

Os minerais pesados e a proveniência sedimentar: estudo de casos do sudoeste da Península Ibérica

João Cascalho¹ e Joana Reis²

Resumo: O presente trabalho baseia-se no estudo de mais de 100 amostras de sedimentos oriundas de três áreas do sudoeste da Península Ibérica: i) área envolvente do Cabo de Sines (plataforma interna), ii) rio Guadiana e plataforma interna adjacente à sua foz e iii) plataforma média do Golfo de Cádiz. A partir destas amostras foram feitas preparações microscópicas para o estudo petrográfico. Com base no padrão de ocorrência dos minerais pesados transparentes mais frequentes é possível identificar as suas origens (fontes) bem como reconhecer a importância dos processos de selecção hidráulica destes minerais no contexto sedimentar das áreas estudadas. Esta interpretação destes processos sedimentares é inteiramente suportada pelos resultados da aplicação do método da análise em componentes principais baseado na transformação logarítmica dos dados de frequência relativa dos minerais identificados. Deste modo foi possível, globalmente, definir a existência de duas assinaturas mineralógicas distintas. Uma é dominada pela presença de anfíbulas e de piroxenas denunciando uma origem relacionada com as rochas ígneas básicas do maciço de Sines e com as rochas ígneas básicas e metamórficas que afloram na bacia hidrográfica do rio Guadiana. Adicionalmente as variedades mineralógicas e morfológicas destes minerais permitem, por um lado, definir com precisão as suas fontes primárias e, por outro, deduzir equivalências hidráulicas em depósitos sedimentares contrastantes. A outra associação é dominada pela presença de partículas roladas a sub-roladas de turmalina, de andaluzite e de estauroлите denunciando uma origem sedimentar de natureza policíclica, isto é, de formações detriticas não consolidadas pertencentes a depósitos continentais de cobertura e/ou a antigos cordões litorais arenosos actualmente depositados em domínio de plataforma continental interna. As preparações microscópicas de minerais pesados utilizadas neste trabalho representam o primeiro conjunto de uma colecção didáctica e científica de minerais pesados pertencente ao arquivo de sedimentos do Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC/UL).

Palavras-chave: Mineralogia da areia, Processos sedimentares, Análise composicional

Abstract: This work is based on the study of over 100 sediment samples that were collected in three different areas within the SW of the Iberian Peninsula: i) an area surrounding Sines' Cape (inner shelf); ii) Guadiana River and inner shelf adjacent to its mouth, iii) Cádiz Gulf's middle shelf. Those samples were used to make sand grain glass slides for petrographic analyses. The occurrence patterns of the most frequent transparent heavy minerals allow us to infer the sediments' sources and also to understand the importance of hydraulic sorting processes of these minerals in their sedimentary environment. This sedimentary processes interpretation was supported by the results obtained by applying a principal components analyses based on the heavy mineral relative frequency data previously manipulated by the centered log-ratio transform. Those methods made

¹ Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC), Rua da Escola Politécnica 56/58, 1250-102 Lisboa; Centro de Geologia da FCUL, Campo Grande, 1749-016 Lisboa; E-mail: jpcascalho@fc.ul.pt.

² Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC), Rua da Escola Politécnica 56/58, 1250-102 Lisboa; E-mail: jleite@museus.ul.pt

it possible to distinguish and pinpoint two different mineralogical signatures, one of which presents high contents of amphiboles and pyroxenes that reveal either a connection with the igneous basic rocks of the Sines massif or to the igneous basic rocks and metamorphic rocks that outcrop through the Guadiana's river basin. Farther more, mineralogical and morphologic varieties of those minerals allowed not only to accurately define their primary sources but also to infer hydraulic equivalences in contrasting sedimentary environments. The other mineralogical signature presents a high content of well-rounded to sub-rounded particles of tourmaline, andalusite and staurolite which reveal a polycyclic sedimentary origin, that should be related to non-consolidated detrital formations belonging to continental cover deposits and/or ancient beach sandbars that nowadays lie in an inner continental shelf domain. All the glass slides with heavy minerals samples that were used in this work were put together as the beginning of a didactic and scientific collection of heavy minerals that will be part of the collections of the Natural History and Science Museum of Lisbon University (MUHNAC/UL).

Keywords: Sand mineralogy, Sedimentary processes, Compositional analysis

“A central lesson of science is that to understand complex issues (or even simple ones), we must try to free our minds of dogma and to guarantee the freedom to publish, to contradict, and to experiment. Arguments from authority are unacceptable.” - Carl Sagan (1988), In Billions and Billions: Thoughts on Life and Death at the Brink of the Millenium

1. Enquadramento do trabalho na missão do Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC/UL)

O MUHNAC/UL é o actual herdeiro de uma longa linhagem de instituições que, de algum modo, sempre exerceram as funções que este museu agora exerce: investigação científica (em vários domínios), gestão e conservação de colecções e também educação/divulgação científica. A conjugação dessas três funções faz com que este museu (tal como qualquer outro museu) seja por excelência uma ponte entre a comunidade científica e o resto da sociedade. Na sua missão educativa o museu pretende ser mais do que uma mera extensão ou complemento à educação formal facultada nas escolas. O seu objectivo é contribuir para a literacia científica dos cidadãos (Reis *et al.* 2011).

Cada vez mais há um consenso entre os vários autores que a literacia científica é mais do que um conjunto avulso de factos. Trata-se de um conceito multidimensional que envolve conhecimentos, competências e atitudes e que está relacionado com a capacidade de aplicar conhecimentos e experiências do passado a novas situações no presente, e com a capacidade de ser crítico e participar em decisões que afectam o indivíduo e/ou a sua família ou até mesmo a sociedade em geral. Para isso, mais do que saber “produzir ciência” (porque isso é a função dos especialistas) pretende-se compreender o método científico e de produção e aquisição de novos conhecimentos e compreender os prós e os contras que a ciência e a tecnologia exercem sobre a sociedade e o Ambiente. Desde modo é possível um exercício activo e consciente da cidadania (Burns *et al.* 2003, Falk *et al.* 2007, Hazen e Trefil 2009).

No seu programa educativo, este museu oferece várias actividades subordinadas a várias temáticas geológicas, nomeadamente Mineralogia, Petrologia e Sedimentologia. Ao projectar essas actividades, de acordo com o que foi dito anteriormente, mais do que transmitir factos e conceitos, pretende-se revelar e relatar como é que se produz ciência. Esta abordagem é utilizada quer em exposições quer em laboratórios pedagógicos onde os participantes podem simular alguns dos métodos utilizados pelos cientistas no seu trabalho quotidiano (Póvoas *et al.* 2010, Reis *et al.* 2011, 2012, 2013).

O museu possui colecções de areias e de preparações microscópicas de minerais pesados nos acervos que herdou e que estão presentemente a ser reorganizadas. Pretende-se integrar as preparações usadas neste estudo de modo a criar uma colecção didáctica que possa ser utilizada na realização das actividades educativas e divulgação científica do museu.

Há uma intenção deliberada nesse propósito. Em primeiro lugar porque essas preparações apresentam de facto mineralogias e morfologias interessantes que permitem ser utilizadas com um propósito didáctico. Em segundo lugar, ao utilizar preparações que foram usadas num estudo científico é possível tornar as actividades mais realistas e partilhar com o público a experiência pessoal do trabalho de um investigador. Estes dois pontos vão de encontro à missão educativa do museu.

2. Importância dos minerais pesados nos estudos sedimentológicos

O reconhecimento da presença dos minerais pesados em sedimentos arenosos coincide, provavelmente, com as primeiras actividades de prospecção em depósitos de tipo *placer*. Não será por acaso que a primeira publicação conhecida que se refere à presença destes minerais está precisamente relacionada com a exploração destes depósitos no norte do país de Gales (Dick 1887), enquanto que as primeiras descrições surgem no trabalho de Artini (1898) sobre análises quantitativas de depósitos arenosos do rio Po (Itália setentrional). Desde então são muitos os trabalhos que abordam esta temática (por exemplo, Rubey 1933, Rittenhouse 1943, Van An del 1950, Pettijohn 1957, Pilkey 1963, Neiheisel 1965, Swift *et al.* 1971, Flores e Shideler 1978, Komar e Wang 1984, Morton e Hallsworth 1999, Frihy e Dewidar 2003, Bateman e Catt 2007, Garzanti e Andò 2007, Andò *et al.* 2012). Por outro lado, desde há muito tempo se reconhece a sua utilidade como instrumento para interpretar a proveniência e o transporte sedimentar, sendo que, o interesse do seu estudo tem crescido em paralelo com o desenvolvimento da tecnologia (Mange e Wright 2007). Todavia, em determinadas situações, existem dificuldades na utilização destes minerais para interpretar a proveniência e o transporte sedimentar. Tais dificuldades devem-se à conjugação de dois factores fundamentais: i) o sinal mineralógico da proveniência (pelos tipos de rochas fonte e seu grau de alteração no afloramento); ii) o efeito da selecção hidráulica das partículas que ocorre durante as fases de entrada em movimento, de transporte e de deposição (Komar 2007).

Quando comparamos a composição mineralógica de sedimentos arenosos provenientes de litologias contrastantes, a dedução da proveniência e, por acréscimo, dos trajectos de transporte sedimentar até podem ser tarefas fáceis de executar (Garzanti e Andò 2007). Contudo, o sinal mineralógico identificável num determinado depósito sedimentar pode ser muito distinto daquele que caracteriza as suas potenciais fontes alimentadoras devido à conjugação dos factores referidos anteriormente. Portanto, nestes contextos, é aconselhável o recurso a técnicas analíticas complementares que podem abranger desde uma simples manipulação matemática dos dados aplicando métodos de análise composicional e de estatística multivariada, passando pelo reconhecimento de propriedades dos minerais que permitam distinguir variedades mineralógicas dentro de uma só espécie, até à utilização de técnicas analíticas mais sofisticadas, como por exemplo, a análise química por microsonda electrónica, a difracção de raios X, a fluorescência de raios X ou a microscopia electrónica de varrimento (Mange e Maurer 1992).

3. Objectivos

O presente trabalho tem por objectivo fundamental demonstrar a utilidade dos minerais pesados na interpretação dos processos sedimentares no que se refere, em particular, à definição das principais fontes sedimentares de partículas arenosas terrígenas em ambientes marinhos de plataforma continental (interna e média). Para tal são considerados três casos de estudo: i) área envolvente do Cabo de Sines (Pombo *et al.* 2006) – Figura 1A; ii) rio Guadiana e plataforma continental adjacente à sua foz (Cascalho 2009a) – Figuras 1B e 1C e iii) plataforma continental do Golfo de Cádiz (Cascalho 2009b) – Figura 1D. A análise, a interpretação e a discussão dos resultados baseia-se em dados de frequência relativa das espécies mineralógicas identificadas ao microscópio polarizante.

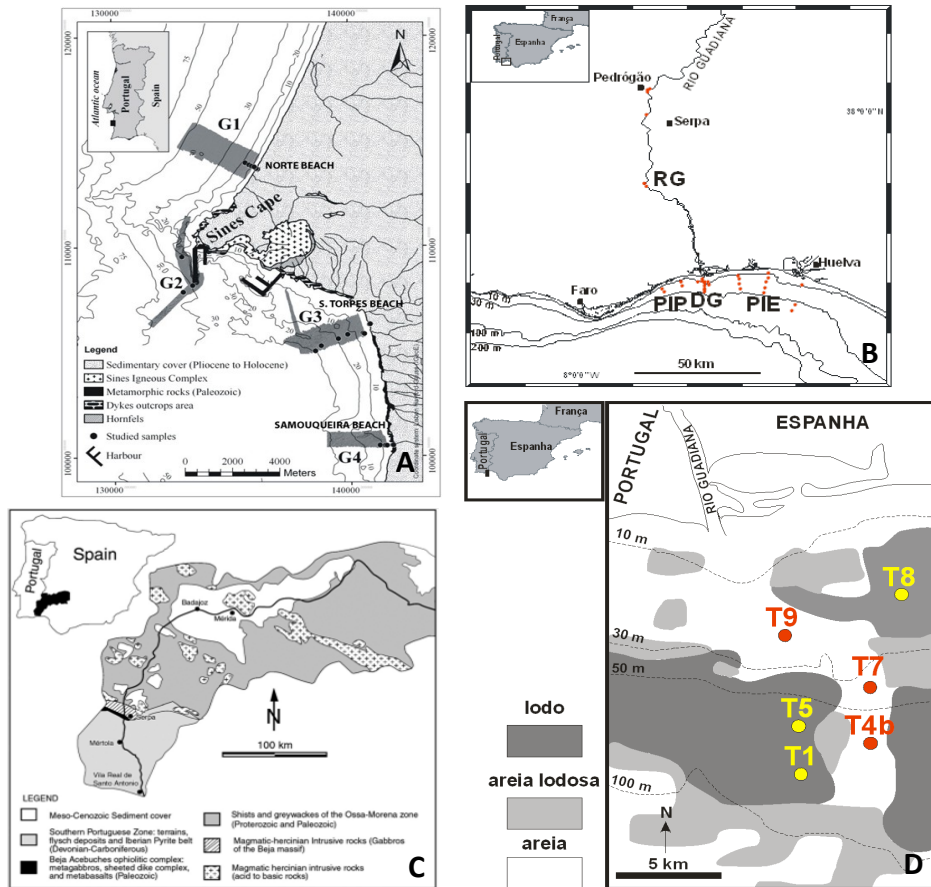


Figura 1. Enquadramento geral das áreas estudadas com a localização correspondente das amostras recolhidas. A - área envolvente do Cabo de Sines: G1 = grupo 1, G2 = grupo 2, G3 = grupo 3 e G4 = grupo 4 (extraído de Pombo *et al.* 2006); B - rio Guadiana e plataforma continental adjacente à sua foz (localização das amostras): RG = rio Guadiana, DG = desembocadura do rio Guadiana, PIP = plataforma continental interna portuguesa, PIE = plataforma continental interna espanhola (adaptado de Cascalho 2009a); C – Geologia da bacia hidrográfica do rio Guadiana (adaptado de Gonzalez *et al.* 2007); D - plataforma continental do Golfo de Cádiz: T1 = testemunho vertical 1, T4b = testemunho vertical 4b, T5 = testemunho vertical 5, T7 = testemunho vertical 7, T8 = testemunho vertical 8, T9 = testemunho vertical 9 (adaptado de Cascalho 2009b).

Figure 1. General setting of the studied areas with the correspondent sample location. A – Sines cape area: G1 = group 1, G2 = group 2, G3 = group 3, G4 = group 4 (from Pombo *et al.* 2006); B – Guadiana river and adjacent inner continental shelf (samples location): RG = Guadiana river, DG = Guadiana mouth, PIP = Portuguese inner shelf, PIE = Spanish inner shelf (adapted from Cascalho 2009a); C – Guadiana river basin geology (adapted from Gonzalez *et al.* 2007) D – Cadiz Gulf continental shelf: T1 = vertical core 1, T4b = vertical core 4b, T5 = vertical core 5, T7 = vertical core 7, T8 = vertical core 8, T9 = vertical core 9 (adapted from Cascalho 2009b).

4. Métodos

O tratamento laboratorial das amostras foi efectuado, numa primeira fase, no Laboratório de Sedimentologia do Instituto Hidrográfico, utilizando o procedimento aí em uso, isto é: ataque com peróxido de hidrogénio para destruição da matéria orgânica; lavagem com água destilada para eliminar os sais dissolvidos e crivagem por via húmida, utilizando crivos de 2,000mm e 0,063mm, para obtenção das fracções cascalho (> 2,000mm), areia (entre 2,000mm e 0,063mm) e finos (< 0,063mm). Na segunda fase do tratamento laboratorial, que teve lugar no Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa, procedeu-se à crivagem a seco da fracção areia com o objectivo de separar as três classes granulométricas mais finas desta fracção (0,500-0,250 mm, 0,250-0,125 mm e 0.125-0.063 mm). Cada amostra nestas três classes granulométricas foi atacada por uma solução com HCl a 10%, a fim de eliminar os carbonatos, nomeadamente os bioclastos presentes. Após lavagem e secagem, efectuou-se a separação “minerais leves-minerais pesados” utilizando líquidos pesados (bromofórmio e politungstato de sódio). Seguidamente foi realizada uma operação de quarteamento utilizando um repartidor (*micro-splitter*) para obter uma pequena quantidade de “resíduo pesado” representativa da amostra necessária à montagem de preparações de tipo permanente. O meio de montagem utilizado foi o bálsamo do Canadá (n=1,54). Estes procedimentos asseguram a facilidade da montagem das preparações pois, utilizando uma pequena amplitude granulométrica viabiliza-se uma preparação mais uniforme, o que facilita a identificação dos minerais e, conseqüentemente, permite obter dados mais rigorosos que são fundamentais para a definição de assinaturas mineralógicas.

A identificação dos minerais pesados foi feita ao microscópio polarizante de luz transmitida. Esta identificação foi seguida da contagem rigorosa das espécies. Na operação de contagem dos minerais foi seguido um método equivalente ao *ribbon method* (van Harten 1965, Galehouse 1969, 1970, citados em Mange e Maurer 1992), isto é, foram sistematicamente identificados todos os minerais que intersectam a parte graduada do fio E-W do retículo pela deslocação da preparação, com o auxílio de uma cremalheira ao longo de fiadas paralelas.

Em cada amostra foram contados (em média) cerca de 600 minerais pesados com dimensões compreendidas entre a areia média e a areia muito fina. Os resultados das contagens foram convertidos em percentagens, isto é, em cada amostra a abundância das várias espécies foi expressa em relação ao total dos minerais pesados (opacos + transparentes). Não foi feita qualquer ponderação dos valores das contagens em relação à massa do sedimento dada a disparidade dos valores de densidade dos minerais pesados presentes nas amostras (entre opacos e transparentes). Os resultados obtidos mostram que os opacos têm normalmente uma frequência elevada (em redor de 50 %), não podendo ser identificados por luz transmitida. Assim, devido a estes constrangimentos, o total dos minerais transparentes identificados em cada amostra foi recalculado para 100 %, a fim de evitar efeitos de obliteração. O registo das contagens e todos os cálculos posteriores foram efectuados utilizando uma folha de cálculo Excel© respeitando a representação matricial em que cada linha representa uma amostra (ou objecto) e cada coluna um mineral (ou variável) - Figura 2.

	M ₁	M ₂	M _m	
A ₁	# _(1,1)	# _(1,2)	# _(1,m)	$\sum_{j=1}^m \#_{i,j} = \#_j$
A ₂	# _(2,1)	# _(2,2)	# _(2,m)	$\sum_{j=1}^m \#_{i,j} = \#_j$
A _n	# _(n,1)	# _(n,2)	# _(n,m)	$\sum_{j=1}^m \#_{i,j} = \#_j$
	$\sum_{i=1}^n \#_{i,j} = \#_i$	$\sum_{i=1}^n \#_{i,j} = \#_j$	$\sum_{i=1}^n \#_{i,j} = \#_j$	
	M ₁ (%)	M ₂ (%)	M _m (%)	

Figura 2. Esquema geral de registo matricial dos valores de contagem (#) dos minerais identificados (A = amostra; M = mineral) e da sua correspondente percentagem global (M₁ (%) a M_m (%)) tendo em conta todas as amostras representativas de cada caso de estudo.

Figure 2. Schematic representation of the mineral counting results (#) as a data matrix (A = sample; M = mineral). M₁ (%) to M_m (%) represent the relative frequency of the identified heavy minerals in each studied case.

5. Resultados (frequência relativa dos minerais)

5.1. Área envolvente do Cabo de Sines

As 22 amostras analisadas estão distribuídas em quatro grupos, de acordo com a sua localização (Figura 1A). O Grupo 1 (G1) é representado por seis amostras que foram colhidas a norte do cabo de Sines, das quais quatro são provenientes de uma faixa da plataforma interna situada entre os 10 e os 19 m de profundidade sendo as restantes provenientes da praia do Norte. O Grupo 2 (G2) inclui três amostras colhidas da plataforma interna/média a oeste do cabo de Sines a profundidades variando entre os 30 e os 62 m. O Grupo 3 (G3) é constituído por oito amostras colhidas a sul do cabo de Sines, das quais seis são originárias da plataforma interna a profundidades variando entre os 6 e 32 m sendo as restantes duas provenientes da praia de S. Torpes. Por fim, o Grupo 4 (G4) é composto por cinco amostras colhidas a sul do cabo de Sines, das quais três foram colhidas da plataforma interna entre os 9 e 17 m de profundidade sendo as restantes duas oriundas da praia da Samouqueira.

Considerando a totalidade das amostras (22), observa-se que os minerais transparentes mais abundantes são, por ordem decrescente da sua frequência relativa: piroxena (PX – 44,5 %), turmalina (TU – 20,1 %), anfíbola (ANF – 15,2 %), andaluzite (AND – 8,1 %), biotite (BI – 7,9 %), estaurólite (EST – 3,1 %) e titanite (TIT – 1,2 %). No entanto, verifica-se que os diferentes grupos de amostras possuem uma assinatura mineralógica específica. No G1 a associação mineralógica é dominada pela presença de turmalina (TU – 40,7 %), seguida pela presença de AND (18,5 %), BI (17,5 %), PX (14,0 %), ANF (5,3 %), EST (3,7 %) e de TIT (0,4 %). Nos grupos G2 e G3 os sedimentos são dominados pela presença de PX (71.0 e 63.6 %, respectivamente), seguida por ANF (21.7 e 22.9 %), titanite (TIT – 3,2 e 0,6 %), TU (1,8 % em ambos os grupos), AND (1,2 % em ambos os grupos), BI (0,7 e 9,5 %) e EST (0,4 % em ambos os grupos). O cortejo mineralógico identificado em G4 revela uma composição intermédia entre os casos anteriores, sendo caracterizado pela elevada frequência de TU (36,9 %), seguida por PX (31,2 %), ANF (11,5 %), AND (10,3 %), EST (9,3 %) e TIT (0,7 %) – Figura 3.

5.2. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente

As 35 amostras analisadas estão distribuídas por quatro grupos, de acordo com a área da sua colheita (Figura 1B). O primeiro grupo corresponde a sedimentos recolhidos no leito do

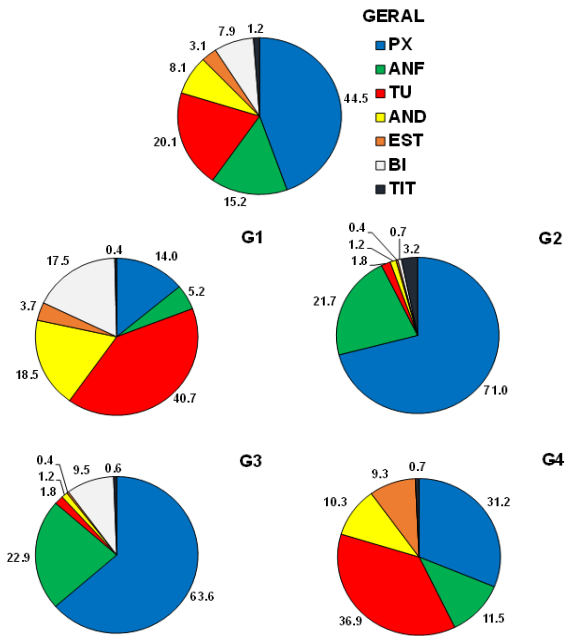


Figura 3. Área envolvente do cabo de Sines: frequência relativa dos minerais pesados transparentes mais comuns. O diagrama “GERAL” representa a média das frequências relativas ao conjunto dos quatro grupos de amostras (G1, G2, G3 e G4). PX – piroxena, ANF – anfíbola, TU – turmalina, AND – andaluzite, EST – estaurolite, BI – biotite, TIT – titanite.

Figure 3. Sines cape área: relative frequency of the most abundant transparent heavy minerals. The pie chart “GERAL” represents the average frequencies relative to the four sample groups (G1, G2, G3 and G4). PX – pyroxene, ANF – amphibole, TU – tourmaline, AND – andalusite, EST – staurolite, BI – biotite, TIT – titanite.

rio Guadiana (grupo RG) e é constituído por oito amostras, o segundo grupo inclui os sedimentos colhidos na área da desembocadura do rio Guadiana (DG) e contém um total de 11 amostras colhidas num intervalo de profundidades entre os 6 e os 22 m, o terceiro grupo é representado pelos sedimentos recolhidos da plataforma continental interna do lado português (PIP) e é representado por quatro amostras oriundas de profundidades compreendidas entre 9 e 23 m e, por fim, o quarto grupo é representado pelos sedimentos recolhidos da plataforma continental interna do lado espanhol (PIE) e é representado por 12 amostras oriundas de profundidades situadas entre os 6 e os 22m.

Considerando a totalidade das amostras (35) verifica-se que os minerais transparentes mais abundantes são, por ordem decrescente da sua frequência relativa: anfíbola verde-incolor (ANFVI – 29,3 %), turmalina (TU – 25,3 %), andaluzite (AND – 17,9 %), anfíbola castanha (ANFC – 10,2 %), estaurolite (EST – 6,4 %), granada (GRA – 3,6 %), ortopiroxena (OPX – 3,1 %), clinopiroxena (CPX – 2,6 %) e epidoto (EP – 1,6 %). Considerando cada grupo individualmente verifica-se que, em RG, a ANFVI é o mineral dominante apresentando uma frequência de 42,1 % seguida, por ordem decrescente, pela ANFC (18,1 %), AND (14,6 %), OPX (7,2 %), GRA (5,4 %), CPX (5,4 %), TU (4,8 %), EP (2,3) e EST (0,2 %). Em DG o mineral transparente mais abundante é representado pela ANFVI (39,6 %), seguido de TU (20,4 %), AND (13,1 %), ANFC (12,8 %), EST (5,2 %), OPX (3,0 %), CPX (2,9 %), GRA (1,8 %) e EP (1,2 %). Em PIE o mineral mais abundante é representado pela ANFVI (32,5 %), seguido de AND (23,4 %), TU (18,6 %), ANFC (9,7 %), GRA (7,0 %), EP (2,7 %), EST (2,3 %), OPX (2,2 %) e CPX (1,8 %). Por último em PIP o mineral mais abundante é representado por TU (57,5 %), seguido de AND (20,6 %), EST (17,7 %), ANFVI (3,2 %), GRA (0,4 %), ANFC (0,2 %), CPX (0,2 %), EP (0,1 %) e OPX (0,1 %) – Figura 4.

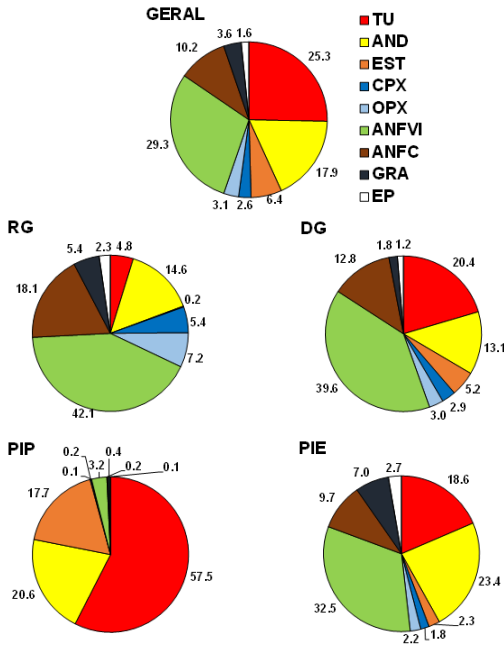


Figura 4. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente: frequência relativa dos minerais pesados transparentes mais comuns. O diagrama “GERAL” representa a média das frequências relativas ao conjunto dos quatro grupos de amostras (RG, DG, PIP e PIE). TU – turmalina, AND – andaluzite, EST – estauroлите, CPX – clinopiroxena, OPX – ortopiroxena, ANFVI – anfíbola verde -incolor, ANFC – anfíbola castanha, GRA – granada, EP - epidoto.

Figure 4. Guadiana river and adjacent continental shelf: relative frequency of the most abundant transparent heavy minerals. The pie chart “GERAL” represents the average frequencies relative to the four sample groups (RG, DG, PIP and PIE). TU – tourmaline, AND – andalusite, EST – staurolite, CPX – clinopyroxene, OPX – orthopyroxene, ANFVI – green colourless amphibole, ANFC – brown amphibole, GRA – garnet, EP - epidote.

5.3. Plataforma continental do Golfo de Cádiz

As 57 amostras analisadas pertencem a seis testemunhos verticais de sedimentos colhidos por *vibrocorer* nesta plataforma continental (Figura 1D). O testemunho 1 (T1) contém dez amostras, o T4b nove, o T5 treze, o T7 oito, o T8 onze e o T9 seis. Os resultados que a seguir se apresentam dizem respeito aos valores médios referentes a cada um dos testemunhos verticais.

Globalmente verifica-se que os testemunhos recolhidos revelam, por ordem decrescente de frequência, as seguintes espécies principais: anfíbola verde-incolor (ANFVI – 32,2 %), turmalina (TOU – 24,3 %), andaluzite (AND – 18,7 %), anfíbola castanha (ANFC – 8,6 %), estauroлите (EST – 5,3 %), clinopiroxena (CPX – 3,5 %), biotite (BI – 2,4 %), granada (GRA – 2,0 %), zircão (ZI – 2,0 %) e ortopiroxena (OPX – 1,1 %). Entre os testemunhos de sedimentos mais grosseiros (designados por T4b, T7 e T9, contendo sedimentos com médias granulométricas de areia fina a média) e os testemunhos de sedimentos mais finos (designados por T1, T5 e T8, contendo sedimentos com média de silte grosseiro) existem grandes contrastes mineralógicos. Assim, nos primeiros verifica-se a presença dominante de TU, AND e EST, que em conjunto representam mais de 65 % do total dos minerais transparentes, ao passo que os segundos revelam a presença dominante de ANFVI e ANFC, que em conjunto representam também mais de 65 % do total dos minerais transparentes identificados (Figura 5).

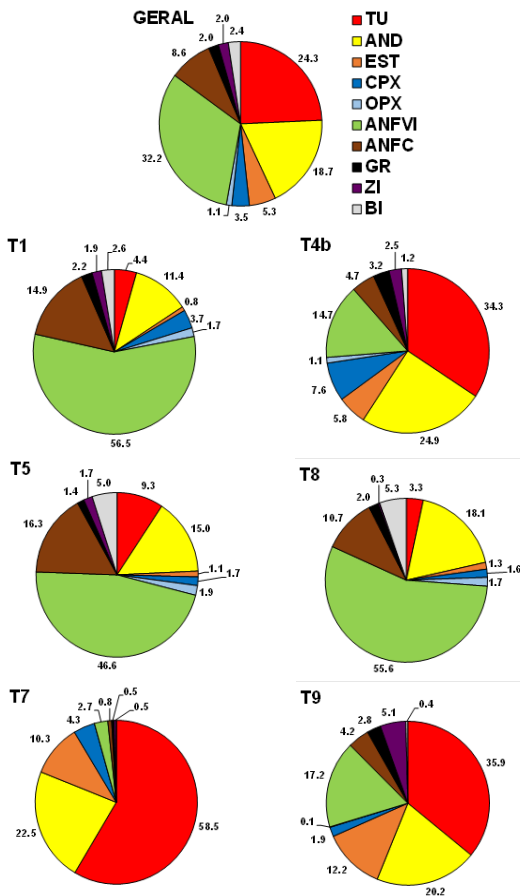


Figura 5. Plataforma continental do Golfo de Cádiz: frequência relativa dos minerais pesados transparentes mais comuns. O diagrama “GERAL” representa a média das frequências relativas ao conjunto dos seis grupos de amostras (T1, T4b, T5, T7, T8 e T9). TU – turmalina, AND – andaluzite, EST – estauroilite, CPX – clinopiroxena, OPX – ortopiroxena, ANFVI – anfíbola verde-incolor, ANFC – anfíbola castanha, GRA – granada, ZI – zircão, BI - biotite.

Figure 5. Gulf of Cadiz continental shelf: relative frequency of the most abundant transparent heavy minerals. The pie chart “GERAL” represents the average frequencies relative to the six sample groups (T1, T4b, T5, T7, T8 and T9). TU – tourmaline, AND – andalusite, EST – staurolite, CPX – clinopyroxene, OPX – orthopyroxene, ANFVI – green-colourless amphibole, ANFC – brown amphibole, GRA – garnet, ZI – zircon, BI - biotite.

6. Caracterização dos minerais pesados mais frequentes

Entre os mais de 35.000 grãos transparentes identificados verifica-se a ocorrência de uma grande variabilidade morfológica nas espécies mais frequentes que caracterizam as três áreas estudadas: anfíbolos (ANF, ANFVI e ANFC), piroxenas (PX, OPX e CPX), turmalina (TU), andaluzite (AND), estauroilite (EST), biotite (BI), granada (GRA), zircão (ZI), epidoto (EP) e titanite (TIT). Esta variabilidade expressa-se, essencialmente, pela presença de partículas com formas muito variadas desde muito angulosas a bem roladas e, ainda, pela existência de partículas com formas lamelares em espécies com planos de clivagem bem desenvolvidos. Neste âmbito, cabe aqui referir, entre as espécies mais frequentes, o caso geral da biotite que aparece sempre com formas lamelares e o caso específico de algumas anfíbolos presentes nos sedimentos colhidos da plataforma continental do Golfo de Cádiz. Nestes sedimentos a variabilidade morfológica das anfíbolos é manifestada pela ocorrência frequente de exemplares

com formas muito lamelares, normalmente associados a sedimentos mais finos (com médias granulométricas de silte grosseiro), em oposição à presença de formas mais equidimensionais normalmente observadas em sedimentos mais grosseiros (com médias granulométricas oscilando entre a areia média e fina). Adicionalmente às variabilidades morfológicas descritas há que acrescentar outras características mineralógicas específicas observadas em algumas das espécies anteriormente referidas. Cabe aqui destacar, por exemplo, a presença de anfíbolos verdes – incolores (ANFVI) ou castanhas (ANFC), de piroxenas monoclinicas (CPX) ou ortorrômbicas (OPX), de grãos de andaluzite com ou sem inclusões carbonosas (variedade quiastolite) ou de turmalinas castanhas ou azuis. Acresce-se, ainda, que foi observada uma variedade de OPX (bronzite) que se reconhece pela existência de sinais de alteração evidenciados pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro (*schiller structure*; Kerr 1977) - Figuras 6 a 11.

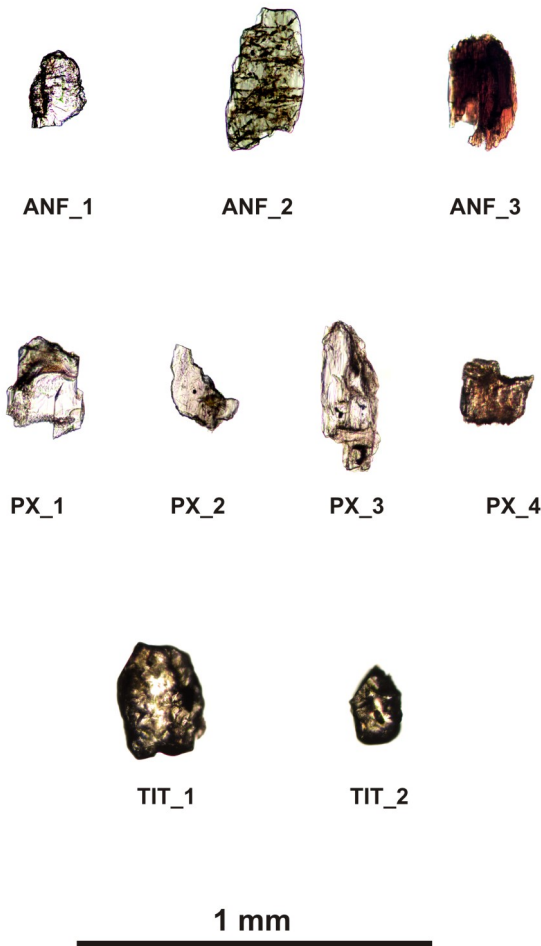


Figura 6. Aspecto visual de alguns grãos de anfíbola, piroxena e titanite identificados nas amostras oriundas da área envolvente ao cabo de Sines. ANF_1 – anfíbola incolor angular, ANF_2 – anfíbola verde angular, ANF_3 – anfíbola castanha angular, PX_1 – clinopiroxena angular, PX_2 – clinopiroxena angular, PX_3 – ortopiroxena angular, PX_4 – ortopiroxena angular, TIT_1 – titanite subangular, TIT_2 – titanite subangular.

Figure 6. Visual aspect of surface textures of amphiboles, pyroxenes and titanite grains present in samples collected from Sines cape surrounding area. ANF_1 – angular colourless amphibole, ANF_2 – angular green amphibole, ANF_3 – brown amphibole, PX_1 – angular clinopyroxene, PX_2 – angular clinopyroxene, PX_3 – angular orthopyroxene, PX_4 – angular orthopyroxene, TIT_1 – sub-angular titanite, TIT_2 – sub-angular titanite.



Figura 7. Aspecto visual de alguns grãos de turmalina, andaluzite, estaurolite e biotite identificados nas amostras oriundas da área envolvente ao cabo de Sines. TU_1 – turmalina sub-rolada, TU_2 – turmalina subangulosa, AND_1 – andaluzite angulosa, AND_2 – andaluzite sub-rolada, EST_1 – estaurolite sub-angulosa, EST_2 – estaurolite sub-rolada, BI_1 – biotite sub-rolada, BI_2 – biotite subangulosa (quase euédrica).

Figure 7. Visual aspect of surface textures of tourmaline, andalusite, staurolite and biotite grains present in samples collected from Sines cape surrounding area. TU_1 – sub-rounded tourmaline, TU_2 – sub-angular tourmaline, AND_1 – angular andalusite, AND_2 – sub-rounded andalusite, EST_1 – sub-angular staurolite, EST_2 – sub-rounded staurolite, BI_1 – sub-rounded biotite, BI_2 – sub-angular biotite (almost euhedral).

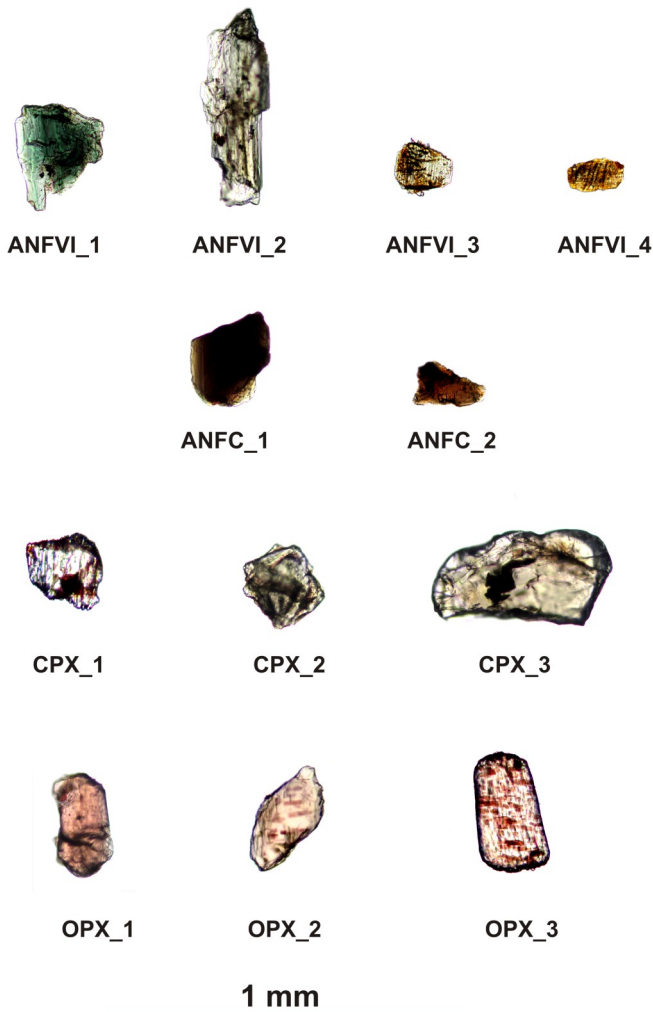


Figura 8. Aspecto visual de alguns grãos de anfíbola e piroxena identificados nas amostras oriundas do rio Guadiana e plataforma continental adjacente. ANFVI_1 – anfíbola verde angulosa, ANFVI_2 – anfíbola incolor angulosa, ANFVI_3 – anfíbola verde sub-rolada (com sinais de alteração), ANFVI_4 – anfíbola verde sub-rolada (com sinais de alteração), ANFC_1 – anfíbola castanha subangulosa, ANFC_2 – anfíbola castanha angulosa, CPX_1 – clinopiroxena angulosa (com sinais de alteração), CPX_2 – clinopiroxena subangulosa, CPX_3 – clinopiroxena subangulosa, OPX_1 – ortopiroxena sub-rolada, OPX_2 – ortopiroxena subangulosa (bronzite), OPX_3 – ortopiroxena sub-rolada (bronzite).

Figure 8. Visual aspect of surface textures of amphiboles and pyroxenes grains present in samples collected from Guadiana River and adjacent continental shelf. ANFVI_1 – angular green amphibole, ANFVI_2 – angular colourless amphibole, ANFVI_3 – sub-rounded green amphibole (with corrosion signs), ANFVI_4 – sub-rounded green amphibole (with corrosion signs), ANFC_1 – sub-angular brown amphibole, ANFC_2 – angular brown amphibole, CPX_1 – angular clinopyroxene (with corrosion signs), CPX_2 – sub-angular clinopyroxene, CPX_3 – sub-angular clinopyroxene, OPX_1 – subrounded orthopyroxene, OPX_2 – sub-angular orthopyroxene (bronzite), OPX_3 – sub-rounded orthopyroxene (bronzite).

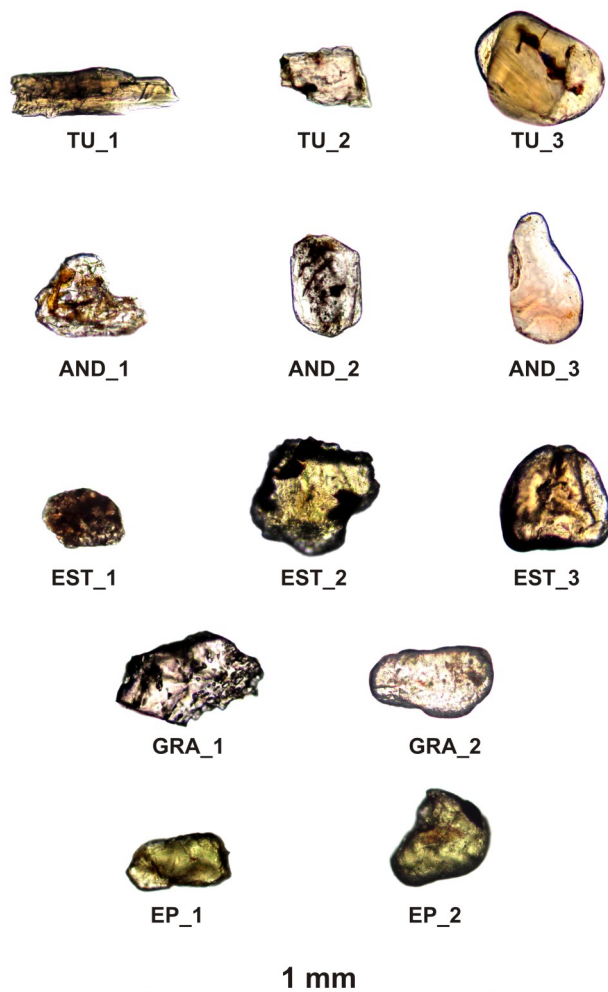


Figura 9. Aspecto visual de alguns grãos de turmalina, andaluzite, estaurolite e biotite identificados nas amostras oriundas do rio Guadiana e plataforma continental adjacente. TU_1 – turmalina angulosa, TU_2 – turmalina angulosa, TU_3 – turmalina rolada, AND_1 – andaluzite subangulosa (partida), AND_2 – andaluzite sub-rolada, AND_3 – andaluzite rolada, EST_1 – estaurolite sub-rolada (com sinais de alteração), EST_2 – estaurolite subangulosa, EST_3 – estaurolite rolada, GRA_1 – granada angulosa, GRA_2 – granada rolada, EP_1 – epidoto sub-rolado, EP_2 – epidoto rolado (partido).

Figure 9. Visual aspect of surface textures of tourmaline, andalusite, staurolite and biotite grains present in samples collected from Guadiana River and adjacent continental shelf. TU_1 – angular tourmaline, TU_2 – angular tourmaline, TU_3 – rounded tourmaline, AND_1 – sub-angular andalusite (broken), AND_2 – sub-rounded andalusite, AND_3 – rounded andalusite, EST_1 – sub-rounded staurolite (with corrosion signs), EST_2 – sub-angular staurolite, EST_3 – rounded staurolite, GRA_1 – angular garnet, GRA_2 – rounded garnet, EP_1 – sub-rounded epidote, EP_2 – rounded epidote (broken).

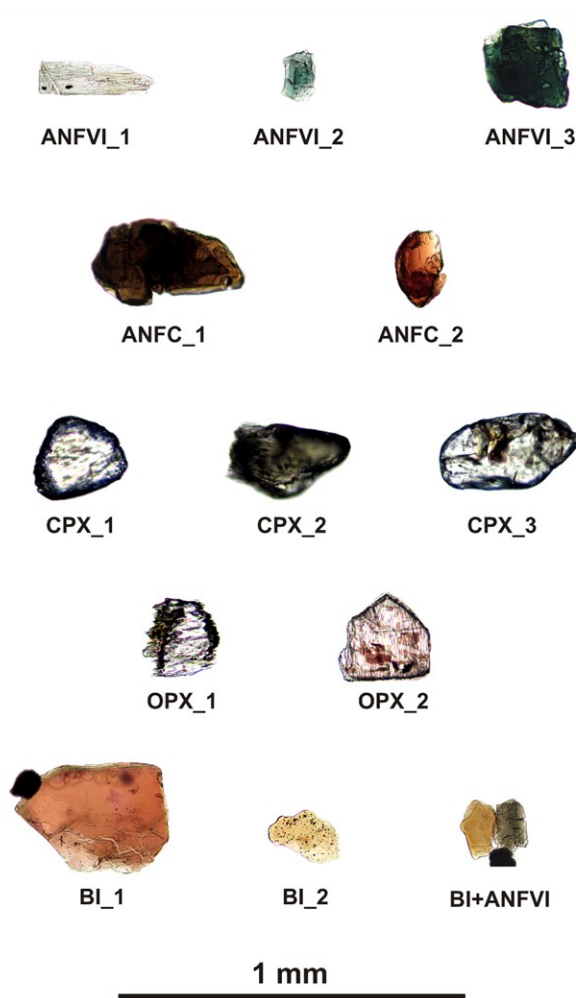


Figura 10. Aspecto visual de alguns grãos de anfíbola, de piroxena e de biotite identificados nas amostras oriundas da plataforma continental do Golfo de Cádiz. ANFVI_1 – anfíbola incolor angulosa, ANFVI_2 – anfíbola verde angulosa, ANFVI_3 – anfíbola verde subangulosa, ANFC_1 – anfíbola castanha subangulosa, ANFC_2 – anfíbola castanha sub-rolada, CPX_1 – clinopiroxena sub-rolada (com sinais de alteração), CPX_2 – clinopiroxena sub-rolada, CPX_3 – clinopiroxena sub-rolada, OPX_1 – ortopiroxena sub-rolada (com sinais de alteração), OPX_2 – ortopiroxena subangulosa (bronzite), BI_1 – biotite sub-angulosa, BI_2 – biotite sub-rolada, BI+ANFVI – biotite e anfíbola verde sub-roladas (com formas lamelares).

Figure 10. Visual aspect of surface textures of amphiboles and pyroxenes grains present in samples collected from Cadiz Gulf's continental shelf. ANFVI_1 – angular incolor amphibole, ANFVI_2 – angular green amphibole, ANFVI_3 – sub-angular green amphibole, ANFC_1 – sub-angular brown amphibole, ANFC_2 – sub-rounded brown amphibole, CPX_1 – sub-rounded clinopyroxene (with corrosion signs), CPX_2 – sub-rounded clinopyroxene, CPX_3 – sub-rounded clinopyroxene, OPX_1 – sub-rounded orthopyroxene (with corrosion signs), OPX_2 – sub-angular orthopyroxene (bronzite), BI_1 – sub-angular biotite, BI_2 – sub-rounded biotite, BI+ANFVI – sub-rounded biotite and amphibole (with lamellar and bladed shapes) .



Figura 11. Aspecto visual de alguns grãos de turmalina, andaluzite, estauroлите, granada e zircão identificados nas amostras oriundas da plataforma continental do Golfo de Cádiz. TU_1 – turmalina angulosa, TU_2 – turmalina rolada, AND_1 – andaluzite subangulosa, AND_2 – andaluzite sub-rolada, EST_1 – estauroлите angulosa (com sinais de alteração), EST_2 – estauroлите rolada, GRA_1 – granada angulosa, GRA_2 – granada rolada, ZI_1 – zircão rolado, ZI_2 – zircão euédrico (partido).

Figure 11. Visual aspect of surface textures of tourmaline, andalusite, staurolite, garnet and zircon grains present in samples collected from Cadiz Gulf's continental shelf. TU_1 – angular tourmaline, TU_2 – rounded tourmaline, AND_1 – sub-angular andalusite (broken), AND_2 – sub-rounded andalusite, EST_1 – angular staurolite (with corrosion signs), EST_2 – rounded staurolite, GRA_1 – angular garnet, GRA_2 – rounded garnet, ZI_1 – rounded zircon, ZI_2 – euhedral zircon (broken).

7. Discussão dos resultados: proveniência dos minerais pesados

7.1. Área envolvente do Cabo de Sines

Os resultados obtidos revelam a presença de duas associações mineralógicas fundamentais. A primeira é dominada pela presença abundante de TU, AND e EST exibindo formas roladas a sub-roladas (Figuras 3 e 7). Neste contexto geológico é admissível afirmar que esta associação é compatível com uma origem sedimentar de natureza policíclica relacionada com a cobertura sedimentar não consolidada do Pliocénico e Holocénico que envolve toda a área emersa em torno dos afloramentos rochosos do maciço de Sines (Inverno *et al.* 1993). Esta associação está muito bem representada nos grupos 1 e 4, estando praticamente ausente nos grupos 2 e 3 (Figura 3). A segunda associação mineralógica é dominada pela presença de grãos angulosos a sub-angulosos de PX, ANF e TIT, geralmente sem alteração significativa (Figuras 3 e 6), que indiciam uma origem relacionada com os gabros e dioritos do maciço de Sines (Canilho 1972, 1989) o que corrobora a hipótese da existência de um curto trajecto de transporte entre a sua origem e os locais onde foram recolhidos os sedimentos.

7.2. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente

Os sedimentos recolhidos do leito do rio Guadiana (grupo RG) contêm uma associação mineralógica dominada pela presença das anfíbolas (nas variedades ópticas ANFVI e ANFC) e das piroxenas (OPX e CPX) que em conjunto representam mais de 50 % das frequências dos minerais transparentes identificados (Figuras 4 e 8). Este padrão mineralógico pode ser facilmente interpretado do ponto de vista da proveniência se considerarmos o facto do rio Guadiana atravessar um conjunto de terrenos onde afloram vários tipos de rochas ígneas e metamórficas (peridotitos, gabros, basaltos e anfíbolitos) em que os minerais referidos são essenciais (Oliveira *et al.* 1992). Em particular verifica-se que as piroxenas e as anfíbolas são minerais muito abundantes nas amostras recolhidas do leito do rio Guadiana, sobretudo nas proximidades da vila de Serpa. Ora, dado que nesta região existem extensos afloramentos de rochas ígneas básicas e ultrabásicas (nomeadamente gabros, peridotitos e anfíbolitos pertencentes ao maciço de Beja – Figura 1C), é lógico concluir que estas litologias constituem a fonte principal destes minerais. A presença dominante destes minerais também se manifesta nos sedimentos da desembocadura do rio Guadiana (grupo DG), nomeadamente nos que foram recolhidos a profundidades situadas entre os 5 e 11 m (> 80 %). Todavia, a maiores profundidades, entre os 11 e 22 m, o “sinal mineralógico do Guadiana” é muito mais fraco ($\approx 30\%$) tornando-se dominante a associação mineralógica constituída pelo trio TU + AND + EST ($\approx 50\%$), tal como acontece nas quatro amostras pertencentes ao grupo PIP onde este trio mineralógico (constituído por grãos rolados a sub-rolados) é esmagadoramente dominante (> 90 %) – Figuras 4 e 9. Por sua vez, no grupo de amostras recolhidas na plataforma interna do lado espanhol (PIE) a assinatura mineralógica é significativamente diferente da que foi identificada nos casos anteriormente descritos. De facto, a presença de GRA (7.0 %) e de EP (2.7 %) mostram a singularidade da assinatura mineralógica dos sedimentos recolhidos nesta zona da plataforma interna, a qual é inteiramente compatível com a presença destes minerais observada na plataforma continental de Cádiz por Gutierrez-Mas *et al.* (1994). Convém ainda referir que no grupo PIE são encontradas anfíbolas (ANFVI +

ANFC \approx 40 %) e piroxenas (CPX + OPX \approx 4 %) compatíveis com as anfíbolas e as piroxenas identificadas nos sedimentos do rio Guadiana e sua desembocadura (grupos RG e DG), apesar de apresentarem formas predominantemente roladas a sub-roladas (Figura 8). A origem primária destes silicatos ferromagnesianos deverá ser coincidente com a origem atribuída aos mesmos silicatos presentes nos sedimentos do rio Guadiana e sua desembocadura (grupos RG e DG). Contudo, no grupo PIE, o maior grau de arredondamento observado nestes grãos aponta para a existência de uma longa evolução sofrida em ambiente sedimentar. De facto, a grande maioria destas partículas mineralógicas tem características morfológicas policíclicas (Figura 8). Como tal, é provável que a sua origem esteja relacionada com a presença de sedimentos de natureza relíquia da zona infralitoral desta plataforma correspondentes a uma antiga desembocadura do rio Guadiana (Gonzalez *et al.* 2004). Podemos assim admitir, como hipótese provável, que estes minerais foram fornecidos no passado ao litoral e à plataforma continental pelo rio Guadiana. Adicionalmente, com base nos padrões de ocorrência das piroxenas e das anfíbolas podemos afirmar que o sinal mineralógico do rio Guadiana se estende para oriente da sua foz numa extensão de pelo menos 40 km. Esta interpretação é concordante com a tendência dominante do sentido da deriva litoral (W-E) apontada por Mèlières (1974).

7.3 Plataforma continental do Golfo de Cádiz

Como já foi afirmado anteriormente, os sedimentos recolhidos nos diferentes testemunhos verticais apresentam, fundamentalmente, duas associações mineralógicas distintas. A associação mineralógica presente nos testemunhos verticais de sedimentos mais finos (T1, T5 e T8) é caracterizada pela presença dominante de anfíbolas (>60 %) (Figura 5), que apresentam um hábito lamelar (Figura 10), que possibilita um transporte em suspensão na coluna de água, como se fossem hidraulicamente equivalentes a partículas minerais mais finas (da dimensão do silte grosseiro), tal como é sugerido em trabalhos anteriores retratando ambientes similares (Schimmitter e Freeman-Lynde 1988, Morton e Hallsworth 1999, Cascalho e Fradique 2007). A origem primária destas anfíbolas é compatível com as rochas básicas e ultrabásicas existentes na bacia hidrográfica do Guadiana e estará, muito provavelmente, relacionada com o acarreo de partículas terrígenas oriundas dessa bacia, hipótese que está de acordo com estudos anteriores de Gonzalez *et al.* (2004 e 2007) que referem a grande importância deste rio como fornecedor de sedimentos terrígenos para esta plataforma continental.

Pelo contrário, nos testemunhos verticais compostos por sedimentos mais grosseiros (T4b, T7 e T9), a presença de grandes quantidades de minerais com formas predominantemente roladas a sub-roladas (TU + AND > 50 %) é indicativa de uma fonte sedimentar com características policíclicas (Figuras 5 e 11). A origem destes minerais estará, muito provavelmente, relacionada com a presença de sedimentos relíquia (associados a antigos cordões litorais) que ocorrem na plataforma interna do Golfo de Cádiz (Gonzalez *et al.* 2004). Neste contexto, é de referir a elevada frequência da “associação TU + AND” (\approx 80 %) composta essencialmente por grãos rolados a sub-rolados identificados no testemunho T7 em quantidades muito homogêneas (Figura 5). Este testemunho foi colhido a uma profundidade de 36 m e representa um depósito sedimentar pertencente a uma parasequência de características transgressivas, conhecida pela designação T_D (Lobo *et al.* 2001) que é interpretada como resultante de um período de arrefecimento no Hemisfério Norte ocorrido há cerca de 8.2 ka BP, após o máximo

glaciar (Alley *et al.* 1997, Kobashi *et al.* 2007). O elevado grau de maturidade evidenciado pela “associação TU + AND” do testemunho T7 (Figura 11) é inteiramente compatível com a presença de sedimentos arenosos de características transgressivas visto que este tipo de sedimentos é normalmente mais maduro do que os seus correspondentes regressivos, quer do ponto de vista textural, quer do ponto de vista mineralógico (Cattaneo e Steel 2003). Poder-se-á então afirmar que esta associação mineralógica representa o resultado final de um processo longo de evolução sedimentar que incluirá, certamente, vários ciclos de erosão-transporte-sedimentação em ambientes de elevada energia. Nos outros testemunhos verticais de sedimentos grosseiros a presença desta associação muito evoluída (TU +AND) já não é tão dominante. Por exemplo, o testemunho T4b, apesar colhido a uma profundidade de 51 m, que é aparentemente coincidente com a localização da parasequência T_D , mostra a presença de uma quantidade significativa de anfífolas ($\approx 20\%$ em média) numa provável relação com a contribuição de minerais terrígenos fornecidos pelo rio Guadiana (Figura 5).

8. Discussão dos resultados: análise composicional

8.1. Fundamentos teóricos da análise composicional (breve referência)

A identificação e a contagem das espécies mineralógicas transparentes resultaram na criação de três matrizes de dados referentes aos três casos estudados cujos resultados foram descritos e interpretados do ponto de vista da proveniência sedimentar no sub-capítulo anterior.

Cada uma das amostras é caracterizada por um conjunto de minerais cuja abundância é expressa em frequências relativas, tal como foi referido no sub-capítulo 4. Desta forma, por cada amostra, a soma das frequências de todos os minerais é igual a 100 %. Isto significa que os valores de frequência relativa (dados composicionais) são constrangidos no sentido em que não variam de forma independente. A este propósito, J. Aitchison (2003), p. 5, afirma que *“Compositional data consist of vectors whose components are the proportion or percentages of some whole. Their peculiarity is that their sum is constrained to be some constant, equal to 1 for proportions, 100 for percentages or possibly some other constant c for other situations such as parts per million (ppm) in trace element compositions. Unfortunately a cursory look at such vectors gives the appearance of vectors of real numbers with the consequence that over the last century all sorts of sophisticated statistical methods designed for unconstrained data have been applied to compositional data with inappropriate inferences. All this despite the fact that many workers have been, or should have been, aware that the sample space for compositional vectors is radically different from the real Euclidean space associated with unconstrained data.”*. Esta questão do “constrangimento a 100 %” torna-se crítica quando se pretendem aplicar métodos de análise multivariada que foram concebidos para serem utilizados com dados não constrangidos. Nesta perspectiva, Aitchison (1986) mostrou que o efeito do constrangimento no cálculo das matrizes de correlação ou de variância-covariância desaparece se os dados de frequência relativa forem alvo de uma transformação logarítmica. Por isso, no presente trabalho, estes dados foram transformados utilizando a razão logarítmica centrada (ou *centred log-ratio transformation - clr*) que corresponde ao cálculo do logaritmo de uma razão entre a frequência relativa de cada mineral e a média geométrica dos valores percentuais de todos os minerais identificados em cada amostra. Esta transformação é expressa da seguinte forma:

$$clr(X) = \left[\ln \frac{x_1}{g(X)}; \dots; \ln \frac{x_D}{g(X)} \right] \quad (1)$$

$$g(X) = \sqrt[D]{x_1 \dots x_D} \quad (2)$$

Em que $clr(X)$ é a razão logarítmica centrada e $g(X)$ é a média geométrica. Todavia, acontece que nas matrizes de dados que expressam os valores de contagem a presença de zeros é muito frequente o que invalida o cálculo da razão logarítmica. Para ultrapassar esta dificuldade há que converter todos os zeros por valores positivos inferiores ao limite mínimo de detecção, que neste caso é igual a 1. A este procedimento chamam os autores de língua inglesa de *zero-replacement* ou *rounding-error replacement procedure* (Aitchison 1986). Nos casos em análise, cada valor zero, que traduz a não identificação de uma determinada espécie numa operação de contagem efectuada em cada amostra, foi substituído por 1.0×10^{-4} . Uma vez feita esta operação de substituição, os valores das contagens foram recalculados para 100 % e a razão logarítmica foi calculada utilizando as equações 1 e 2. Após esta operação procedeu-se à aplicação da análise em componentes principais (ACP), com o objectivo de extrair as eventuais correlações lineares existentes entre os vários minerais identificados em cada um dos conjuntos de amostras estudadas (Davies 1986). Estas correlações lineares são expressas através de um conjunto de componentes principais hierarquizados segundo a quantidade decrescente de variância de dados explicada por cada um desses componentes. No essencial, a ACP tem como objectivo principal capturar a maior parte da variabilidade dos dados utilizando o número mínimo possível de componentes extraídos que apresentam correlação nula entre si (Aitchison 1986). Optou-se por fazer a extracção dos componentes principais utilizando a matriz de variância-covariância (VAR-COV) uma vez que os dados originais representam quantidades relativas de vários minerais expressas nas mesmas unidades (Borgognone *et al.* 2001). De seguida analisamos os resultados da ACP baseada no cálculo da $rlc(X)$ e na projecção dos resultados em diagramas *biplot* (Aitchison e Greenacre 2002) obtidos pela aplicação do programa informático *CoDaPack* (Thió-Henestrosa e Martín-Fernández 2005).

8.2. Área envolvente do Cabo de Sines

Neste caso foi considerado como ponto de partida uma matriz de dados contendo 22 amostras ($n = 22$) caracterizadas por seis minerais ($m = 6$). O cálculo da matriz VAR-COV mostra que os minerais TIT e a EST são os que apresentam maior variância em oposição à ANF e PX que exibem os valores mais baixos de variância associada. O traço desta matriz é igual a 27.31 e representa a soma dos valores próprios dos componentes principais extraídos, verificando-se que os dois primeiros componentes têm associado cerca de 94 % da variância dos dados (Tabelas 1 e 2). As ponderações dos vários minerais no componente com maior variância associada (C1 = 75 %) mostram uma proximidade de ponderação entre a TU, AND e EST (em valores negativos) em oposição à ponderação da TIT e, em menor grau, da ANF (em valores positivos). O componente C2 tem associada uma variância menor (C2 = 17 %) e nas ponderações dos vários minerais mostra uma proximidade entre a PX e a ANF (com valores positivos) em oposição à da EST que apresenta valor negativo (Figura 12).

Projectando as 22 amostras num gráfico *biplot* verifica-se o aparecimento de um novo

Tabela 1. Área envolvente ao cabo de Sines: matriz de variâncias-covariâncias.

Table 1. Sines cape area: variance-covariance matrix.

	PX	ANF	TIT	TU	AND	EST
PX	1.22					
ANF	0.98	0.94				
TIT	0.42	1.18	14.30			
TU	-0.52	-0.82	-5.46	2.70		
AND	-0.37	-0.54	-4.67	2.20	2.09	
EST	-1.73	-1.74	-5.77	1.90	1.29	6.05
SOMA DAS VARIÂNCIAS (TRAÇO DA MATRIZ) = 27.31						

Tabela 2. Área envolvente ao cabo de Sines: valores próprios e variância dos componentes extraídos.

Table 2. Sines cape area: eigenvalues and variance of the extracted components.

COMPONENTES	VALORES PRÓPRIOS	% INDIVIDUAL	VALORES PRÓPRIOS CUMULATIVO	% CUMULATIVA
1	21.03	77.02	21.03	77.02
2	4.52	16.57	25.56	93.58
3	1.53	5.62	27.09	99.20
4	0.19	0.68	27.28	99.88
5	0.03	0.12	27.31	100.00

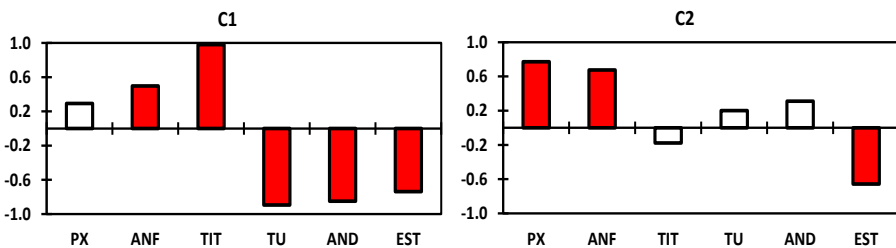


Figura 12. Área envolvente do cabo de Sines: ponderação dos minerais nos dois componentes principais com maior variância associada (barras a vermelho = minerais com maior ponderação).

Figure 12. Sines cape área: mineral loadings on the first two principal components with higher variance associated (red bars = minerals with higher loading).

padrão de agrupamento destas amostras. Surgem, assim, três associações em que duas delas incluem as amostras dos grupos G1 e G4 e uma terceira que inclui as amostras dos grupos G2 e G3 (Figura 13). Este padrão é suportado, em proporções diferentes, pelo eixo relativo ao 1.º componente principal (1st) e pelo eixo relativo 2.º componente (2nd) que, em conjunto, têm

associado mais de 90 % da variância dos dados (Tabela 2). Podemos igualmente verificar no gráfico *biplot* da Figura 13 quais são os minerais que melhor traduzem o padrão de distribuição observado para as amostras da região de Sines. Verifica-se assim que a máxima variabilidade está associada aos vectores mais longos (*clr.TIT* e *clr.EST*) que correspondem aos minerais titanite e estauroлите que possuem os valores mais elevados de variância (Tabela 1). Focando a atenção no padrão dos vectores *clr* verifica-se que eles tendem a agrupar-se segundo duas direcções principais gerando um padrão em “cruz”: uma definida pela oposição da EST relativamente à ANF + PX e outra definida pela oposição da TIT relativamente à TU + AND (Figura 13). Este padrão é aparentemente condicionado apenas pelo efeito da proveniência uma vez que opõe sempre minerais oriundos de fontes primárias (rochas ígneas e metamórficas) a minerais oriundos de fontes secundárias (sedimentares), tal como referido anteriormente (sub-capítulo 7).

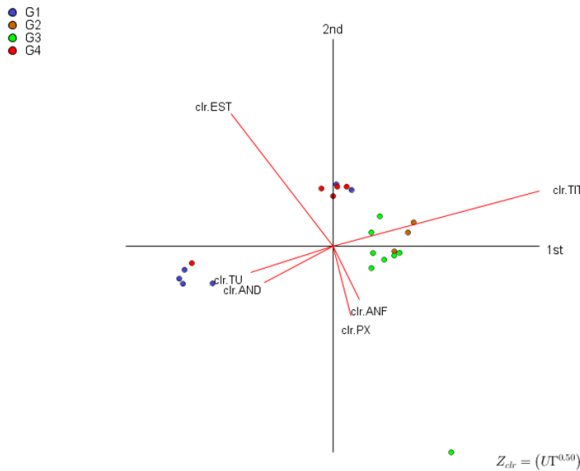


Figura 13. Área envolvente do cabo de Sines: gráfico composicional biplot mostrando a projecção das amostras de acordo com os componentes principais 1 (1^{st}) e 2 (2^{nd}) e também a orientação dos vectores (referentes aos minerais) resultantes da transformação logarítmica utilizada (*clr*)

Figure 13. Sines cape area: compositional biplot diagram showing the samples projection according to the principal components 1 (1^{st}) and 2 (2^{nd}) and also the orientation of the vectors (correspondent to minerals) derived from the centred log-ratio transformation (*clr*).

8.3. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente

Neste caso foi considerado como ponto de partida uma matriz de dados definida por 35 amostras ($n = 35$) caracterizadas por sete minerais ($m = 7$). O cálculo da matriz VAR-COV mostra a EST como sendo o mineral que apresenta a maior variância, em oposição à AND e à ANF-VI que exibem os valores mais baixos de variância associada. O traço desta matriz é igual a 55.98 e representa a soma dos valores próprios dos componentes principais extraídos. Verifica-se que os dois primeiros componentes têm associado cerca de 83 % da variância dos dados (Tabelas 3 e 4). As ponderações dos vários minerais no componente com maior variância associada (C1 = 66 %) mostram uma proximidade de ponderação entre a TU e EST (em valores negativos) em oposição à ponderação da OPX, ANFVI e ANFC com valores positivos. O componente C2 tem associada uma variância menor (C2 = 17 %) e nas ponderações dos vários minerais mostra o isolamento da GRA relativamente a todos os outros minerais (Figura 14).

Tabela 3. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente: matriz de variâncias-covariâncias.

Table 3. Guadiana River and adjacent continental shelf: variance-covariance matrix.

	TU	AND	EST	OPX	ANFVI	ANFC	GRA
TU	6.27						
AND	1.88	1.80					
EST	6.50	1.50	20.58				
OPX	-5.08	-2.06	-10.03	8.97			
ANFVI	-2.90	-0.90	-5.15	2.76	3.55		
ANFC	-5.32	-2.51	-9.25	6.27	3.30	7.82	
GRA	-1.34	0.29	-4.15	-0.82	-0.65	-0.31	6.98

SOMA DAS VARIÂNCIAS (TRAÇO DA MATRIZ) = 55.98

Tabela 4 . Rio Guadiana e plataforma continental adjacente: valores próprios e variância dos componentes extraídos.

Table 4. Guadiana River and adjacent continental shelf: eigenvalues and variance of the extracted components.

COMPONENTES	VALORES PRÓPRIOS	% INDIVIDUAL	VALORES PRÓPRIOS CUMULATIVO	% CUMULATIVA
1	37.13	66.33	37.13	66.33
2	9.29	16.60	46.42	82.92
3	4.39	7.84	50.81	90.76
4	2.69	4.80	53.50	95.56
5	1.73	3.09	55.22	98.65
6	0.76	1.35	55.98	100.00

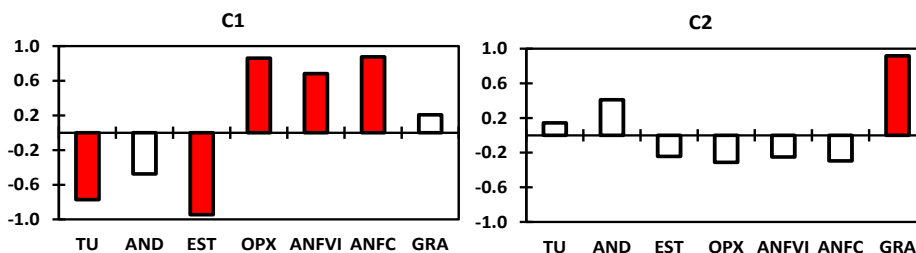


Figura 14. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente: ponderação dos minerais nos dois componentes principais com maior variância associada (barras a vermelho = minerais com maior ponderação).

Figure 14. Guadiana river and adjacent continental shelf: mineral loadings on the first two principal components with higher variance associated (red bars = minerals with higher loading).

Projectando as 35 amostras (de acordo com os quatro grupos inicialmente definidos) num gráfico *biplot* verifica-se que grande parte das amostras se concentra em torno da origem dos eixos. Contudo, definem-se três pequenos conjuntos de amostras que se distribuem por três quadrantes diferentes. Este padrão é essencialmente suportado pelo eixo referente ao 1.º componente principal (1st) ao mostrar a oposição entre amostras do grupo PIP e amostras dos grupos RG e DG (Figura 15). Podemos igualmente verificar, neste gráfico, quais são os minerais que melhor traduzem este padrão de distribuição. Verifica-se assim, mais uma vez, que a máxima variabilidade está associada aos vectores mais longos (*clr.EST*, *clr.OPX*, *clr.ANFC*, *clr.GRA* e *clr.TU*) correspondentes aos minerais estauroilite, ortopiroxena, anfíbola castanha e granada, que possuem os valores mais elevados de variância (Tabela 3). Focando a atenção no padrão dos vectores *clr* verifica-se que eles tendem a agrupar-se segundo três direcções gerando um padrão em “Y”: uma definida pelo conjunto EST + TU, outra definida pelo conjunto OPX + ANFC e uma terceira constituída pela GRA (Figura 15). Este padrão é aparentemente condicionado por dois factores distintos: a proveniência, que está reflectida nos padrões de ocorrência de duas associações mineralógicas opostas (turmalina + estauroilite - origem sedimentar policíclica *versus* anfíbolas e piroxenas - origem primária); e a selecção hidráulica das partículas que está patente no padrão de ocorrência da granada porque sendo este o mais denso dos minerais considerados é também o mais sensível a enriquecimento residual por este processo.

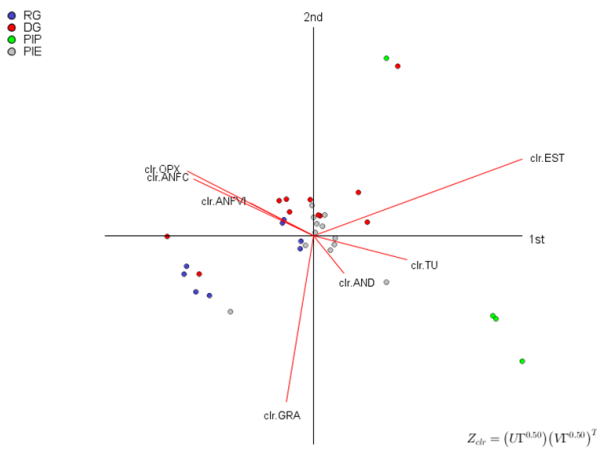


Figura 15. Rio Guadiana e plataforma continental adjacente: gráfico composicional biplot mostrando a projecção das amostras de acordo com os componentes principais 1 (1st) e 2 (2nd) e também a orientação dos vectores (referentes aos minerais) resultantes da transformação logarítmica utilizada (*clr*)

Figure 15. Guadiana river and adjacent continental shelf: compositional biplot diagram showing the samples projection according to the principal components 1 (1st) and 2 (2nd) and also the orientation of the vectors (correspondent to minerals) derived from the centred log-ratio transformation (*clr*).

8.4. Plataforma continental do Golfo de Cádiz

Neste caso foi considerado como ponto de partida uma matriz de dados contendo 57 amostras ($n = 57$) caracterizados por oito minerais ($m = 8$). O cálculo da matriz VAR-COV mostra a OPX e a EST como sendo os minerais que apresentam a maior variância em oposição à AND e à ANFC que exibem os valores mais baixos de variância associada. O traço desta matriz é igual a

79.53 e representa a soma dos valores próprios dos componentes principais extraídos. Verifica-se que os dois primeiros componentes têm associado 63 % da variância dos dados (Tabelas 5 e 6). As ponderações dos vários minerais no componente com maior variância associada (C1 = 45 %) mostram uma proximidade de ponderação entre a EST e o ZI (em valores positivos) em oposição à ponderação da OPX, ANFVI e ANFC com valores negativos (Figura 16). O componente C2 tem associada uma variância menor (C2 = 17 %) mostrando a ponderação isolada do ZI relativamente a todos os outros minerais (Figura 16). Projectando as 57 amostras (de acordo com os seis grupos de amostras inicialmente definidos) num gráfico *biplot* verifica-se que o 1.º componente mostra, claramente, a separação entre as amostras pertencentes aos testemunhos verticais de sedimentos grosseiros (T4b, T7 e T9) das amostras pertencentes aos testemunhos de sedimentos mais finos (T1, T5 e T8). Podemos igualmente verificar neste gráfico quais são os minerais que melhor traduzem este padrão de distribuição. Verifica-se assim, mais uma vez, que a máxima variabilidade está associada aos vectores mais longos (*clr.OPX*, *clr.EST*, e *clr.ZI*) correspondentes aos minerais ortopiroxena, estauroilite e zircão, que possuem os valores mais elevados de variância (Tabela 5). Focando a atenção no padrão dos vectores *clr* verifica-se mais uma vez que eles tendem a agrupar-

Tabela 5. Plataforma continental do Golfo de Cádiz: matriz de variâncias-covariâncias.
Table 5. *Cádiz Gulf's continental shelf: variance-covariance matrix.*

	TU	AND	EST	CPX	OPX	ANFVI	ANFC	GRA	ZI
TU	3.29								
AND	0.74	1.33							
EST	1.97	-0.67	17.48						
CPX	-0.66	0.20	-1.43	7.13					
OPX	-3.98	-1.86	-10.74	0.83	18.94				
ANFVI	-0.66	1.05	-4.12	-0.57	2.66	2.69			
ANFC	-0.90	0.70	-4.98	-1.16	4.16	2.80	4.80		
GRA	-0.18	-0.48	-0.14	-1.67	-2.56	-0.83	-1.51	8.07	
ZI	0.40	-1.01	2.62	-2.67	-7.46	-3.03	-3.92	-0.72	15.80

SOMA DAS VARIÂNCIAS (TRAÇO DA MATRIZ) = 79.53

Tabela 6. Plataforma continental do Golfo de Cádiz: valores próprios e variância dos componentes extraídos.
Table 6. *Cádiz Gulf's continental shelf: eigenvalues and variance of the extracted components.*

COMPONENTES	VALORES PRÓ- PRIOS	% INDIVIDUAL	VALORES PRÓPRIOS CUMULATIVO	% CUMULATIVA
1	36.09	45.38	36.09	45.38
2	14.27	17.94	50.37	63.33
3	9.80	12.32	60.17	75.65
4	8.15	10.24	68.31	85.89
5	7.45	9.37	75.76	95.26
6	2.67	3.36	78.43	98.61
7	0.95	1.20	79.38	99.81
8	0.15	0.19	79.53	100.00

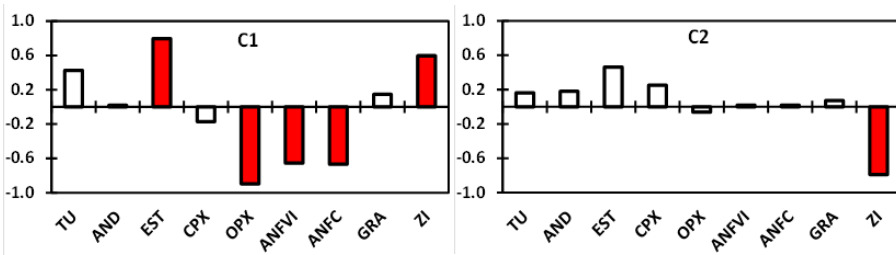


Figura 16. Plataforma continental do Golfo de Cádiz: ponderação dos minerais nos dois componentes principais com maior variância associada (barras a vermelho = minerais com maior ponderação).

Figure 16. Cadiz Gulf's continental shelf: mineral loadings on the first two principal components with higher variance associated (red bars = minerals with higher loading).

se segundo três direcções gerando um padrão em “Y”: uma definida pela ortopiroxena, outra definida pela estauroлите e uma terceira constituída pelo zircão (Figura 17). Este padrão é aparentemente condicionado por dois factores distintos: a proveniência, que está reflectida nos padrões de ocorrência de duas associações mineralógicas opostas (estauroлите + zircão + turmalina - origem sedimentar policíclica *versus* anfíbolas e piroxenas - origem primária); e a selecção hidráulica das partículas que está patente no padrão de ocorrência do zircão porque sendo este o mais denso dos minerais considerados é também o mais sensível a enriquecimento residual por este processo.

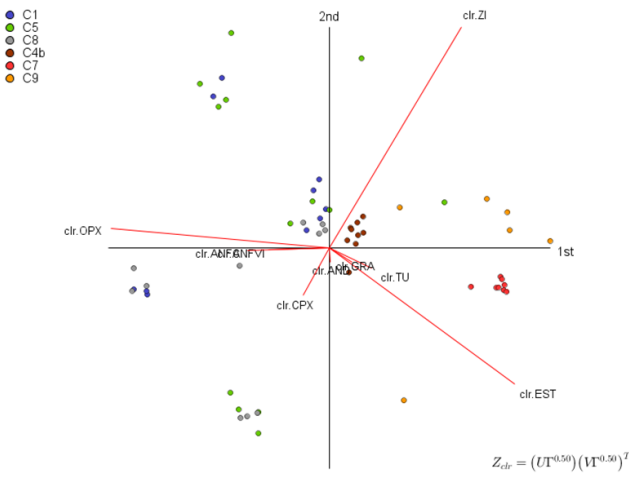


Figura 17. Plataforma continental do Golfo de Cádiz: gráfico composicional biplot mostrando a projecção das amostras de acordo com os componentes principais 1 (1st) e 2 (2nd) e também a orientação dos vectores (referentes aos minerais) resultantes da transformação logarítmica utilizada (clr)

Figure 17. Cadiz Gulf's continental shelf: compositional biplot diagram showing the samples projection according to the principal components 1 (1st) and 2 (2nd) and also the orientation of the vectors (correspondent to minerals) derived from the centred log-ratio transformation (clr).

9. Conclusões

Com base nas mais de 100 amostras que serviram de base às preparações microscópicas de minerais pesados que foram estudadas pode afirmar-se que existem dois tipos fundamen-

tais de proveniências traduzidas em duas associações mineralógicas distintas: uma, de origem sedimentar e de natureza policíclica, é evidenciada pela elevada frequência de partículas normalmente roladas a sub-roladas de turmalina, de andaluzite e de estauroilite; outra, de origem ígnea e/ou metamórfica (de 1.º ciclo sedimentar) é evidenciada pela elevada frequência de partículas normalmente angulosas a sub-angulosas de anfíbolos e de piroxenas.

Detectaram-se especificidades nos três casos de estudo no que se refere às assinaturas mineralógicas identificadas e à distância a que se situam as principais fontes sedimentares.

Na área envolvente ao cabo de Sines existem, fundamentalmente, dois cortejos mineralógicos distintos. Um é caracterizado pela elevada frequência de piroxenas, de anfíbolos e de titanite com formas predominantemente angulosas a sub-angulosas. Outro é representado pela elevada frequência de turmalina, de andaluzite e de estauroilite com formas geralmente roladas a sub-roladas. O primeiro cortejo é revelador da existência de uma fonte próxima relacionada com as rochas ígneas do maciço de Sines, enquanto que o segundo reflecte uma proveniência relacionada com os extensos depósitos continentais da cobertura sedimentar atribuída ao Pliocénico e Holocénico existentes na região.

Nos sedimentos superficiais recolhidos ao longo do leito do rio Guadiana, na sua correspondente desembocadura e na plataforma continental interna adjacente é possível também identificar a existência de dois cortejos mineralógicos fundamentais. Um é representado pela presença abundante de anfíbolos e piroxenas de carácter anguloso a subanguloso, sendo indicador de uma proveniência relacionada com as rochas ígneas básicas e metamórficas que afloram na bacia hidrográfica do rio Guadiana. Outro é representado pela presença abundante de turmalina, de andaluzite e de estauroilite com formas roladas a sub-roladas, sendo indicador de uma proveniência sedimentar de características policíclicas (depósitos relíquia pertencentes a antigos litorais ou a uma antiga desembocadura do rio Guadiana).

Nos sedimentos recolhidos em seis testemunhos verticais da plataforma continental do Golfo de Cádiz verifica-se a existência de dois cortejos de minerais pesados completamente distintos entre si. Um deles é dominado pela presença de vários tipos de anfíbolos e de piroxenas. Este cortejo está particularmente bem representado nos testemunhos verticais constituídos por sedimentos de dimensão média de silte grosseiro. Atendendo às características mineralógicas e morfológicas dos minerais dominantes é possível deduzir que as rochas ígneas básicas e metamórficas da bacia hidrográfica do rio Guadiana são a principal fonte destes minerais. O outro cortejo é dominado pela turmalina, andaluzite e estauroilite, estando muito bem representado nos testemunhos verticais compostos por sedimentos predominantemente arenosos. Atendendo às características mineralógicas e morfológicas destas partículas, é possível afirmar que a sua origem poderá estar relacionada com antigos cordões litorais, actualmente pertencentes a sequências sedimentares de características transgressivas identificadas em domínio da plataforma interna.

A extracção dos componentes principais, entrando em linha de conta com a transformação logarítmica centrada dos dados de frequência dos minerais, permite definir com precisão a importância relativa dos factores mais importantes que controlam a presença dos minerais pesados nos sedimentos: proveniência e selecção hidráulica.

Na sequência da projecção das amostras e dos minerais no ambiente gráfico *biplot* verificou-se a existência de dois padrões geométricos dos vectores que resultam da transformação logarítmica dos dados: o primeiro foi nomeado como padrão em “cruz” e traduz a

influência dominante da proveniência; o segundo foi nomeado por padrão em “Y” e traduz a influência simultânea da proveniência e da selecção hidráulica das partículas. O primeiro (“cruz”) está patente na área envolvente ao Cabo de Sines, onde a elevada proximidade das duas fontes mineralógicas mais importantes é determinante nos resultados obtidos. O segundo (“Y”) caracteriza as duas outras áreas estudadas (Rio Guadiana e plataforma continental adjacente + plataforma continental do Golfo de Cádiz) onde a maior distância existente entre as fontes mineralógicas e os locais amostrados gera condições para que os diferentes minerais possam ser hidraulicamente seleccionados. Esta selecção, quando observada, é traduzida pelos contrastes existentes entre os padrões de ocorrência das espécies transparentes de maior densidade (zircão e granada) relativamente aos padrões das restantes espécies mineralógicas menos densas, nomeadamente, no que se refere às que exibem, com frequência, formas tendencialmente lamelares (caso das anfíbolos).

Como ponto final, deve ser acrescentado, que as preparações microscópicas utilizadas neste trabalho constituem uma base para a construção de uma colecção de referência de minerais pesados com fins didácticos e científicos que irá integrar os acervos do Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a cedência das amostras utilizadas no presente trabalho. Estas amostras foram recolhidas no âmbito de diferentes projectos de investigação: as que são oriundas da área envolvente ao cabo de Sines foram obtidas na sequência de um estudo de dinâmica sedimentar encomendado ao Instituto Hidrográfico pela Administração do Porto de Sines em Setembro de 2002; as restantes foram recolhidas entre 1999 e 2003 no âmbito do projecto “Consequences of River Discharge Modifications on Coastal Zone and Continental Shelf – CRIDA” (PLE/8/00), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Referências

- Aitchison J. 1986. The statistical analysis of compositional data. The Blackburn Press. Caldwell. New Jersey.
- Aitchison J. 2003. A concise guide to compositional data analysis. In: 2nd Compositional Data Analysis Workshop. Girona, Italy.
- Aitchison J., Greenacre M. 2002. Biplots of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 51: 375-392.
- Alley R.B., Mayewski P.A., Sowers T., Stuiver M., Taylor K.C., Clark P.U. 1997. Holocene climatic instability: a prominent widespread event 8200 years ago. *Geology* 25: 483-486.
- Andò S., Garzanti E., Padoan M., Limonta M. 2012. Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis. *Sedimentary Geology* 280: 165-178.
- Artini E. 1898. Introno alla composizione mineralodical delle sabbie di alcuni fiumi del Veneto, con applicazione ai terreni de transport. *Riv. Miner. Crist. Italiana* 19: 33-94.
- Bateman R.M., Catt J.A. 2007. Provenance and paleoenvironmental interpretation of superficial deposits, with particular reference to post-depositional modification of heavy mineral assemblages, *Developments in Sedimentology* 58: 151-188.
- Borgognone M.G., Bussi J., Hough G. 2001. Principal component analysis in sensory analysis: covariance or correlation matrix? *Food Quality and Preference* 12: 323-326.

Os minerais pesados e a proveniência sedimentar: estudo de casos do sudoeste da Península Ibérica

- Burns T.W., O'Conner D.J., Stockmayer S.M. 2003. Science communication: a contemporary definition. *Public Understanding of Science* 12: 183-202
- Canilho M.H. 1972. Estudo geológico-petrográfico do maciço eruptivo de Sines. *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências* 12 (2): 77-161.
- Canilho M.H. 1989. Elementos de geoquímica das rochas do maciço ígneo de Sines. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, 10: 65-80.
- Cascalho J. 2009a. Guadiana continental shelf heavy mineral sources (SW Iberia). 6.o Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica, Oviedo (Espanha), 1-5 Dezembro 2009: 261-264.
- Cascalho J. 2009b. Heavy mineral assemblages from different Guadiana shelf sedimentary sequences (SW Iberia). 6º Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica, Oviedo, Espanha, 1-5 Dezembro 2009: 257-260.
- Cascalho J., Fradique C. 2007. The sources and hydraulic sorting of heavy minerals on the northern Portuguese continental margin. *Developments in Sedimentology* 58: 75-110.
- Cattaneo A., Steel R.J. 2003. Transgressive deposits: a review of their variability. *Earth-Science Reviews* 62: 187-228.
- Davies J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, New York.
- Dick A.B. 1887. On zircon and other minerals contained in sand. *Nature* 36: 1-92.
- Flores R.M., Shideler G.L. 1978. Factors controlling heavy-mineral variations on the South Texas outer continental shelf, Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* 48: 269-280.
- Falk J.H., Storksdieck M., Dierking L.D. 2007. Investigating public interest and understanding: evidence for the importance of free-choice learning. *Public Understanding of Science* 16: 455-469.
- Frihy O.E., Dewidar K.M. 2003. Patterns of erosion/sedimentation. Heavy mineral concentration and grain size to interpret boundaries of littoral sub-cells of the Nile Delta, Egypt. *Marine Geology* 199: 27-43.
- Garzanti E., Andò S. 2007. Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Developments in Sedimentology* 58: 517-545.
- Gonzalez R., Dias J.M.A., Lobo F., Mendes I. 2004. Sedimentological and paleoenvironmental characterization of transgressive sediments on the Guadiana Shelf (Northern Gulf of Cadiz, SW Iberia). *Quaternary International* 120: 133-144.
- Gonzalez R., Araújo M.F., Burdloff D., Cachão M., Cascalho J., Correadeira C., Dias J.M.A., Fradique C., Ferreira J., Gomes C., Machado A., Mendes I., Rocha F. 2007. Sediment and pollutant transport in the Northern Gulf of Cadiz: A multi-proxy approach. *Journal of Marine Systems* 68: 1-23.
- Gutiérrez-Mas J.M., Domínguez-Bella S., López-Aguayo 1994. Present-day sedimentation patterns of the Gulf of Cadiz northern shelf from heavy mineral analysis. *Geo-Marine Letters* 14: 52-58.
- Hazen R. M., Trefil, J. 2009. *Science Matters Achieving scientific literacy 2nd Edition*, Anchor Books. New York, 360 p.
- Inverno C.M.C., Manupella G., Zbyszewski G., Pais J., Ribeiro M.L. 1993. Maciço Eruptivo de Sines. Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000, Notícia explicativa da folha 42-C, Santiago do Cacém. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Kerr P.F. 1977. *Optical Mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Kobashi T., Severinghaus J.P., Brook S.J., Barnola J.M., Grachev A.M. 2007. Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice. *Quaternary Science Reviews* 26: 1212-1222.
- Komar P.D. 2007. The entrainment, transport and sorting of heavy minerals by waves and currents. *Developments in Sedimentology* 58: 3-48.
- Komar P.D., Wang C. 1984. Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches. *Journal of Geology* 92: 637-656.
- Lobo F.J., Hernández-Molina F.J., Díaz Del Río V. 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). *Marine Geology* 178: 171-195.
- Mange M.A., Maurer H.F.W. 1992. *Heavy minerals in colour*. Chapman and Hall, London.

- Mange M, Wright D. (editors) 2007. Heavy minerals in use. Developments in Sedimentology 58. Elsevier. Amsterdam.
- Mèlières F. 1974. Recherches sur la dynamique sédimentaire du golfe du Cadix (Espagne). Thèse d'état, University of Paris.
- Morton A.C., Hallsforth C.R. 1999. Processes controlling the composition of heavy minerals assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology* 124: 3-29.
- Neiheisel J. 1965. Source and distribution of sediments at Brunswick Harbour and vicinity, Georgia. U. S. Army Coast. Eng. Center, Teach. Mem., 12.
- Oliveira J.T., Pereira E., Ramalho M., Antunes M.T., Monteiro J.H., Almeida J.P., Carvalho D., Carvalhosa A., Ferreira J.N., Gonçalves F., Oliveira V., Ribeiro A., Ribeiro M.L., Silva A.F., Noronha F., Young T., Barbosa B., Manupella G., Pais J., Reis R.P., Rocha R., Soares A.F., Zbyszewski G., Gaspar L., Moreira A.P., Moitinho de Almeida F., Dâmaso B., Dâmaso L. 1992. Notícia explicativa da carta geológica de Portugal (folha 8, 1:200000). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Pettijohn F.J. 1957. Sedimentary rocks. Harper and Bros., New York.
- Pilkey O.H. 1963. Heavy minerals of the U. S. South Atlantic continental shelf and slope. *Geological Society of America Bulletin* 74: 641-648.
- Pombo J., Cascalho J., Rodrigues A., Taborda R., Oliveira A. 2006. The Sines sub-volcanic intrusive complex: imprint on the inner shelf sedimentary cover (Sines, Portugal). *Journal of Coastal Research* SI 39: 250-254.
- Póvoas L., Lopes C., Dantas P., Malafaia E., Barriga F.J.A.S. 2010. A exposição "Allosaurus: um dinossaúrio, dois continentes?" - Divulgar procedimentos científicos para promover literacia científica. VIII Congresso Nacional de Geologia (Universidade do Minho, Braga, 12-14 Julho 2010), *e-Terra* 15 (51): 1-4.
- Reis J., Cascalho J., Póvoas L., Barriga F.J.A.S. 2012. Micro scale geodiversity: Telling stories with sand. *Geologia dell'Ambiente Supplemento* al n. 3/2012 *Geoheritage: Protecting and Sharing 7th International Symposium ProGEO on the Conservation of the Geological Heritage*: 193-195.
- Reis J., Lopes C., Póvoas L., Ribeiro B., Dantas P. 2013. Accessing the public opinion of an exhibition: are we fulfilling our goals? In http://comunicacaodeciencia.files.wordpress.com/2012/11/livro_abstracts_scicom_final.pdf: 29-30.
- Reis J., Póvoas L., Ribeiro B. 2011. Educação não formal no MNHN: o método como contributo para a Geoliteracia. In Conferência GEOescolas: novas práticas no ensino das Geociências. Geoparque Naturtejo, Idanha-a-Nova: 59-60.
- Rittenhouse G. 1943. Transportation and deposition of heavy minerals. *Geological Society of America Bulletin* 54 (12): 1725-1780.
- Rubey W.W. 1933. The size distribution of heavy minerals within a water-laid sandstone. *Journal of Sedimentary Petrology* 3: 3-29.
- Schmitter R.D., Freeman-Lynde R.P. 1988. Hornblend content of Georgia – South Carolina, U.S.A., neashore sands: support for shoreward sediment transport in the neashore zone. *Sedimentary Geology* 57: 153- 169.
- Swift D.J.P., Dill C.E., McHon J. 1971. Hydraulic fractionation of heavy mineral suites on an unconsolidated retreating coast. *Journal of Sedimentary Petrology* 41: 683-690.
- Thió-Henestrosa S., Martín-Fernández J. 2005. Dealing with Compositional Data: The Freeware CoDaPack. *Mathematical Geology* 37: 773–793.
- Van Andel T.H. 1950. Provenance, transport and deposition of Rhine sediments. A heavy mineral study on river sands.