM II**  
**BACIA LUSITÂNICA, PORTUGAL**

Marisa Sofia Alves dos Santos

**MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS, ÁREA DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOLOGIA DO PETRÓLEO**

Fevereiro, 2016



**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**Departamento de Ciências da Terra**

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA NA PASSAGEM  
AALENIANO-BAJOCIANO NOS PERFIS DA  
MURTINHEIRA E DA SERRA DA BOA VIAGEM II  
BACIA LUSITÂNICA, PORTUGAL**

**Marisa Sofia Alves dos Santos**

**MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS, ÁREA DE ESPECIALIZAÇÃO EM  
GEOLOGIA DO PETRÓLEO**

**Orientadores Científicos**

Prof. Dr. Rui Paulo Bento Pena dos Reis, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Universidade de Coimbra

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Helena Paiva Henriques, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Universidade de Coimbra

**Fevereiro, 2016**

*“A persistência é o caminho do êxito”*

**Charles Chaplin**

*Aos Meus Pais*

## Agradecimentos

*À minha orientadora, Professora Doutora Maria Helena Henriques, pela proposta do tema, por toda a orientação e disponibilidade, e por tudo aquilo que me ensinou. Todo o seu entusiasmo neste tema foi, sem dúvida, um incentivo durante a elaboração deste trabalho. Um enorme obrigado por toda a paciência e por toda a ajuda, mesmo nas fases menos boas, sempre acreditou em mim e nunca deixou de me apoiar.*

*Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Pena dos Reis, pela orientação, por tudo o que me ensinou, por todos os esclarecimentos e conselhos, por toda a paciência e por todas as críticas, sempre construtivas!*

*À Professora Doutora Maria Luísa Canales, pelas palavras ânimo e de incentivo, pelo seu entusiasmo neste tema, e por toda a ajuda que disponibilizou.*

*Agradeço ao DPEP/DGEG (Departamento para a Pesquisa e Exploração de Petróleo/Direção geral de Energia e Geologia), em particular, ao Doutor José Miguel Martins, a disponibilidade prestada na aquisição das diagrfias e relatórios de sondagens, para a realização de parte deste trabalho.*

*Ao laboratório de geotecnia e ao laboratório de sedimentologia do DCT-UC, onde desenvolvi parte deste trabalho.*

*Aos meus professores da licenciatura e mestrado, um obrigada por toda a ajuda e por tudo aquilo que me ensinaram e que me permitiu finalizar os dois ciclos de estudos.*

*Aos funcionários do DCT-UC, em especial ao Sr. Carlos Maia por toda a ajuda e, apesar dos vários contratemplos, ter realizado todas as análises de difração de raios x em tempo útil.*

*Aos meus pais, Rosa e Agostinho, é a eles que dedico este trabalho pois, estiveram sempre presentes, mesmo nas fases mais complicadas durante a elaboração deste trabalho, e sempre acreditaram em mim. Apesar das dificuldades económicas, sempre me ajudaram no que podiam, e permitiram que concluísse o curso superior e o mestrado que agora finalizo. Um obrigado por tudo! Ao meu irmão, Jorge, obrigada por toda a compreensão, apesar das nossas pequenas desavenças (típico de irmãos!) ajudou-me e acreditou sempre em mim.*

*À Helena Moura, amiga, afilhada, por vezes mãe! Obrigada por todo o apoio, pela preocupação, e pelos conselhos e palavras de incentivo.*

## Agradecimentos

*Aos que me ajudaram durante o mestrado e especialmente durante a elaboração da tese: Laura, Sílvia, Rui, Bruno, Gabriel, Jorge, Sérgio, Nei e Mafalda, um obrigado por todo o apoio e paciência.*

*Aos meus amigos geólogos, Beatriz, Janete, Filipa, João Tomás, David, Joana, Pedro, Joel, André, Marta, Carolina, Fábio, Fábio Marques, Sara, Marlisa, Mafalda e Hugo, obrigada por todos os momentos ao longo destes anos em Coimbra.*

*Às amigas de largos anos, Elsa e Eliana por toda a ajuda, preocupação e apoio e incentivo durante a elaboração deste trabalho. À Carita e à Melanie um obrigado por tudo.*

## Resumo

No presente trabalho apresentam-se resultados obtidos a partir da análise de dados de radiação gama recolhidos na passagem Aaleniano - Bajociano de dois perfis de referência localizados no setor norte da Bacia Lusitânica: Murtinheira e Serra da Boa Viagem II.

Para tal, procurou-se caracterizar as tendências de variação dos perfis de radiação gama total e dos perfis dos radioelementos potássio, urânio e tório, nas séries margo-calcárias dos dois perfis, bem como analisar as diferentes relações estabelecidas entre aqueles. Além disso, analisaram-se as associações de minerais de argila e procurou-se estabelecer relações com os dados de espectrometria de raios gama, de forma a inferir condições paleoclimáticas.

Os resultados obtidos permitem, com base nos parâmetros analisados, estabelecer uma organização sequencial para o registo sedimentar estudado, bem como fundamentar correlações entre os dois perfis e uma sondagem *offshore* da bacia, objeto de interesse em atividades correntes de exploração de hidrocarbonetos.

A biostratigrafia da passagem Aaleniano - Bajociano dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II é conhecida em detalhe com base nas associações de amonites, braquiópodes, foraminíferos bentónicos e nanoplâncton calcário, que permitiram a elaboração de escalas de tempo bem calibradas baseadas em diferentes grupos fósseis. Da análise dos dados de radiação gama recolhidos foi possível relacionar a espectrometria de radiação gama e a natureza do cortejo argiloso, com resultados obtidos a partir de análises paleoecológicas realizadas com diferentes grupos taxonómicos, e que permitiram identificar bioeventos de empobrecimento e renovação das faunas.

Assim, na passagem Aaleniano - Bajociano na Bacia Lusitânica, as variações de radiação gama, resultantes do maior ou menor aporte de sedimentos para a bacia, parecem ter influenciado a ocorrência de bioeventos, em particular daqueles que foram reconhecidos com base na composição das associações de foraminíferos bentónicos. Estas relações poderão eventualmente ser extrapoláveis para poços exploratórios da bacia, configurando uma ferramenta complementar de análise de bacias sedimentares com interesse para a indústria dos hidrocarbonetos.

**Palavras-chave:** radiação gama; cortejo argiloso; bioeventos; Aaleniano - Bajociano; Bacia Lusitânica.

## **Abstract**

This work presents results based on the analysis of gamma radiation data collected at the Aalenian - Bajocian boundary of two reference sections, located in the northern sector of the Lusitanian Basin: Murtinheira and Serra da Boa Viagem II.

Specifically, it aims at characterizing the variation trends of the total gamma ray log and of the spectral gamma-ray logs of potassium, uranium and thorium, in the marly-limestones sequences of the two sections, and at analyzing the different relationships among them. The clay minerals associations were also examined, and an attempt was made at relating them to gamma spectrometry data in order to infer paleoclimatic conditions.

Based on the parameters analyzed, the found results allow establishing a sequential organization of the sedimentary record and substantiating correlations between the two sections and offshore well data concerning the basin, a subject of interest for current hydrocarbon exploration.

The biostratigraphy of the Aalenian - Bajocian boundary of the Murtinheira and the Serra da Boa Viagem II sections is known in detail, drawing on ammonites assemblages, brachiopods, benthic foraminifera and calcareous nanoplankton, which made possible the development of well-calibrated time scales based on different fossil groups. The analysis of the gamma radiation allowed relating the spectral gamma ray logs and the nature of the clay mineralogy with results obtained from paleoecological analyzes of different taxonomic groups, supporting the identification of impoverishment and renewal faunal bioevents.

In the Aalenian - Bajocian boundary of the Lusitanian Basin, the greater or lesser sediment supply to the basin reflected in the variation of gamma radiation appears to have influenced the occurrence of bioevents, particularly those documented on the basis of the composition of benthic foraminifera assemblages. These relationships may possibly be extrapolated to exploratory wells in the basin, thus affording a complementary tool for the analysis of sedimentary basins of relevance to the petroleum industry.

**Keywords:** gamma radiation; clay mineralogy; bioevents; Aalenian - Bajocian; Lusitanian Basin.

## Índice

Agradecimentos .....	I
Resumo.....	III
Abstract.....	IV
Lista de figuras.....	VII
Lista de tabelas .....	X
Lista de anexos .....	XI
Capítulo 1 – Introdução .....	1
Capítulo 2 – Enquadramento teórico da investigação.....	3
2. Enquadramento teórico da investigação.....	4
2.1. Radiação natural.....	4
2.1.1. Radioatividade.....	4
2.1.2. Radiação Gama .....	5
2.1.3. Radionuclídeos naturais .....	5
2.2. Geoquímica dos radioelementos.....	7
2.2.1. Tório.....	7
2.2.2. Potássio .....	8
2.2.3. Urânio.....	8
2.3.1. Perfil de radiação gama total .....	9
2.4. Bioeventos .....	15
2.4.1. Significado e aplicações .....	15
2.4.2. Bioeventos e variações de radiação gama .....	16
Capítulo 3 – Localização geográfica e enquadramento geológico .....	18
3.1. Localização e evolução geodinâmica da Bacia Lusitânica .....	19
3.2. Localização geográfica e enquadramento geológico dos perfis estudados .....	23
3.2.1. Perfil da Murtinheira .....	24
3.2.2. Perfil da Serra da Boa Viagem II .....	25
3.3. Os bioeventos registados na passagem Aaleniano – Bajociano da Bacia Lusitânica.....	26
3.3.1. Amonites .....	26
3.3.2. Nanoplâncton calcário .....	28
3.3.4. Braquiópodes .....	28
3.3.4. Foraminíferos bentónicos .....	29
Capítulo 4 – Procedimentos técnicos e metodológicos.....	33
4.1. Trabalho de Campo .....	34
4.2. Trabalho Laboratorial.....	36
4.3. Furos de sondagem.....	37
4.4. Trabalho de Gabinete .....	37
Capítulo 5 – Apresentação e interpretação de dados .....	38



5.1. Variações de Radiação Gama no perfil da Murtinheira .....	39
5.2. Variações da Radiação Gama no perfil da Serra da Boa Viagem II .....	43
5.3. Dados analíticos do cortejo argiloso.....	47
Capítulo 6 – Discussão dos resultados obtidos .....	49
6.1. Perfil de radiação total .....	50
6.2 – Perfis de potássio, urânio e tório.....	50
6.3. Correlação entre os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II.....	51
6.5. Sequências deposicionais.....	53
6.6. Correlação com furo de sondagem .....	55
6.7. Evidências paleoambientais e paleoclimáticas.....	57
Capítulo 7 – Conclusões .....	65
Capítulo 8 – Referências bibliográficas .....	68
Anexos .....	77
Anexo I .....	78
Anexo II .....	79
Anexo III .....	80

**Lista de figuras**

Figura 2.1 - Esquema do decaimento radioativo das séries do urânio, tório e actínio. A azul estão representados os radionuclídeos mensuráveis pela técnica de espectrometria de raios gama. Os decaimentos da série do actínio estão representados até ao Ra-223, já que o restante da cadeia não é de interesse (retirado de Scheibel, 2006). .....6

Figura 2.2 - Espectro da probabilidade de emissão dos raios gama pelos três principais radionuclídeos naturalmente presentes na natureza (adaptado de Ellis e Singer, 2007) .....7

Figura 2.3 - Esquema representativo de um perfil de raios gama referente a diferentes tipos litológicos (retirado de Calhã *et al.*, 2010).....9

Figura 2.4 – Perfis de radiação gama total exibindo vários tipos de padrões (adaptado de Catuneanu, 2006)..... 10

Figura 2.5 – Várias tendências do perfil de GR permitem a interpretação de fácies e ambientes deposicionais (adaptado de Nichols, 2009)..... 11

Figura 3.1 – Localização geográfica e enquadramento tectónico da Bacia Lusitânica. a) Localização dos limites da Bacia Lusitânica e das principais falhas que condicionaram a sua evolução geodinâmica; B: Sub-bacia do Bombarral; T: Sub-bacia do Turcifal; A: Sub-bacia de Arruda. b) Localização das bacias sedimentares da Margem Ocidental Ibérica (modificado de Kullberg *et al.*, 2006). .....20

Figura 3.2 - Quadro litostratigráfico da Bacia Lusitânica, representando as principais unidades litostratigráficas do Mesozóico (modificado de Pena dos Reis *et al.*, 2011), e indicando a posição estratigráfica da Formação de Cabo Mondego (retângulo a vermelho) .....22

Figura 3.3 – Localização dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II (Setor Norte da Bacia Lusitânica (modificado de Figueiredo e Guterres, 2012) .....23

Figura 3.4 - Correlação entre as unidades litostratigráficas da Bacia Lusitânica (CM – Cabo Mondego; MCE – Maciço Calcário Estremenho) (retirado de Azerêdo *et al.*, 2003). .....24

Figura 3.5 – Bioeventos de amonites, foraminíferos bentónicos e nanofósseis calcários reconhecidos na passagem Aaleniano-Bajociano no perfil da Murtinheira (retirado de Henriques *et al.*, 2010) .....27

Figura 3.6 – Distribuição estratigráfica das espécies de braquiópodes na Bacia Lusitânica (modificado de Andrade, 2006) .....29

Figura 3.7 – Principais bioeventos de foraminíferos bentónicos registados no perfil da Serra da Boa Viagem II e no perfil da Murtinheira. B: Biozona Bradfordensis; G: Biozona Gigantea (adaptado de Silva <i>et al.</i> , 2015).....	31
Figura 4.1 – Medição realizada com o espectrómetro portátil <i>Gamma surveyor II</i> , orientado perpendicularmente em relação à superfície de estratificação da camada. ....	34
Figura 4.2 – Efeitos da superfície de amostragem e da geometria das camadas nas medições de espectrometria de radiação gama em afloramento. A área a picotado representa o volume de rocha amostrada. A) Menor volume de rochas medido em superfícies convexas origina leituras reduzidas; B) Um maior volume de rocha medido resulta em leituras amplificadas; C) Equipamento paralelo à estratificação origina leituras diluídas para camadas finas; D) Equipamento perpendicular à estratificação fornece leituras concentradas nas camadas finas; E) Esquema que representa a área aproximada de rocha amostrada pelo espectrómetro (adaptado de Parkinson, 1996; Svendsen e Hartley, 2001).....	35
Figura 4.3 – Difractograma de raios X do DCT-UC. ....	36
Figura 5.1 – Correlação entre a radiação gama total (nGy/h) e as concentrações de K (%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Murtinheira. $R^2$ é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=69).....	40
Figura 5.2 – Variações da radiação gama total, da CGR, da espectrometria dos elementos radioativos, e da relação Th/U e Th/K no perfil da Murtinheira. A linha a tracejado em cada uma das curvas radiométricas marca a média ( $\bar{x}$ ) total calculada para todo o perfil. ....	41
Figura 5.3 – Correlação entre as concentrações dos elementos radioativos de K (%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Murtinheira. $R^2$ é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=69).....	42
Figura 5.4 – Correlação entre a radiação gama total (nGy/h) e as concentrações de K(%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Serra da Boa Viagem II. $R^2$ é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=27). ....	44
Figura 5.5 – Variações da radiação gama total, da CGR, da espectrometria dos elementos radioativos, e da relação Th/U e Th/K no perfil da Serra da Boa Viagem. A linha a tracejado em cada uma das curvas radiométricas marca a média ( $\bar{x}$ ) total calculada para todo o perfil... .....	45
Figura 5.6 – Correlação entre as concentrações dos elementos radioativos de K(%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Serra da Boa Viagem II. $R^2$ é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=27).....	46

Figura 5.7 – Identificação dos minerais de argila no diagrama “normal” dos difratogramas de raios X de algumas amostras do perfil da Murtinheira. a) amostra M-304; b) amostra M-295; c) amostra M-338; d) amostra M352.....48

Figura 6.1 – Correlação entre os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II com base nas tendências da curva CGR (*Clay Gamma Ray*), definindo os intervalos de maior ou menor argilosidade.....52

Figura 6.2 – Sequências transgressivo-regressivas estabelecidas para alguns perfis da Bacia Ibérica. O retângulo a vermelho corresponde a ciclos de 3ª ordem estabelecidos nos perfis da Demanda, San Leonardo e Madero-Moncayo, que podem ser correlacionados com as sequências de “raseamento”/aprofundamento das fácies reconhecidas no presente trabalho entre as Biozonas Concavum e Discites (adaptado de Garcia-Frank, 2008). .....55

Figura 6.3 – Correlação entre os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II e a sondagem Sardinha 13 C-1.....57

Figura 6.4 – Análise paleoecológica das associações de foraminíferos bentónicos do perfil da Murtinheira e intervalos de variação da radiação gama (modificado de Canales e Henriques, 2015). Os índices utilizados na análise paleoecológica são: Índice  $\alpha$  de Fisher e Índice de Margalef, expressam a riqueza das espécies; Índice de Simpson, indica a probabilidade de, numa associação, dois indivíduos, pertencerem à mesma espécie; Índice de Berger – Parker, relaciona, dentro de uma associação, o número de indivíduos da espécie abundante com o número total de indivíduos; Índice de Shannon e Wiener, mede o grau de incerteza em prever a espécie de um exemplar escolhido aleatoriamente; o Índice de equitabilidade de Pielou, indica a dominância de espécies (Silva, 2013).....60

Figura 6.5 - Análise paleoecológica das associações de foraminíferos bentónicos do perfil da Serra da Boa Viagem II e intervalos de variação da radiação gama (modificado de Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014). Os índices utilizados na análise paleoecológica são: Índice  $\alpha$  de Fisher e Índice de Margalef, expressam a riqueza das espécies; Índice de Simpson, indica a probabilidade de, numa associação, dois indivíduos, pertencerem à mesma espécie; Índice de Berger – Parker, relaciona, dentro de uma associação, o número de indivíduos da espécie abundante com o número total de indivíduos; Índice de Shannon e Wiener, mede o grau de incerteza em prever a espécie de um exemplar escolhido aleatoriamente; o Índice de equitabilidade de Pielou, indica a dominância de espécies (Silva, 2013).....61

**Lista de tabelas**

Tabela 2.1 – Distribuição das concentrações de potássio (K), urânio (U) e tório (Th) em algumas rochas e minerais (adaptado de Fertl, 1979).....8

Tabela 2.2 – Alguns significados e aplicações geológicas das razões entre K, Th e U (adaptado de Fertl,1979) .....14

Tabela 5.1 – Média ( $\bar{x}$ ) das concentrações de K, U, Th e das taxas de Th/U, Th/K e U/K, e respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ) para os diferentes intervalos de variação da radiação gama no perfil da Murtinheira.....43

Tabela 5.2 – Média ( $\bar{x}$ ) das concentrações de K, U, Th e das taxas de Th/U, Th/K e U/K, e respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ) para os diferentes intervalos de variação da radiação gama no perfil da Serra da Boa Viagem II. ....46

Tabela 5.3 – Identificação das associações de minerais de argila em amostras do perfil da Murtinheira. ....47

**Lista de anexos**

Anexo I – Dados das medições da radiação gama em campo, e cálculo de alguns parâmetros radiométricos e estatísticos para o perfil da Murtinheira. ....79

Anexo II – Dados das medições da radiação gama em campo, e cálculo de alguns parâmetros radiométricos e estatísticos para o perfil da Serra da Boa Viagem II. ....80

Anexo III – Difractogramas de raios X das amostras do perfil da Murtinheira. A azul: diagrama normal; a verde: diagrama “glicerolado”; a vermelho: diagrama “aquecido”.....81 e 82

## ***Capítulo 1 – Introdução***

## 1. Introdução e objetivos

O presente trabalho foi realizado no âmbito da elaboração da dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Geociências na área de especialização em Geologia do Petróleo pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. O trabalho consiste no estudo das variações da espectrometria de radiação gama na passagem Aaleniano - Bajociano em dois perfis de referência situados no setor norte da Bacia Lusitânica.

Com a realização deste trabalho pretende-se desenvolver competências no âmbito da Geologia do Petróleo, nomeadamente nas áreas da estratigrafia e da sedimentologia, utilizando a técnica de espectrometria de raios gama, desde há várias décadas aplicada na indústria petrolífera, e recentemente, objeto de estudo em vários trabalhos académicos.

Este estudo pretende ampliar o conhecimento acerca do registo da passagem Aaleniano - Bajociano na Bacia Lusitânica utilizando a espectrometria de radiação gama e recorrendo aos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II, cuja biostratigrafia com base nas associações de amonites, foraminíferos bentónicos e nanoplâncton calcário, é conhecida em detalhe.

Para esse fim, foram definidos vários objetivos, entre o quais:

- Caracterizar as tendências de variação dos perfis de radiação gama total e dos perfis dos elementos radioativos potássio, urânio e tório, nas séries margo-calcárias dos dois perfis;
- Analisar as diferentes relações estabelecidas entre os radioelementos potássio, urânio e tório;
- Estabelecer uma organização sequencial com base nos parâmetros analisados;
- Fundamentar correlações entre os dois perfis e uma sondagem *offshore* com base nas variações dos radioelementos analisados;
- Caracterizar as associações de minerais de argila e estabelecer relações com os dados de espectrometria de raios gama, de forma a inferir condições paleoclimáticas;
- Relacionar a espectrometria de radiação gama e a natureza do cortejo argiloso, com resultados obtidos a partir de análises paleoecológicas realizadas com diferentes grupos taxonómicos, e que permitiram identificar bioeventos de empobrecimento e renovação das faunas;
- Inferir variações no aporte de sedimentos que terão influenciado os bioeventos e as variações de radiação gama na passagem Aaleniano - Bajociano na Bacia Lusitânica, eventualmente extrapoláveis para poços exploratórios da bacia.



## ***Capítulo 2 – Enquadramento teórico da investigação***

## 2. Enquadramento teórico da investigação

Neste capítulo apresenta-se uma síntese acerca da radioatividade natural presente nas rochas sedimentares (em 2.1), da geoquímica dos elementos radioativos (em 2.2) e das aplicações da radiação gama e da espectrometria dos radionuclídeos em séries sedimentares com interesse potencial para a exploração de hidrocarbonetos (em 2.3). Apresenta-se, igualmente, uma síntese acerca de bioeventos reconhecidos a partir da análise de associações registadas de foraminíferos bentónicos, nomeadamente o seu significado e as suas aplicações no quadro da interpretação de sondagens (em 2.4), cuja articulação com as variações de resultados obtidos a partir de espectrometria de raios gama se pretende aprofundar no presente estudo.

### 2.1. Radiação natural

A radiação de origem natural está continuamente presente no meio ambiente sob a forma de radiação cósmica e radiação emitida pelos materiais da crosta terrestre. A radiação gama é um dos tipos de radiação natural mais abundante no planeta.

#### 2.1.1. Radioatividade

Num átomo, o conjunto de nucleões com os seus eletrões associados é designado por nuclídeo. Um nuclídeo instável fica suscetível a reações nucleares e, por conseguinte, sofre decaimento radioativo, sendo designado por radionuclídeo. O núcleo atómico de um radionuclídeo pode emitir vários tipos de radiação ionizante: as partículas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ) e raios gama ( $\gamma$ ).

O decaimento radioativo consiste na mudança espontânea do núcleo de um átomo que resulta na emissão de partículas ou radiação eletromagnética, com libertação de energia. Este decaimento é impulsionado pelas variações na massa do átomo, sendo a massa do produto ou produtos menor que a do nuclídeo original (Gilmore, 2008). Este processo pode resultar num novo núcleo ou simplesmente na mudança de estado energético do núcleo inicial. Em cada série, o nuclídeo pai decai num nuclídeo filho que, por sua vez, também decai, e assim por diante, até se obter um produto final estável.

Os tipos de decaimento radioativo são principalmente o decaimento alfa e o beta. No decaimento alfa o núcleo liberta uma partícula alfa que consiste em dois prótons e dois neutrões, e uma quantidade fixa de energia (Gilmore, *op. cit.*).

O decaimento beta compreende dois tipos: o  $\beta^-$  e  $\beta^+$ . No decaimento  $\beta^-$  um neutrão é convertido num próton no interior do núcleo, sendo emitida uma partícula beta com carga negativa idêntica a um eletrão. No decaimento  $\beta^+$  um próton é convertido num neutrão no interior do núcleo e é emitido um positrão (antipartícula do eletrão) com carga positiva. Estes

decaimentos são, em geral, acompanhados de emissão de radiação gama (Gilmore, *op. cit.*).

### **2.1.2. Radiação Gama**

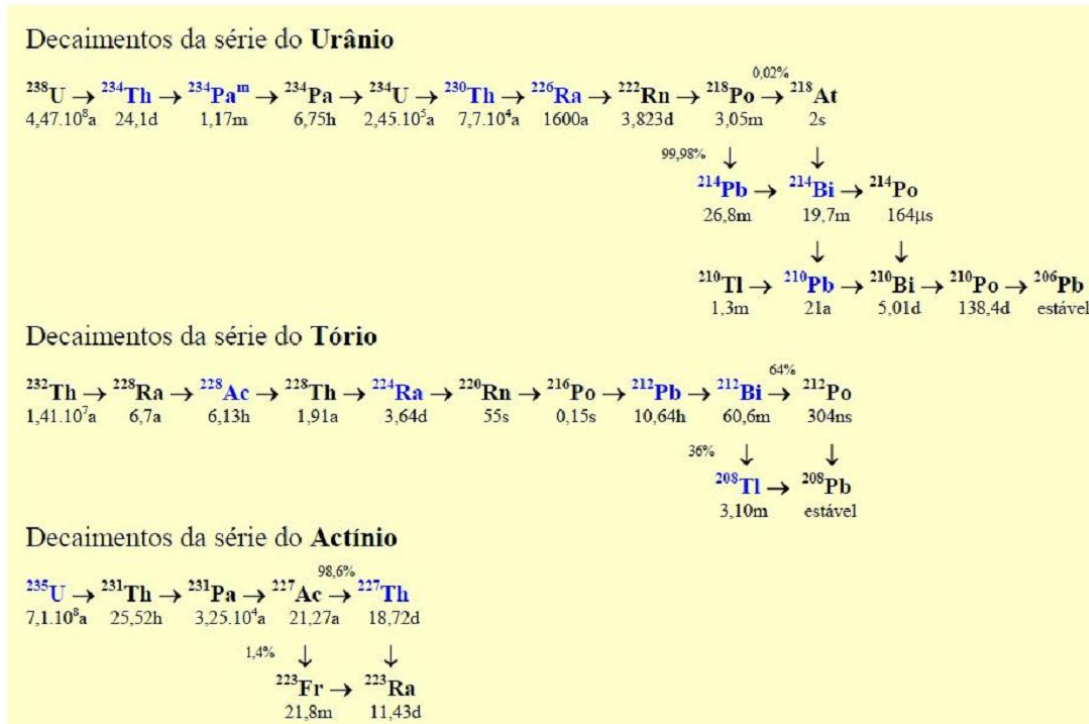
A radiação gama integra o espectro de radiação eletromagnética situando-se no extremo dos comprimentos de onda curtos, altas frequências e alta energia.

A emissão de radiação gama não é estritamente um modo de decaimento, uma vez que, na sua origem, não existe mudança no número ou no tipo de nucleões do núcleo; é sim um processo no qual o núcleo perde o excesso de energia de excitação, na passagem entre estados excitados. A emissão de raios gama é geralmente um subproduto do decaimento alfa ou beta, e pode continuar a ser emitida pelos núcleos filho resultantes do decaimento (Gilmore, *op. cit.*).

O processo mais significativo de atenuação da radiação gama com a matéria é o efeito de *Compton*, no qual os fótons de raios gama experienciam sucessivas colisões com os átomos do material da formação, sofrendo dispersão a cada evento, resultando na perda de energia. Assim, os raios gama naturais são gradualmente absorvidos pelos átomos da matéria, nomeadamente de uma formação geológica, à medida que passam através desta (Schlumberger, 1989). Ao contrário das partículas alfa e beta, que sofrem atenuações quase instantaneamente, os raios gama são bastante penetrantes na matéria e percorrem vários metros dentro de uma formação (Rider, 1999).

### **2.1.3. Radionuclídeos naturais**

Os nuclídeos medidos pela espectrometria de raios gama são os nuclídeos de origem cósmica:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  e o  $^{232}\text{Th}$ . Estes radionuclídeos, os radionuclídeos originados pelos seus decaimentos (exceto para o  $^{40}\text{K}$ ) e os radionuclídeos provenientes do cosmos contribuem para a radioatividade natural da crosta terrestre. O urânio (U) e o tório (Th) decaem principalmente através do decaimento alfa (Fig. 2.1) para um nuclídeo filho instável que, por sua vez, decai numa série de radionuclídeos, diferentes do nuclídeo pai, que terminam num dos isótopos estáveis de chumbo (Gilmore, 2008).



**Figura 2.1** - Esquema do decaimento radioativo das séries do urânio, tório e actínio. A azul estão representados os radionuclídeos mensuráveis pela técnica de espectrometria de raios gama. Os decaimentos da série do actínio estão representados até ao Ra-223, já que o restante da cadeia não é de interesse (retirado de Scheibel, 2006).

O urânio é composto por três isótopos de meia-vida longa: o  $^{238}\text{U}$  ( $4.4 \times 10^9$  anos), mais abundante na natureza, com uma percentagem de 99,25%, o  $^{235}\text{U}$  (série do actínio), com abundância natural de 0,72%, e o  $^{234}\text{U}$ , isótopo filho da série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . O tório tem tempo de meia-vida longa de  $1.4 \times 10^{10}$  anos e tem apenas um isótopo de longa vida, o  $^{232}\text{Th}$ , que possui uma abundância natural de 100% (Scheibel, 2006).

Os picos de emissão de energia do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  ocorrem numa zona de baixa energia e pouca intensidade (Fig. 2.2), e é difícil a sua resolução para efeitos de medição por espectrometria gama, utilizando-se então os radionuclídeos do final das séries de decaimento, como o bismuto ( $^{214}\text{Bi}$ ) e o tálio ( $^{208}\text{Tl}$ ), que exibem espectros de energia muito particulares e com boa intensidade. O nuclídeo bismuto, da série do U, emite um pico de radiação gama aos 1764 KeV (*kiloelectron volt*), e o nuclídeo tálio, da série do Th, emite um pico aos 2614 KeV (Fertl, 1979).

O potássio (K) contém três isótopos naturais, o  $^{39}\text{K}$ , o  $^{40}\text{K}$  e o  $^{41}\text{K}$ , com abundâncias de 93,08, 0,0119, e 6,9 por cento, respetivamente (Fertl, op. cit.).

Apenas o  $^{40}\text{K}$  é radioativo, sendo caracterizado por uma linha gama única, pois não decai em nenhuma série radioativa, tendo um tempo de meia vida de  $1,3 \times 10^9$  anos. O  $^{40}\text{K}$  emite um único pico de radiação gama de 1460 KeV, que é diretamente mensurável pela espectrometria gama (Fertl, 1979).

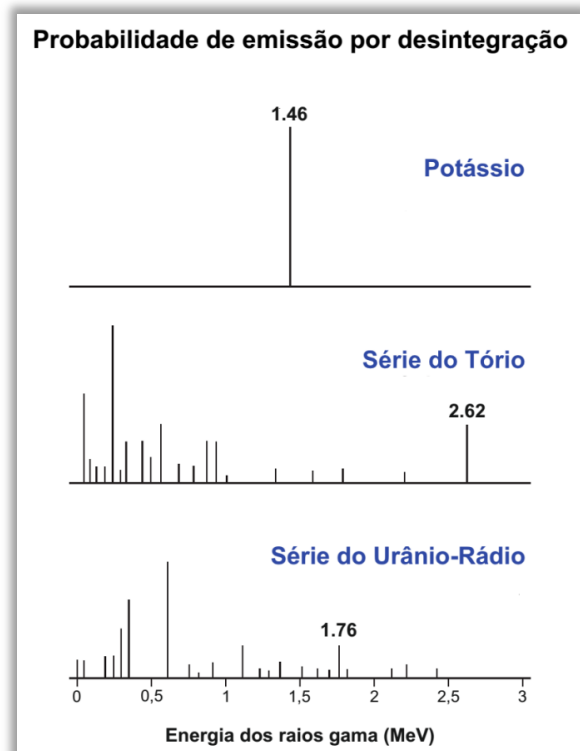
## 2.2. Geoquímica dos radioelementos

As rochas que integram a litosfera contêm alguns elementos radioativos cuja radiação pode ser utilizada como ferramenta de análise do registo geológico, nomeadamente no registo sedimentar, e em particular no quadro das atividades de exploração de hidrocarbonetos. De entre aqueles destacam-se o tório, o potássio e o urânio, cujas propriedades geoquímicas se descrevem de seguida.

### 2.2.1. Tório

O tório é um elemento traço comum na maioria dos ambientes geológicos, aparecendo normalmente no seu estado de oxidação principal, o  $\text{Th}^{4+}$  (Boile, 1982). A abundância média deste radioelemento na crosta terrestre é cerca de 12 ppm (Schlumberger, 1989). O tório é quase insolúvel em águas naturais e ocorre nas rochas como um componente estrutural de minerais pesados, como as biotites, zircões e monazites, ou adsorvido nas superfícies dos minerais de argila, particularmente aqueles formados sobre condições de forte meteorização, como a caulinite e a esmectite (Hesselbo, 1996). Está geralmente concentrado em depósitos residuais, como as argilas, pois a sua percentagem aumenta através do tempo se a meteorização química for dominante (Ruffell e Worden, 2000; Schnyder *et al.*, 2006), e permanece pouco tempo nas águas dos oceanos.

As suas concentrações tendem a ser elevadas em *shales* e rochas argilosas (Tabela 2.1); nas rochas areníticas o tório aumenta com o aumento dos minerais pesados (Boile, 1982).



**Figura 2.2** - Espectro da probabilidade de emissão dos raios gama pelos três principais radionuclídeos naturalmente presentes na natureza (adaptado de Ellis e Singer, 2007).

### 2.2.2. Potássio

O potássio é o principal radioelemento constituinte das rochas e, conseqüentemente, dos solos, sendo por isso a maior fonte de radioatividade natural (Parkinson, 1996); a sua concentração na crosta terrestre é de cerca de 2,6% (Schlumberger, 1989). Este elemento tem grande mobilidade e é relativamente solúvel em solução aquosa e sob condições de meteorização química (Ruffell e Worden 2000; Schnyder *et al.*, 2006).

Os minerais mais comuns em rochas sedimentares contendo potássio são feldspato, mica, argilas (ilite) (Tabela 2.1), glauconite e sais de cloreto (evaporitos) (Ruffell e Worden, 2000). Nos minerais detríticos, por exemplo nas ilites, o potássio ocorre principalmente dentro da sua estrutura (Hesselbo, 1996). A principal rocha fonte de potássio é o granito.

**Tabela 2.1** – Distribuição das concentrações de potássio (K), urânio (U) e tório (Th) em algumas rochas e minerais (adaptado de Fertl, 1979).

Tipo de rocha ou mineral	K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	Variação	Média	Variação	Média	Variação	Média
<b>Carbonato</b>	0,0 – 2,0	0,3	0,1 – 9,0	2,2	0,1 – 7,0	1,7
Calcite, chalk, calcários, dolomites (puros)		<0,1		<1,0		<0,5
<b>Shale</b>	1,6 – 4,2	2,7	1,5 – 5,5	3,7	8 – 18	12
<b>Arenito</b>	0,7 – 3,8	1,1	0,2 – 0,6	0,5	0,7 – 2,0	1,7
<b>Caulinite</b>		0,42	1,5 – 3		6 – 19	
<b>Ilite</b>		4,5		1,5	----	
<b>Montmorilonite</b>		0,16	2 – 5		14 – 24	
<b>Biotite</b>	6,7 – 8,3			----		< 0,01
<b>Moscovite</b>	7,9 – 9,8			----		< 0,01

### 2.2.3. Urânio

A abundância média de urânio na crosta terrestre é de cerca de 3ppm (Schlumberger, 1989) e encontra-se presente na natureza em dois estados de oxidação: o tetravalente ( $U^{4+}$ ) e o hexavalente ( $U^{6+}$ ). O  $U^{6+}$  representa o estado de oxidação do urânio mais estável, que é formado em condições oxidantes do solo ou rocha, conduzindo à formação de complexos solúveis de iões. Em ambientes redutores, o U assume o estado  $U^{4+}$  tornando-se insolúvel (Boile, 1982; Bond e Zaton, 2003). É um elemento com grande mobilidade e, em condições de meteorização química, dissolve-se facilmente (Schnyder *et al.*, 2006). Possui maior mobilidade em solos de climas quentes semi-áridos do que em solos de climas temperados ou tropicais.

Na natureza o ião uranilo ( $UO_2^{2+}$ ) é geralmente reduzido para o seu estado tetravalente e precipita como  $UO_2$  (presente na composição dos minerais primários de urânio como a uraninite), ou precipita no seu estado hexavalente, integrando diversos

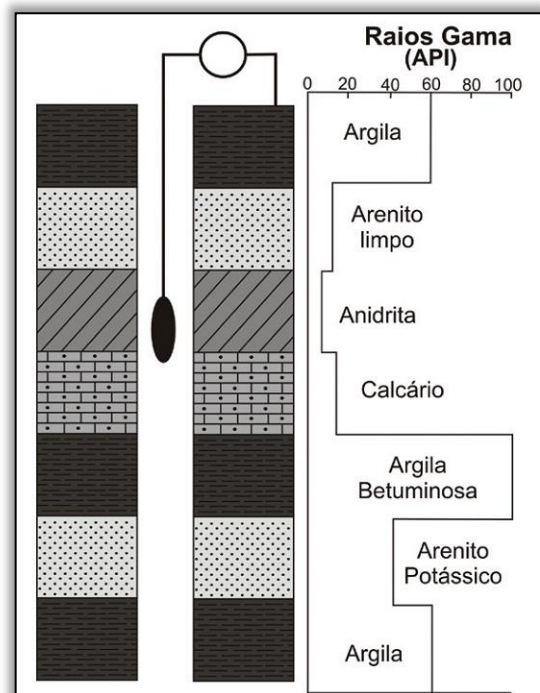
minerais secundários como hidróxidos, silicatos, carbonatos, fosfatos, sulfatos (Boile, 1982).

Num ambiente com condições redutoras, e na presença de matéria orgânica, sulfureto de hidrogénio e dióxido de enxofre, os iões de urânio disponíveis, transportados aquando da migração de águas de subsolo, vão precipitar como  $UO_2$  (Fertl, 1979). Em ambientes oxidantes e ligeiramente alcalinos, o ião urânio é solúvel nas águas que contêm carbonato, bicarbonato e iões hidróxido (Fertl, *op. cit.*).

Assim, os iões  $U^{4+}$  e o  $UO_2^{2+}$  são fortemente adsorvidos por um grande número de substâncias de natureza orgânica e inorgânica. O U pode ocorrer associado à fração detrítica argilosa mas, além disso, é normalmente dissolvido na água do mar e dos rios (Hesselbo, 1996). As rochas com concentrações mais elevadas de U são os granitos e os *black shales* (Boile, 1982).

### 2.3. Aplicações da radiação gama e da espectrometria dos radioelementos nas séries sedimentares

No final de 1930 a indústria petrolífera foi um dos setores pioneiros na introdução dos perfis de radiação gama total (*Gamma Ray - GR*), nos quais se representavam medições da radioatividade total das formações geológicas que eram objeto de exploração, realizadas apenas com um simples detetor de raios gama. Na década de 50 iniciaram-se vários estudos em poços de sondagem com técnicas de espectrometria de raios gama, que permitiram detetar os radionuclídeos presentes nas formações geológicas e quantificar as suas concentrações (Fertl, 1979).



**Figura 2.3** - Esquema representativo de um perfil de raios gama referente a diferentes tipos litológicos (retirado de Calhã *et al.*, 2010).

#### 2.3.1. Perfil de radiação gama total

As diagrfias de radiação gama total são usadas tradicionalmente na correlação de sondagens, na identificação de litologias (Fig. 2.3) e no cálculo de estimativas do volume de *shale* presente nas formações geológicas, podendo constituir uma ferramenta auxiliar de

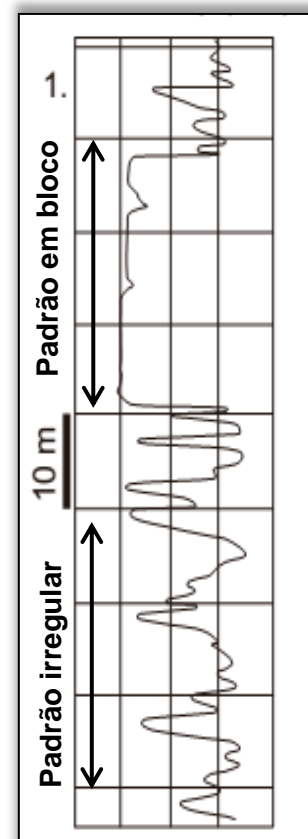
grande interesse na interpretação da maioria das restantes diagrfias, ao permitir um controlo contínuo de profundidade (Ellis e Singer, 2007).

Estes perfis apresentam o grau de radioatividade dos estratos, o que é geralmente proporcional à quantidade argilosa e/ou à quantidade de matéria orgânica presente na rocha. A grande variedade de sistemas deposicionais e o grau de energia a eles associado refletem-se numa ampla gama de valores de radiação gama emitida pelas rochas.

Perfis com boa resposta de GR (valores radiométricos elevados) traduzem condições de deposição em ambientes subaquáticos (marinhos ou lacustres), de baixa energia, onde predomina a acumulação de sedimentos margosos com forte componente argilosa, sujeito a períodos restritos de circulação de águas de fundo e/ou reduzido aporte sedimentar, o que favorece a formação de secções condensadas, por vezes associadas a estágios transgressivos e superfícies de máxima inundação (assim como finais de sequência). Séries essencialmente carbonatadas depositadas em ambientes de elevada energia apresentam baixos teores de radiação gama (Catuneanu, 2006). Nestas condições, a identificação de fácies torna-se difícil devido à ausência de alternâncias, entre as litologias.

Catuneanu (*op. cit.*) considera que a interpretação de sistemas deposicionais nas diagrfias de radiação gama pode conduzir a grandes equívocos, podendo ser apenas indicadoras das alterações energéticas, uma vez que diferentes ambientes podem produzir padrões similares.

As tendências nas curvas de radiação gama definem vários padrões (Figs. 2.4 e 2.5), entre os quais se distinguem: padrão em bloco, irregular, progradação (*shallowing-upward*) e retrogradação (*deepening-upward*). Padrões em bloco correspondem a níveis de alta energia e taxas de sedimentação constantes e podem representar desde ambientes fluviais, estuarinos e de praia, a marinho raso. Os padrões irregulares representam alternâncias nas condições de energia do meio, que conduzem à deposição de alternâncias de sedimentos grosseiros e finos. São indicadores de ambientes fluviais, sistemas costeiro-marinho, plataforma interna (sendo estes dois últimos afetados



**Figura 2.4** – Perfil de radiação gama total exibindo dois tipos de padrões (adaptado de Catuneanu, 2006).



por inundações periódicas e/ou tempestíticas) e marinho profundo, onde ocorrem deslizamentos gravíticos e correntes turbidíticas.

Os padrões de progradação refletem um decréscimo na amplitude da curva de GR para o topo de uma sequência sedimentar e, conseqüentemente, um aumento da granulometria, com aproximação gradual de níveis mais energéticos, podendo ser reconhecido nas séries progradantes das linhas costeiras clásticas, nas sucessões carbonatadas progressivamente menos profundas e nos lóbulos de leques submarinos. Os padrões de retrogradação podem ser reconhecidos com o aumento da amplitude da curva de GR para o topo, sugerindo uma diminuição na granulometria e conseqüente aumento da argilosidade, podendo ser um indicador de um ambiente com tendência para diminuição energética, tal como uma plataforma carbonatada transgressiva, um enchimento de canal, ambiente fluvial de maré e de leques submarinos (Rider, 1999; Catuneanu, 2006).

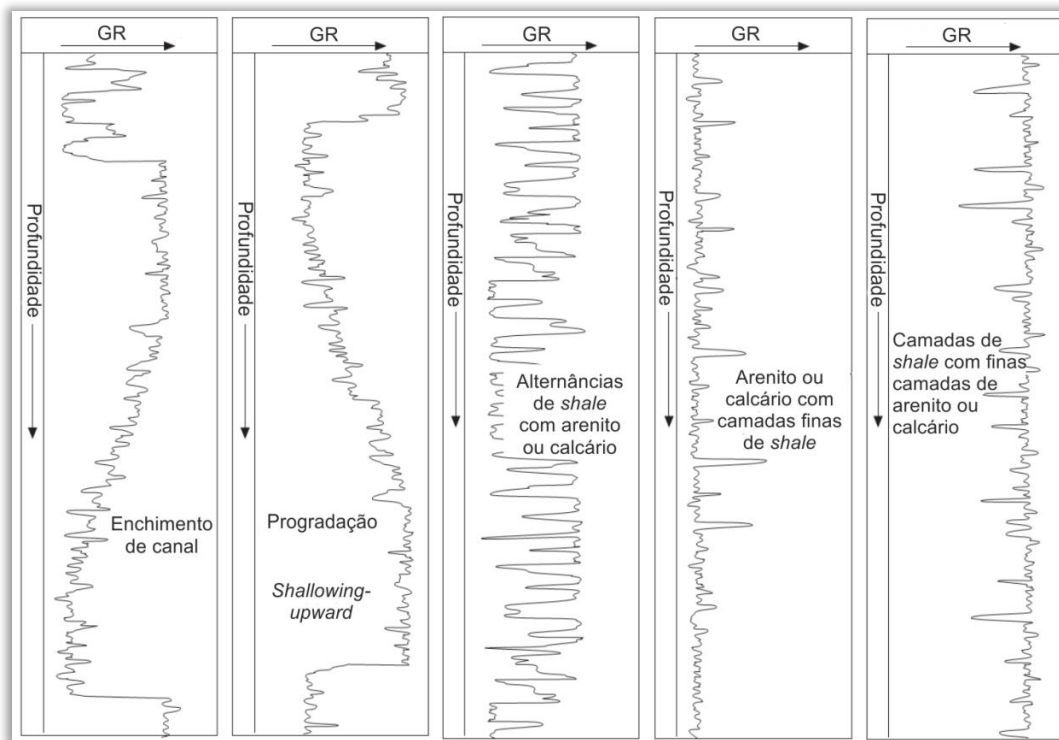


Figura 2.5 – Várias tendências do perfil de GR permitem a interpretação de fácies e ambientes deposicionais (adaptado de Nichols, 2009).

### 2.3.2. Perfis de espectrometria de raios gama

Os espectrómetros de raios gama quantificam as concentrações individuais dos três elementos radioativos que constituem a radiação gama total: K, Th e U. Dentro de cada tipo de rocha os valores destes elementos são diferentes dos valores médios da crosta terrestre e, por vezes, dentro da mesma litologia há divergência nesses teores dependendo das condições de formação da rocha.

Através do sinal de radiação total destes três radioelementos é comum a elaboração do perfil SGR (*Standard Gamma Ray*) em unidades API conforme os padrões de calibração estabelecidos pelo *American Petroleum Institute* (API), numa escala que varia entre 0 e 200 API, utilizando os seguintes múltiplos: 1% K = 16 unidades API, 1ppm U = 8 unidades API e 1ppm Th = 4 unidades API (Rider, 1999).

A espectrometria de raios gama permite a identificação de vários tipos de argila, classificando-as em termos da contribuição relativa de cada um dos três radioelementos. Esta técnica possibilita a interpretação de anomalias radioativas registadas num perfil, uma vez que através da separação das três curvas dos radioelementos se pode inferir qual o elemento que contribui com maior sinal numa dada zona do perfil (Ellis e Singer, 2007).

A aplicação deste método em afloramento é cada vez mais comum em trabalhos científicos e de grande interesse para a indústria petrolífera, principalmente para o estabelecimento de correlações entre afloramentos e perfis de sondagem (Slatt *et al.*, 1992) e na interpretação de ambientes deposicionais. Em afloramento ou poço esta é uma técnica económica e rápida de implementar, em comparação com as análises laboratoriais.

Outras aplicações comuns desta técnica incluem a caracterização litostratigráfica e o reconhecimento de tipos de rochas de diferentes fácies (Fertl, 1979), a identificação de fraturas e a análise de permeabilidade, a caracterização e determinação da quantidade de *shale* de reservatórios (Svendsen e Hartley, 2001), o estudo de séries sedimentares ricas em matéria orgânica, a caracterização de rochas potencialmente geradoras e sua correlação com dados geoquímicos (Myers e Wignall, 1987; Lüning e Kolonic, 2003; Schmoker, 1981), a estratigrafia de sequências (Parkinson, 1996), o estabelecimento de correlações com os minerais de argilas e a elaboração de reconstruções paleoclimáticas (Ruffell e Worden, 2000).

Os dados de espectrometria de radiação gama do K e do Th são interpretados como indicadores do conteúdo argiloso (*shale content*) em carbonatos e *shales*. Assim, é comum a construção da CGR (Curva de Radiação Gama Computadorizada, usualmente designada de “*Clay*” *Gamma Ray*) que representa apenas as contribuições do potássio e tório em unidades API. A curva de CGR é interpretada como um indicador do volume de argila, ao contrário da curva SGR que inclui o urânio, e que, por vezes, suscita interpretações erradas a respeito do conteúdo argiloso (Rider, 1999).

A utilização dos perfis de radiação gama de cada um dos radioelementos em séries carbonatadas permite a identificação dos tipos de calcários, prevenindo interpretações erradas quando utiliza apenas o perfil de GR total. Os carbonatos puros não apresentam radioatividade, contudo, com a presença de matéria orgânica apresentam radioatividade que

se verifica no aumento das concentrações do perfil de urânio. Por outro lado, os carbonatos argilosos exibem um aumento das concentrações nos perfis de potássio e de tório.

A relação entre os elementos Th, K e U (Tabela 2.2) pode fornecer informações relevantes acerca dos minerais de argila presentes numa formação, bem como das condições paleoclimáticas que condicionaram a sua deposição. A caulinite, formada em solos de regiões quentes e húmidas, apresenta normalmente boa correspondência com valores elevados da relação Th/K ou Th/U, em que o K e o U foram lixiviados das argilas e feldspatos. A illite está associada a climas áridos e exibe boa correlação com valores baixos da relação Th/K e Th/U (Ruffell e Worden, 2000).

Os valores de Th/K e Th/U aumentam nos sedimentos quando ocorrem mudanças no nível do mar, que influenciam o conteúdo em minerais de argila (mudanças nas condições oxidação-redução) ou na diagénese tardia (movimentação de fluídos/ mineralização) (Ghasemi-Nejad *et al.*, 2014).

Em séries essencialmente carbonatadas, o K e o Th apresentam valores muito variáveis como reflexo da diluição do material fino terrígeno (principalmente minerais de argila) nos carbonados, devido ao fato de haver variação na produção de carbonatos e/ou no aporte de material siliciclástico para a bacia (Koptíková *et al.*, 2010). Assim, os valores de K e Th aumentam em fácies cada vez mais profundas devido ao decréscimo da quantidade de carbonato em relação ao das argilas.

Em ambientes continentais e oxidantes, favoráveis à formação da espécie móvel  $U^{6+}$ , a razão Th/U assume valores elevados ( $Th/U > 7$ ), por outro lado, em sedimentos marinhos redutores, depositados em ambiente anóxico, esta razão assume valores inferiores ( $Th/U < 2$ ) (Fertl, 1979).

Nos sedimentos marinhos o K e o Th correlacionam-se, uma vez que os dois estão presentes maioritariamente na fração detrítica argilosa.

O U também ocorre na fração detrítica mas, ao contrário do Th, é transportado parcialmente em solução como complexos carbonatados de urânio e, sob condições redutoras ( $U^{4+}$ ), precipita como urânio autigénico (U autigénico) na interface sedimento-água e na presença de um adsorvente, que normalmente é matéria orgânica ou fosfato. Sedimentos enriquecidos em U autigénico foram tendencialmente depositados em condições anóxicas que permitiram a fixação de U e grande acumulação de matéria orgânica (Myers e Wignall, 1987).

**Tabela 2.2** – Alguns significados e aplicações geológicas das razões entre K, Th e U (adaptado de Fertl,1979).

Razão	Aplicações
<b>Tório/Urânio (Th/U)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação do ambiente de deposição Th/U&gt;7: ambiente continental, oxidante; Th/U&lt;7: depósitos marinhos; Th/U&lt;2: ambiente redutor, black shales;</li> <li>• Distâncias a antigas linhas de costa ou localização de rápida elevação durante o tempo de deposição dos sedimentos;</li> <li>• Correlações estratigráficas, transgressão vs. regressão;</li> <li>• Principais inconformidades geológicas;</li> <li>• Estimativas do potencial gerador em sedimentos argilosos (<i>shales</i>).</li> </ul>
<b>Tório/Potássio (Th/K)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação de tipos de rochas de diferente fácies;</li> <li>• Interpretações paleoclimáticas;</li> <li>• Reconhecimento de ambientes deposicionais e distância a antigas linhas de costa;</li> <li>• Mudança diagenética de sedimentos argilosos;</li> <li>• Identificação de tipos de argila: Th/K aumenta de glauconite &gt; moscovite &gt; illite &gt; argilas interestratificadas &gt; caulinite &gt; clorite &gt; bauxite.</li> </ul>
<b>Urânio/Potássio (U/K)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial de rocha geradora em sedimentos argilosos;</li> <li>• Correlações estratigráficas;</li> <li>• Inconformidades e mudanças diagenéticas em sedimentos argilosos, carbonatos;</li> <li>• Correlações com sistemas de fraturas naturais em formações subterrâneas, incluindo a correlação com aparecimento de hidrocarbonetos.</li> </ul>

Segundo Myers e Wignall (op. cit.), o cálculo do U autigénico pode ser efetuado se a componente detrítica do urânio (de origem continental) for conhecida. O valor mínimo da razão Th/U para o qual se assume que o U é inteiramente detrítico é 3; então, o U detrítico será obtido dividindo o valor do Th por 3. O cálculo do U autigénico é obtido através da seguinte fórmula:

$$U_{\text{autigénico}} = U_{\text{total}} - \text{Th}/3 \quad (1)$$

Estes dados são muito úteis na caracterização de rochas geradoras e são geralmente comparados com parâmetros geoquímicos como o carbono orgânico total (COT), pois existe uma relação linear entre o U autigénico e o COT (Lüning e Kolonic, 2003). Então, o U autigénico é muitas vezes utilizado para estimar valores quantitativos de matéria orgânica, evitando o recurso a onerosas análises laboratoriais. Contudo, deve ser feita uma calibração da relação U/COT determinando os limites estratigráficos e geográficos de cada local de onde esta é derivada (Lüning e Kolonic, 2003).

## 2.4. Bioeventos

As variações nos padrões de biodiversidade das associações faunísticas e florísticas podem ser o resultado de alterações nas condições ambientais a que os organismos estão sujeitos. Estas variações, quando reconhecidas no registo estratigráfico, são designadas por bioeventos, podendo ser de grande utilidade, por exemplo, na interpretação de sondagens (Henriques e Canales, 2013).

Os eventos mais isócronos a nível mundial são os bioeventos que representam extinções em massa, que coincidem com evidências de outro tipo de eventos, de natureza abiótica, como os eustáticos, cósmicos, paleoclimáticos ou paleoceanográficos (Molina, 2004).

### 2.4.1. Significado e aplicações

Os bioeventos correspondem a mudanças que se refletem amplamente nas condições ecológicas, biogeográficas e/ou evolutivas das comunidades biológicas durante um curto período de tempo, que pode ser de horas, dias ou alguns milhares de anos. Estas variações são isócronas e ocorrem à escala local, regional, ou global. Podem ser reconhecidos ao nível de uma espécie, de uma população ou de uma comunidade, sendo classificados como eventos de diversificação ou de redução (Sageman *et al.*, 1997).

Os bioeventos de diversificação resultam de processos de rápida colonização, aumento rápido da população e da biomassa, especiação e imigração, que podem originar horizontes ou finos intervalos estratigráficos com grande abundância faunística e/ou diversidade de espécies. Bioeventos de redução resultam de processos de mortalidade em massa da população, extinção ao nível da espécie, e declínio da comunidade/ecossistema, que podem resultar em intervalos empobrecidos ou desprovidos de fósseis.

O reconhecimento dos bioeventos numa sequência sedimentar é efetuado através das primeiras ocorrências (*First occurrence – FO*) e últimas ocorrências (*Last occurrence – LO*) de determinadas espécies, assim como mudanças evidentes nas abundâncias relativas de alguns táxones e alterações na diversidade das associações paleontológicas (Sageman *et al.*, op. cit.).

Inicialmente estes bioeventos têm aplicação local, devido à relação próxima entre espécies e condições paleoambientais, mas uma vez conhecido o seu valor biostratigráfico podem ser correlacionados com outros reconhecidos em outros perfis dentro da mesma bacia sedimentar, ou até noutras bacias, adquirindo assim importância à escala regional (Canales e Henriques, 2013).

Uma das principais aplicações dos bioeventos na indústria petrolífera é na correlação

entre poços de sondagens e/ou afloramentos. Bioeventos de empobrecimento das associações faunísticas ou mesmo extinção de espécies que revelem como causa a falta de oxigenação nas condições paleoambientais, podem ser utilizados pela indústria como possíveis intervalos biostratigráficos onde poderá ter ocorrido anoxia do meio ambiente, e portanto, condições favoráveis à preservação de matéria orgânica nos sedimentos. São muitas vezes aplicados na estratigrafia de sequências, como por exemplo no caso em que os bioeventos coincidem com intervalos de máxima inundação em sequências transgressivas (Pérez-López *et al.*, 2005). Podem ainda ser utilizados como indicadores de mudanças eustáticas, paleoclimáticas e paleogeográficas.

#### **2.4.2. Bioeventos e variações de radiação gama**

Wignall e Myers (1988) compararam dados paleoecológicos relativos a associações de bivalves com dados de espectrometria de radiação gama num perfil do Jurássico superior, em Dorset (sul de Inglaterra), tendo concluído que os valores moderados de urânio autigénico, que indicam um ambiente empobrecido em oxigénio (por vezes com condições anóxicas) se correlacionam com o decréscimo no número de espécies de bivalves e com o decréscimo nos valores dos índices de dominância-diversidade.

A extinção de bivalves da passagem Triásico – Jurássico da Áustria ocidental foi estudada por McRoberts e outros (1997), que aplicaram entre outras técnicas, a espectrometria de raios gama, excluindo assim a existência de condições prolongadas de anoxia ou dioxia devido às altas taxas de Th/U. Concluíram também que nas zonas onde esta taxa se apresentava baixa, tal traduziria a reduzida presença de tório nos sedimentos ricos em carbonatos, sem que tenha ocorrido qualquer formação de urânio autigénico.

Hallam e Wignall (2000) integraram dados de litofácies, biofácies e espectrometria de raios gama no estudo de uma sucessão em Nevada (USA) e verificaram uma redução da profundidade para o topo da sucessão marinha do Retiano, seguida de um aprofundamento no início do Hetangiano. Os autores defendem que a regressão seguida de transgressão poderá estar associada a vários bioeventos de extinção que se registam naquele intervalo. Contrariamente ao que se regista noutros perfis da Europa para o mesmo intervalo de tempo, que mostram bioeventos de extinção relacionados com anoxia, a razão Th/U indica geralmente condições oxigenadas na maior parte da sucessão, apenas se registando um breve e episódico decréscimo nesta relação; permanece a dúvida se aquele terá sido o responsável pelas extinções.

Kalvoda e outros (2011) integraram o estudo biostratigráfico de associações de foraminíferos com a técnica de espectrometria de raios gama na definição do limite Tournasiano-Viseano na Bacia de Dublin (Irlanda), uma vez que o topo do Tournasiano

revelava um empobrecimento nas associações de foraminíferos. O estudo de espectrometria de raios gama complementou o estudo biostratigráfico, revelando-se uma boa ferramenta no zonamento de foraminíferos. A combinação de dados biostratigráficos com dados de radiação gama provou ser uma ferramenta muito útil na identificação do limite de sequência imediatamente abaixo da passagem Tournaisiano – Viséano ao longo dos diferentes ambientes da Bacia de Dublin

***Capítulo 3 – Localização geográfica e  
enquadramento geológico***



### 3. Localização geográfica e enquadramento geológico

Neste capítulo apresenta-se a localização da Bacia Lusitânica e a sua evolução geodinâmica (em 3.1), bem como a localização geográfica e enquadramento geológico dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II, que foram objeto de estudo no presente trabalho (em 3.2). No subcapítulo 3.3 são apresentados os bioeventos reconhecidos na passagem Aaleniano – Bajociano da Bacia Lusitânica, definidos com base no registo das associações de diferentes grupos de fósseis, nomeadamente amonites (em 3.3.1), nanoplâncton calcário (em 3.3.2), braquiópodes (em 3.3.3) e foraminíferos bentónicos (em 3.3.4).

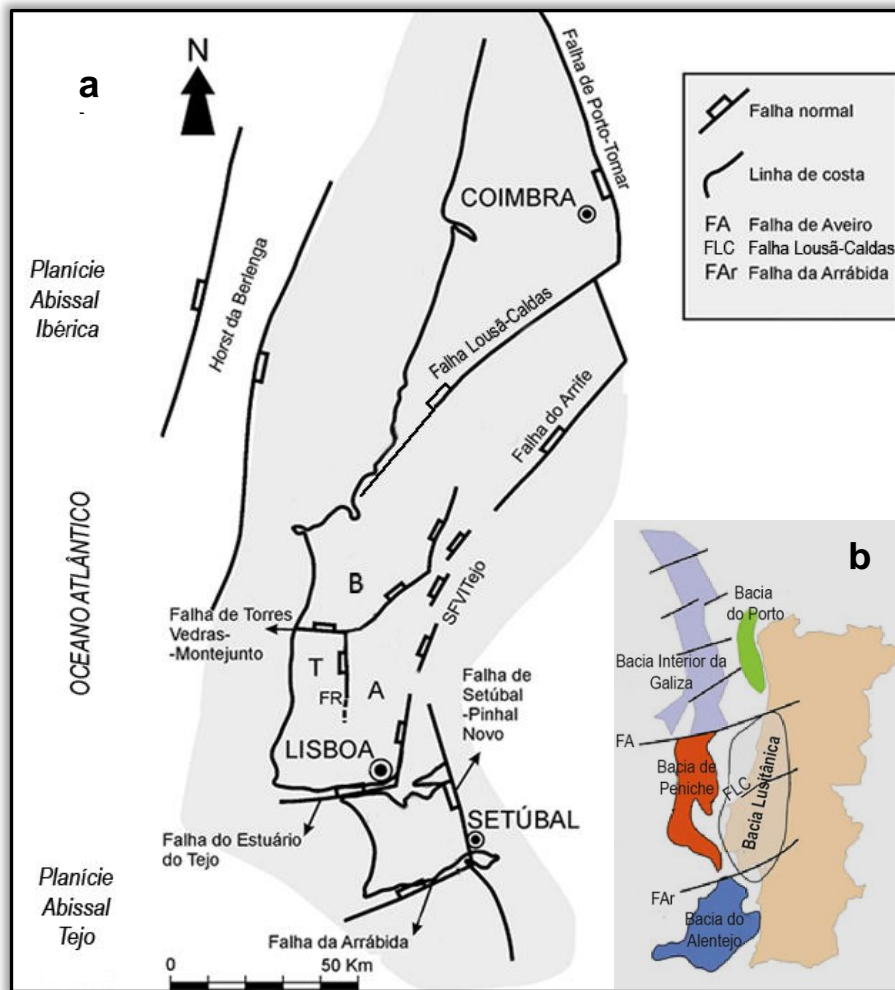
#### 3.1. Localização e evolução geodinâmica da Bacia Lusitânica

A Bacia Lusitânica desenvolveu-se na Margem Ocidental Ibérica durante parte do Mesozóico, tendo a sua génese e evolução sido determinadas pelas sucessivas fases de abertura do Oceano Atlântico Norte e do Tétis, no contexto da fragmentação da Pangeia.

A Bacia Lusitânica exhibe uma configuração NNE-SSW, com cerca de 130km de largura e aproximadamente 340 km de comprimento, sendo a área *onshore* superior a 23 000 km<sup>2</sup>. Apresenta uma espessura de sedimentos estimada na ordem dos 5 km (Ribeiro *et al.*, 1979), e um intervalo temporal que abrange desde o Triásico superior ao Cretácico superior, o que permite, ao contrário das restantes bacias Mesozóicas Atlânticas, um estudo aprofundado das sequências sedimentares *pre-rift* e *sin-rift* (Wilson, 1988).

É limitada no bordo este pelo Maciço Hespérico, com o qual contacta através da falha Porto-Tomar, e a oeste por um bloco de soco Paleozóico e Pre-câmbrico soerguido, parcialmente emerso, designado por *horst* da Berlenga (*eg.* Wilson, 1988), constituindo o grupo de ilhéus da Berlenga-Farilhões. O limite norte e sul da Bacia Lusitânica são delimitados pelas falhas de transferência de Aveiro (Alves *et al.*, 2002) e da Arrábida (Kullberg, 2000), respetivamente (Fig. 3.1).

A evolução tectónica da Bacia Lusitânica foi fortemente influenciada pelas estruturas do Maciço Hespérico que foram reativadas durante os episódios de distensão Mesozóica e de compressão Cenozóica. Segundo Ribeiro *et al.* (1979), estas falhas transcorrentes formaram-se no final da orogenia Varisca, e assumem direções dominantes NNE-SSW a NE-SW e NW-SE, tendo-se comportado como falhas normais durante a extensão Mesozóica e como falhas inversas durante a compressão da orogenia Alpina (Pinheiro *et al.*, 1996) (Fig. 3.1a). O movimento destas falhas desencadeou processos de halocinese nas estruturas salíferas (Triásico superior – Hetangiano), que ocorreram nas distintas fases de extensão



**Figura 3.1** – Localização geográfica e enquadramento tectónico da Bacia Lusitânica. a) Localização dos limites da Bacia Lusitânica e das principais falhas que condicionaram a sua evolução geodinâmica; B: Sub-bacia do Bombarral; T: Sub-bacia do Turcifal; A: Sub-bacia de Arruda. b) Localização das bacias sedimentares da Margem Ocidental Ibérica (modificado de Kullberg *et al.*, 2006).

durante o Jurássico. A interação entre estes dois processos controlou fortemente a deposição e as taxas de subsidência na bacia (Wilson *et al.*, 1989; Rasmussen *et al.*, 1998).

Durante a evolução da Margem Ocidental Ibérica vários são os autores que referem a existência de diferentes fases de *rifting* com limites de episódios nem sempre coincidentes.

O primeiro episódio de *rifting* registado na Bacia Lusitânica teve início no Triásico superior e conduziu ao estiramento e à reativação de falhas do soco hercínico, conferindo uma geometria à bacia em *grabens* e *semi-grabens* (eg. Rasmussen *et al.*, 1998; Ribeiro *et al.*, 1979; Wilson *et al.*, 1989), onde se depositaram os sedimentos aluvio-fluviais do Grupo de Silves. Num contexto de subsidência essencialmente de sobrecarga (Pena dos Reis *et al.*, 2011) depositaram-se espessas séries argilo-evaporíticas da Formação de Dagorda

(Triásico superior-Hetangiano) (Fig. 3.2).

A base do Jurássico (Sinemuriano) é marcada por uma invasão gradual do mar (Azerêdo *et al.*, 2003), com deposição de calcários dolomíticos em toda a bacia, quando esta se encontrava condicionada por relaxamento térmico da litosfera (Wilson, 1988).

Alguns autores referem a existência de um evento de *rifting* durante o Sinemuriano-Pliensbaquiano, que se terá manifestado sobretudo a sul da falha Lousã - Caldas, associado ao início da deposição marinha e à movimentação de sal induzida pela atividade das falhas do soco (Rasmussen *et al.*, 1998; Alves *et al.*, 2002, 2003).

Durante o final do Sinemuriano até ao fim do Jurássico inferior instalou-se uma rampa carbonatada homoclinal com pendor para ocidente, com deposição de unidades margo - calcárias (Wilson, 1988), testemunhando assim a primeira grande abertura da bacia Lusitânica a condições marinhas (Azerêdo *et al.*, 2003). Durante o Jurássico médio depositaram-se calcários de rampa proximal, a este da bacia, e margas e calcários de rampa intermédia a distal, a oeste (Watkinson, 1989; Azerêdo *et al.*, 2003). Esta fácies de geometria simples indica que a deposição neste intervalo se desenrolou num contexto de subsidência térmica regional (Wilson, 1988; Rasmussen *et al.*, 1998).

A passagem Jurássico médio - superior é marcada por um soerguimento regional que originou uma descontinuidade de âmbito bacinal, sugerindo uma regressão forçada, com pequenas flutuações relativas do nível do mar e/ou um evento tectónico regional (Wilson, 1988; Rasmussen *et al.*, 1998; Azerêdo *et al.*, 2002) associado ao *rifting* do Atlântico central e ao alinhamento da Bacia Lusitânica com este (Pena dos Reis *et al.*, 2011).

A subsidência foi fortemente retomada com o início de um novo episódio de *rifting* no Oxfordiano superior, relacionado com o *rifting* da Planície Abissal do Tejo, que conduziu à reativação das falhas do soco, migração de espessas massas evaporíticas, desenvolvimento de sub-bacias halocinéticas e sub-bacias limitadas por falhas (Wilson *et al.*, 1989; Rasmussen *et al.*, 1998; Alves *et al.*, 2002) e notável influxo de sedimentos siliciclásticos.

Segundo alguns autores (Wilson e Manatschal, 2001; Alves *et al.*, 2002, 2003, 2009), durante o Berriasiano Superior-Valangiano inferior ocorreu uma nova fase de *rifting* a noroeste da Bacia Lusitânica, na Planície Abissal Ibérica, que seria responsável pela separação das margens da Ibéria e do Canadá, materializado pelo soerguimento relativo a norte da falha Lousã-Caldas. A descontinuidade de rotura da Bacia no Aptiano superior marcou o início de um contexto de margem passiva e expansão oceânica, com o fim da sedimentação na parte centro e sul da bacia (Wilson *et al.*, 1989; Alves *et al.*, 2002).

No final do Cretácico a Bacia Lusitânica foi sujeita à compressão da orogenia Alpina, que se prolongou durante o Cenozóico, e que conduziu à inversão tectónica e exposição das unidades Mesozóicas.

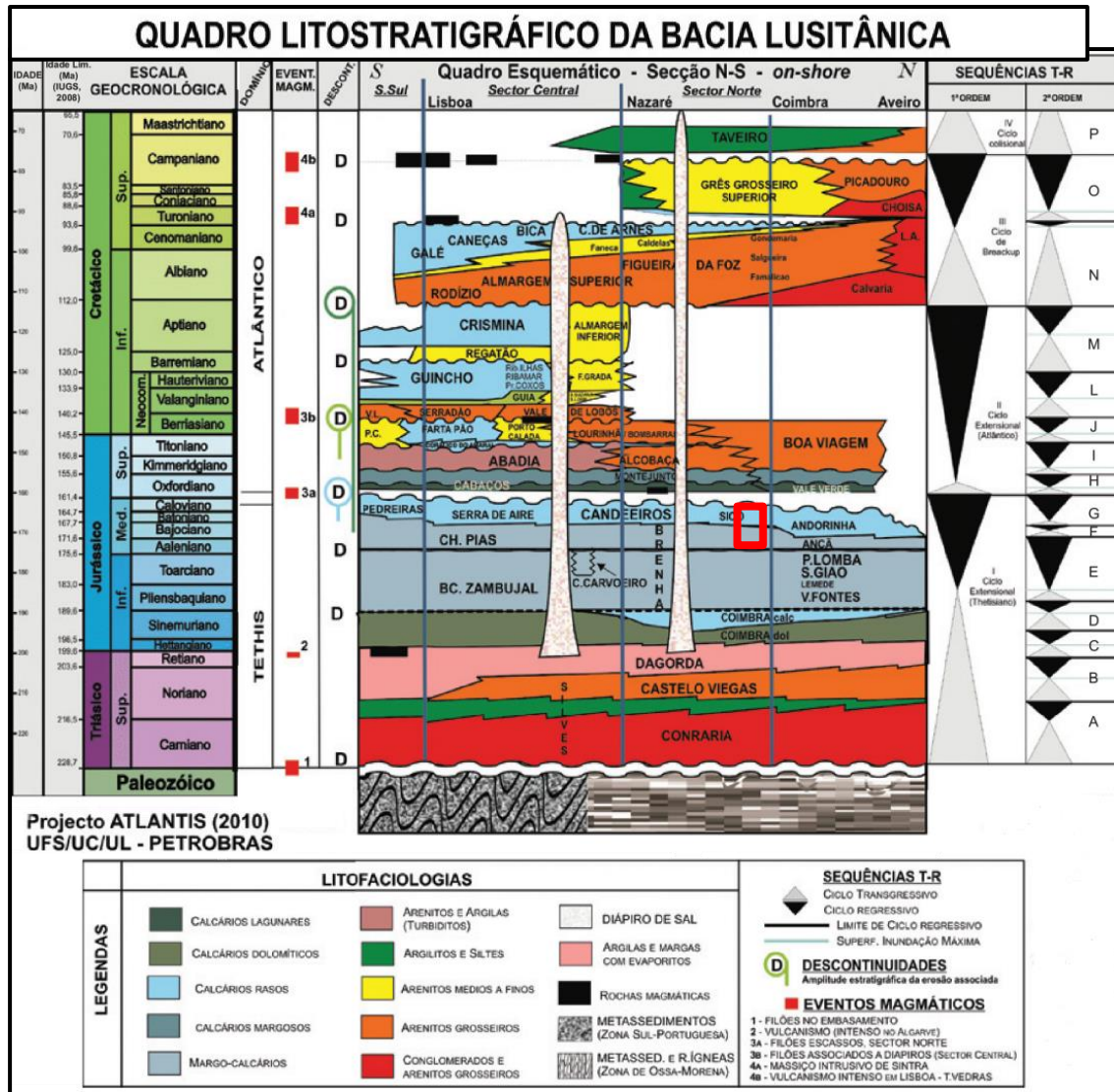


Figura 3.2 – Quadro litostratigráfico da Bacia Lusitânica, representando as principais unidades litostratigráficas do Mesozóico (modificado de Pena dos Reis *et al.*, 2011), e indicando a posição estratigráfica da Formação de Cabo Mondego (retângulo a vermelho).

### 3.2. Localização geográfica e enquadramento geológico dos perfis estudados

A passagem Aaleniano – Bajociano está particularmente bem representada no Setor norte da Bacia, nomeadamente nos perfis da Murtinheira (onde foi estabelecido o GSSP do Bajociano; Pavia e Enay, 1997) e da Serra da Boa Viagem II (Fig. 3.3), que integram a parte basal das unidades carbonatadas Jurássicas do setor ocidental da Serra da Boa Viagem cartografadas à escala 1:50 000 na folha 19C – Figueira da Foz da Carta Geológica de Portugal.

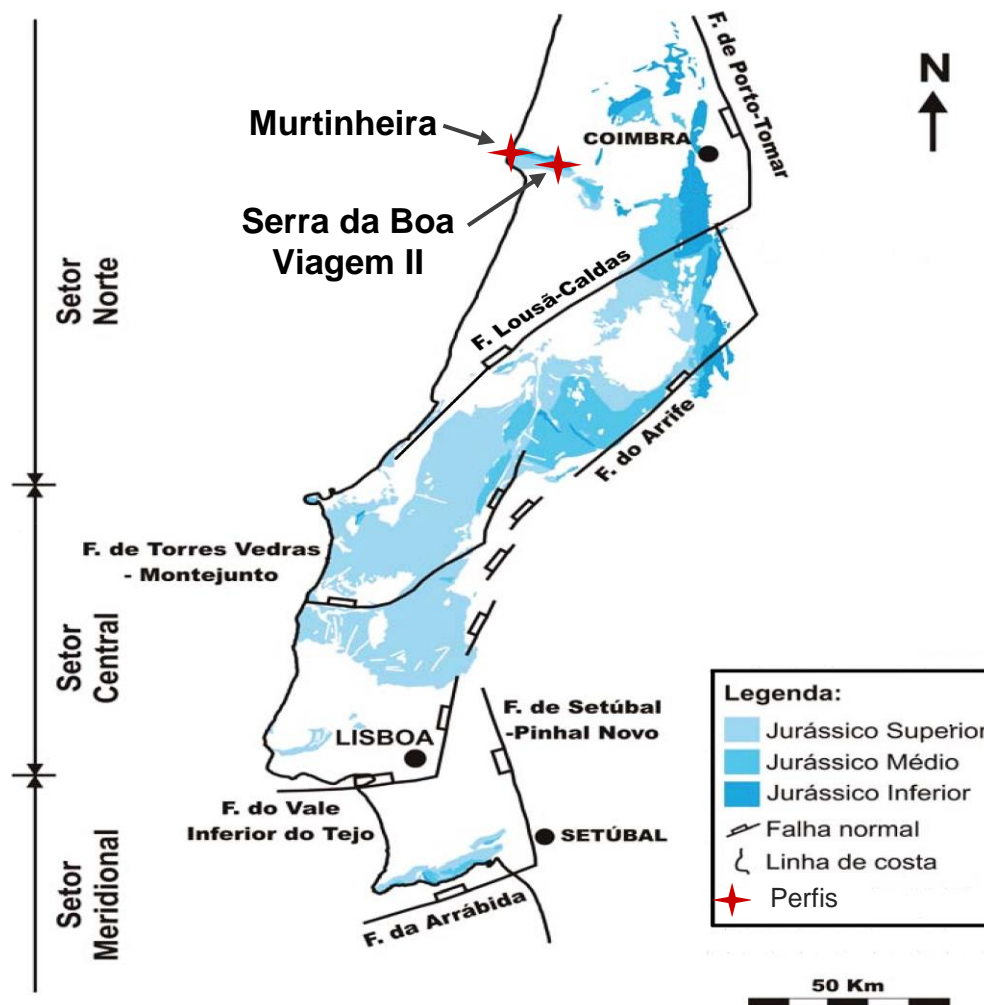
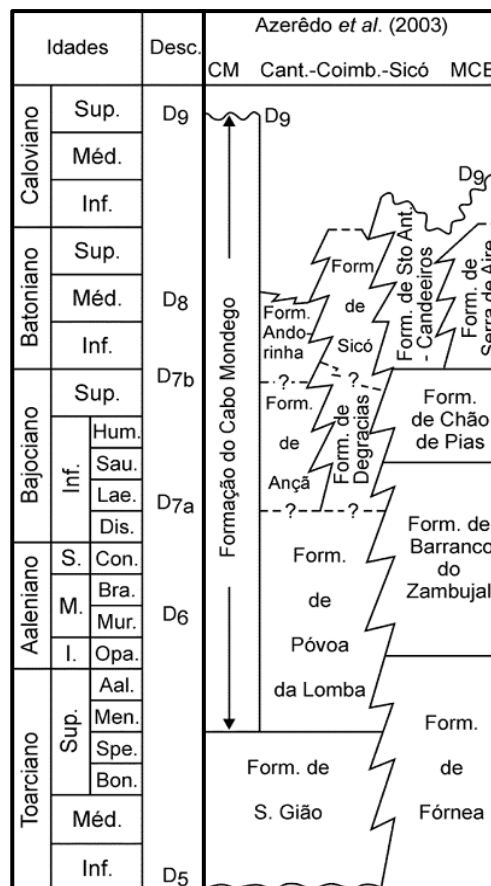


Figura 3.3 – Localização dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II (Setor Norte da Bacia Lusitânica (modificado de Figueiredo e Guterres, 2012).

As unidades ali aflorantes correspondem à Formação de Cabo Mondego (Toarciano superior-Caloviano) (Fig. 3.4), que é caracterizada pela ocorrência de fácies de rampa distal, constituídas por alternâncias rítmicas de margas e calcários margosos cinzentos com abundante macrofauna, especialmente de amonites (Henriques, 1992; Azerêdo *et al.*, 2003),

depositadas num contexto de sedimentação calma e monótona, típica de um ambiente marinho externo.

Porém, no Cabo Mondego e na Serra da Boa Viagem, a partir do final do Aaleniano, são registados ocorrências de calciturbiditos associados ao início do aumento do declive da rampa carbonatada, intercalados com sedimentação normal hemipelágica (Watkinson, 1989). Watkinson (*op. cit.*) considera que este sistema de fluxo de massa de baixa densidade foi depositado como *lobe fringes* que progradavam esporadicamente num ambiente com sedimentação hemipelágica, na zona distal da rampa, originando finas camadas de calciturbiditos que ocorrem isolados ou agrupados, caracterizados por limites incisivos na base. Os processos tectónicos que provocaram o aumento do declive da rampa provavelmente ocorreram acima de estruturas reativadas do soco varisco, provavelmente no eixo entre Verride e Ançã.



**Figura 3.4** - Correlação entre as unidades litostratigráficas da Bacia Lusitânica (CM – Cabo Mondego; MCE – Maciço Calcário Estremenho) (retirado de Azerêdo *et al.*, 2003).

### 3.2.1. Perfil da Murtinheira

O perfil da Murtinheira (M) situa-se a 40 km a oeste de Coimbra e a 1,5 km a NE do Cabo Mondego – Carta Militar de Portugal à escala 1:25 000; folha 238 A - Vais (Figueira da Foz) –, junto ao quilómetro 120 da Rua do Farol Novo, que permite a ligação à Murtinheira, sendo as coordenadas UTM as seguintes: 508 368mE; 4 450 114mN.

Este perfil representa o topo do Toarciano superior, o Aaleniano e a base do Bajociano (Henriques, 1992). O presente trabalho refere-se ao intervalo estratigráfico relativo à Subzona Limitatum da Biozona Concavum (Aaleniano superior), à Biozona Discites e à parte inferior da Biozona Laeviuscula (Bajociano inferior), que está representado pelo conjunto de camadas que abarca desde a camada M-282 à camada M-399, previamente estudadas por Henriques (1992) no que se refere ao registo de amonóides. Canales e Henriques (2008, 2013) estudaram o registo de foraminíferos bentónicos, o que permitiu por em evidência o empobrecimento das associações de representantes daquele grupo de microfósseis na passagem entre as duas biozonas, seguido de renovação faunística já na Biozona Discites.

Os níveis da Subzona Limitatum apresentam calcários micríticos de cor cinzenta, muito bioturbados, por vezes apinhado, em camadas com espessura variável (0,05m a 0,60m) e limites irregulares, que alternam com margas calcárias cinzentas, muito bioturbadas, em camadas de espessura menor (0,03m a 0,30m) e limites igualmente irregulares. Alguns níveis exibem um carácter lenticular, ou apenas uma divisão local por interposição de finas margas. A Biozona Discites é caracterizada por uma alternância rítmica de bancadas decimétricas de calcários micríticos compactos, com limites muito irregulares, e bancadas decimétricas de margas muito bioturbadas, com níveis por vezes muito escuros. Por vezes ocorrem níveis com carácter lenticular e níveis com superfícies de *hardground* (Henriques, 1992).

### **3.2.2. Perfil da Serra da Boa Viagem II**

O perfil da Serra da Boa Viagem II (SBVII) localiza-se a 6km a norte da Figueira da Foz (Carta Militar de Portugal à escala 1:25 000; folha 239 – Figueira da Foz), junto ao quilómetro 6,9 da estrada EM 596, que une Quaios à Figueira da Foz, tendo as seguintes coordenadas UTM: 512 065 mE; 4 450 058 mN.

Tal como o perfil da Murtinheira, o perfil da SBVII integra unidades da Formação de Cabo Mondego (Fig. 3.4), compreendendo o topo do Toarciano, o Aaleniano e a base do Bajociano, e nele regista-se abundante fauna de amonóides (Henriques, 1992; Silva *et al.*, 2015) e de foraminíferos bentónicos (Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014).

O intervalo estudado neste perfil corresponde à Subzona Limitatum da Biozona Concavum e à parte inferior da Biozona Discites (das camadas SBVII-106 à SBVII-177). Os níveis da Subzona Limitatum são caracterizados por alternâncias de calcário cinzento margoso, que se torna mais micrítico para o topo, muito compacto, em bancadas com 0,15m espessura e marga cinzenta em bancadas de com 0,10m espessura. Os níveis da Biozona Discites apresentam calcário micrítico cinzento muito compacto com 0,20 a 0,40m de espessura, que alternam com finas margas cinzentas em bancadas com 0,05m na base. Na parte intermédia da Biozona Discites as margas tornam-se mais expressivas, com níveis entre 0,10m a 0,20m e intercalam com calcários micríticos com 0,20m a 0,50m de cor cinzenta, tornando-se as camadas de calcário mais espessas para o topo (Henriques, 1992).

A passagem Aaleniano – Bajociano regista um decréscimo na abundância e diversidade de associações de foraminíferos bentónicos (Silva *et al.*, 2014), já evidenciado em níveis correlativos do perfil da Murtinheira (Canales e Henriques, 2008).

### 3.3. Os bioeventos registados na passagem Aaleniano – Bajociano da Bacia Lusitânica

Os principais bioeventos reconhecidos no Aaleniano – Bajociano da Bacia Lusitânica representam mudanças na composição das associações de macrofósseis (amonóides, braquiópodes) e de nanofósseis (nanoplâncton calcário), bem como de microfósseis (foraminíferos bentónicos). Neste subcapítulo apresenta-se uma breve descrição dos bioeventos reconhecidos nos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II, com base em informação publicada em diversos trabalhos (Henriques, 1992; Andrade, 2006; Neto *et al.*, 2010; Canales e Henriques, 2008, 2013, Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014, 2015). São apenas referidos os bioeventos que ocorrem no intervalo de estudo, que se estende desde a Biozona Concavum (Subzona Limitatum) à Biozona Discites, e que se referem a primeiras ocorrências (FOs), últimas ocorrências (LOs) e mudanças na abundância relativa dos táxones ou mudanças na abundância e diversidade das associações registadas. Alguns destes bioeventos têm apenas expressão local, mas outros são igualmente reconhecidos noutras bacias péri-Atlânticas.

#### 3.3.1. Amonites

Henriques (1992) analisou as associações de amonites em vários perfis da Bacia Lusitânica, incluindo as dos dois perfis em estudo neste trabalho. A fauna de amonites apresenta-se muito diversificada e exhibe afinidades com as faunas do domínio Norte-Europeu e Mediterrâneo, sendo de grande importância a notável renovação faunística que se regista na passagem Aaleniano – Bajociano.

No perfil da Murtinheira (Fig. 3.5) a Subzona Limitatum (Biozona Concavum, Aaleniano superior) foi reconhecida através das FOs de representantes de *Graphoceras limitatum* (Buckman) e do género *Braunsina*. Na parte superior desta subzona (camada M-327) está registada a LO de exemplares do género *Graphoceras* (típico do Aalenino superior) para este perfil, bem como as FO de representantes dos géneros *Toxolioceras* e *Reynesella* (camada M-355).

Na camada M-337 verifica-se uma mudança significativa na composição das associações de amonites, pois regista-se a FO de uma associação que contém representantes da espécie *Toxolioceras mundum* (Buckman) e de espécies semelhantes, tais como *Toxolioceras furcatum* (Buckman), *Braunsina aspera* (Buckman) e *Braunsina elegantula* (Buckman). Assim, com base nesse facto, bem como devido ao registo de uma inversão da polaridade magnética, a camada M-337 passou a representar o limite inferior da Biozona Discites, onde foi estabelecido o GSSP do Bajociano (Pavia e Enay, 1997). A Biozona Discites é caracterizada por um aumento na abundância e diversificação de novas



famílias e géneros de amonites.

No perfil da Serra da Boa Viagem a Subzona Limitatum apresenta uma grande abundância de associações de amonites, com destaque para os representantes de *Graphoceratinae* e *Grammocerotinae* (Henriques, 1992; Silva *et al.*, 2015). O limite inferior da Subzona Limitatum foi reconhecido pela FO de *Graphoceras limitatum* (Buckman), já registado noutros perfis da Bacia Lusitânica. Ainda nesta subzona verificam-se as FOs dos géneros *Fontannesia* e *Braunsina* na base, do género *Reynesella* na parte superior, e da espécie *Toxilioceras* sp. nos últimos níveis. Os últimos representantes do género *Graphoceras* neste perfil aparecem no topo desta subzona.

Na parte inferior da Biozona Discites as faunas tornam-se mais abundantes e diversificadas, ainda que ocorram os últimos representantes dos géneros *Haplopleuroceras* e *Fontannesia*. Esta biozona foi reconhecida pela FOs de uma associação que inclui várias espécies dos géneros *Toxilioceras*, *Braunsina*, *Reynesella* e *Oedania*. Esta renovação na composição das associações de amonites na passagem Aaleniano-Bajociano foi igualmente reconhecida por O'Dogherty *et al.* (2006) na Cordilheira Bética.

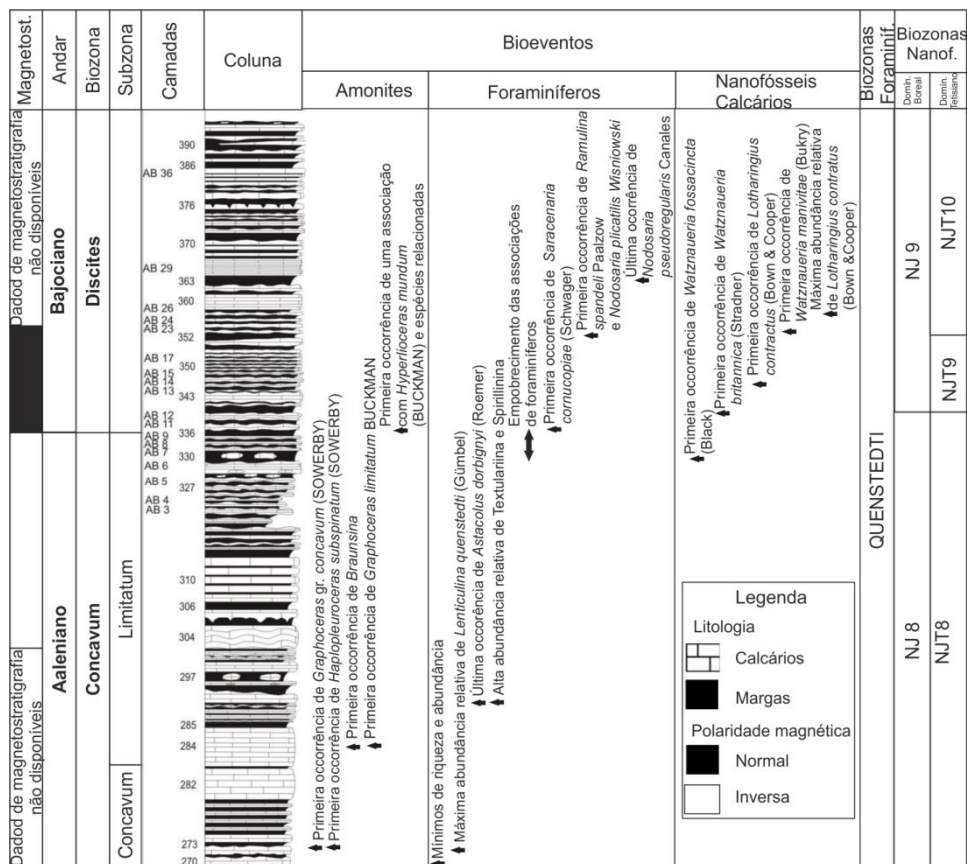


Figura 3.5 – Bioeventos de amonites, foraminíferos bentónicos e nanofósseis calcários reconhecidos na passagem Aaleniano-Bajociano no perfil da Murtinheira (retirado de Henriques *et al.*, 2010).

### 3.3.2. Nanoplâncton calcário

No perfil da Murtinheira, ao longo do intervalo estratigráfico estudado, foram reconhecidos por Neto *et al.* (2010) vários bioeventos a partir da análise da composição das associações de nanoplâncton calcário (Fig. 3.5). Na parte superior da Subzona Limitatum (amostra M-340) foi reconhecida a FO de representantes de *Watznaueria fossacincta* (Black). A partir da Biozona Discites torna-se evidente um aumento na diversidade e abundâncias relativas de algumas espécies de nanoplâncton calcário. Os primeiros representantes da espécie *Lotharingius contractus* (Brown e Cooper) foram reconhecidos na amostra M-349, e a sua abundância relativa aumenta significativamente a partir da amostra M-356. A última FO registada nesta biozona refere-se aos exemplares de *Watznaueria manivittae* (Bukry) na amostra M-377. A análise da composição das associações registadas de nanoplâncton calcário permite reconhecer unidades biostratigráficas com base naquele grupo de microfósseis estabelecidas em Itália e Sul de França (Domínio Tétisiano) e em outras bacias do NW da Europa (Domínio Boreal) (Neto *et al.*, 2010).

Suchéras-Marx *et al.* (2012) reconhecem um aumento na produção pelágica de carbonato durante o Bajociano inferior no Cabo Mondego, que teve origem num importante incremento do fluxo de nanoplâncton calcário desde a parte superior do Aaleniano até ao Bajociano inferior, e que está relacionado com uma renovação nas associações de nanofósseis durante esse intervalo, caracterizada pela diversificação de *Watznaueria*, um género muito importante durante o Jurássico médio. Apesar do aumento da abundância relativa de representantes deste género não existe nenhum decréscimo significativo nas abundâncias absolutas dos restantes cocólitos (Suchéras-Marx *et al.*, 2015). Este crescimento no fluxo de nanoplâncton está igualmente assinalado em Chaudon-Norante (Bacia Subalpina Francesa) que, tal como no perfil do Cabo Mondego, regista um aumento no fluxo entre 10 a 100 vezes durante o final do Aaleniano ao Bajociano inferior, tendo sido considerado um evento de valor supra-regional (Suchéras-Marx *et al.*, 2014).

### 3.3.4. Braquiópodes

Andrade (2006) descreveu as associações de braquiópodes da passagem Jurássico inferior – Jurássico médio em vários perfis da Bacia Lusitânica. O perfil da Murtinheira foi um dos perfis estudados pelo autor, onde reconheceu diversos bioeventos (Fig. 3.6), que serão brevemente resumidos para as biozonas Concavum e Discites.

Na Biozona Concavum (Subzona Limitatum) registam-se as LOs de *Neozeilleria anglica* (Oppel), a primeira espécie de braquiópodes do Aaleniano registada na bacia, e de *Sphaeroidothyris uretae* (García Joral), na parte superior da subzona. No topo da Subzona Limitatum as espécies de braquiópodes quase desaparecem e apenas duas espécies do

Aaleniano se estendem até ao Bajociano inferior: *Soaresirhynchia murtinheirensis* sp. nov. (típica do Aaleniano médio) e *Sphaeroidothyris henriquesae* sp. nov. (típica do Aaleniano superior). *S. murtinheirensis* sp. nov. é a única espécie presente na primeira camada do Bajociano (M-355) na Murtinheira, enquanto *S. henriquesae* sp. nov. ocorre nos níveis acima e abaixo daquela.

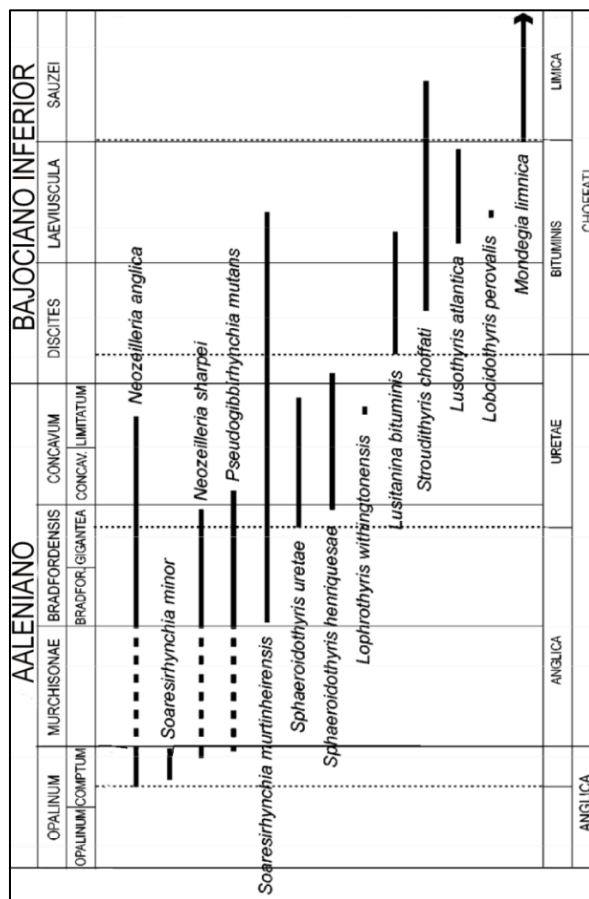
O início do Bajociano regista uma renovação gradual da fauna, em que as espécies presentes no Aaleniano superior vão sendo substituídas por novas formas. A parte inferior da Biozona Discites é marcada por escassa diversidade de espécies, contrariamente à parte superior, onde são registadas as FOs de representantes de *Lusitanina bituminis* sp. nov. e *Stroudithyris choffati* sp. nov., apesar da LO de *S. henriquesae* sp. nov.

A renovação faunística que se regista no Bajociano inferior é constituída, na sua maioria, por elementos exclusivos da Bacia Lusitânica, tanto ao nível de espécie como de género, de que são exemplo *L. bituminis* sp. nov. e *S. choffati* sp. nov. Tratam-se de táxones autóctones que povoam um sistema distal de movimentos em massa, numa etapa em que se acentua o isolamento da bacia.

O autor considera que as associações da Bacia Lusitânica têm afinidades com as de outras bacias europeias, como por exemplo com as da Cordilheira Ibérica e as da Bacia Basco-Cantábrica (Andrade *et al.*, 2015).

### 3.3.4. Foraminíferos bentónicos

Canales e Henriques (2008, 2013) reconheceram, na passagem Aaleniano-Bajociano do perfil da Murtinheira, vários bioeventos com base na composição das associações de foraminíferos bentónicos que serão de seguida descritos resumidamente (Fig. 3.5 e 3.7). Na camada M-291 (base da Subzona Limitatum, Biozona Concavum) reconhecem-se dois



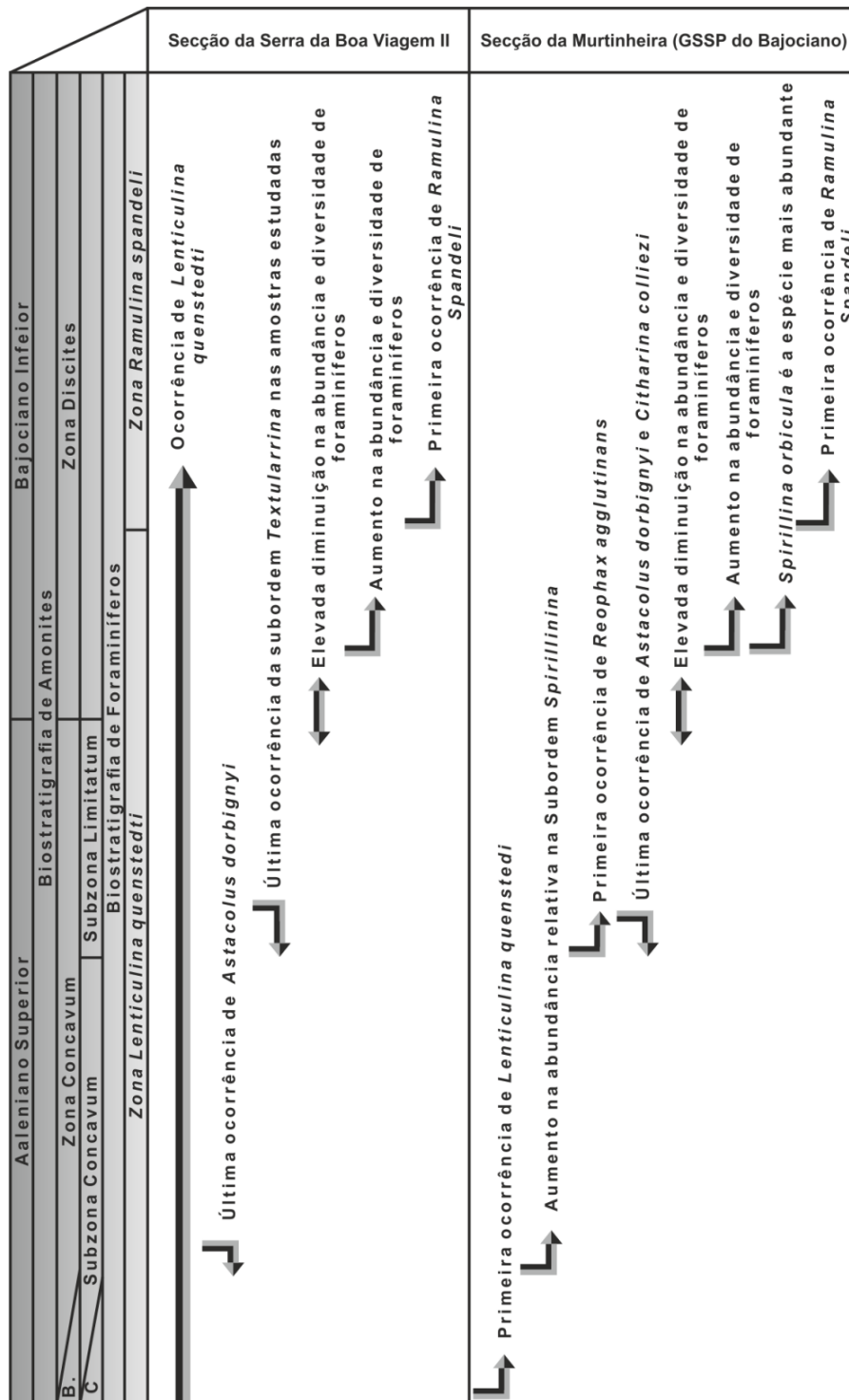
**Figura 3.6** – Distribuição estratigráfica das espécies de braquiópodes na Bacia Lusitânica (modificado de Andrade, 2006).

bioeventos: as últimas ocorrências (LOs) de representantes de duas espécies típicas do Aaleniano, *Astacolus dorbignyi* (Roemer) e *Citharina colliezi* (Terquem), e a FO de representantes da espécie *Reophax agglutinans* (Terquem), elemento importante em algumas associações do Bajociano.

Na passagem Aaleniano-Bajociano os níveis M-330 e M-336 apresentam um baixo número de espécimes e de taxónes que refletem um notável decréscimo na abundância e diversidade dos foraminíferos, representando um importante bioevento de empobrecimento das associações. Neste limite apenas os elementos dos grupos mais abundantes parecem ter sobrevivido. No início do Bajociano (parte inferior da Biozona Discites), a camada M-352 exhibe um aumento no número de espécimes e de táxones, registando um marcante bioevento de aumento na abundância e diversidade dos foraminíferos. Esta importante renovação das faunas, que se prolonga pela Biozona Discites, é caracterizada pelo reaparecimento de algumas espécies já presentes na Subzona Limitatum, pelas FOs de representantes de várias espécies típicas do Jurássico Médio, e LOs de alguns táxones do Toarciano superior – Aaleniano. Ainda no nível M-352 ocorrem representantes da espécie índice *Ramulina spandeli* (Paalzow), e *Spirillina orbicula* (Terquem e Berthelin) torna-se a espécie mais abundante.

As autoras consideram ainda que as associações de foraminíferos do Bajociano são mais abundantes e diversas do que as do Aaleniano.

As LOs de representantes de *Nodosaria pseudoregularis* (Canales) e *Nodosaria pulchra* (Franke), duas espécies típicas do Aaleniano, são registadas no nível M-363. Nas amostras M-386 e M-402 verifica-se um aumento na abundância de *Reophax agglutinans* (Terquem), sendo que na última amostra está assinalado um rápido aumento na diversidade de espécies de foraminíferos representativos das faunas do Jurássico Médio. A partir da análise paleoecológica realizada, Canales e Henriques (2008) concluem que as condições ambientais estáveis que predominavam durante todo o Aaleniano ter-se-ão tornado instáveis durante a passagem Aaleniano – Bajociano, sugerindo que a renovação da fauna de foraminíferos está provavelmente relacionada com perturbações no ciclo do carbono relatados por O'Dogherty *et al.* (2006) para este intervalo de tempo na Cordilheira Bética



**Figura 3.7** – Principais bioeventos de foraminíferos bentónicos registados no perfil da Serra da Boa Viagem II e no perfil da Murtinheira. B: Biozona Bradfordensis; G: Biozona Gigantea (adaptado de Silva *et al.*, 2015).

No perfil da Serra da Boa Viagem II (SBVII), Silva (2013) e Silva *et al.* (2015) reconheceram igualmente vários bioeventos com base na análise da composição das associações registadas de foraminíferos bentónicos (Fig. 3.7), alguns dos quais

correlacionáveis com os bioeventos reconhecidos no perfil da Murtinheira, e que serão descritos resumidamente com base na informação contida naqueles trabalhos. Na Subzona Concavum (Biozona Concavum) regista-se as LOs de representantes de vários táxones típicos do Jurássico inferior, tais como *Astacolus dorbignyi* (Roemer), *Pseudonodosaria vulgata* (Bornemann) e *Astacolus varians* (Bornemann), e as FOs de representantes de espécies típicas do Jurássico médio, tais como *Prodentalina* cf. *P. mucronata* (Neugeboren), *Prodentalina propinqua* (Terquem) e *Nodosaria opalini* (Bartenstein). Na Subzona Limitatum (Biozona Concavum) não há qualquer registo de FOs. No entanto, a base desta subzona (amostra SBVII-110) é marcada por várias LOs, designadamente de representantes de *Fronicularia oolithica* (Terquem), *Nodosaria fontinensis* (Terquem), *Planularia* aff. *P. beierana* (Gümbel), *Planularia protracta* (Bornemann), *Ammobaculites fontinensis* (Terquem), *Nodosaria opalini* (Bartenstein), *Prodentalina fragilis* (Terquem), *Prodentalina subsiliqua* (Franke) e *Marginulina porrecta* (Terquem), sendo que algumas destas espécies são típicas do Jurássico inferior.

Na passagem Aaleniano – Bajociano (amostras SBVII-130, SBVII-134 e SBVII-140) regista-se um decréscimo significativo no número de espécimes e táxones, e consequentemente, um importante bioevento de decréscimo na abundância e diversidade das associações (topo da Biozona Concavum).

Após este bioevento de empobrecimento das associações de foraminíferos, a parte inferior da Biozona Discites regista uma importante renovação das mesmas, uma vez que os representantes de algumas espécies reaparecem e a abundância e diversidade das associações começam a aumentar, nomeadamente a partir da amostra SBVII-148 do topo da sucessão. Ao longo desta biozona são registados alguns bioeventos de FOs de representantes de táxones típicos do Jurássico Médio, tais como *Astacolus* sp. 1 (Canales), *Nodosaria torulosi* (Frentzen) e *Ramulina spandeli* (Paalzow).

Este episódio de empobrecimento e renovação das associações de foraminíferos bentónicos na passagem Aaleniano – Bajociano correlaciona-se com o bioevento reconhecido no perfil da Murtinheira para este intervalo de tempo (Canales e Henriques, 2013), já descrito anteriormente neste trabalho.

Muitos destes bioeventos registados nos perfis da Murtinheira e SBVII têm apenas utilidade local, mas o bioevento de renovação faunística da passagem Aaleniano - Bajociano adquire importância regional, tendo sido já reconhecido em outras bacias localizadas em torno da Placa Ibérica, tais como nas bacias Basco-Cantábrica e Ibérica (Henriques *et al.*, 2014).

***Capítulo 4 – Procedimientos técnicos e  
metodológicos***

#### 4. Procedimentos técnicos e metodológicos

A recolha de dados para o presente trabalho foi realizada segundo determinados procedimentos técnicos e metodológicos que incluíram trabalho de campo (descrito em 4.1), trabalho laboratorial (descrito em 4.2), análise de furos de sondagem (descrito em 4.3) e trabalho de gabinete (descrito em 4.4).

##### 4.1. Trabalho de Campo

O trabalho de campo efetuado nos dois perfis estudados consistiu no reconhecimento dos níveis dos perfis a amostrar e na medição de valores de espectrometria de raios gama através de um espectrómetro de raios gama portátil - modelo *Gamma Surveyor II* (1024 canais e 30 KeV – 3 MeV de energia) equipado com detetor de cintilação de óxido germanato de bismuto – BGO) com 20 cm<sup>3</sup> de volume (Fig. 4.1). Este equipamento mede a taxa de dose da radiação gama natural emitida (nGy/h – nanoGrey por hora) e determina a concentração individual das três maiores fontes radioativas – K em %, U em ppm e Th em ppm.

A amostragem realizou-se de forma sistemática e regular, só circunstancialmente aleatória, tendo em conta a dimensão aproximada de amostra de rocha que é mensurável pelo espectrómetro que, em condições geológicas normais, tem uma geometria circular, atingindo uma profundidade de 0,15 m e raio de 0,5 m (Parkinson, 1996) (Fig. 4.2 E).

Cada medição corresponde a um registo efetuado pelo aparelho durante um período de 3 minutos, com um intervalo de amostragem entre 0,25m a 1m, uma vez que, devido à grande espessura do perfil da Murtinheira, um intervalo menor tornaria o processo muito moroso. Reduziu-se o intervalo de amostragem para 0,15 m nos níveis dos perfis em que se considerou necessário detalhar a aquisição de dados, como, por exemplo, nas proximidades de limites biostratigráficos.

Em camadas com espessura muito fina, não se procedeu à aquisição de dados, uma vez que as medições obtidas seriam o resultado de valores correspondentes também aos das camadas adjacentes.



**Figura 4.1** – Medição realizada com o espectrómetro portátil *Gamma surveyor II*, orientado perpendicularmente em relação à superfície de estratificação da camada.

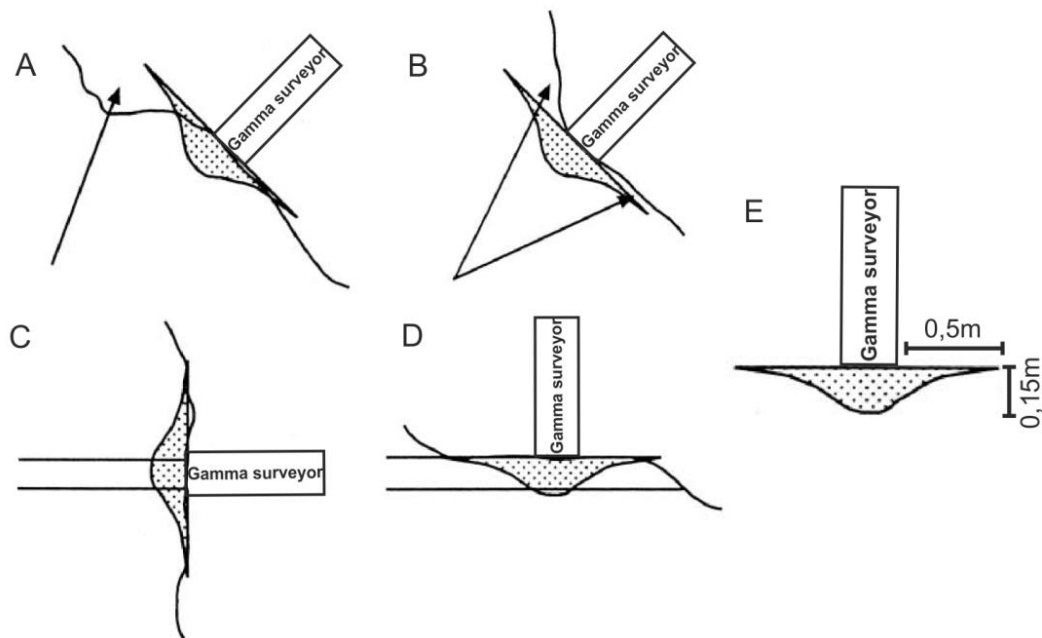


As medições foram realizadas em superfícies planas, exibindo pouca alteração superficial, evitando sempre que possível zonas convexas - que dariam valores subestimados, pois o aparelho mediria um menor volume de rocha - e zonas côncavas - que dariam valores exagerados (Fig. 4.2), devido ao maior volume de rocha medido (Parkinson, 1996; Svendsen e Hartley, 2001).

Sempre que se justificava, limpavam-se as superfícies a analisar, a fim de impedir a contaminação com materiais oriundos de níveis superiores, solo ou vegetação.

A posição do espectrômetro em relação à superfície de estratificação da camada que se pretende amostrar (Fig. 4.2) é outro parâmetro importante na aquisição de dados, uma vez que, no caso de horizontes finos, se o equipamento for colocado paralelamente à superfície da camada, as medições serão influenciadas pelas camadas envolventes. Em camadas com superfície de estratificação bem exposta, se o aparelho for colocado perpendicularmente a essa superfície, as medições serão concentradas nesse horizonte (Parkinson, 1996; Svendsen e Hartley, 2001). Sempre que a exposição das camadas permitia, as medições eram feitas perpendicularmente em relação à superfície de estratificação (Fig.4.1 e 4.2 D).

Dados do fabricante prevêm que os resultados de um ensaio típico (numa amostra com baixo fundo radiométrico) para um tempo de medição de 3 minutos são os seguintes:



**Figura 4.2** – Efeitos da superfície de amostragem e da geometria das camadas nas medições de espectrometria de radiação gama em afloramento. A área a picotado representa o volume de rocha amostrada. A) Menor volume de rochas medido em superfícies convexas origina leituras reduzidas; B) Um maior volume de rocha medido resulta em leituras amplificadas; C) Equipamento paralelo à estratificação origina leituras diluídas para camadas finas; D) Equipamento perpendicular à estratificação fornece leituras concentradas nas camadas finas; E) Esquema que representa a área aproximada de rocha amostrada pelo espectrômetro (adaptado de Parkinson, 1996; Svendsen e Hartley, 2001).

$2.3 \pm 0.14$  % K,  $2.7 \pm 0.8$  ppm U,  $9.4 \pm 1.5$  ppm Th.

No perfil da Murtinheira foram amostrados 69 níveis e no perfil da Serra da Boa Viagem II a amostragem foi realizada em 27 níveis. No total dos dois perfis foram amostrados 96 níveis, tendo-se obtido para todos eles valores quantitativos de radiação gama emitida por cada um dos diferentes elementos radioativos (K, U e Th) e a taxa de dosagem total da radiação gama natural (nGy/h).

Os valores da dosagem total de radiação gama registados pelo aparelho foram convertidos para unidades API utilizando a seguinte fórmula de cálculo:

$$GR_{API} = K \cdot 16 + U \cdot 8 + Th \cdot 4 \quad (2)$$

#### 4.2. Trabalho Laboratorial

Dificuldades técnicas relacionadas com o equipamento de raios X do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (DCT-UC) ao longo da elaboração do presente trabalho, apenas permitiram a realização de análises de difração de raios X no perfil da Murtinheira, num conjunto limitado de amostras (15 no total).

Cada amostra, depois de moída, foi descarbonatada usando uma solução de 16 ml de ácido clorídrico para 1 litro de água desionizada; o excesso de ácido foi posteriormente removido através de lavagens sucessivas com água desionizada. A fração de argila ( $< 2\mu\text{m}$ ) foi separada por sedimentação e centrifugação usando os procedimentos analíticos de Holtzapffel (1985). Estes procedimentos foram realizados no Laboratório de Geotecnia e no Laboratório de Sedimentologia do DCT-UC.

Os difratogramas de raios X foram obtidos utilizando um difratómetro Philips PW 3710, com um gerador PW 1830 (com tensão de 40 kV e 20 mA de corrente), ampola de cobre e um goniómetro PW 1050, existente no DCT-UC (Fig.4.3). O *software* analítico utilizado foi PC.APD 3.6J.

Para cada amostra foi realizada uma análise raios X através de secagem ao ar (diagrama normal), uma vez que tal bastava para a identificação do conjunto ilite-caulinite. Quando não foi possível identificar todo o conjunto argiloso através da análise normal, procedeu-se à análise de saturação de etileno-glicol e do aquecido durante 2 horas



**Figura 4.3** – Difratograma de raios X do DCT-UC.

a 550 °C.

A identificação dos minerais de argila foi efetuada de acordo com a posição da (001) série de reflexões basais no diagrama normal para as amostras M-295, M-304, M-327, M-333, M-336, M-338, M-350, M-352, M-361, M-387, e nos três diagramas de raios-X (normal, glicerolado e aquecido) para as seguintes amostras: M-285, M-311, M-330, M-342 e M-363.

### **4.3. Furos de sondagem**

Para efeitos de correlação de amostragem em afloramento com sondagens efetuou-se uma deslocação às instalações da Divisão de Pesquisa e Exploração de Petróleo para consulta de informação relativa a alguns furos de sondagem em *offshore*, com localização geográfica próxima da dos afloramentos em estudo neste trabalho. Foi então adquirida informação relativa aos furos de sondagem Sardinha 13C-1, Moreia1 e Dourada 1-C com as diagrfias e relatórios de sondagem. Após tentativas de correlação entre os perfis de radiação gama total da sondagem e de afloramento verificou-se que, devido ao pequeno intervalo em estudo (Aaleniano superior – Bajociano inferior), apenas seria viável a utilização da sondagem Sardinha 13C-1, uma vez que é a única que assinala este limite entre andares. A sondagem Sardinha 13C-1 situa-se na latitude 40° 01' 34"3 N e longitude - 9° 07' 59"3 Oeste.

### **4.4. Trabalho de Gabinete**

Após a recolha dos dados de radiação gama e de difração de raios X e a escolha do furo de sondagem procedeu-se ao tratamento e processamento de toda a informação disponível e à posterior análise e discussão dos resultados obtidos, tendo em conta literatura de referência.

Os dados obtidos nas medições de campo foram processados recorrendo ao *software Microsoft Excel*<sup>®</sup> para a realização de cálculos e elaboração de gráficos e tabelas.

As figuras, colunas estratigráficas e esquemas apresentados no presente trabalho foram elaborados ou modificados com recurso aos programas de edição de imagem *Adobe Photoshop*<sup>®</sup> e/ou *CorelDRAW*<sup>®</sup>.

## ***Capítulo 5 – Apresentação e interpretação de dados***

## 5. Apresentação e interpretação de dados

Neste capítulo apresentam-se os dados obtidos relativamente à radiação gama total e à espectrometria dos radioelementos registadas no perfil da Murtinheira (em 5.1) e no perfil da Serra da Boa Viagem II (em 5.2). Em 5.3 apresentam-se os dados relativos à natureza do cortejo argiloso obtidos para algumas amostras selecionadas do perfil da Murtinheira. As listagens dos valores obtidos de radiação gama estão incluídas nos anexos I e II, e os diagramas de difração de raios X são representados no anexo III.

### 5.1. Variações de Radiação Gama no perfil da Murtinheira

Os dados de radiação gama total (GR) obtidos neste perfil revelam intensidades moderadas a baixas, entre 12 a 60 API.

Ao longo do intervalo amostrado no perfil da Murtinheira verifica-se um decréscimo generalizado nos valores da radiação gama desde a base até ao topo, no qual a curva de GR revela um padrão hierárquico com ciclos menores sobrepostos sobre a tendência principal. Observando a curva de GR total e a curva de CGR (*“Clay” Gamma Ray*), como indicador de argilosidade, podem ser distinguidos cinco intervalos de variações (Fig.5.2):

- M1 – o fundo radiométrico mantém-se relativamente alto desde o topo da Subzona Concavum até à parte intermédia da Subzona Limitatum (camada M-311), uma vez que se verifica um carácter mais margoso na sucessão, registando-se um desvio para valores maiores na camada M-311;
- M2 – decréscimo acentuado dos valores até à base da Biozona Discites (camada M-339). Este padrão é concordante com o aumento do conteúdo calcário desde a parte superior da Subzona Limitatum até à base da Biozona Discites;
- M3 – na parte inferior da Biozona Discites (a partir da camada M-342) verifica-se um aumento na tendência da curva de GR, que atinge um máximo na camada M-352, relacionando-se com um aumento da natureza margosa da sucessão;
- M4 – A componente calcária aumenta novamente e os valores de GR voltam a decrescer (com pequenos desvios para maiores valores) desde a parte intermédia até à parte superior da Biozona Discites (camada M-385);
- M5 – desde o topo da Biozona Discites até à base da Biozona Laeviuscula verifica – se um desvio distinto para valores maiores de GR, congruente com o forte aumento da composição margosa nesta parte do perfil.

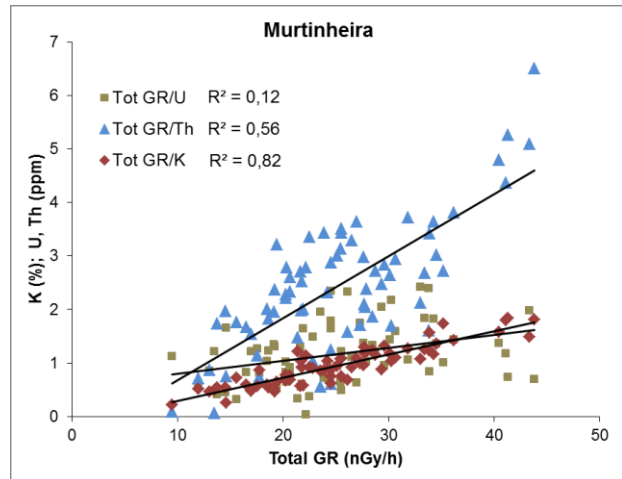
A correlação entre o valor total da radiação gama (em nGy/h) e as concentrações individuais de potássio (K), urânio (U) e tório (Th) permitem inferir qual a contribuição de cada um dos elementos radioativos para o total da taxa de dosagem. Neste perfil a maior contribuição para a radiação gama total provém do potássio (Tot/K:  $R^2 = 0,82$ ), seguido do tório (Tot/th:  $R^2 = 0,56$ ), e em menor grau, pelo urânio (Tot/U:  $R^2 = 0,12$ ) (Fig.5.1).

No intervalo estudado as concentrações dos radioelementos (anexo I) variam entre 0,2 % e 1,8% (média,  $\bar{x} = 1,0\%$ ) para o K, entre 0,04 ppm a 2,4 ppm ( $\bar{x} 1,2$  ppm) para o U, e entre 0,06 ppm a 6,5 ppm para o Th ( $\bar{x} 2,4$ ).

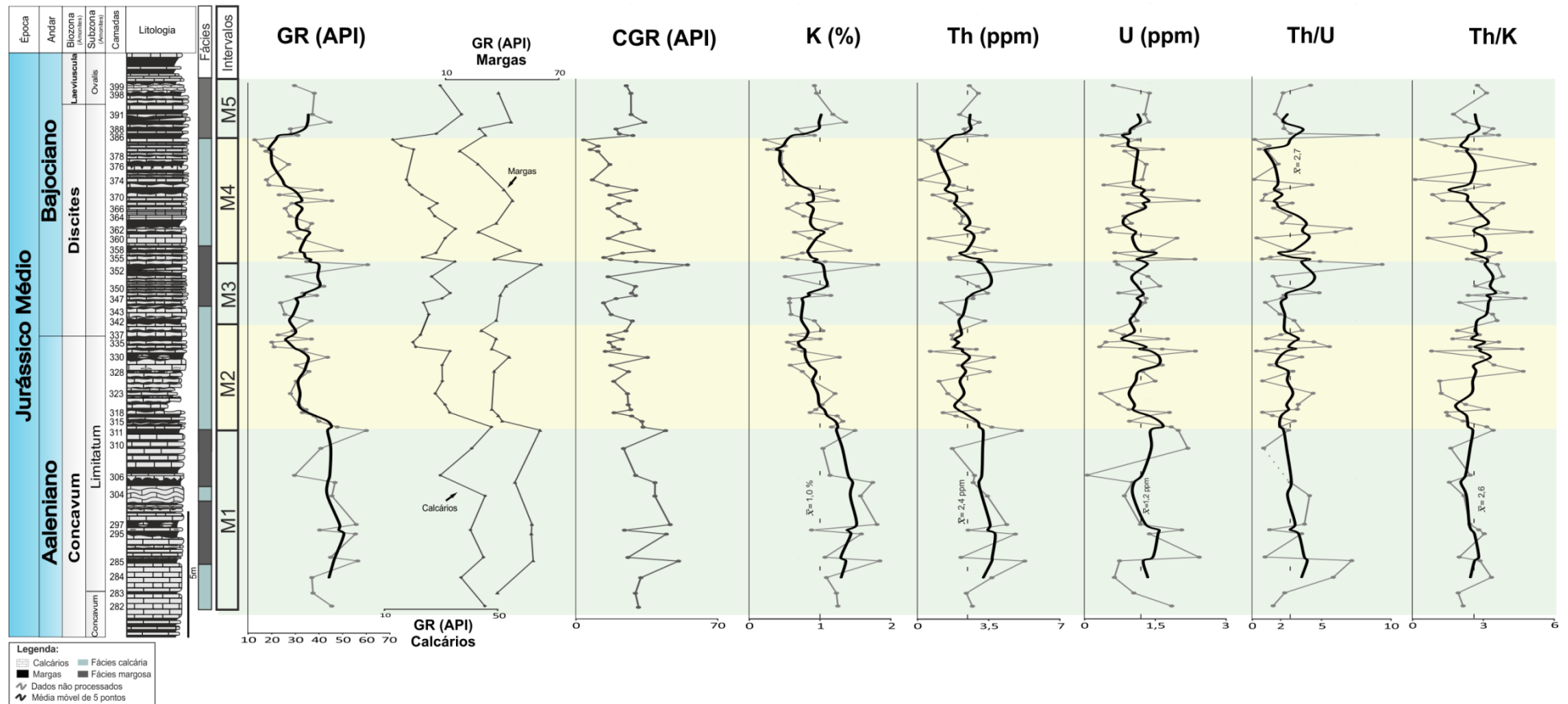
As concentrações de K e Th ao longo do perfil da Murtinheira mostram uma boa correlação ( $R^2 = 0,47$ ) (Fig. 5.3), sugerindo que os dois radioelementos variam quase proporcionalmente, uma vez que as tendências das respetivas curvas radiométricas são relativamente semelhantes. A correlação entre as concentrações de U e K é praticamente nula ( $R^2 = 0,002$ ), assim como entre o U e Th, que apresentam uma correlação negativa quase nula ( $R^2 = 0,03$ ), visto que o perfil radiométrico do U não mostra qualquer analogia com os perfis do K e do Th.

O perfil radiométrico de K e Th e o perfil radiométrico total de GR têm tendências similares, o que se deve ao facto destes serem os elementos que mais contribuem para a taxa de dosagem total da radiação gama.

O U apresenta uma distribuição vertical muito irregular e com concentrações relativamente baixas, sendo difícil a interpretação de possíveis tendências. Contudo, destaca-se um decréscimo generalizado dos valores dos três radioelementos desde o topo da Subzona Limitatum até ao topo da Biozona Discites.



**Figura 5.1** – Correlação entre a radiação gama total (nGy/h) e as concentrações de K (%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Murtinheira.  $R^2$  é o coeficiente de regressão linear (número de medições,  $n=69$ ).



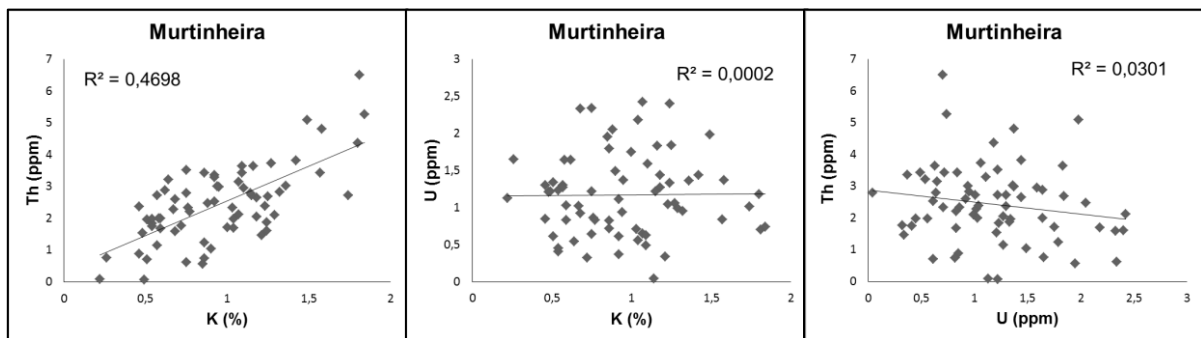
**Figura 5.2** – Variações da radiação gama total, da CGR e da espectrometria dos elementos radioativos, e da relação Th/U e Th/K no perfil da Murtinheira. A linha a tracejado em cada uma das curvas radiométricas marca a média ( $\bar{x}$ ) total calculada para todo o perfil.

Durante o intervalo M1 o K e o Th apresentam as maiores concentrações de toda a sucessão estudada (Tabela 5.1), que se mantêm relativamente constantes com médias de 1,4% e 3,3 ppm, respetivamente. Verifica-se uma maior tendência de decréscimo na curva radiométrica do K no topo deste intervalo contrariamente à do Th. Os valores de U são muito variáveis, ainda que ligeiramente maiores do que no restante perfil ( $\bar{x}$  1,3). A razão Th/K apresenta as taxas mais baixas ( $\bar{x}$  2,4) e menos variáveis ( $\sigma$  0,6) de todo o perfil. A relação Th/U apresenta taxas moderadas ( $\bar{x}$  3) que variam entre  $\sim$ 1 e  $\sim$ 7, com tendência ligeiramente decrescente ao longo deste intervalo. O ponto correspondente à camada M-306 no perfil de Th/U foi substituído por linha a tracejado, uma vez que representava um enorme desvio da curva (Th/U=69,8) devido ao baixo valor de U que se regista nesse nível (0,04 ppm) (que poderá estar associado a um erro de campo do aparelho) em detrimento do valor de Th (2,8 ppm).

No intervalo M2 as concentrações de K e Th diminuem consideravelmente até à base da Biozona Discites, concordante com o aumento da componente calcária. A razão Th/K torna-se mais oscilante, o que se reflete no aumento do desvio padrão em relação à média (Tabela 5.1), no entanto, sem mudanças significativas na tendência da curva. Em contraste, o U apresenta um ligeiro aumento até ao topo deste intervalo. Assim, a razão Th/U diminui ligeiramente (entre  $\sim$ 0,3 a  $\sim$ 6) apresentando um maior número de taxas com valor inferior a 2.

Com o aumento da componente margosa no intervalo M3 regista-se um aumento gradual na tendência da curva de K e Th, com uma excursão positiva localizada na camada M-352. A razão Th/K aumenta ligeiramente até a base do intervalo M4, uma vez que o aumento das concentrações de Th é mais significativo do que no caso do K (Tabela 5.1). Regista-se um notável aumento da relação Th/U, uma vez que as concentrações de U se mantêm uniformes, apresentando um pico máximo ( $\sim$ 9ppm) na camada M-352.

A tendência das curvas radiométricas de K e Th diminui gradualmente no intervalo M4 ( $\bar{x}$  0,7 e 1,8, respetivamente). As taxas de Th/K tornam-se bastante oscilantes (aumento



**Figura 5.3** – Correlação entre as concentrações dos elementos radioativos de K (%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Murtinheira.  $R^2$  é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=69).



do desvio padrão em relação à média,  $\sigma$  1,4;  $\bar{x}$  2,5) mas, tal como no intervalo M3, não evidenciam mudanças significativas na tendência da curva. O perfil de Th/U apresenta uma tendência decrescente. Os valores próximos de zero nas curvas de Th/K e Th/U neste intervalo podem estar relacionados com a quase ausência de Th nestes níveis, não sendo de descartar a ocorrência de erro de campo do espectrómetro; no entanto as fácies tornam-se mais calcárias podendo justificar uma depleção em Th.

O intervalo M5 é caracterizado por um forte aumento das concentrações de K ( $\bar{x}$  1,0) e Th ( $\bar{x}$  2,6) e da relação Th/U.

**Tabela 5.1** – Média ( $\bar{x}$ ) das concentrações de K, U, Th e das taxas de Th/U, Th/K e U/K, e respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ) para os diferentes intervalos de variação da radiação gama no perfil da Murtinheira.

Intervalo	K (%) ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	U (ppm) ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	Th (ppm) ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	Th/U ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	Th/K ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	U/K ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )
<b>M5</b>	1,0/0,2	1,0/0,4	2,6/0,5	3,5/2,6	2,9/0,7	1,0/0,4
<b>M4</b>	0,7/0,3	1,1/0,6	1,8/1,1	2,2/1,9	2,5/1,4	1,9/1,5
<b>M3</b>	0,9/0,4	1,1/0,3	3,0/1,5	3,1/2,6	3,4/0,9	1,5/0,7
<b>M2</b>	0,9/0,3	1,2/0,6	2,2/0,9	2,5/1,5	2,5/1,1	1,4/0,8
<b>M1</b>	1,4/0,3	1,3/0,7	3,3/1,2	3,0/2,0	2,4/0,6	1,1/0,8
<b>Total perfil</b>	1,0/0,4	1,2/0,6	2,4/1,2	2,7/2,0	2,6/1,1	1,5/1,1

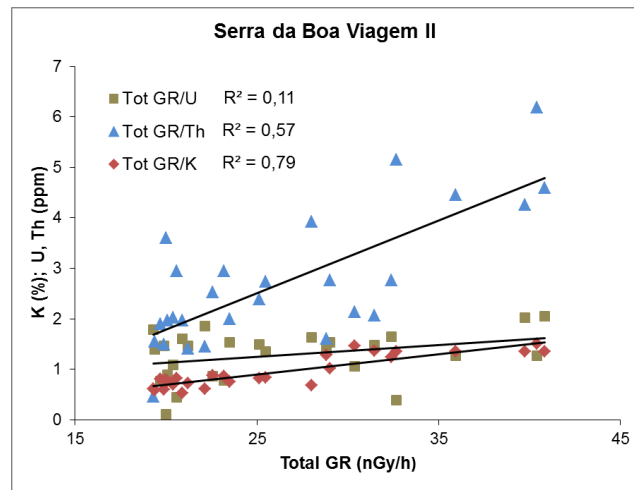
## 5.2. Variações da Radiação Gama no perfil da Serra da Boa Viagem II

A intensidade da radiação gama no perfil da Serra da Boa Viagem II, tal como no perfil da Murtinheira, apresenta valores baixos a moderados, entre 26 a 59 API, embora neste perfil os valores mínimos tendam a ser mais elevados. No perfil de GR total (Fig. 5.5) verifica-se uma diminuição do fundo radiométrico desde a base até ao topo; observações conjuntas com a CGR permitem destacar três intervalos com diferentes tendências:

- SBVII 1 – diminuição do fundo radiométrico desde o topo da Subzona Concavum até à base da Biozona Discites (camada SBVII-147), uma vez que se verifica um aumento do conteúdo em calcário;
- SBVII 2 – a partir da camada SBVII-155 (Biozona Discites) regista-se um aumento dos valores de GR, com um máximo dos valores de CGR na camada SBVII -168, concordante com o aumento da componente margosa;
- SBVII 3 – para o topo do perfil (topo da parte inferior da Biozona Discites) regista-se novamente uma ligeira diminuição do fundo radiométrico, concordante com o aumento da natureza calcária das fácies.

Neste perfil foram recolhidos menos dados do que no perfil da Murtinheira, dado que as condições de campo são mais adversas, e a espessuras das camadas de marga são muito finas, principalmente na passagem Aaleniano - Bajociano (0,05m), o que fez com que nesse limite se recolhessem mais dados em calcários do que em margas.

Em relação aos dados de espetrometria, observa-se que o K é o elemento com a maior contribuição para a radiação gama total ( $R^2 = 0,79$ ), seguido do Th ( $R^2 = 0,57$ ), e por último o U ( $R^2 = 0,11$ ) (Fig. 5.4). Para o intervalo amostrado neste perfil as concentrações individuais dos radioelementos são um pouco mais baixas do que no perfil da Murtinheira, variando entre 0,5 % e 1,5 % ( $\bar{x}$  0,95 %) para o K, entre 0,1 ppm a 2,1 ppm ( $\bar{x}$  1,3 ppm) para o U, e entre 0,46 ppm a 6,2 ppm para o Th ( $\bar{x}$  2,7 ppm).



**Figura 5.4** – Correlação entre a radiação gama total (nGy/h) e as concentrações de K(%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Serra da Boa Viagem II.  $R^2$  é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=27).

A correlação entre os radioelementos neste perfil apresenta semelhanças com os resultados obtidos no perfil da Murtinheira, mostrando uma boa correlação entre o K e o Th ( $R^2 = 0,39$ ) e a quase inexistência de correlação entre o U e K ( $R^2 = 0,0006$ ) e entre o Th e U ( $R^2 = 0,03$ ) (Fig.5.6).

As curvas de K e Th e a curva total de GR mostram tendências semelhantes, visto que são os radioelementos que mais contribuem para a taxa de dosagem total da radiação gama e que exibem uma boa correlação entre eles.

O U apresenta uma distribuição vertical muito irregular e com concentrações relativamente baixas, visto que não indica qualquer correlação com os restantes radioelementos

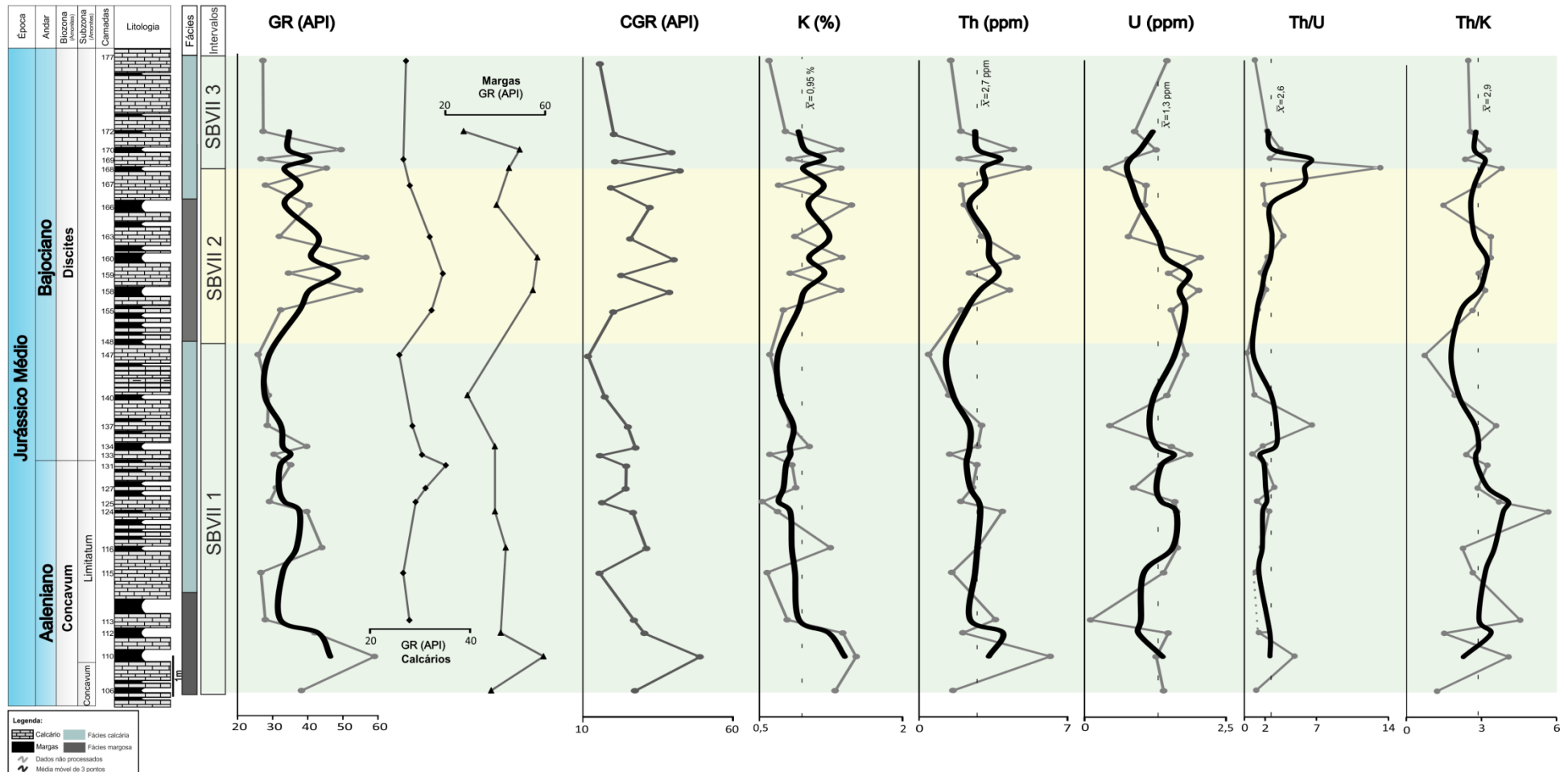
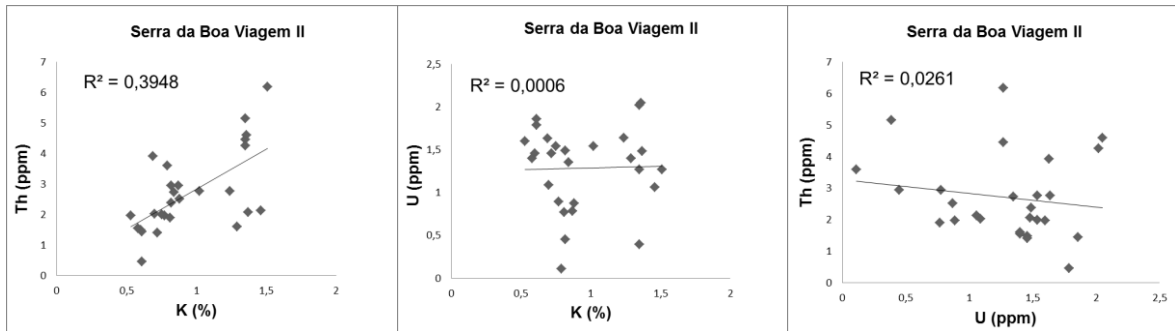


Figura 5.5 – Variações da radiação gama total, da CGR, da espectrometria dos elementos radioativos, e da relação Th/U e Th/K no perfil da Serra da Boa Viagem. A linha a tracejada em cada uma das curvas radiométricas marca a média ( $\bar{x}$ ) total calculada para todo o perfil.



**Figura 5.6** – Correlação entre as concentrações dos elementos radioativos de K(%), U (ppm) e Th (ppm) para o perfil da Serra da Boa Viagem II.  $R^2$  é o coeficiente de regressão linear (número de medições, n=27).

A base do intervalo SBVII 1 apresenta as maiores concentrações de K e Th deste perfil, que decrescem gradualmente até ao topo da Subzona Limitatum, e diminuem bruscamente na base da Biozona Discites. A razão Th/K decresce ligeiramente até ao topo deste intervalo, uma vez que o decréscimo das concentrações de Th é mais acentuado do que no caso do K. A tendência da curva radiométrica do U é muito variável, não se verificando tendências evidentes neste intervalo. Depreciando os dois picos isolados, um na base e outro perto do topo, as taxas de Th/U assumem pouca variação (entre ~1 e ~3), diminuindo até à base do intervalo SBVII 2. O ponto correspondente à camada SBVII-113 no perfil de Th/U foi substituído por linha a tracejado, uma vez que provocava um enorme desvio da curva (Th/U ~32) devido ao baixo valor de urânio que se regista nesse nível (0,11ppm) face ao valor de Th.

No intervalo SBVII 2 as concentrações de K e Th aumentam bruscamente, enquanto as concentrações de U se mantém ligeiramente altas (tabela 5.2). A relação Th/K apresenta taxas quase uniformes ( $\bar{x}$  3,0;  $\sigma$  0,7). Verifica-se um grande aumento na tendência da razão Th/U, com taxas que variam entre ~2 e ~4, até alcançar um pico (~13) na camada SBVII-168. A tendência das curvas radiométricas de K, Th e Th/U é ligeiramente decrescente durante o intervalo SBVII 3, ao passo que as concentrações de U aumentam ligeiramente.

**Tabela 5.2** – Média ( $\bar{x}$ ) das concentrações de K, U, Th e das taxas de Th/U, Th/K e U/K, e respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ) para os diferentes intervalos de variação da radiação gama no perfil da Serra da Boa Viagem II.

Intervalo	K (%) ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	U (ppm) ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	Th (ppm) ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	Th/U ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	Th/K ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )	U/K ( $\bar{x}$ / $\sigma$ )
SBVII 3	0,9/0,3	1,1/0,3	2,5/1,3	2,3/1,0	2,7/0,4	1,4/0,7
SBVII 2	1,1/0,3	1,3/0,6	3,2/1,3	3,5/	3,0/0,7	1,3/0,6
SBVII 1	0,9/0,3	1,3/0,5	2,5/1,4	2,1/1,7	2,9/1,3	1,7/0,9
Total perfil	1/0,3	1,3/0,5	2,7/1,3	2,6/2,6	2,9/1,0	1,5/0,8

Para evitar interpretações erradas nas tendências da curva de GR foram separados os níveis de calcários e os de margas nos dois perfis em estudo, dado que, por vezes, as condições do campo ou a pequena espessura das camadas não permitiam uma amostragem sistemática das intercalações margas - calcário. Comparando os perfis de GR dos calcários e das margas com o perfil de GR total reconhecem-se as mesmas tendências, mesmo em zonas dos perfis de afloramento onde só se conseguiram obter medições num desses tipos litológicos.

Algum cuidado deve ser tomado ao analisar com pormenor as variações nos dois perfis, pois os dados relativos a algumas camadas amostradas de espessura muito fina podem ter sido influenciados pelos das camadas adjacentes, resultando num conjunto de dados suavizado (Parkinson, 1996).

### 5.3. Dados analíticos do cortejo argiloso

As amostras para análise do conteúdo argiloso do perfil da Murtinheira foram selecionadas entre calcários (M-304, M-327, M-333, M-342, M-387) e margas (M-295, M-336, M-338, M-350, M-352, M-361, M-285, M-311, M-330, M-363).

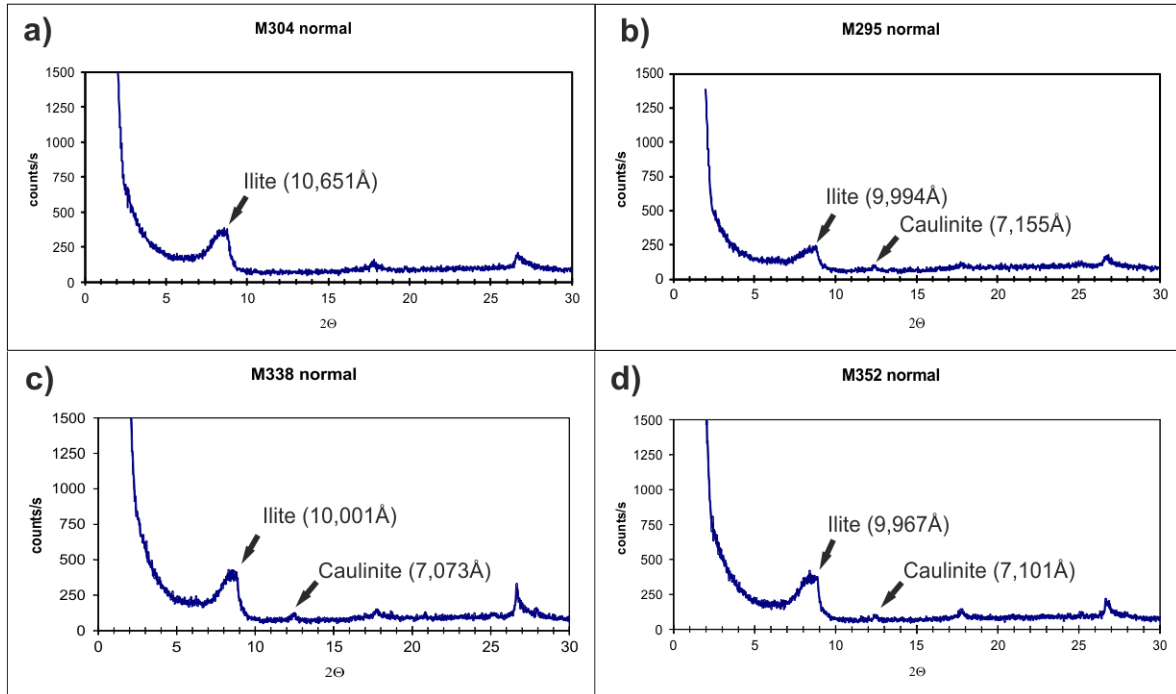
A análise das várias amostras mostra que na fração de argila se reconhece a associação de minerais argilosos illite + caulinite e illite + clorite, que é maioritariamente constituída por illite com vestígios de caulinite ou de clorite, ou apenas a presença de illite. A identificação das associações de minerais de argila para cada uma das amostras encontra-se na tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Identificação das associações de minerais de argila em amostras do perfil da Murtinheira.

Amostra	Minerais	Amostra	Minerais
<b>M-285</b>	illite	<b>M-338</b>	illite + vestígios de Caulinite
<b>M-295</b>	illite + vestígios de Caulinite	<b>M-342</b>	illite (~95%) + Clorite (~5 %)
<b>M-304</b>	illite	<b>M-350</b>	illite
<b>M-311</b>	illite (~95%) + Clorite (~5%)	<b>M-352</b>	illite + vestígios de Caulinite
<b>M-327</b>	illite + vestígios de Caulinite	<b>M-361</b>	illite + vestígios de Caulinite
<b>M-330</b>	illite	<b>M-363</b>	illite (90 a 95%) + Clorite (5 a 10 %)
<b>M-333</b>	illite + vestígios de Caulinite	<b>M-387</b>	illite
<b>M-336</b>	illite + vestígios de Caulinite		

Nos difratogramas de raios X (Fig. 5.7) a identificação da illite é efetuada no pico a 10 Å no diagrama “normal”, a caulinite no pico a 7Å no diagrama “normal”, e a clorite no pico a 14 Å no diagrama “aquecido”. Não se procedeu à semi-quantificação das argilas dado que o

pico da caulinite apresenta em todas as amostras uma intensidade muito baixa, o que resultaria em valores quase nulos, uma vez que, ao contrário da illite, o cálculo é feito apenas com metade da área do pico (Pena dos Reis, 1983).



**Figura 5.7** – Identificação dos minerais de argila no diagrama “normal” dos difratogramas de raios X de algumas amostras do perfil da Murтинheira. a) amostra M-304; b) amostra M-295; c) amostra M-338; d) amostra M352.

## ***Capítulo 6 – Discussão dos resultados obtidos***

## 6. Discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo analisam-se os resultados obtidos para o intervalo Aaleniano - Bajociano dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem no que diz respeito à radiação total (em 6.1) e à espectrometria dos radioelementos (em 6.2), bem como a correlação estabelecida entre os dois perfis com base naqueles (em 6.3). Em 6.4 analisa-se a relação entre os ciclos de variação dos radioelementos potássio e tório e o aporte de terrígenos para a bacia, e em 6.5 apresenta-se a organização sequencial para o intervalo de tempo estudado com base nos parâmetros de variação da radiação gama. Em 6.6 estabelece-se uma correlação entre os perfis estudados em afloramento e um furo de sondagem em *offshore*, e em 6.7 inferem-se as condições paleoclimáticas e paleoambientais que terão condicionado a deposição dos sedimentos registados nos dois perfis. Por fim, relacionam-se as interpretações de espectrometria de radiação gama e da natureza do cortejo argiloso com bioeventos já estabelecidos para a Bacia para a passagem Aaleniano-Bajociano, em particular os que se referem a foraminíferos bentónicos (em 6.8).

### 6.1. Perfil de radiação total

No perfil da Murtinheira e no perfil da Serra da Boa Viagem II os índices de radioatividade moderados a baixos do perfil GR total são característicos destas séries hemipelágicas predominantemente carbonatadas (Catuneanu, 2006).

O perfil de GR total apresenta um padrão irregular, típico destas sequências constituídas por intercalações rítmicas de margas e calcários (Fig. 5.2 e 5.5). Verifica-se que nos dois perfis o aumento dos valores de GR total ocorre nos níveis tendencialmente margosos, enquanto a diminuição dos valores de GR total é registada nos intervalos com maior componente calcária, uma vez que as tendências dos perfis de GR total estão relacionadas com a distribuição da argilosidade na sucessão (Rider, 1999).

### 6.2 – Perfis de potássio, urânio e tório

As concentrações médias de potássio, urânio e tório, no perfil da Murtinheira e no perfil da Serra da Boa Viagem II apresentam valores bastante semelhantes, possivelmente devido à proximidade entre os perfis (cerca de 6 km). As concentrações moderadas de K e Th, e as baixas concentrações de U, a par do padrão irregular das respetivas curvas radiométricas, fundamentam as observações referidas anteriormente para o perfil de GR total, refletindo a natureza margo - calcária destas litologias (Fig. 5.2 e 5.5).

A correlação entre os valores das concentrações do K, U e Th e o GR total (nGy/h), revela que nos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II a contribuição individual de cada um dos radioelementos para o valor do GR total é bastante semelhante, sendo que



provém primeiramente do K, seguido do Th e em menor grau do U (Figs. 5.1 e 5.4).

As concentrações de K e Th em carbonatos estão normalmente relacionadas com a presença de componentes siliciclásticos de granulometria fina (ilite e outros minerais de argila, feldspatos potássicos ou micas) (Adams e Weaver, 1958; Rider, 1999; Ehrenberg e Svana, 2001). A boa correlação que estes dois radioelementos apresentam nos dois perfis (Figs. 5.3 e 5.6) é o reflexo da adição de componentes siliciclásticos de granulometria fina, com características radioativas, à sequência carbonatada.

Nos dois perfis em estudo é possível observar que o aumento dos valores radiométricos de K e Th está associado aos intervalos de maior conteúdo argiloso (M1, M3, M5, base SBVII 1 e SBVII 2), verificando-se que as concentrações destes elementos são fortemente dependentes das fácies, tal como preconizado por Bábek e outros (2013). Segundo Koptíková e outros (2010), o aumento nas concentrações de K e Th coincide com a diminuição do conteúdo de carbonato de cálcio.

O U varia independentemente dos restantes elementos, uma vez que não apresenta correlação com o K e o Th (Figs. 5.3 e 5.7), sugerindo diferentes naturezas entre o U e o conjunto K + Th (Vacek *et al.*, 2010). O reduzido conteúdo de U poderá ser o resultado da presença de iões de carbonato que impossibilitaram a precipitação deste radioelemento (Fertl, 1979).

A tendência da curva radiométrica do U é muito heterogénea ao longo dos dois perfis, não sendo possível qualquer correlação com os intervalos de fácies margosas ou calcárias, uma vez que a sua distribuição nos sedimentos é bastante diversa, podendo ocorrer associado à fração argilosa (nas ilites), ou precipitado nos sedimentos associado à presença de carbono orgânico ou de fosfatos. Portanto, este elemento não mostra qualquer dependência das fácies (Rider, 1999; Raddadi *et al.*, 2005). Alguns valores de U podem corresponder a uma concentração pós sedimentar, visto que este radioelemento é muito móvel durante a diagénese (Rider, 1999).

### **6.3. Correlação entre os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II**

Os dois perfis situam-se relativamente próximos um do outro (6km), e registam uma sedimentação em ambiente distal da rampa carbonatada. O perfil da Murtinheira abarca toda a extensão da Biozona Discites, que apresenta espessura de cerca de 9 metros; o perfil da Serra da Boa Viagem II compreende apenas a parte inferior desta biozona, que exhibe uma espessura de cerca de 10 metros.

Uma vez que a curva de GR total totaliza as concentrações do K, Th e U, a utilização da CGR (“Clay” Gamma Ray) torna-se mais viável quando se pretende fazer correlações

entre perfis, utilizando-se, para o efeito, apenas os valores das concentrações de K e Th como indicadores do conteúdo argiloso, visto que as concentrações de U não dependem das fácies.

Correlacionando os dois perfis em estudo verificam-se as mesmas tendências entre as curvas de CGR ao longo da Subzona Limitatum e da Biozona Discites (Fig. 6.1). Portanto, a parte inferior da Subzona Limitatum (intervalo M1 e base do intervalo SBVII 1) apresenta o maior conteúdo argiloso nos dois perfis, que diminui marcadamente até à base da Biozona Discites (intervalo M2 e parte média a superior do intervalo SBVII 1).

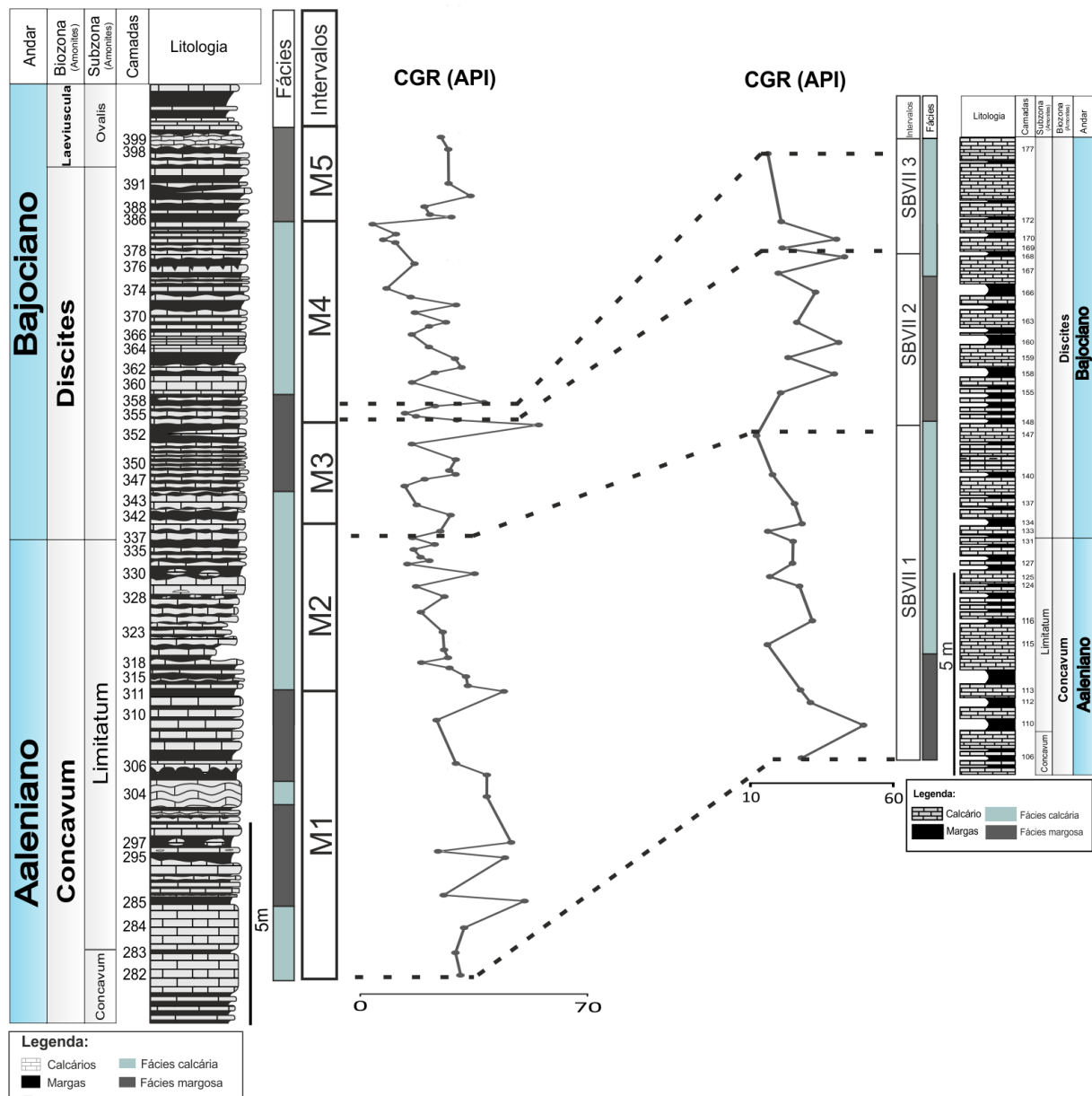


Figura 6.1 – Correlação entre os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II com base nas tendências da curva CGR (“Clay” Gamma Ray), definindo os intervalos de maior ou menor argiliosidade.

A parte inferior da Biozona Discites é caracterizada por um novo aumento no conteúdo argiloso (intervalos M3 e SBVII 2), até atingir um valor máximo de argilosidade na camada M-352 do perfil da Murtinheira e na camada SBVII-168 do perfil da Serra da Boa Viagem II, o que permitiu a correlação do topo destes dois intervalos nestes dois níveis.

Tal como referido anteriormente, no perfil da Serra da Boa Viagem II apenas está representada a parte inferior da Biozona Discites; por conseguinte, o intervalo SBVII 3 correlaciona-se apenas com a base do intervalo M4 do perfil da Murtinheira, que registam novamente um decréscimo no conteúdo argiloso.

#### **6.4. Espectrometria de raios gama e o aporte de siliciclásticos**

Os ciclos de potássio e tório que se reconhecem nos dois perfis podem ser interpretados como o reflexo da diluição cíclica de terrígenos de granulometria fina nos carbonatos, como resultado de uma variação na produção de carbonato e/ou aporte de material siliciclástico para a bacia (Koptíková *et al.*, 2010).

O aumento das concentrações de K e Th nos intervalos M3 e SBVII 2 (base da Biozona Discites) e no intervalo M5 (topo da Biozona Discites - base da Biozona Laeviuscula) pode estar relacionado com um incremento do aporte de material terrígeno para a bacia, dado que estes intervalos estão associados a fácies margosas. Verifica-se um aumento claro na razão Th/U nestes intervalos, sugerindo uma maior influência de material siliciclástico, dado que o Th apresenta uma maior afinidade com material detrítico do que o U (Adams e Weaver, 1958).

Por conseguinte, o decréscimo das concentrações de K e Th e da razão Th/U na parte superior da Subzona Limitatum (intervalo M2 e SBVII 1) e na parte média a superior da Biozona Discites (intervalo M4) pode estar relacionado com um fornecimento reduzido de material terrígeno para a bacia (Babek *et al.*, 2010).

#### **6.5. Sequências deposicionais**

Uma das aplicações da espectrometria de raios gama consiste na sua utilização na estratigrafia de sequências e determinação de ciclos transgressivos e regressivos.

Num ambiente distal, a tendência de decréscimo do perfil de GR total está normalmente relacionada com uma mudança das fácies em direção à bacia (progradação), enquanto a tendência de aumento do perfil de GR total está relacionada com a mudança das fácies em direção ao continente (regressão) (Rider, 1999; Pawellek e Aigner, 2003; Catuneanu, 2006).

O mesmo se verifica nos ciclos de diminuição e aumento das curvas radiométricas de potássio e tório, que podem estar relacionados com mudanças de fácies em direção à

bacia ou em direção ao continente, respetivamente, muitas vezes interpretados como ciclos de progradação e retrogradação (Koptíková *et al.*, 2010). Ehrenberg e Svana (2001) consideram que valores elevados nas curvas de K e Th podem ser interpretados como produtos de uma transgressão, que resultam numa maior concentração destes elementos devido ao maior aporte de aluminossilicatos fornecidos pelo continente.

Considerando o pequeno intervalo estudado neste trabalho, as interpretações deposicionais efetuadas para estes perfis são apenas genéricas.

No perfil da Murtinheira e no perfil da Serra da Boa Viagem II o decréscimo nas concentrações de K e Th coincidentes com a tendência decrescente da curva de GR total que se verifica até à base da Biozona Discites (intervalo M2 e SBVII 1) sugere uma tendência de “raseamento” (*shallowing-upward*), com mudança das fácies carbonatadas para a bacia, associada a um aumento do fornecimento de carbonato (Wright, 1986; Koptíková *et al.*, 2010). As baixas taxas de Th/U nestes intervalos corroboram a interpretação anterior, visto que as baixas concentrações de Th em relação às do U sugerem um ambiente com pouca influência de material siliciclástico.

A parte inferior da Biozona Discites (intervalos M3 e SBVII 2) nos dois perfis está associada a uma tendência crescente da curva GR total, a par do marcado aumento nas concentrações de K e Th, e conseqüentemente na curva de CGR, apontando para um máximo na argilosidade, e sugerindo uma tendência de aprofundamento (*deepening-upward*) com mudança da fácies para o continente. A razão Th/U aumenta bastante nestes intervalos, com um valor máximo nos mesmos níveis de K e Th, sugerindo um máximo nas condições de acomodação (Ehrenberg e Svana., 2001) e um aprofundamento da fácies.

Desde a parte intermédia de Biozona Discites até a Biozona Laeviuscula destaca-se outro ciclo com tendência para “raseamento” e aprofundamento das fácies; verifica-se o decréscimo dos valores de GR total e a diminuição das concentrações de K, Th e Th/U até à parte superior da Biozona Discites (M4 e SBVII3), seguido de um abrupto aumento da curva de GR total, das concentrações de K e Th e da razão Th/U no intervalo M5.

Não se reconhecem ciclos de estratigrafia de sequências para o Aaleniano - Bajociano na Bacia Lusitânica, porém García-Frank e outros (2008) estabeleceram ciclos de estratigrafia de sequências no noroeste da Bacia Ibérica (Espanha) para o Aaleniano-Bajociano, cujas tendências consideram terem sido controladas por tectónica regional (*rifting* do sistema Atlântico central-Tétis Alpino), com episódios de reativação de falhas, um deles reconhecido na Biozona Discites.

Os autores consideram que os sistemas deposicionais progradantes das bacias do NW da Europa atingiram um máximo durante o Aaleniano superior - Bajociano inferior. Duas

dessas sequências transgressivo-regressivas foram identificadas nas Biozona Concavum e Discites (Fig. 6.2). Dado que, no intervalo Aaleniano - Bajociano da Bacia Lusitânica, o aumento de declive da rampa carbonatada foi controlado por tectónica regional, as tendências deposicionais de aprofundamento e “raseamento” inferidas neste trabalho para os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II podem ser correlacionados com as sequências transgressivo-regressivas estabelecida na Bacia Ibérica.

### Ciclos

Bacia Ibérica				NW Europa	
Aurell et al. (2003) 2ª Ordem	2ª Ordem 6-12 Ma 3ª Ordem 1-5 Ma Gómez & Goy (2005) Gómez & Fernández-López (2004)	2ª Ordem 3-30 Ma Cameros	Garcia-Frank et al. (2008) 3ª Ordem 0.5-3Ma Demanda, San Leonardo e Madero-Moncayo	Jacquin et al. (1988) 3ª Ordem	Divisões Geocronológicas
				Bj1 Aa2 Aa1 To7	B Aalenian T Laeviuscula Discites Concavum Bradfordensis Murchisonae Opalinum Aalensis

**Figura 6.2** – Sequências transgressivo-regressivas estabelecidas para alguns perfis da Bacia Ibérica. O retângulo a vermelho corresponde a ciclos de 3ª ordem estabelecidos nos perfis da Demanda, San Leonardo e Madero-Moncayo, que podem ser correlacionados com as sequências de “raseamento”/aprofundamento das fácies reconhecidas no presente trabalho entre as Biozonas Concavum e Discites (adaptado de Garcia-Frank et al., 2008).

### 6.6. Correlação com furo de sondagem

A história da exploração de petróleo em Portugal remonta à década de 30 no século XX. Na Bacia Lusitânica já foram perfurados 102 poços em *onshore* e *offshore*, dos quais 57 são anteriores ao ano de 1963, sendo que 46 são furos de baixa profundidade (< 600 m) e 47 não alcançaram o Jurássico Médio (Uphoff, 2005).

As sondagens em *offshore* Sardinha 13C-1, Moreia 1 e Dourada 1-C apresentam localização geográfica próxima das dos afloramentos estudados neste trabalho; no entanto, devido ao pequeno intervalo em estudo (topo do Aaleniano – base do Bajociano), apenas foi utilizada a sondagem Sardinha 13C-1, uma vez que é a única que assinala este limite entre os andares.

O furo de sondagem Sardinha 13 C-1 foi o primeiro poço perfurado no *offshore* português realizado pela sociedade Shell Prospex/Sacorex em 1974 e situa-se a sudoeste da Figueira da Foz. O objetivo da sondagem seria o estudo da sequência pós-sal, em

particular as unidades do Jurássico superior e Cretácico inferior. Porém, foram também investigadas as sequências do pré-sal.

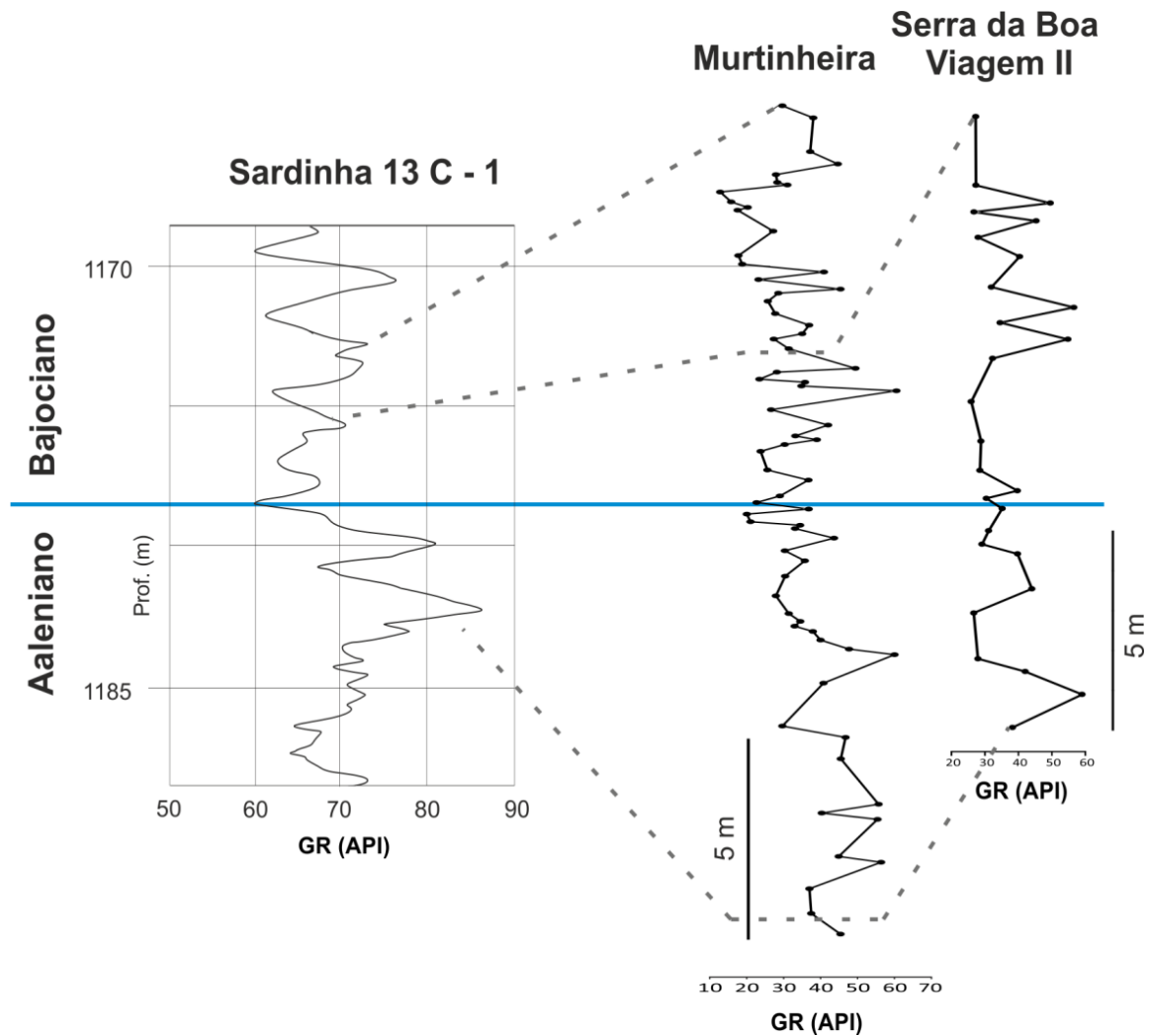
A sondagem apenas apresenta dados relativos ao perfil de radiação gama total (em API); posto isto, ela foi apenas correlacionada com o perfil de GR total obtido em campo nos dois afloramentos analisados (Fig. 6.3).

Na diagrafia foi selecionado o intervalo 1170 – 1185 m por incluir o limite entre os andares Aaleniano - Bajociano, definido aproximadamente aos 1178 m. Este intervalo da sondagem exhibe um padrão irregular (Catuneanu, 2006), tal como os perfis de GR em afloramento. Foi tido em conta o facto de que nesta sondagem a espessura do Bajociano inferior apresentar apenas cerca de 38 m, e os perfis em estudo, apenas abarcarem a base deste intervalo.

Para melhor correlação entre os perfis e a sondagem, os dados micropaleontológicos poderiam auxiliar na definição dos limites inferiores e superiores das biozonas, mas na sondagem apenas se refere a ocorrência de representantes do género *Lenticulina* sp. e da espécie *Lenticulina quenstedti quenstedti*. O primeiro táxone tem uma distribuição estratigráfica que abarca todo o Jurássico; o segundo estende-se a todo o Jurássico médio. Em conclusão, os dados micropaleontológicos não foram de grande relevância para o exercício de correlação pretendido.

Assim, inicialmente fez-se coincidir o limite Aaleniano - Bajociano da diagrafia com o dos perfis de GR reconhecidos em afloramento. Tendo em conta as tendências dos dados de GR total obtidos em afloramento, verificou-se que o intervalo com os menores valores de GR, correspondente ao limite Aaleniano - Bajociano nos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II coincidem com os de menores valores da diagrafia.

No intervalo 1183 m a 1178 m, a sondagem exhibe uma tendência de diminuição dos valores de GR total (89 a 68 API), o que permitiu a correlação com os dados de campo que exibem a mesma tendência no topo do Aaleniano. Tal como se verifica nos dados de campo, no intervalo 1173 a 1178 m a sondagem apresenta um ciclo de aumento e diminuição dos valores de GR total (60 a 72 API), embora os valores neste intervalo sejam mais baixos do que os do que se registam no Aaleniano superior.



**Figura 6.3** – Correlação entre os perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II e a sondagem Sardinha 13 C-1.

### 6.7. Evidências paleoambientais e paleoclimáticas

Em estudos de paleoambientes é frequente a utilização da técnica de espectrometria de radiação gama na caracterização de condições deposicionais oxidantes ou redutoras. Numa primeira abordagem, as observações litológicas no campo e os dados paleontológicos e micropaleontológicos dos perfis em estudo no presente trabalho permitem inferir ambientes deposicionais bem oxigenados (Henriques, 1992; Canales e Henriques, 2008; Canales e Henriques, 2013; Silva *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015).

Geralmente as altas taxas na razão Tório/Urânio ( $>7$ ) são consideradas como o reflexo de condições deposicionais continentais inteiramente oxidantes (Adams e Weaver, 1958), enquanto as baixas taxas de Th/U ( $<3$ ) indicam condições deposicionais redutoras (Myers e Wignal, 1987).

Tendo em conta que os sedimentos detríticos apresentam maiores concentrações de Th do que os carbonatos, e que os cálculos de Myers e Wignal (1987) são apenas aplicados a *shales* marinhos, Bond e Zaton (2003) consideram que o valor de Th/U para carbonatos anóxicos é normalmente inferior a 1. A razão Th/U ao longo dos dois perfis varia normalmente entre 1 a 5, indicando a presença de sedimentos marinhos depositados em condições bem oxigenadas.

Tal como já foi referido anteriormente, os valores de Th/U maiores que 7 que se registam nos intervalos M3, M5 e SBVII 2 indicam uma grande influência de sedimentos oriundos do continente que foram transportados para a bacia. Alguns níveis apresentam valores de Th/U inferiores a 1, que provavelmente não resultam de condições redutoras, mas sim de uma depleção em Th, o que é típico de muitos carbonatos (Adams e Weaver, 1958).

A razão Th/K ao longo dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II é geralmente inferior a 4 (Tabelas 5.1 e 5.2). Através do diagrama de Rider (1999) acerca da distribuição de minerais de argila verifica-se que a ilite é o mineral de argila predominante nas sequências.

Em relação aos dados do cortejo argiloso, no perfil da Murtinheira verifica-se que as associações de minerais de argila são praticamente constituídas por ilite, confirmando os resultados inferidos através da razão Th/K. A razão Th/K apresenta taxas relativamente constantes ao longo do perfil, refletindo a ausência de mudanças nas associações mineralógicas (Ruffel e Worden, 2000). Tal facto é confirmado pelas análises do cortejo argiloso, uma vez que não se verificam mudanças nas associações mineralógicas no perfil da Murtinheira. Tendo em conta a similaridade nas médias e desvio padrão (Tabelas 5.1 e 5.2) da relação Th/K e a ausência de variações na tendência da respetiva curva entre os dois perfis, pode deduzir-se que associação de minerais de argila no perfil da SBVII poderá ser semelhante à do perfil da Murtinheira.

A predominância de ilite em todas as amostras estudadas e a não existência de diferentes tendências na curva de Th/K pode sugerir a ausência de mudanças climáticas na sucessão estudada, inferindo-se um clima menos húmido e geralmente menos quente do que aquele que seria de esperar no caso de uma associação constituída por caulinite (Ruffel e Worden, 2000).

O mesmo pode ser verificado através da comparação entre as curvas de variação da razão Th/K e do Th/U (Ghasemi-Nejad *et al.*, 2014) que apresentam diferentes comportamentos, sugerindo que não houve importantes mudanças nas taxas de meteorização do continente e, por conseguinte, o clima não terá sofrido alterações.



No entanto, as interpretações da razão Th/K devem ser feitas com prudência, uma vez que a diagénese pode provocar mudanças na distribuição de K (Rider, 1999).

### **6.8. Integração da análise da espectrometria de raios gama e do cortejo argiloso ao registo de bioeventos**

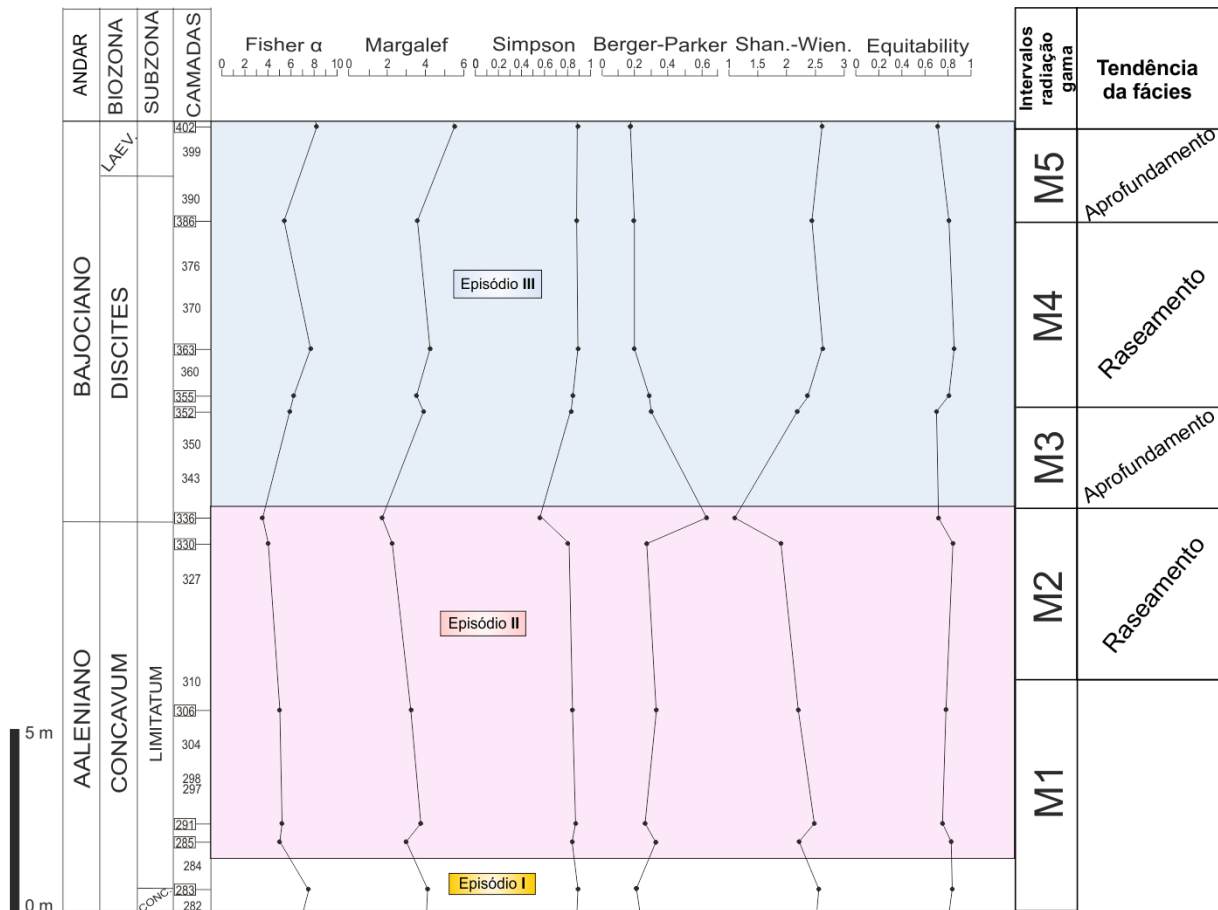
Os principais bioeventos reconhecidos no Aaleniano – Bajociano da Bacia Lusitânica representam mudanças na composição das associações de macrofósseis (amonoídeos, braquiópodes) e de nanofósseis (nanoplâncton calcário), bem como de microfósseis (foraminíferos bentónicos), já descritos no subcapítulo 3.3 do presente trabalho. Porém, neste subcapítulo será feita uma abordagem mais detalhada ao bioevento de empobrecimento das associações de foraminíferos bentónicos reconhecido, quer no perfil da Murtinheira quer no perfil da Serra da Boa Viagem II ao longo da passagem Aaleniano-Bajociano (Canales e Henriques, 2008, 2013; Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014; 2015).

Uma das principais aplicações da espectrometria de raios gama na análise de bioeventos, principalmente de empobrecimento das faunas, é no estudo de condições anóxicas ou disóxicas de ambientes de deposição (Wignall e Myers, 1988; Bond e Zaton, 2003). Os resultados obtidos neste trabalho relativamente à razão Th/U sugerem, para a passagem Aaleniano - Bajociano dos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II, condições paleoambientais bem oxigenadas. Estes resultados vão ao encontro dos resultados decorrentes das análises paleoecológicas realizadas por Canales e Henriques (2008, 2013), Silva (2013) e Silva *et al.*, (2014, 2015) à composição das associações de foraminíferos bentónicos registadas nos mesmos perfis e para o mesmo intervalo de tempo, que indicam que aquelas associações se terão desenvolvido em condições ambientais de salinidade normal e bem oxigenadas.

A predominância de ilite nas associações de minerais de argila das amostras estudadas no perfil da Murtinheira não sugere a existência de mudanças climáticas ao longo da sucessão, indicando um clima possivelmente árido e frio. Estes dados sugerem que as mudanças na composição das associações paleontológicas não foram provavelmente devidas a alterações climáticas no continente.

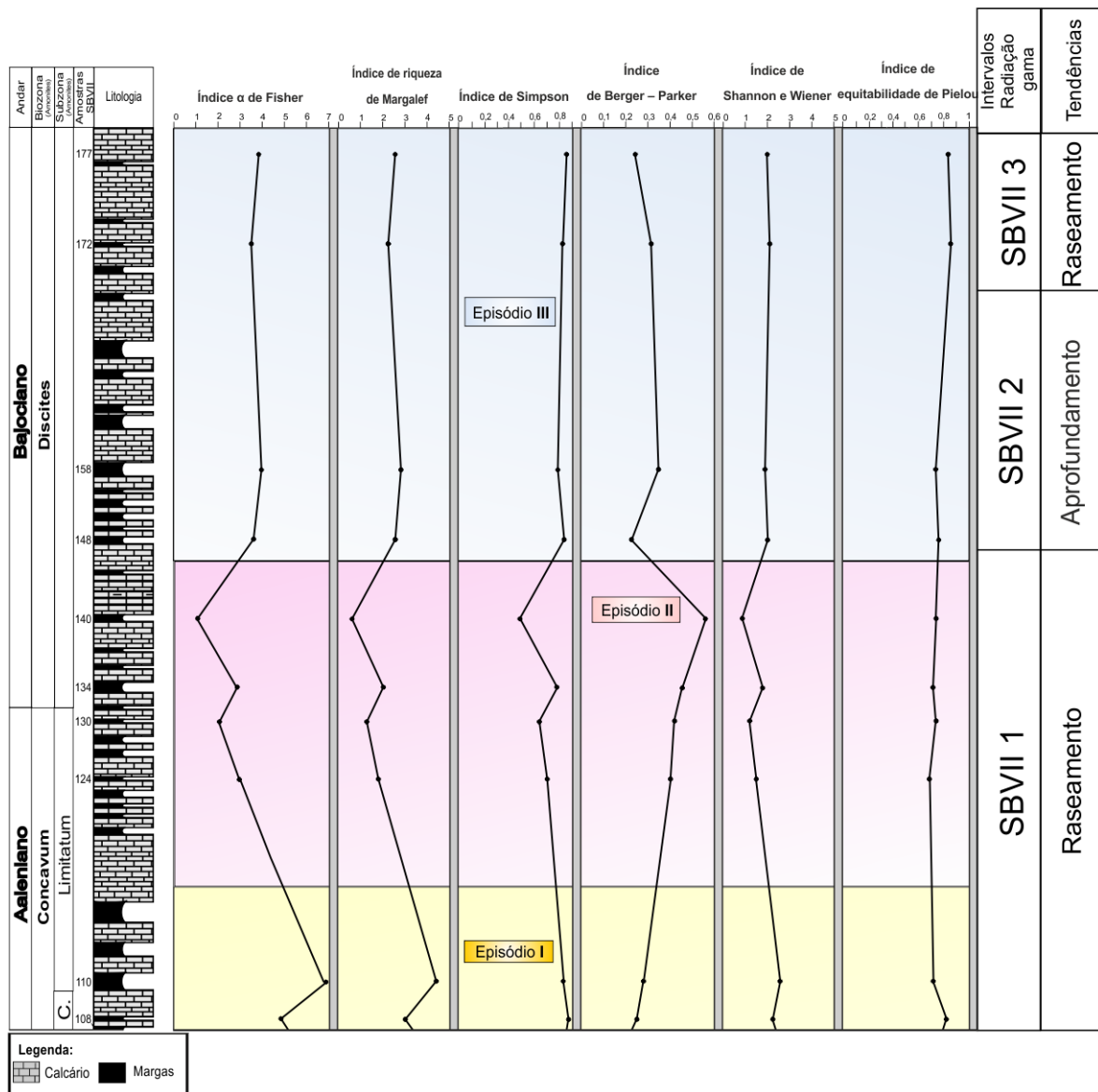
A interpretação das sequências deposicionais através da espectrometria de radiação gama apresenta semelhanças com os episódios de abundância e diversidade das associações de foraminíferos bentónicos registadas nos perfis da Murtinheira e da Serra da Boa Viagem II estudadas por Canales e Henriques (2008, 2013, 2015), por Silva (2013) e por Silva *et al.*, (2014, 2015).

No perfil da Murtinheira (Fig. 6.4), o intervalo M2 é caracterizado por uma tendência de “raseamento” das fácies, que coincide com o episódio de grande empobrecimento das associações de foraminíferos bentônicos da passagem Aaleniano – Bajociano (Episódio II). A tendência de aprofundamento das fácies no intervalo M3 é concordante com o episódio de renovação das faunas registado na parte inferior da Biozona Discites (Episódio III). Uma nova tendência de “raseamento” das fácies registada no intervalo M4 coincide com a diminuição na abundância e diversidade numa associação de foraminíferos registada no topo da Biozona Discites; a seguinte tendência de aprofundamento das fácies no intervalo M5 coincide com o aumento na diversidade e abundância de uma associação registada na Biozona Laeviuscula.



**Figura 6.4** – Análise paleoecológica das associações de foraminíferos bentônicos do perfil da Murtinheira e intervalos de variação da radiação gama (modificado de Canales e Henriques, 2015). Os índices utilizados na análise paleoecológica são: Índice  $\alpha$  de Fisher e Índice de Margalef, expressam a riqueza das espécies; Índice de Simpson, indica a probabilidade de, numa associação, dois indivíduos, pertencerem à mesma espécie; Índice de Berger – Parker, relaciona, dentro de uma associação, o número de indivíduos da espécie abundante com o número total de indivíduos; Índice de Shannon e Wiener, mede o grau de incerteza em prever a espécie de um exemplar escolhido aleatoriamente; o Índice de equitabilidade de Pielou, indica a dominância de espécies (Silva, 2013).

No perfil da Serra da Boa Viagem II (Fig. 6.5) a tendência de “raseamento” das fácies no intervalo SBVII 1 é concordante com o episódio II que registra um empobrecimento das faunas. A tendência de aprofundamento da fácies durante o intervalo SBVII 2 coincide com o episódio III que registra uma renovação nas faunas.



**Figura 6.5** - Análise paleoecológica das associações de foraminíferos bentônicos do perfil da Serra da Boa Viagem II e intervalos de variação da radiação gama (modificado de Silva, 2013; Silva *et al.*, 2014). Os índices utilizados na análise paleoecológica são: Índice  $\alpha$  de Fisher e Índice de Margalef, expressam a riqueza das espécies; Índice de Simpson, indica a probabilidade de, numa associação, dois indivíduos, pertencerem à mesma espécie; Índice de Berger – Parker, relaciona, dentro de uma associação, o número de indivíduos da espécie abundante com o número total de indivíduos; Índice de Shannon e Wiener, mede o grau de incerteza em prever a espécie de um exemplar escolhido aleatoriamente; o Índice de equitabilidade de Pielou, indica a dominância de espécies (Silva, 2013).

As sequências de “raseamento” das fácies nos intervalos M2, M4 e SBVII 1 representam uma diminuição no aporte de material siliciclástico, proveniente do continente, para o ambiente deposicional da bacia. O material detrítico fornecido pelo continente transporta os nutrientes essenciais ao desenvolvimento das faunas. Nestes intervalos a diminuição do fornecimento de detritos continentais provavelmente limitou a quantidade de nutrientes disponíveis que, por conseguinte, poderá ter conduzido ao empobrecimento das faunas.

Os intervalos M3 e M5 no perfil da Murtinheira e o intervalo SBVII 2 no perfil da Serra da Boa Viagem II representam uma sequência de aprofundamento das fácies e aumento no aporte de material siliciclástico para o ambiente deposicional da bacia. O maior aporte de detritos nestes intervalos poderá ter fornecido uma maior quantidade de nutrientes à bacia e provavelmente induziu um aumento na capacidade de carga do nicho ecológico, possibilitando a renovação das faunas.

Vários autores sugerem que os ciclos de aprofundamento e “raseamento” das fácies coincidem, respetivamente, com o aumento e diminuição das abundância e diversidade das faunas. Molina (2004) refere que os máximos de diversidade do grupo dos Fusulinídeos estão associados a extensas etapas de transgressão globais, enquanto a diminuição de diversidade deste grupo está relacionada com etapas regressivas, que reduzem a extensão das plataformas colonizadas por representantes deste grupo. Os bioeventos de extinção e renovação de amonites na passagem Aaleniano-Bajociano da Cordilheira Bética foram igualmente referidos por O’Dogherty e outros (2006) como o reflexo de regressões e transgressões, respetivamente. Sandoval e outros (2008) sugerem que, na Cordilheira Bética durante o Toarciano – Aaleniano, os bioeventos de extinção de amonites, radiolários e nanofósseis estão relacionados com intervalos regressivos, enquanto os intervalos transgressivos se correlacionam com bioeventos de radiação e alta produtividade biológica.

Gómez e outros (2009) sugerem que na Bacia Basco-Cantábrica, da Subzona Limitatum à Biozona Discites, terá ocorrido um aumento nas temperaturas da água do mar. O aumento em cerca de 2,5° C, inferido a partir da composição de isótopos de oxigénio das belemnites, terá sido a principal causa para o desaparecimento de cerca de 30% das espécies de foraminíferos e para um decréscimo significativo na composição das associações de amonóides.

Korte e outros (2015) sugerem que as temperaturas na água do mar teriam sido frias na maior parte das bacias europeias, durante o Jurássico médio na *Laurasian Seaway*, uma passagem marítima que conectava o Oceano Tétis equatorial ao Mar Boreal. Os autores registaram temperaturas de cerca de 12 a 13°C na passagem Aaleniano - Bajociano da

Bacia Lusitânica. Recentemente, os resultados de Arabas (2016) apoia igualmente a hipótese de um episódio de arrefecimento (*cooling event*) durante o Aaleniano - Bajociano. Os valores publicados nesse trabalho para a composição de isótopos de oxigénio das belemnites na região dos Cárpatos (Eslováquia e Polónia) sugerem um decréscimo nas temperaturas durante o Aaleniano - Bajociano, com temperaturas de cerca de 14 a 15,5 °C nas biozonas Concavum – Discites inferior. Os dados de isótopos de oxigénio de Korte e outros (2015) e Arabas (2016) corroboram os resultados obtidos no presente trabalho, que referem um clima mais frio, associado à composição maioritária de ilite nas associações de minerais de argila.

Canales e Henriques (2013) indicaram como causa provável para o empobrecimento das faunas na passagem Aaleniano - Bajociano possíveis perturbações no ciclo do carbono. Suchéras-Marx e outros (2012) identificaram no perfil da Murtinheira uma excursão positiva na composição dos isótopos de carbono dos carbonatos no Bajociano inferior, coincidente com um marcado aumento nos fluxos de nanofósseis calcários, que se regista, desde o topo do Aaleniano até ao Bajociano inferior. O mesmo tem sido igualmente apontado em outros estudos realizados em outras bacias da Placa Ibérica para o mesmo intervalo de tempo. Assim, O'Dogherty e outros (2006) identificaram uma excursão negativa no  $\delta^{13}\text{C}$  durante o Aaleniano superior - Bajociano inferior na Cordilheira Bética coincidente com uma grande extinção nas amonites. Sandoval e outros (2008) sugerem que, durante Aaleniano da Cordilheira Bética, os bioeventos de extinção das faunas de amonites, radiolários e nanofósseis estão igualmente relacionados com excursões negativas de  $\delta^{13}\text{C}$ , e os intervalos de excursões positivas de  $\delta^{13}\text{C}$  estão relacionados com bioeventos de radiação e aumento da produtividade biológica. Gomez e outros (2009) apontam igualmente para uma excursão negativa entre os limites das Biozonas Concavum e Discites na Bacia Basco-Cantrábrica.

O'Doguerty propõe que o aumento dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  durante a passagem Aaleniano - Bajociano da Cordilheira Bética teria sido o resultado de injeções de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, associadas a uma reorganização das placas tectónicas, o que terá acelerado a transferência de nutrientes dos continentes para o oceano, e aumentado a produção primária. Suchéras-Marx e outros (2015) constatam que a diversificação do género nanofóssil *Watznaueria* no perfil da Murtinheira, a partir da Biozona Discites, terá resultado de um evento de eutrofização relacionado com mudanças climáticas. Referem, ainda, que o aumento da capacidade de carga do nicho ecológico poderá ser devido a um aumento da oferta de nutrientes.

A interpretação de possíveis mudanças no clima para a passagem Aaleniano – Bajociano da Bacia Lusitânica resulta bastante discutível, pois a constante presença de ilite nas amostras estudadas para o perfil da Murtinheira, a par das constantes taxas de Th/K, não sugerem a existência de mudanças climáticas. Assim, o aporte de sedimentos detríticos e, conseqüentemente, de nutrientes poderá ter sido o resultado de instabilidade tectónica e do efeito combinado entre espaço de acomodação e sedimentos disponíveis, em consequência do aumento do declive da rampa carbonatada preconizado por Watkinson (1989).

A instabilidade tectónica neste intervalo de tempo foi reconhecida por García-Frank e outros (2008) como sendo de carácter regional. As semelhanças entre as sequências transgressivo-regressivas propostas para a Bacia Ibérica, e as tendências de aprofundamento e “raseamento” propostas no presente trabalho para a Subzona Limitatum - Biozona Discites, parecem conferir à instabilidade tectónica um papel bastante relevante no fornecimento de material detrítico proveniente do continente para a bacia.

## ***Capítulo 7 – Conclusões***

## 7. Conclusões

No presente trabalho foram aplicadas, pela primeira vez, técnicas de espectrometria de raios gama em afloramentos do Jurássico Médio da Bacia Lusitânica, particularmente na passagem Aaleniano - Bajociano do perfil da Murtinheira e do perfil da Serra da Boa Viagem II, ambos situados no setor norte da bacia, e cuja biostratigrafia, com base em diferentes grupos taxonómicos (amonóides, braquiópodes, foraminíferos e nanoplâncton calcário), é conhecida em detalhe. Para tal, utilizou-se um espectrómetro de raios gama portátil - modelo *Gamma Surveyor II* (1024 canais e 30 KeV – 3 MeV de energia) equipado com detetor de cintilação de óxido germanato de bismuto – BGO) com 20 cm<sup>3</sup> de volume.

Os valores de radiação gama total e das concentrações dos radioelementos são baixos a moderados ao longo dos dois perfis, entre 12 e 60 API, e são característicos de séries hemipelágicas predominantemente carbonatadas, como as que foram analisadas. As tendências da curva de GR total e da CGR permitiram distinguir alguns intervalos de aumento ou diminuição dos valores de radiação gama nos perfis de afloramento. Assim, foram reconhecidos cinco intervalos de variação da radiação gama no perfil da Murtinheira (M1, M2, M3, M4 e M5) e três intervalos no perfil da Serra da Boa Viagem II (SBVII 1, SBVII2 e SBVII3).

Os radioelementos potássio e tório apresentam uma boa correlação entre os dois perfis refletindo a adição de componentes siliciclásticos de granulometria fina, provenientes do continente, à sequência carbonatada. Além disso, em ambos os perfis, as concentrações destes elementos aumentam nos intervalos mais margosos.

Com base nos parâmetros analisados foi possível estabelecer uma organização sequencial para registo sedimenta analisado. Assim, foram reconhecidos quatro intervalos de “raseamento” das fácies (M2, M4, SBVII 1 e SBVII 3) e três intervalos de aprofundamento das fácies (M3, M5 e SBVII 2). Os intervalos de “raseamento” das fácies apresentam tendências decrescentes nos valores de radiação gama, a par da diminuição da argilidade, sugerindo menores aportes de material siliciclástico para a bacia. Os intervalos de aprofundamento da fácies são caracterizados por tendências crescentes dos valores da radiação gama e, conseqüentemente, maior argilidade, sugerindo um maior aporte de siliciclásticos.

Tendo em vista o potencial interesse do presente estudo para a análise de bacias sedimentares com interesse petrolífero, interpretou-se uma sondagem *offshore* (Sardinha 13C-1), que se situa na latitude 40° 01' 34"3 N e longitude -9° 07' 59"3 Oeste. Foi possível, com base na diagrafia de GR total, fundamentar correlações entre os dois perfis e a sondagem, uma vez que nesta última, se reconheceram tendências semelhantes às dos



perfis em afloramento.

Ao longo dos dois perfis, a razão Th/U varia geralmente entre 1 a 5, indicando que a sequência carbonatada foi depositada em condições bem oxigenadas, o que já tinha sido sugerido por estudos anteriores, recorrendo à análise paleoecológica das associações de foraminíferos bentónicos. As associações de minerais de argila no perfil da Murtinheira são maioritariamente constituídas por ilite e, a par da inexistência de variações nas taxas Th/K, pode inferir-se que, ao longo da passagem Aaleniano – Bajociano, não terão ocorrido importantes mudanças climáticas.

No intervalo estratigráfico estudado, análises paleoecológicas realizadas com diferentes grupos taxonómicos permitiram identificar bioeventos de empobrecimento e renovação das faunas, que se podem relacionar com os dados obtidos de radiação gama e a natureza do cortejo argiloso. Assim, as tendências de “raseamento” das fácies, que representam uma diminuição no aporte de material siliciclástico, incluindo nutrientes, proveniente do continente, correlacionam-se com os episódios de diminuição de abundância e diversidade das associações de foraminíferos bentónicos. Do mesmo modo, as tendências de aprofundamento, que terão induzido um aumento na capacidade de carga do nicho ecológico, correlacionam-se com os episódios de renovação faunística.

As relações estabelecidas no presente estudo, que envolvem a articulação de variáveis abióticas (espetrometria de raios gama e análise do cortejo argiloso) com variáveis bióticas (paleoecologia de foraminíferos bentónicos), são pouco frequentes na literatura. Contudo, estas relações poderão eventualmente ser úteis na interpretação de sondagens da Bacia Lusitânica, configurando uma ferramenta complementar de análise de bacias sedimentares com interesse para a indústria dos hidrocarbonetos. Para tal, seria interessante aplicar a abordagem descrita no presente trabalho a intervalos estratigráficos mais amplos desta bacia e, eventualmente de outras, em torno da Placa Ibérica, onde já foram reconhecidos os mesmos bioeventos.

## ***Capítulo 8 – Referências bibliográficas***

## 8. Referências bibliográficas

- Adams, J. A. & Weaver, C. E. (1958).** Thorium to uranium ratios as indicators of sedimentary processes: examples of concept of geochemical facies. *Bull. Am. Assoc. Geol.* 42, pp. 387–430.
- Alves, T. M., Gawthorpe, R. L., Hunt, D. W. & Monteiro, J. H. (2002).** Jurassic tectono-sedimentary evolution of the Northern Lusitanian Basin (offshore Portugal). *Marine and Petroleum Geology*, 19, pp.727–754.
- Alves, T. M., Gawthorpe, R. L., Hunt, D. W. & Monteiro, J. H. (2003).** Post-Jurassic tectono-sedimentary evolution of the Northern Lusitanian Basin (Western Iberian margin), *Basin Research*, 15, pp. 227–249.
- Alves, T. M., Moita, C., Sandnes, F., Cunha, T., Monteiro, J. H. & Pinheiro, L. M. (2006).** Mesozoic–Cenozoic evolution of North Atlantic continental-slope basins: The Peniche basin, western Iberian margin. *AAPG Bull.* 90 (1), pp. 31–60.
- Alves, T. M., Moita, C., Cunha, T., Ullnaess, M., Myklebust, R. Monteiro, J. H. & Manuppella, G. (2009).** Diachronous evolution of Late Jurassic–Cretaceous continental rifting in the northeast Atlantic (west Iberian margin). *Tectonics*, 28, pp. 1–32.
- Andrade, B. (2006).** Los braquiópodos del tránsito Jurásico Inferior-Jurásico Medio de la Cuenca Lusitánica ( Portugal ). *Coloquios de Paleontología*, 56, pp. 5–194.
- Andrade, B., Duarte, L. V., Joral, F. G., Goy, A. & Henriques, M. H. (2015).** Paleobiogeographic patterns of the brachiopod assemblages of the Iberian Subplate during the Late toarcian-Early Aalenian (Jurassic). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paleo.2015.10.053> (em publicação)
- Arabas, A. (2016).** Middle–Upper Jurassic stable isotope records and seawater temperature variations: New palaeoclimate data from marine carbonate and belemnite rostra (Pieniny Klippen Belt, Carpathians), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 446, pp. 284–294.
- Azerêdo, A., Wright, V. P. & Ramalho, M. M. (2002).** Middle–Late Jurassic forced regression and disconformity in central Portugal: eustatic, tectonic and climatic effects on a carbonate ramp system. *Sedimentology*, 49, pp. 1339–1370.
- Azerêdo, A. C., Duarte, L. V., Henriques, M. H. & Manuppella, G. (2003).** Da dinâmica continental no Triásico aos mares no Jurásico Inferior e Médio. *Cadernos*

- Geológicos de Portugal, *Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, pp. 43.
- Bábek, O., Kalvoda, J., Aretz, M., Cossey, P. J., Devuyt, F.-X., Herbig, H. G. & Sevastopulo, G. D. (2010).** The correlation potential of magnetic susceptibility and outcrop gamma-ray logs at Tournaisian–Visean boundary sections in Western Europe. *Geologica Belgica*, 13, pp. 291–308.
- Bábek, O., Kalvoda, J., Cossey, P., Šimicek, D., Devuyt, F.X. & Hargreaves, S. (2013).** Facies and petrophysical signature of the Tournaisian/Viséan (Lower Carboniferous) sea-level cycle in carbonate ramp to basinal settings of the Wales-Brabant massif, British Isles. *Sedimentary Geology*, 284-285, pp. 197–213.
- Bond, D. P. G. & Zaton, M. (2003).** Gamma-ray spectrometry across the Upper Devonian basin succession at Kowala in the Holy Cross Mountains. *Acta Geologica Polonica*, 53, pp. 93–99.
- Boyle, R. W. (1982).** Geochemical Prospecting for Thorium and Uranium Deposits, Vol. 16: Developments in economic geology. *Elsevier Scientific Publishing Company*, 498 p.
- Calhõa, A. M., Pena dos Reis, R. & França, A. (2010).** A utilização de electrofáceis na ampliação do conhecimento da estratigrafia do Jurássico Inferior e Médio na Bacia Lusitânica. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 19, pp. 101–30.
- Canales, M. L. & Henriques, M. H. (2008).** Foraminifera from the Aalenian and the Bajocian GSSP (Middle Jurassic) of Murtinheira section (Cabo Mondego, West Portugal): Biostratigraphy and paleoenvironmental implications. *Marine Micropaleontology*, 67, (1-2), pp.155–179.
- Canales, M. L. & Henriques, M. H. (2013).** Foraminiferal Assemblages From the Bajocian Global Stratotype Section and Point (GSSP) At Cape Mondego (Portugal). *Journal of Foraminiferal Research*, 43, 2, pp.182–206.
- Canales, M. L. & Henriques, M. H. (2015).** Paleoenvironmental significance of the foraminiferal assemblages from the Bajocian GSSP (Cape Mondego, Portugal), Trabalho apresentado em *AAPG European & Regional Conference & Exhibition 2015 “Tethys-Atlantic Interaction Along the European-Iberian-African Plate Boundaries”*, In Abstracts, Lisboa.
- Catuneanu, O. (2006).** Principles of Sequence Stratigraphy. *Elsevier*, Oxford – UK, 375 p.
- Ehrenberg, S. N. & Svana, T. A. (2001).** Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata; an example from the Finnmark carbonate platform (Carboniferous–Permian), Barents Sea. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 85,

pp.295–308.

- Ellis, D. V. & Singer, J. M. (2007).** Well Logging for Earth Scientists, 2<sup>nd</sup> edition, *Springer*, 692 p.
- Figueiredo, V. L. & Guterres, H. C. (2012).** Análise Quantitativa das Associações de Foraminíferos da Passagem Jurássico Inferior- Médio do Perfil de Maria Pares (Setor Norte da Bacia Lusitânica, Portugal) – Implicações Paleontológicas. Para Conhecer a Terra – *Memórias e Notícias de Geociências No Espaço Lusófono. Imprensa da Universidade de Coimbra*, pp. 151–159.
- Fertl, W. H. (1979).** Gamma Ray Spectral Data Assists in Complex Formation Evaluation. *Log Analyst*, 20, 5, pp. 3–37.
- García - Frank, A., Ureta, S. & Mas, R. (2008).** Aalenian pulses of tectonic activity in the Iberian Basin , Spain. *Sedimentary Geology*, 209, pp.15–35.
- Ghasemi-Nejad, E., Ruffell, A., Rahimpour-Bonab, H., Sharifi, M., Soltani, B. & Sfidari, E. (2014).** Spectral gamma-ray logs and palaeoclimate change? Permian-Triassic, Persian Gulf. *Geological Journal*, 50, 2, pp. 210–219.
- Gilmore, G. R. (2008).** Gamma-ray Spectrometry– 2<sup>nd</sup> Edition, JohnWiley&Sons, England. 387 p.
- Gómez, J., Canales, M., Ureta, S. & Goy, A., (2009).** Palaeoclimatic and biotic changes during the Aalenian (Middle Jurassic) at the southern Laurasian Seaway (Basque– Cantabrian Basin, northern Spain). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 275,pp. 14–27.
- Hallam, A & Wignall, P. B.(2000).** Facies changes across de Triassic-Jurassic boundary in Nevada, USA. *Journal of the Geological Society*, 157, pp. 49–54.
- Henriques, M. H. (1992).** Biostratigrafia e Paleontologia (Ammonoidea) do Aaleniano em Portugal (Sector Setentrional da Bacia Lusitaniana). Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Henriques, M. H. & Canales, M. L. (2013).** Ammonite-benthic foraminifera turnovers across the Lower-Middle Jurassic transition in the Lusitanian Basin (Portugal), *Geobios*, 46, pp. 395–408.
- Henriques, M. H., Canales, M. L., Figueiredo, V., García-Frank, A., Hernández, L., Silva, S. & Ureta, S. (2014).** Biostratigrafia integrada (Ammonoidea, Foraminiferida) da passagem Jurássico Inferior-Médio na Península Ibérica: resultados preliminaries. *Comunicações Geológicas*, 101, Especial I, LNEG, Lisboa, pp. 443–446.

- Henriques, M. H., Canales, M. L., Neto, K. & Antunes, R. L. (2010).** Bioeventos registados no GSSP do Bajociano (Cabo Mondego, Portugal). *In: Roteiro IV Curso de Campo na Bacia Lusitânica (Portugal)*, pp. 20–27.
- Hesselbo, S. P. (1996).** Spectral gamma-ray logs in relation to clay mineralogy and sequence stratigraphy, cenozoic of the atlantic margin, offshore new jersey 1 relationship of spectral gamma-ray units to depositional geometry. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 150, pp. 411–22.
- Holtzapffel, T. (1985).** Les mine´raux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord*. 12, 136 p.
- Kalvoda, J., Bábek, B., Devuyst, F. X. & Sevastopulo, G. D. (2011).** Biostratigraphy, sequence stratigraphy and gamma-ray spectrometry of the Tournaisian-Viséan boundary interval in the Dublin Basin. *Bulletin of Geosciences*, 86, 4, pp. 683–706.
- Koptíková, L., Bábek, O., Hladil, J., Kalvoda, J. & Slavík, L. (2010).** Stratigraphic significance and resolution of spectral reflectance logs in Lower Devonian carbonates of the Barrandian area, Czech Republic; a correlation with magnetic susceptibility and gamma-ray logs. *Sedimentary Geology*, 225, 3-4, pp. 83–98.
- Korte, C., Hesselbo, S.P., Ullmann, C.V., Dietl, G., Ruhl, M., Schweigert, G. & Thibault, N., (2015).** Jurassic climate mode governed by ocean gateway. *Nat. Commun.* 6, pp. 1–7.
- Kulberg, J C.R. (2000).** Evolução tectónica Mesozóica da Bacia Lusitânica, Dissertação Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa.
- Kullberg, J. C., Rocha, R. B, A., Soares, F., Rey, J., Terrinha, P., Callapez, P. & Martins, L. (2006).** A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *In: Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (R. Dias,A. Araújo,P. Terrinha & J. C. Kullberg,Eds.). Universidade de Évora, pp. 317–368.
- Lüning, S. & Kolonic, S. (2003).** Uranium spectral gamma-ray response as a proxy for organic richness in black shales: Applicability and limitations. *Journal of Petroleum Geology*, 26, pp. 153–74.
- McRoberts, C. A., Furrer, H. & Jones, D. S. (1997).** Palaeoenvironmental interpretation of a Triassic-Jurassic boundary section from western Austria based on palaeoecological and geochemical data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 136, 1-4, pp. 79–95.
- Molina, E. (2004).** Micropaleontología. Concepto, historia y estado actual. *In:*

*Micropaleontología. Prêsas Universitarias de Zaragoza* (Ed. Molina, E.), España.

- Myers, K.J. & Wignall, P.B. (1987).** Understanding Jurassic organic-rich mudrocks, new concepts using gamma-ray spectrometry and palaeoecology: examples from the Kimmeridge Clay of Dorset and the Jet Rock of Yorkshire. *In: Marine Clastic Environments: Concepts and Case Studies*, (Eds. Legget, J.K., Zuffa, G.G. Graham & Trotman) London, pp. 175–192.
- Neto, K. S. A., Henriques, M. H. & Antunes, R. L. (2010).** Nanofósseis calcários da Passagem AalenianoBajociano do perfil do Cabo Mondego - Portugal (GSSP do Bajociano). *Boletim de Geociências da Petrobras*, 19, pp. 235–250.
- Nichols, G. (2009).** *Sedimentology and Stratigraphy* (2<sup>nd</sup> Edition). *Blackwell Publishing*, 419 p.
- O'Dogherty, L., Sandoval, J., Bartolini, A., Bruchez, S., Bill, M. & Guex, J. (2006).** Carbon – isotope stratigraphy and ammonite faunal turnover for the Middle Jurassic in the Southern Iberian palaeomargin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 239, 3-4, pp. 311–333.
- Parkinson, D. N. (1996).** Gamma-ray spectrometry as a tool for stratigraphical interpretation: examples from the western European Lower Jurassic. *Geological Society, Special Publications*, 103, 1, pp. 231–255.
- Pawellek, T. & Aigner, T. (2003).** Stratigraphic architecture and gamma ray logs of deeper ramp carbonates (Upper Jurassic , SW Germany). *Sedimentary Geology*, 159, pp. 203–240.
- Pavia, G. & Enay, R. (1997).** Definition of the Aalenian-Bajocian Stage Boundary. *Episodes*, 20, p. 16–22.
- Pena dos Reis, R.P.B. (1983).** A sedimentologia de depósitos continentais: Dois exemplos dos Cretácico superior – Miocénico de Portugal, Dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra, 404 p.
- Pena dos Reis, R., Pimentel, N. & Garcia, A (2011).** A Bacia Lusitânica (Portugal): análise estratigráfica e evolução geodinâmica. *A Petrobras em Portugal. Boletim de Geociências da Petrobras*, 19 (1/2), pp 23–51.
- Pérez-lópez, A., Márquez, L. & Pérez-Valera, F. (2005).** A foraminiferal assemblage as a bioevent marker of the main Ladinian transgressive stage in the Betic Cordillera, southern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 224, 1-3, pp. 217–231.

- Pinheiro, L.M., Wilson, R.C.L., Pena dos Reis, R., Whitmarsh, R.B. & Ribeiro, A. (1996).** The western Iberia Margin: A geophysical and geological overview. *In: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (Eds. Whitmarsh, R.B., Sawyer, D.S., Klaus, A., and Masson, D.G.), 149, pp 1–23.
- Raddadi, M.C., Arnaud, A., Poupeau, G., Carrio-schaffhauser, E., Arnaud, H. & Rivera, A. (2005).** Interpretation of gamma-ray logs: The distribution of uranium in carbonate platform. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 337, 16, pp. 1457–1461.
- Rasmussen, E. S., Lomholt, S., Andersen, C. & Vejbæk, Ole V. (1998).** Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. *Tectonophysics*, 300, pp. 199–225.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D. & Monteiro, J. H. (1979).** Introduction à la géologie générale du Portugal. *Serviços Geológicos de Portugal*, 114 p.
- Rider, M. H. (1999).** The Geological Interpretation of Well Logs. Whittles Publishing Services, 288 p.
- Ruffell, A. & Worden, R. H. (2000).** Palaeoclimate analysis using spectral gamma-ray data from the Aptian (Cretaceous) of southern England and southern France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 155, 3-4, pp. 265–83.
- Sageman, Bradley B., Erle G. Kauffman, Peter J. Harries & William P. Elder. (1997).** *In: Brett C.E. and Baird, G.C (Eds), Paleontological events: Stratigraphic, ecological and evolutionary implications, Columbia University Press, NY, pp. 520-570, 1997.* New York: Columbia University Press.
- Sandoval, J., O'Dogherty, L., Aguado, R., Bartolini, A., Bruchez, S. & Bill, M. (2008).** Aalenian carbon-isotope stratigraphy: calibration with ammonite, radiolarian and nannofossil events in the Western Tethys. *Palaeogeog. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 267, pp. 115–137.
- Scheibel, V. (2006).** Determinação das Doses Efetivas por Ingestão de Farinhas de Cereais através da Espectrometria de Raios Gama Viviane Scheibel Determinação das Doses Efetivas por Ingestão de Farinhas de Cereais através da Espectrometria de Raios Gama, Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual de Londrina. 131p.
- Slatt, R. M., Jordan, D. W., D'Agostino, A. E & Gillespie, R. H. (1992).** Outcrop gamma-ray logging to improve understanding of subsurface well log correlations. *Geological Society, Special Publications* 65, 1, pp. 3–19.



- Schlumberger. 1989.** Log Interpretation – Principles/Applications. *Schlumberger*, 241pp.
- Schmoker, J. W. (1981).** Determination of organic matter content of Appalachian Devonian Shale from gamma ray logs. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 65, 7, pp. 1285–98.
- Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J. F. & Baudin, F. (2006).** Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229, pp. 303–320.
- Silva, S. (2013).** Foraminíferos da passagem Aaleniano – Bajociano no setor setentrional da Bacia Lusitânica: o perfil da Serra da Boa Viagem II. Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciência da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 100 pp. (não publicada).
- Silva, S., Henriques, M. H. & Canales, M. L. (2014).** Análise paleoecológica baseada em foraminíferos da passagem Aaleniano-Bajociano (Jurássico Médio) no perfil da Serra da Boa Viagem II (Portugal). *Comunicações Geológicas*, 101, Especial I, LNEG, Lisboa, pp. 573–576.
- Silva, S., Henriques, M. H. & Canales, M. L. (2015).** High resolution ammonite-benthic foraminiferal biostratigraphy across the Aalenian-Bajocian boundary in the Lusitanian Basin (Portugal). *Geological Journal*, 50, 4, pp. 477–496.
- Suchéras-marx, B., Guihou, A., Giraud, F., Lécuyer, C. & Pittet, B. (2012).** Impact of the Middle Jurassic diversification of Watznaueria (coccolith-bearing algae) on the carbon cycle and  $\delta^{13}\text{C}$  of bulk marine carbonates Pangea Tethys. *Global and Planetary Change*, 86-87, pp. 92–100.
- Suchéras-marx, B., Giraud, F., Mattioli, E., Gally, Y., Barbarin, N. & Beaufort, L. (2014).** Middle Jurassic coccolith fluxes: A novel approach by automated quantification. *Marine micropaleontology*, 111, pp. 15–25.
- Suchéras-marx, B., Giraud, F., Mattioli, E. & Escarguel, G. (2015).** Paleoenvironmental and paleobiological origins of coccolithophorid genus Watznaueria emergence during the late Aalenian – early Bajocian. *Paleobiology*, (em publicação) DOI:10.1017/pab.2015.8
- Svendsen, J.B. & Hartley, N.R. (2001).** Comparison between outcrop-spectral gamma ray logging and whole rock geochemistry: Implications for quantitative reservoir characterisation in continental sequences. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 6, pp. 657–670.

- Uphoff, T.L. (2005).** Subsalt (pre-Jurassic) exploration play in the northern Lusitanian basin of Portugal. *AAPG Bulletin*, 89, pp.699–714.
- Vacek, F., Hladil, J. e Schnabl, P. (2010).** Stratigraphic correlation potential of magnetic susceptibility and gamma-ray spectrometric variations in calciturbiditic facies ( Silurian-Devonian boundary , Prague Synclinorium , Czech Republic ). *Geologica Carpathica*, 61, pp. 257–27.
- Watkinson, M. P. (1989).** Triassic to Middle Jurassic Sequences from the Lusitanian Basin, Portugal, and Their Equivalents in Other North Atlantic Margin Basins. *Ph.D. Thesis, The Open University, Milton Keynes*, 390 p.
- Wignall, P. B. & Myers, K. J. (1988).** Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: A new approach. *Geology* 16, 5, pp. 452–55.
- Wilson, R. C. L. (1988).** Mesozoic development of the Lusitanian Basin, Portugal. *Rev., Soc., Geol., España*, 1, pp. 393–407;
- Wilson, R. C. L., Hiscott, R. N., Willis, M. G. & Gradstein, P. M. (1989).** The Lusitanian Basin of west-central Portugal: Mesozoic and Tertiary tectonic, stratigraphic and subsidence history. *In: Tankard, A.J., and Balkwill, H.R. (Eds.), Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins. AAPG Mem.*, 46, pp. 341–361.
- Wilson, R.C.L. & Manatschal, G. (2001).** Rifting along non-volcanic passive margins: stratigraphic and seismic evidence from the Mesozoic successions of the Alps and western Iberia. *In: Non-Volcanic Rifting of Continental Margins: A Comparison of Evidence from Land and Sea* (eds. Wilson, R.C.L., Whitmarsh , R.B., Taylor, B., Froitzheim, N) *Geological Society, London, Special Publications*, 187, pp. 429-452.
- Wright, V.P. (1986).** Facies sequences on a carbonate ramp: the Carboniferous Limestone of South Wales. *Sedimentology*, 33, pp. 221–241.

**Anexos**

## Anexo I

Perfil da Murtinheira													
Andar	Biozona/Subzona	Litologia	Camada	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	GR (nGy/h)	GR (API)	Th/K	Th/U	CGR		
Bajociano	Laeviuscula	C	M-399	0,92	0,61	2,53	21,78	29,72	2,75	4,15	24,96		
		M	M-398	0,95	1,37	2,98	27,66	38,08	3,14	2,18	27,22		
	Discites	C	M-391	1,18	1,27	2,05	27,74	37,24	1,74	1,61	27,31		
		M	M-390	1,36	1,36	3,02	34,56	44,72	2,22	2,22	34,06		
		M	M-388	0,67	1,02	2,28	20,26	28	3,40	2,24	19,89		
		C	M-387	0,76	0,86	2,33	20,63	28,36	3,07	2,71	21,56		
		M	M-386	0,92	0,37	3,35	22,5	31,08	3,64	9,05	28,18		
		C	M-385	0,22	1,13	0,09	9,49	12,92	0,41	0,08	3,94		
		C	M-381	0,51	0,61	0,71	12	15,88	1,39	1,16	11,11		
		C	M-379	0,26	1,65	0,75	14,6	20,36	2,88	0,45	7,19		
		M	M-378	0,46	0,85	0,87	13,02	17,64	1,89	1,02	10,93		
		M	M-376	0,46	1,3	2,37	19,24	27,24	5,15	1,82	16,82		
		C	M-374	0,49	1,22	0,06	13,49	17,84	0,12	0,05	8,23		
		C	M-372	0,54	0,41	1,74	13,75	18,88	3,22	4,24	15,65		
		M	M-371	1,18	1,44	2,64	30,11	40,96	2,24	1,83	29,63		
		C	M-370	0,86	0,82	0,74	17,79	23,28	0,86	0,90	16,94		
		M	M-369	1,24	2,4	1,6	33,81	45,44	1,29	0,67	26,52		
		C	M-368	0,68	0,92	2,6	20,64	28,64	3,82	2,83	21,32		
		C	M-366	0,54	1,23	1,83	18,64	25,8	3,39	1,49	16,00		
		C	M-364	0,77	0,83	2,21	20,27	27,8	2,87	2,66	21,25		
		M	M-363	1,29	0,99	2,1	27,7	36,96	1,63	2,12	29,31		
		C	M-362	1,09	0,49	3,43	25,55	35,08	3,15	7,00	31,27		
		M	M-361	0,64	0,54	3,21	19,4	27,4	5,02	5,94	23,06		
		C	M-360	0,85	1,95	0,56	23,57	31,44	0,66	0,29	16,07		
		M	M-358	1,42	1,44	3,81	36,21	49,48	2,68	2,65	38,15		
		C	M-357	0,75	0,64	2,78	20,3	28,24	3,71	4,34	23,17		
		C	M-355	0,48	1,21	1,54	16,94	23,52	3,21	1,27	13,89		
		M	M-354	0,68	2,33	1,58	26,1	35,84	2,32	0,68	17,31		
		C	M-353	1,07	0,65	3,14	25,46	34,88	2,93	4,83	29,80		
		M	M-352	1,81	0,7	6,5	43,82	60,56	3,59	9,29	55,08		
		C	M-351	0,51	1,34	1,95	19,13	26,68	3,82	1,46	15,99		
		M	M-350	1,1	1,59	2,94	30,67	42,08	2,67	1,85	29,51		
		C	M-349	0,86	0,72	3,43	23,87	33,24	3,99	4,76	27,52		
		M	M-348	1,15	1,22	2,72	28,76	39,04	2,37	2,23	29,46		
		C	M-347	0,57	1,3	2,71	21,64	30,36	4,75	2,08	19,95		
		C	M-345	0,57	1,27	1,14	17,54	23,84	2,00	0,90	13,78		
		C	M-343	0,59	1,03	2	18,49	25,68	3,39	1,94	17,49		
	M	M-342	0,92	1,11	3,29	26,49	36,76	3,58	2,96	27,94			
	M	M-338	1,04	0,56	1,98	21,7	29,04	1,90	3,54	24,75			
	C	M-337	0,59	0,83	1,67	16,54	22,76	2,83	2,01	16,19			
	Aaleniano	Limitatum	M	M-336	1	1,75	1,71	27,28	36,84	1,71	0,98	23,04	
			C	M-335	0,54	0,45	1,97	14,53	20,12	3,65	4,38	16,55	
			C	M-333	0,72	0,32	1,76	15,56	21,12	2,44	5,50	18,67	
			M	M-332	0,62	1,64	2,87	24,51	34,52	4,63	1,75	21,40	
			C	M-331	0,75	2,34	0,61	24,56	33,16	0,81	0,26	14,64	
			M	M-330	1,27	1,06	3,72	31,86	43,68	2,93	3,51	35,35	
			C	M-329	0,58	1,64	2	21,9	30,4	3,45	1,22	17,33	
M			M-328	0,75	1,22	3,51	25,54	35,8	4,68	2,88	26,03		
C			M-327	0,9	1,49	1,04	22,8	30,48	1,16	0,70	18,78		
C			M-323	1,21	0,34	1,47	21,39	27,96	1,21	4,32	25,52		
C			M-320	1,03	0,71	2,32	24,24	31,44	2,25	3,27	25,93		
M			M-319	0,94	0,94	3	25,12	34,56	3,19	3,19	27,13		
C			M-318	0,86	1,79	1,24	24,53	33,04	1,44	0,69	18,91		
M			M-317	1,24	1,33	1,87	28,5	37,96	1,51	1,41	27,59		
M			M-315	1,32	0,95	2,83	29,63	40,04	2,14	2,98	32,66		
C			M-312	1,16	1,83	3,64	34,3	47,76	3,14	1,99	33,24		
M			M-311	1,49	1,98	5,09	43,38	60,04	3,42	2,57	44,32		
C			M-310	1,04	2,18	1,69	30,23	40,84	1,63	0,78	23,61		
C			M-306	1,14	0,04	2,79	22,16	29,72	2,45		29,57		
M			M-305	1,74	1,01	2,72	35,19	46,8	1,56	2,69	39,09		
C			M-304	1,57	0,84	3,42	33,86	45,52	2,18	4,07	39,06		
M			M-297	1,8	1,18	4,37	41,12	55,72	2,43	3,70	46,55		
C			M-296	0,88	2,05	2,47	29,32	40,36	2,81	1,20	24,07		
M			M-295	1,58	1,37	4,8	40,43	55,44	3,04	3,50	44,65		
C			M-286	1,07	2,42	2,12	33,02	44,96	1,98	0,88	25,79		
M			M-285	1,84	0,74	5,26	41,32	56,4	2,86	7,11	50,70		
C			M-284	1,09	0,63	3,64	26,96	37,04	3,34	5,78	32,09		
Concavum			M	M-283	1,23	1,04	2,38	27,88	37,52	1,93	2,29	29,43	
			C	M-282	1,25	1,84	2,68	33,44	45,44	2,14	1,46	30,93	
				Total perfil	Média	1,0	1,2	2,4	33,44	34,3	2,6	2,7	2,63
				Total perfil	Desvio padrão	0,38	0,55	1,20	33,44	10,59	1,1	2,0	1,09

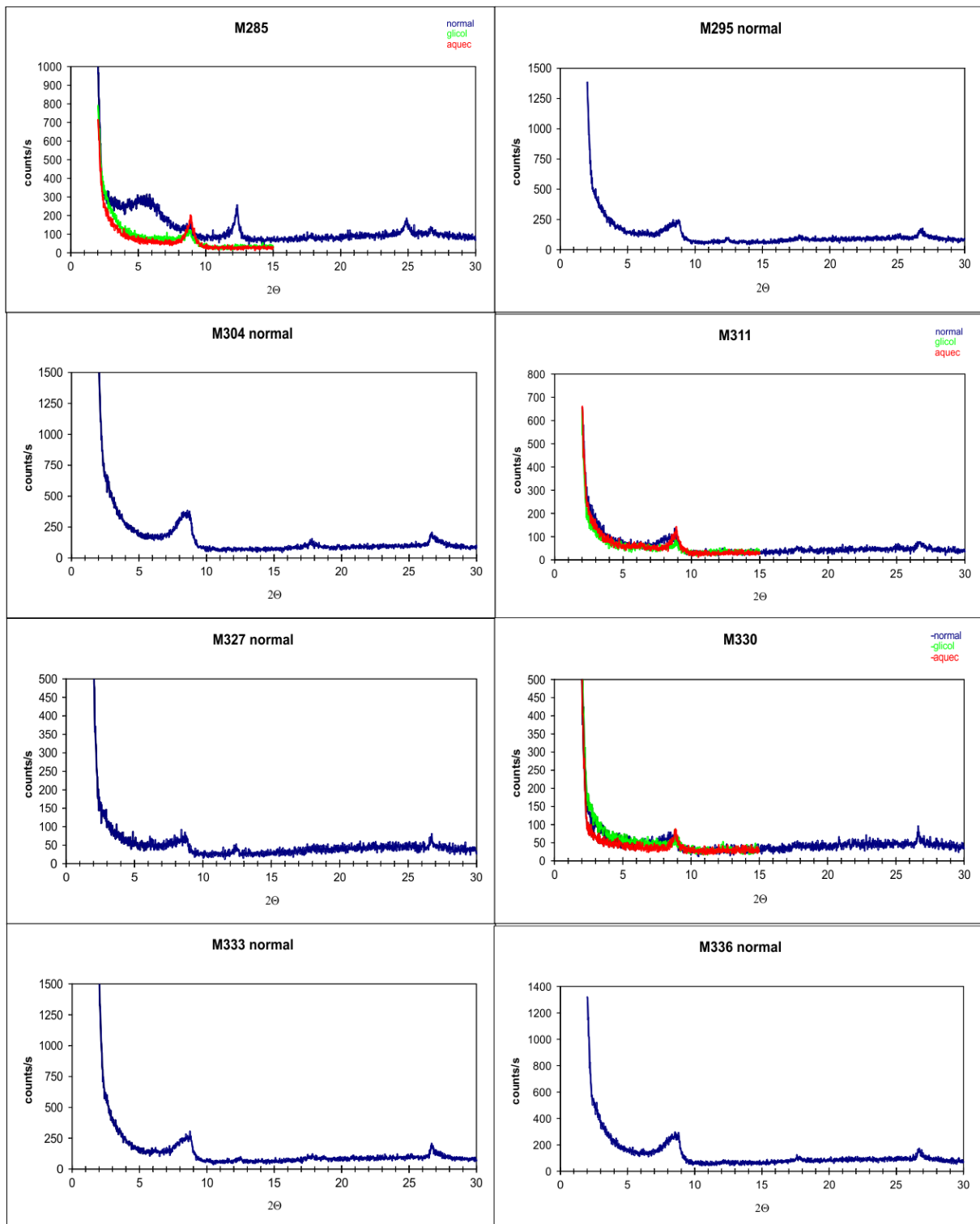
Anexo I – Dados das medições da radiação gama em campo, e cálculo de alguns parâmetros radiométricos e estatísticos para o perfil da Murtinheira.

## Anexo II

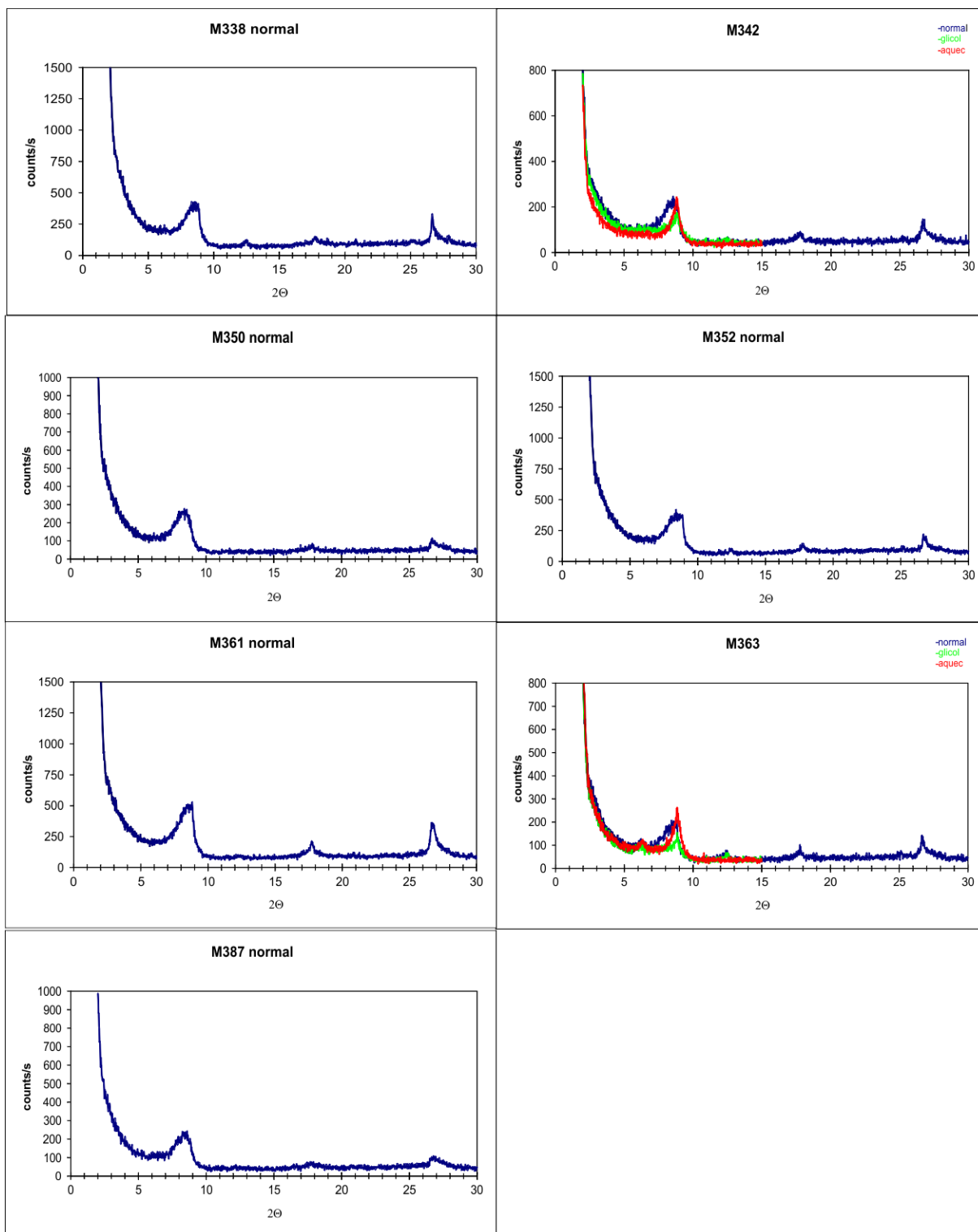
Perfil da Serra da Boa Viagem II									
Andar	Biozona	Camada	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	GR (nGy/h)	GR (API)	Th/K	Th/U
Bajociano	Discites	SBVII-177	0,6	1,46	1,49	19,87	27,24	2,48333	1,02055
		SBVII-172	0,77	0,89	1,97	20,08	27,32	2,55844	2,21348
		SBVII-170	1,35	1,27	4,45	35,95	49,56	3,2963	3,50394
		SBVII-169	0,81	0,77	1,9	19,68	26,72	2,34568	2,46753
		SBVII-168	1,35	0,39	5,15	32,68	45,32	3,81481	13,2051
		SBVII-167	0,7	1,09	2,02	20,39	28	2,88571	1,85321
		SBVII-166	1,46	1,06	2,14	30,38	40,4	1,46575	2,01887
		SBVII-163	0,87	0,78	2,95	23,18	31,96	3,3908	3,78205
		SBVII-160	1,36	2,05	4,6	40,86	56,56	3,38235	2,2439
		SBVII-159	0,82	1,49	2,38	25,12	34,56	2,90244	1,59732
		SBVII-158	1,35	2,02	4,26	39,77	54,8	3,15556	2,10891
		SBVII-155	0,75	1,54	2	23,51	32,32	2,66667	1,2987
		SBVII-147	0,61	1,79	0,46	19,3	25,92	0,7541	0,25698
		SBVII-140	0,72	1,46	1,41	21,2	28,84	1,95833	0,96575
		SBVII-137	0,82	0,45	2,95	20,58	28,52	3,59756	6,55556
		SBVII-134	1,02	1,54	2,77	29,02	39,72	2,71569	1,7987
		SBVII-133	0,61	1,86	1,45	22,13	30,44	2,37705	0,77957
Aaleniano	Limitatum	SBVII-131	0,84	1,35	2,73	25,48	35,16	3,25	2,02222
		SBVII-127	0,88	0,87	2,52	22,58	31,12	2,86364	2,89655
		SBVII-125	0,53	1,6	1,97	20,88	29,16	3,71698	1,23125
		SBVII-124	0,69	1,63	3,92	28,02	39,76	5,68116	2,40491
		SBVII-116	1,24	1,64	2,77	32,42	44,04	2,23387	1,68902
		SBVII-115	0,58	1,4	1,55	19,37	26,68	2,67241	1,10714
		SBVII-113	0,79	0,11	3,6	20,01	27,92	4,55696	32,7273
		SBVII-112	1,37	1,48	2,07	31,48	42,04	1,51095	1,39865
		SBVII-110	1,51	1,27	6,18	40,4	59,04	4,09272	4,86614
Concavum	SBVII-106	1,29	1,4	1,6	28,82	38,24	1,24031	1,14286	
	Média total	0,95148	1,2837	2,71333	26,413333	36,34667	2,87295	3,67245	
	Desvio Padrão	0,3179	0,48729	1,32131	6,9549518	9,855279	1,0448	6,32383	

**Anexo II** – Dados das medições da radiação gama em campo, e cálculo de alguns parâmetros radiométricos e estatísticos para o perfil da Serra da Boa Viagem II.

## Anexo III



Anexo III – Difractogramas de raios X das amostras do perfil da Murtinheira. A azul: diagrama normal; a verde: diagrama “glicerolado”; a vermelho: diagrama “aquecido”.



Anexo III – Difratoigramas de raios X das amostras do perfil da Murtinheira. A azul: diagrama normal; a verde: diagrama “glicerolado”; a vermelho: diagrama “aquecido”.