

Assinatura granulométrica como indicador da proveniência: potencialidades e limitações

Pedro Dinis¹ e Ana Castilho²

Resumo: A distribuição granulométrica de sedimentos, solos ou outros materiais geológicos não consolidados é determinada pela textura original das unidades que os alimentam e pelos processos associados à alteração, transporte e deposição das partículas constituintes. Uma análise de alta resolução da granulometria de materiais não consolidados permite reconhecer uma assinatura textural que pode ser usada como ferramenta auxiliar na indicação ou rejeição de possíveis fontes de alimentação. Neste trabalho apresentam-se abordagens metodológicas para determinar a distribuição granulométrica de materiais geológicos não consolidados e exemplos de interpretações da proveniência baseada na sua granulometria e de possíveis fontes detríticas. A avaliação da proveniência baseia-se na identificação e caracterização das populações constituintes. Para se ser bem sucedido é necessário garantir que a representatividade da amostra e a resolução da análise são adequadas. Posteriormente, a definição das populações e a avaliação das proporções presentes numa amostra (ou lote de amostras) pode ser conseguida por diferentes processos, que apresentam diferentes níveis de complexidade.

Palavras-chave: Proveniência, Distribuição granulométrica, População granulométrica

Abstract: The grain size distribution of sediments, soil or other unconsolidated geological materials is determined by the texture of the source units and the subsequent modifications during weathering, transport and depositional processes. A high-resolution analysis of the grain-size of unconsolidated materials allows the recognition of a textural signature that can be used as an auxiliary tool to establish or reject possible supply units. In this work we present methodological approaches to determine the grain size distribution of unconsolidated geological materials and examples of interpretations of the provenance based on their grain size and possible detrital sources. Provenance assessment is based on the identification and characterization of the constituent populations. To be successful, one must ensure that the sample is representative and the resolution of the analysis is appropriate. Subsequently, the definition of the populations and evaluation of their proportions in a sample (or a set of samples) can be achieved by different processes, which have different levels of complexity.

Keywords: Provenance, Grain size distribution, Grain size population

¹ IMAR-CMA (MARE), Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. e-mail: pdinis@dct.uc.pt

² Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra

1. Introdução

Um sedimento ou outro corpo friável formado maioritariamente por materiais geológicos integra partículas de diferentes dimensões, sendo muitas vezes possível usar a distribuição granulométrica para reconstruir fontes e processos associados à sua génese (Krumbein e Pettijohn 1938, McManus 1988). De facto, o tamanho das partículas de uma determinada unidade geológica em análise é determinado, em primeiro lugar, pelo tamanho das partículas das áreas de alimentação, ou seja, é condicionado pela sua proveniência. Por outro lado, desde que o agente de transporte tenha capacidade para mobilizar as classes modais existentes observadas nas áreas de alimentação elas tendem a preservar-se nos depósitos resultantes do seu desmantelamento (Gosh *et al.* 1986). Depois, há que considerar um conjunto de factores, condicionadores dos processos de transporte e deposição, que podem influenciar a selecção de fracções granulométricas e, conseqüentemente, a curva de distribuição. Entre estes factores podemos enunciar alguns intrínsecos às características das próprias partículas, como as suas formas e densidades (ver p. ex., Matthews 1991, Bridge e Bennet 2010) cuja variabilidade justifica o conceito de diâmetro equivalente; e outros que se relacionam com as características do meio de transporte, como a sua densidade, viscosidade, velocidade e turbulência (ver p. ex., Gibbs *et al.* 1971, Ferguson e Church 2004, Bridge e Bennet 2010).

A granulometria de sedimentos não é frequentemente considerada uma característica decisiva em estudos de proveniência, recorrendo-se com maior frequência a outros aspectos composicionais. É consensual que a composição química e mineralógica dum corpo detrítico depende da dimensão dos grãos constituintes, pelo que este aspecto deve ser tido em conta na interpretação dos resultados composicionais. Mas a distribuição granulométrica também pode fornecer informações directas sobre a natureza das áreas de alimentação.

A ideia fundamental é que uma população de uma distribuição granulométrica apresenta um conjunto de características, que suportam um histograma ou uma curva de frequência, cujo significado genético pode ser decifrado. É possível ajustar matematicamente as percentagens das várias classes granulométricas a uma função de distribuição teórica (por exemplo, lognormal, Weibull ou hiperbólica), definir os parâmetros que a caracterizam e trabalhar sobre estes parâmetros. Quando se observam várias populações no mesmo corpo é, em teoria, possível atribuir génese própria a cada uma delas. A primeira dificuldade está na forma de separar as várias populações, havendo depois que atribuir a cada população uma determinada fonte e um conjunto de processos responsáveis pela selecção e dispersão dos elementos constituintes.

Com este capítulo transmite-se uma reflexão sobre o significado das distribuições granulométricas e a forma de as determinar e proceder à sua análise, particularmente focado na investigação da proveniência. São abordados (1) problemas metodológicos que devem ser tidos em conta aquando da determinação da dimensão das partículas e (2) formas de aplicação dos resultados destas determinações na interpretação da proveniência. Uma parte significativa do texto é baseado em processos naturais responsáveis pela génese de unidades sedimentares, mas que podem facilmente ser extrapolados para outros derivados da intervenção antrópica.

2. Populações granulométricas

Durante os processos de transporte e deposição, entre uma área de alimentação e o local de deposição, ocorrem alterações, quer por selecção de alguns grãos em detrimento de

outros, quer por fragmentação ou agregação dos sedimentos em trânsito quer, ainda, por inclusão de novas partículas. No decurso do processo de transporte espera-se que a calibragem do sedimento aumente (isto é, que diminua o desvio-padrão), mas tanto pode acontecer um incremento como uma diminuição de tamanho médio das partículas e da assimetria (Le Roux e Rojas 2007). O conhecimento das tendências de alteração de parâmetros estatísticos permitiu desenvolver fórmulas para a determinação de vectores de transporte (McLaren Bowles 1985, Gao e Collins 1992, Le Roux 1994, Asselman 1999, Poizot *et al.* 2008). Estas fórmulas revelam-se particularmente úteis em ambientes costeiros sob influência das marés, onde o padrão de circulação sedimentar nem sempre é fácil de determinar e pode variar a diferentes escalas espacio-temporais em função das condições dinâmicas (p. ex. Pedreros *et al.* 1996). As tendências de variação granulométrica também são reconhecidas para sedimentos depositados noutros ambientes (p. ex. Pettijohn *et al.* 1972, Blatt *et al.* 1980, Nickling 1994). McBride e Picard (1987) apresentam mesmo uma fórmula que estabelece a distância de transporte num curso de água de elevado declive com base na dimensão dos maiores clastos.

Se é certo que os padrões de alteração nos parâmetros estatísticos podem ser usados para estabelecer vectores de transporte, é muitas vezes a partir da identificação de populações constituintes num corpo que reside a informação mais relevante quando se pretende estabelecer as áreas de alimentação. Importa desde já referir que o significado dos parâmetros estatísticos dum amostra que resulta da mistura de mais do que uma população é relativamente reduzido. De pouco serve o conhecimento de parâmetros como a média, desvio-padrão ou assimetria dum sedimento com a curva de distribuição ilustrada na figura 1A. Da análise da curva ressalta a presença de duas populações maiores na gama de silte grosseiro a areia grosseira e outras, cuja proporção é relativamente reduzida, que integra grãos de maior e menor dimensão. Quando muito pode interessar conhecer os parâmetros que caracterizam a curva de distribuição de cada uma das populações constituintes.

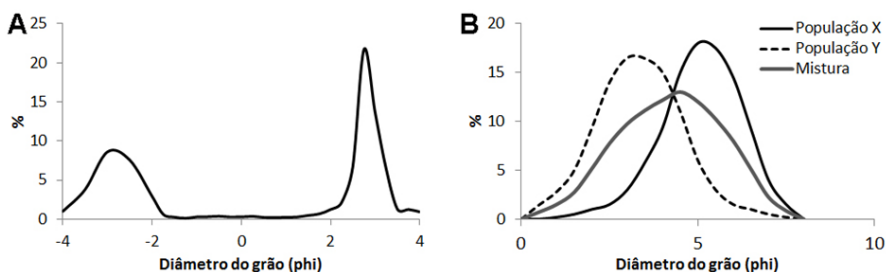


Figura 1. Exemplos de curvas de distribuição associadas a mistura de populações granulométricas. (A) Sedimento marinho que integra uma população de maior calibre, associada à mobilização de partículas da praia em períodos de tempestade, e uma população de areia fina a média, muito bem calibrada, em equilíbrio com as condições dinâmicas mais comuns. (B) Curva granulométrica teórica resultante da mistura em parte iguais de duas populações distintas (X e Y).

Figure 1. Examples of grain size distribution curves associated with populations mixing. (A) Marine sediment that contain a coarser population, associated with the transport of particle from the beach in stormy periods, and a fine to medium, well sorted, population, in equilibrium with the most common dynamic conditions. (B) Theoretical grain size curve obtained from mixture, in equal parts, of two distinct populations (X and Y).

2.1. Significado genético das populações

A presença de diferentes populações granulométricas num determinado corpo pode ter duas justificações: a ocorrência de partículas associadas a processos físicos distintos ou a diferentes alimentações. A não ser que os processos de selecção hidráulica ou aerodinâmica sejam muito eficazes e a natureza dos grãos em transporte seja uniforme, é de prever a ocorrência de mais do que uma população granulométrica. Contudo, muitas vezes as populações confundem-se ou existe uma (ou algumas) cuja proporção na mistura é claramente dominante, não sendo perceptível a presença de outras, menos bem representadas.

Durante as fases iniciais dum ciclo sedimentar, quando os processos de meteorização física e química actuam sobre as rochas presente numa área, formam-se sedimentos com distribuições granulométricas particulares que são o produto da natureza da rocha-mãe e dos processos de meteorização actuantes. As características finais do sedimento no local de deposição resultam da história de erosão, transporte e deposição de sedimentos com diferentes proveniências. Esta história inclui muitas vezes episódios de deposição transitória ou a interferência de múltiplos ciclos deposicionais. Os processos sedimentares promovem diferentes níveis de selecção de partículas em equilíbrio dinâmico com as condições do meio transporte, podendo envolver ainda alguma fragmentação ou agregação de partículas de menor calibre.

Apesar desta aparente complexidade, a influência de diferentes processos físicos e áreas de alimentação é frequentemente deduzida da análise das distribuições granulométricas, sobretudo se também se considerarem algumas informações independentes. O reconhecimento de características herdadas de depósitos anteriores terá aqui um papel decisivo. Características herdadas fornecem informação sobre a proveniência, mas dificultam a interpretação dos processos de selecção granulométrica. A título de exemplo, se considerarmos uma área de alimentação onde existem partículas com uma gama de dimensões restrita (por exemplo, uma unidade eólica) e um agente de transporte com capacidade de mobilizar estas partículas é de prever que qualquer depósito resultante, independentemente das condições de transporte, também apresente esta gama dimensional. Neste caso, as características granulométricas são herdadas e dizem pouco sobre os processos envolvidos no último ciclo deposicional, mas encerram em si uma informação importante sobre a natureza da unidade que fornece sedimentos. Por outro lado, populações granulométricas que não estão em equilíbrio com as condições dinâmicas podem ser relacionadas com a ocorrência de reciclagem de depósitos associados a ambientes de maior energia (p. ex. Dias e Neal 1990, Rey e Bernardes 2004) ou a alimentações laterais por tributários em sistemas fluviais (p. ex. Leopold *et al.* 1964).

Com base nas características das populações granulométricas de uma amostra ou de um conjunto de amostras e de um leque de hipóteses de fontes detríticas é possível perceber se diferentes áreas de alimentação contribuíram com sedimento e em que proporções. Foi com base nestas possibilidades de relação que, por exemplo, se estabeleceu a importância relativa de alimentações eólicas e fluviais na margem continental do NW de África (Holz *et al.* 2004), se reconheceram contribuições associados a contornitos e a descarga glacial no Atlântico Norte (Prins *et al.* 2002) e se contribuiu para o conhecimento de padrões de circulação atmosférica (p. ex. Sun *et al.* 2002, 2004, Bokhorst *et al.* 2011).

A discriminação e interpretação de populações granulométricas também pode ser aplicada no estudo de materiais transportados ou manipulados pela actividade humana. Por

exemplo, a análise de populações em solos e sedimentos pode ajudar a ultrapassar dificuldades na interpretação de dados granulométricos em investigações forenses (p.ex. Morgan e Bull 2007) ou contribuir para conhecer a origem de materiais usados em argamassas históricas (p.ex. Bianchini *et al.* 2004).

2.2. Definição de populações

Sempre que a curva granulométrica dum corpo revela claramente a presença de várias modas perfeitamente individualizadas somos tentados a considerar que este corpo resulta da mistura de mais do que uma população. Alguns autores têm recorrido às classes modais das distribuições granulométricas para avaliar a origem e processos envolvidos na acumulação de depósitos sedimentares (p.ex. Dias e Neal 1990, Tamura 2004, Dinis *et al.* 2009). Ainda que a individualização de populações granulométrica com base nas suas classes modais constitua uma abordagem extremamente simples, e muitas vezes eficaz, ela é pouco robusta e pode ser errónea. Em primeiro lugar, porque é possível que a mistura de duas populações de granulometria distinta origine uma distribuição unimodal (Figura 1B). Depois, porque a identificação das modas não permite conhecer os parâmetros que caracterizam a população ou a sua proporção no corpo sedimentar, nem extrair o possível significado geológico dessa população.

Curry (1960) procedeu à decomposição da curva de distribuição segundo um método gráfico, partindo da projecção da curva cumulativa em papel de probabilidade normal e assumindo que uma distribuição normal (ou lognormal) surge representada como uma recta; sendo que, os desvios da forma rectilínea resultariam da mistura de populações (Figura 2). Outros autores adoptaram o mesmo procedimento para individualizar diferentes populações, atribuindo depois, a cada uma, um significado genético (Visher 1969, Middleton 1976, Ashley 1978). Visher (1969) sugeriu que os vários segmentos de recta, identificados em curvas cumuladas projectadas em papel de probabilidade normal, refletem distribuições normais truncadas, estando cada um dos segmentos associado a sedimentos transportados sob determinada forma (designadamente, tracção, saltação ou suspensão).

Contudo, sabe-se que os processos sedimentares naturais não criam necessariamente distribuições normais e alguns autores têm defendido a adopção de outras funções, como a hiperbólica (Bagnold e Barndorff-Nielsen 1980, Christiansen *et al.* 1984, Christiansen e Hartman 1991) ou a Weibull (Sun *et al.* 2002). Uma vez que as frequências cumulativas de uma distribuição não Gaussiana projectadas em gráfico de probabilidade normal não definem uma recta, o aspecto curvo ou a presença de segmentos de recta obtidos com estas frequências cumulativas não podem ser interpretados como o resultado da mistura de materiais associados a diferentes fontes ou processos sedimentares.

Encontramos na literatura recente diversos procedimentos, baseados em métodos paramétricos e não paramétricos, para decompor uma curva de distribuição em populações constituintes. No caso dos métodos paramétricos tenta-se adaptar a curva de distribuição determinada em laboratório para uma amostra ao produto da mistura de várias distribuições unimodais adaptadas a funções matemáticas conhecidas, que se caracterizam por parâmetros simples. A decomposição em várias populações com distribuição de Weibull tem sido conseguida com sucesso em seqüências com importante contribuição eólica do tipo "Loess" (Sun *et al.* 2002 e 2004, Qin *et al.* 2005, Varga 2012, Flores-Aqueveque *et al.* 2012). Também têm sido

criadas aplicações informáticas para extrair populações granulométricas e os parâmetros matemáticos que definem as suas funções de distribuição (Macdonald e Green 1988, Du 2002, Leys *et al.* 2005).

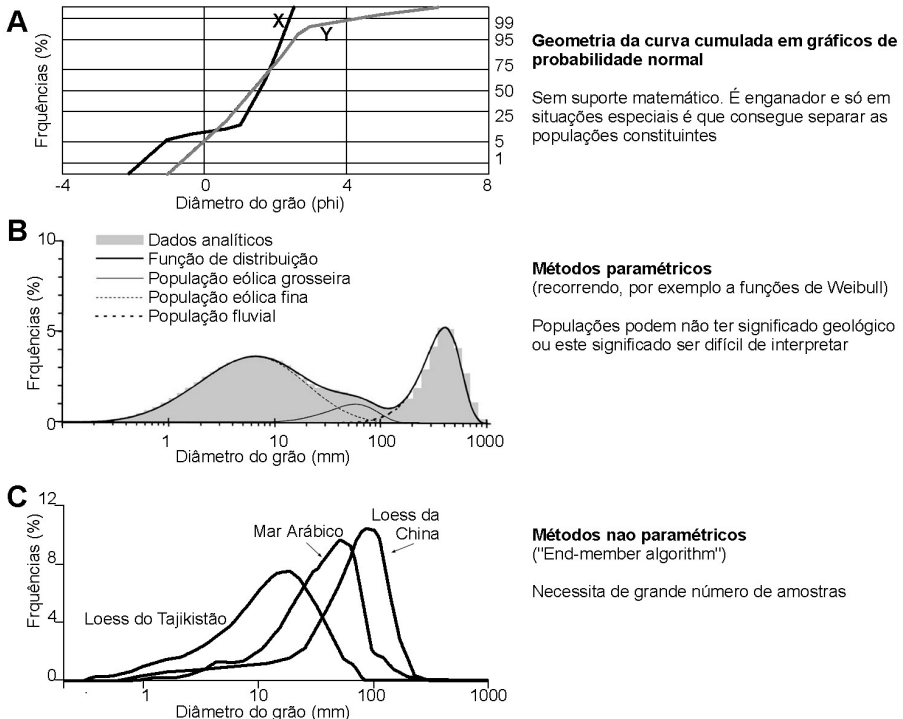


Figura 2. Três metodologias para discriminar populações constituintes. (A) Recorrendo às curvas de distribuição cumuladas com as frequências projectadas em escala de probabilidade normal. A presença de dois troços de maior declive justifica-se pela mistura de duas populações na amostra X. No entanto, o carácter não rectilíneo da amostra Y não implica a presença de duas populações e pode resultar, simplesmente, da distribuição granulométrica não se ajustar a uma curva de Gauss. (B) Exemplo da aplicação de métodos paramétricos retirado de Sun *et al.* (2002). (C) Exemplo de aplicação de métodos não paramétricos retirado de Weltje e Prins (2003). A aplicação dos métodos paramétricos e não paramétricos ilustrados fornece soluções fiáveis com suporte matemático.

Figure 2. Three methods to discriminate constituent populations. (A) Using the cumulative distribution curves with the frequencies projected in normal probability scale. The presence of two partitions of greater slope in sample X is justified by mixing of two populations. However, the non-rectilinear nature of sample Y does not imply the presence of two populations and may result simply from fitting to a non-Gaussian curve. (B) Example of application of parametric methods taken from Sun *et al.* (2002). (C) Example of application of nonparametric methods taken from Weltje and Prins (2003). The application of the illustrated parametric and non-parametric methods provides reliable solutions with mathematical support.

Com os métodos não paramétricos considera-se que a variabilidade observada nas distribuições granulométricas de um conjunto de amostras resulta de processos que modificam um número reduzido de distribuições originais, sendo que estas não são necessariamente unimodais nem têm de estar adaptadas a qualquer função matemática (Weltje e Prins 2007). A discriminação de populações tem sido obtida a partir do “End Member Algorithm” de Weltje (1997). Este procedimento foi criado para extrair um número mínimo de soluções (“end-members”) cuja mistura consiga explicar a maior parte da variabilidade composicional observada (Weltje 1997, Weltje e Prins 2003 e 2007). Na sua aplicação a dados granulométricos encara-se a frequência de uma das classes granulométricas da mesma forma que a percentagem de um qualquer elemento ou mineral em dados composicionais convencionais. Para adoptar este método não paramétrico é necessário ter um número significativo de amostras. A obtenção dos “end-members” é feita a partir de série de iterações com todos os dados granulométricos sob investigação, até se obter uma solução satisfatória que explique as curvas de distribuição granulométrica por misturas em diferentes proporções das populações constituintes (i.e. dos “end members”). Os cálculos envolvidos no processo de decomposição foram apresentados, por exemplo, em Weltje (1997) ou Weltje e Prins (2003 e 2007).

O “End Member Algorithm” tem sido usado para a identificação de populações presentes em sedimentos de grão fino, associados a ambientes eólicos, fluviais ou marinhos profundos (Weltje e Prins 2003, Holz *et al.* 2004, Prins *et al.* 2007, Weltje e Prins 2007, Bokhorst *et al.* 2011). Weltje e Prins (2007) consideram que a aplicação dos métodos paramétricos pode fornecer soluções de interpretação difícil e não detectar populações presentes em quantidades menores, sendo portanto menos adequados quando se pretende obter resultados com algum significado genético.

3. Determinação da granulometria

3.1. Escalas granulométricas

A aplicação de uma escala aritmética para expressar a dimensão das partículas tem como consequência directa uma sobrevalorização das partículas mais grosseiras e uma subvalorização das partículas mais finas (McManus 1988). É por essa razão que é comum aplicar uma transformada logarítmica da dimensão das partículas, obtendo-se assim uma progressão geométrica equilibrada. As classificações granulométricas mais frequentes seguem a escala logarítmica de Udden-Wentworth (Tabela 1). Esta transformação logarítmica é geralmente aplicada, logo no momento de definição das classes, através da escala de phi (ϕ , em que $\phi = -\log_2 X$, sendo X o diâmetro dos grãos em mm) proposta por Krumbein (1934). Para facilitar a percepção dos dados, alguns investigadores apresentam as determinações em mm, mas introduzem uma escala logarítmica.

A escala de Mesh é também frequentemente referida. No caso da escala de Tyler, uma das mais comuns, o valor em “mesh” é igual ao número de vazios no crivo por polegada linear. Ainda que algumas das dimensões-chave, em protocolos laboratoriais de tratamento de sedimentos sigam a escala de Mesh (por exemplo, as amostras submetidas a análise química são muitas vezes trituradas a 200 mesh, o que corresponde a cerca de 0,075 mm ou 3,75 ϕ), esta escala é pouco usada em análise granulométrica.

Atendendo à fórmula que expressa a escala de ϕ , os valores maiores correspondem a dimensões menores, em mm, e a progressão de uma unidade na escala de ϕ (por exemplo, de 0 ϕ para 1 ϕ) associa-se a uma diminuição da dimensão em mm para metade (no exemplo,

de 1 mm para 0,5 mm). Os limites entre as principais fracções granulométricas (argila, silte, areia e seixo/cascalho) posicionam-se em números inteiros da escala de ϕ (8, 4 e -1 ϕ). A tradução dos termos usados na literatura inglesa para os termos de maior calibre também não tem sido homogénea (Tabela 1).

Como vimos acima, uma das formas mais eficazes de usar a granulometria como uma ferramenta para a definição da proveniência detrítica é a identificação e interpretação das populações, algo que só se consegue se os incrementos entre classes forem regulares. É fácil obter no mercado colunas de crivos ajustadas a diferentes escalas de ϕ . Por uma questão de uniformidade, também se deve procurar ter classes granulométricas adaptadas a uma mesma escala quando se procede a uma análise mediante outras metodologias. As aplicações infor-

Tabela 1. Termos granulométricos para diferentes escalas usadas em sedimentologia, pedologia e mecânica dos solos. Indicam-se algumas traduções para português de classes texturais de maior calibre.

Table 1. Grain size terms for different scales used in sedimentology, pedology and soil mechanics. Translations to Portuguese of some coarser size classes are also shown.

Limite inferior da classe ϕ mm	Sedimentologia			Pedologia		Mecânica de solos	
	Udden (1914), Wentworth (1922)	Friedman & Sanders (1978)	Blott e Pye (2001)	FAO (2006)	USDA (1987)	ASTM (1996)	BSI (1999)
-11	2048						
-10	1024						
-9	512						
-8	256						
-7	128						
-6	64						
-5	32						
-4	16						
-3	8						
-2	4						
-1	2						
0	1	Very coarse					
1	0.5	Coarse					
2	0.25	Medium					
3	0.125	Fine					
4	0.0625	Very fine					
5	0.0313						
6	0.0156						
7	0.0078						
8	0.0039						
9	0.0020						
10	0.0010						
11	0.0005						
12	0.0002						

^a Tradução de Soares (1966) para termos de maior calibre

^b Tradução de Dias (2004) para termos de maior calibre

----- Traçado para limites que não se ajustam a incrrmentos de 1 phi

máticas associadas a alguns dos aparelhos usados na determinação da granulometria das fracções mais finas permitem introduzir valores limite com intervalos regulares de ϕ . Também se deve ter a mesma preocupação na definição de classes para os calibres maiores, que não podem ser medidos com o método da crivagem.

3.2. Métodos de medição

Nesta secção apresentam-se apenas algumas questões relacionadas com o processo de determinação da dimensão de grãos detríticos, que devem ser tidas em conta quando se pretende aplicar a distribuição granulométrica como um indicador da proveniência. Descrições detalhadas das metodologias de análise granulométrica de corpos friáveis foram feitas em numerosos manuais da área de sedimentologia, pedologia e geotecnia, entre outras.

A gama dimensional de partículas detríticas é muito ampla, não existindo um método que possa ser aplicado a toda ela. De um modo geral, as partículas de maiores dimensões (maiores que 1 a 5 cm) devem ser medidas diretamente com uma régua, enquanto as percentagens das partículas da gama dimensional intermédia (digamos, entre 0,031 e 50 mm) podem ser determinadas por crivagem. Desenvolveram-se várias técnicas para a quantificação das partículas de menores dimensão. Estas técnicas foram inicialmente usadas para fracções de dimensão inferior a 0,1 mm, mas, com algumas adaptações tecnológicas, a sua aplicação tem sido estendida a partículas maiores, muitas vezes já da ordem de 1 mm ou mesmo superior. As mais populares são as que se baseiam nos processos de sedimentação, considerando a sedimentação de partículas de acordo com a lei de Stokes, e a difracção de raios laser. Gossens (2008) forneceu uma análise comparativa destas técnicas.

Como existe alguma sobreposição nas gamas dimensionais que podem ser determinadas através das várias metodologias, é possível tomar opções em relação aos limites entre as fracções granulométricas determinadas por cada método. A título de exemplo, a percentagem da fracção entre 0,063 mm e 2 mm pode ser determinada tanto por difracção laser como por crivagem. Todavia, a escolha da metodologia mais adequada deve ser criteriosamente ponderada. Por um lado, na medida do possível, deve-se evitar truncar as amostras, analisando fracções inferiores e superiores ao diâmetro de truncatura por diferentes métodos (Blott e Pye 2006). Por outro, não é de estranhar que os resultados fornecidos para as zonas limite de aplicação dos métodos sejam menos rigorosos ou precisos.

Apesar das dificuldades em medir correctamente partículas com morfologias muito afastadas da esfera, em que o resultado determinado por difracção laser é muito superior ao real (Konert e Vandenberghe 1997, Beuselinc *et al.* 1998, Hayton *et al.* 2001, Blott e Pye 2006), esta técnica tem ganhado popularidade durante os últimos anos, em parte devido às suas vantagens em termos de reprodutibilidade, volume de amostra requerido e tempos de análise e de processamento de resultados (Beuselinc *et al.* 1998, Eshel *et al.* 2004, Gossens 2008). Contudo, alguns autores têm defendido que o método não é adequado quando se pretende determinar as condições dinâmicas do ambiente deposicional, uma vez que na medição de partículas finas, da dimensão de argila ou silte fino, os resultados sugerem maiores dimensões, na gama de silte médio a grosseiro, que se depositam sob condições de maior energia (McCave *et al.* 2006). Naturalmente, a aplicação de técnicas que tomem em consideração a velocidade de sedimentação (seja ela pipetagem, atenuação de Raios X ou outro)

deve fornecer resultados que reproduzam melhor as condições dinâmicas. A opção por estas técnicas, contudo, não se pode fazer sem se ter presente os seus inconvenientes e as vantagens das alternativas. Aqui, para além do rigor e precisão dos resultados, há que considerar parâmetros tão diversos como o preço dos equipamentos e a sua manutenção, o tempo de análise e a facilidade de processamento dos resultados, a quantidade de amostra necessária, a possibilidade de comparação com os resultados obtidos em trabalhos similares, etc.

Um outro problema, cuja forma de ultrapassar origina resultados muito diversos, relaciona-se com a tendência para constituir agregados revelada pelas partículas mais finas. Em função da natureza dos materiais em transporte e das condições do meio, partículas argilosas podem ser transportadas de forma dispersa, isto é, como grão individuais, ou integradas em agregados de dimensões muito diversas. A determinação da granulometria depois de se proceder à dispersão da amostra fornecerá, potencialmente, informações mais relevantes sobre a natureza das áreas de alimentação. Mas uma avaliação das condições dinâmicas pode ser preferível em amostras não dispersas; alternativamente pode ser baseada em fracções que não sejam propensas à floculação (McCave *et al.* 1995, Bianchi *et al.* 1999).

3.3. Resolução da análise

A resolução refere-se aqui ao intervalo granulométrico mínimo cuja frequência pode ser detectada com a análise. Em termos simples, corresponde ao mínimo valor do incremento entre classes granulométricas fornecido com segurança pela técnica analítica. Estando a análise adaptada a uma escala de ϕ , é geralmente feita a opção de incrementos de 1, 1/2, 1/4 ou 1/5 ϕ . Com uma análise de reduzida resolução (por exemplo, de 1 ϕ) há o risco da não identificação de populações em amostras que resultam de mistura (Figura 3). Desta forma, é recomendável adoptar incrementos, entre classes granulométricas, tão baixos quanto possível (isto é, maiores resoluções de análise).

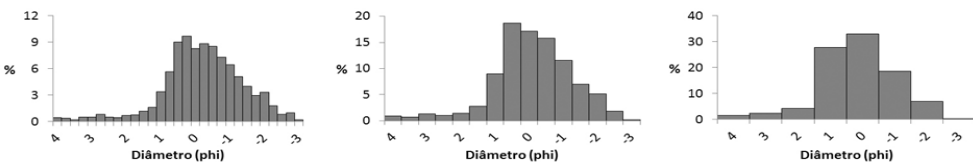


Figura 3. Resolução numa análise granulométrica. Repare-se nas diferentes posições da(s) classe(s) modal(is) para diferentes resoluções de análise do mesmo sedimento. Da esquerda para a direita apresentam-se gráficos para análises a 1/4, 1/2 e 1 ϕ .

Figure 3. Resolution of a sieve analysis. Note the different modal sizes for different resolutions of analysis of the same sediment. From left to right are shown histograms for analysis at 1/4, 1/2 and 1 ϕ .

No caso de uma análise efectuada por crivagem, a resolução estabelecida aquando da execução da análise é aquela que se mantém nos resultados finais. Aumentar a resolução obriga a que se introduzam mais crivos (classes granulométricas), implicando portanto mais tempo de análise e processamento de dados e também o uso de maior quantidade de amostra. No caso de se recorrer a aparelhos com maior nível tecnológico, como a difracção laser

ou de atenuação de Raios X (Sedigraph), o processo de análise fornece um conjunto de dados que podem ser adaptados a diferentes resoluções. O número de classes granulométricas possíveis não será, naturalmente, infinito, pelo que haverá sempre um valor máximo de resolução real, mas pode-se trabalhar com resoluções da ordem de $1/4 \phi$, ou mesmo superiores, com segurança. Nos casos em que se pretendem resultados com maiores resoluções há que ter particular atenção à questão da representatividade da amostra para as fracções mais grosseiras.

3.4. Questões de representatividade

A representatividade duma amostra relaciona-se directamente com o volume de material que deve ser sujeito a análise. Como ponto de partida, sabemos que quanto maior for a dimensão máxima das partículas presentes numa amostra, maior é o volume necessário para se ter uma amostra representativa. A relação entre a quantidade de material necessária e o diâmetro máximo das partículas resulta do facto de ocorrer uma diminuição do número de grãos presentes num determinado volume quando se aumenta o tamanho dessas partículas.

No caso de determinações da granulometria por crivagem, desde que não se estejam a avaliar proporções de classes granulométricas demasiado grandes para o diâmetro do crivo, podemos garantir um resultado representativo aumentando o volume de amostra. Há ainda que ter presente que a eficiência da análise acabará por diminuir se um determinado crivo tiver de suportar um volume de material tal que leve à colmatação da sua malha. Poucos gramas serão suficientes para a análise granulométrica de sedimentos com menos de 0,1 mm de diâmetro. Contudo, uma vez que o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos concebidos para a determinação da granulometria das fracções mais finas tem permitido que estes também sejam usados para medir grãos na gama de areia média a grosseira e que a aplicação de uma única técnica é preferível a uma metodologia de análise que envolva duas, com posterior conjugação dos resultados (Coakley e Syvitski 1991, Blott e Pye 2006), os resultados da análise para amostras que integrem partículas de maior calibre podem ter problemas sérios de representatividade, como se explica de seguida.

Alguns aparelhos indicam a quantidade de material ideal para análise, enquanto que, em outros, são usados volumes de amostra ou soluções com concentrações de sedimento, segundo padrões recomendadas pelo fabricante ou ajustados à experiência do operador. De qualquer modo, a quantidade de material é sempre da ordem de poucos gramas ou mesmo inferior. No caso da difracção de raios laser, existem hoje no mercado equipamentos que podem medir partículas até 2 mm. Os aparelhos medem a quantidade de material e indicam quando se atingiu o valor adequado para uma medição, que depende sobretudo das características do próprio sedimento, sendo, como convém, muito maior em materiais arenosos do que em materiais silto-argilosos. Se considerarmos, por exemplo, um sedimento que integra partículas da ordem de 1 mm, a quantidade de sedimento medida é sempre muito inferior à que é geralmente usada numa análise por crivagem, em sedimentos com calibres semelhantes, o que tem feito com que alguns investigadores duvidem dos resultados para as fracções arenosas. O problema torna-se particularmente relevante quando a amostra integra uma população de grão fino (silto-argilosa) e outra de maior granulometria (digamos, de areia fina), porque quantidades reduzidas da fracção mais fina serão suficientes para o equipamento considerar que se atingiram volumes adequados para a análise.

Com base no coeficiente de variação dos resultados obtidos para cada uma das classes granulométricas, a partir da medição duma série de tomas de amostras com diferentes características, Dinis (2008) sugere que o problema da representatividade dos resultados da difracção laser começa a fazer especial sentido quando a técnica é usada na determinação de partículas próximas de 0,5-1 mm. Pode assumir-se que o maior ruído associado à difracção por partículas mais grosseiras é responsável por uma sobrestimação das fracções mais grosseiras (Blott e Pye 2006), e estará associado à maior dispersão dos resultados nestas fracções. Mas o facto dos resultados de difracção laser para amostras com diâmetro médio superior a 0,5 mm sugerirem granulometrias mais finas do que os fornecidos pela crivagem, quando o usual é que a comparação dos métodos indique o oposto (Syvitski *et al.* 1991, Konert e Vandenberghe 1997, Blott e Pye 2006), deve estar relacionado com problemas de representatividade das fracções mais grosseiras (Dinis e Castilho 2012).

As questões de representatividade dos equipamentos que recorrem a quantidades reduzidas de material podem ser ultrapassadas replicando a análise um número de vezes considerado razoável. Este número deve ser proporcional à variabilidade dos resultados obtidos.

4. Curva de distribuição integral

Diversos autores têm demonstrado que a integração de dados de diferentes técnicas numa curva de distribuição integral não é um processo simples (Coakley e Syvitski 1991, Blott e Pye 2006, Dinis e Castilho 2012). O exemplo da figura 4 mostra os resultados obtidos para a difracção laser e crivagem duma mesma amostra e duas possibilidades de integração: uma com separação das duas metodologias a 0,063 mm e a outra a 2 mm. As duas curvas de distribuição revelam modas artificiais que não são compatíveis com os dados analíticos originais. Outra coisa não seria de prever, uma vez que se estão a medir propriedades diferentes, que envolveram tratamentos matemáticos distintos. Mas mesmo a integração de dados baseados na mesma propriedade pode produzir artefactos na curva de distribuição (Coakley e Syvitski 1991).

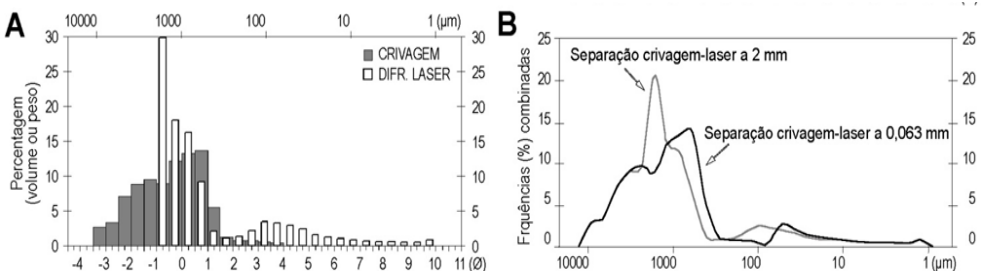


Figura 4. Exemplo das dificuldades que podem surgir quando se pretende a integração de dados de duas técnicas (crivagem e difracção laser) numa curva de distribuição granulométrica global. (A) Resultados obtidos por crivagem e difracção laser para uma mesma amostra. (B) Possíveis curvas de distribuição depois de se proceder à integração com separação dos dados em posições distintas (0,063 ou 2 mm).

Figure 4. Example of the difficulties that can arise when merging data from two techniques (sieving and laser diffraction) in a bulk grain size distribution curve. (A) Results obtained by sieving and laser diffraction for the same sample. (B) Possible distribution curves with separation of the data in different positions (0.063 to 2 mm).

Na fusão de dados granulométricos de duas técnicas deve considerar-se a necessidade de aplicar um “diâmetro de limiar” e um “diâmetro de corte”. O diâmetro de limiar estabelece a separação computacional entre as fracções analisadas pelas duas técnicas. A separação física é feita no “diâmetro de corte” (ou truncatura). Tem sido demonstrado que a truncatura numa amostra não é recomendável. Por exemplo, quando o tratamento da amostra envolve a remoção numa fracção fina por via húmida, sendo o material de maior calibre analisado por crivagem e o mais fino por outro método, este processo pode criar um défice de frequência nas classes imediatamente acima do diâmetro de corte (Matthews 1991). Por outro lado, os algoritmos usados por equipamentos de difracção laser tendem a adaptar os resultados a funções de distribuição, pelo que, a truncatura numa fracção acarretará erros adicionais (Blott e Pye 2006). A presença de um diâmetro de limiar não implica a truncatura da amostra em duas fracções de tamanhos diferentes e os diâmetros de corte e limiar não têm necessariamente que coincidir. O problema, na combinação de dados, pode estar então na definição do diâmetro de limiar.

A aplicação informática SLCombo (Dinis e Castilho 2012) foi criada para integrar os resultados de crivagem e difracção laser numa mesma curva de distribuição. Permite a comparação dos dados analíticos originais e a obtenção de diferentes curvas de distribuição para diferentes localizações do diâmetro de limiar, o que torna mais criteriosa a escolha do ponto de ligação entre os dados das duas técnicas (Figura 5). O utilizador fornece as proporções das fracções mais fina e mais grosseira que o crivo de malha mais fechada e as frequências (em volume e em peso) das classes granulométricas determinadas pelas duas metodologias. A aplicação SLCombo determina automaticamente a curva de distribuição granulométrica combinada para diferentes diâmetros de limiar com base nos seguintes cálculos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } i < thr \ \rho \Rightarrow f_{Ci} = f_{Li} \times \left(\frac{\sum^{thr} f_{Si}}{\sum f_{Li}} \right) \quad (1) \\ \text{se } i > thr \ \rho \Rightarrow f_{Ci} = f_{Si} \quad (2) \end{array} \right.$$

em que i é uma classe granulométrica, thr é o diâmetro de limiar (*threshold*) e f_{Ci} , f_{Li} e f_{Si} são, respectivamente, as frequências obtidas por crivagem, difracção laser e combinadas.

Há que assegurar que os dados dimensionais estão ajustados a intervalos regulares segundo a escala de ϕ (por exemplo, $1/2 \phi$ ou $1/4 \phi$). Cabe ao utilizador optar pelo diâmetro mais ajustado aos dados analíticos fornecidos pelos dois métodos. Como regra básica, este deve estar desviado das várias modas sugeridas pelas duas metodologias, de forma a garantir que as partículas mais finas e grosseiras de uma população não sejam consideradas por técnicas diferentes na curva combinada. Como os resultados da crivagem e difracção laser, para diâmetros mais grosseiros, podem divergir significativamente, devido às questões do ruído associado à difracção e à representatividade, a opção por um limiar mais grosseiro que 1 mm deve ser tomada com cuidado. Poderá fazer sentido adoptar resultados de difracção laser para as classes dimensionais mais grosseiras se esta opção permitir obter a granulometria com uma única técnica. Na medida do possível, deve ser aplicado o mesmo diâmetro de limiar a todas as amostras em investigação, garantindo-se assim que é usada sempre a mesma técnica para estabelecer a frequências numa classe granulométrica.

A aplicação SLCombo foi concebida para reunir dados de crivagem e difracção laser numa mesma curva de distribuição, mas também pode ser usada com dados de outras técnicas, desde que estes apresentem incrementos com intervalos regulares de $1/2 \phi$ ou $1/4 \phi$.

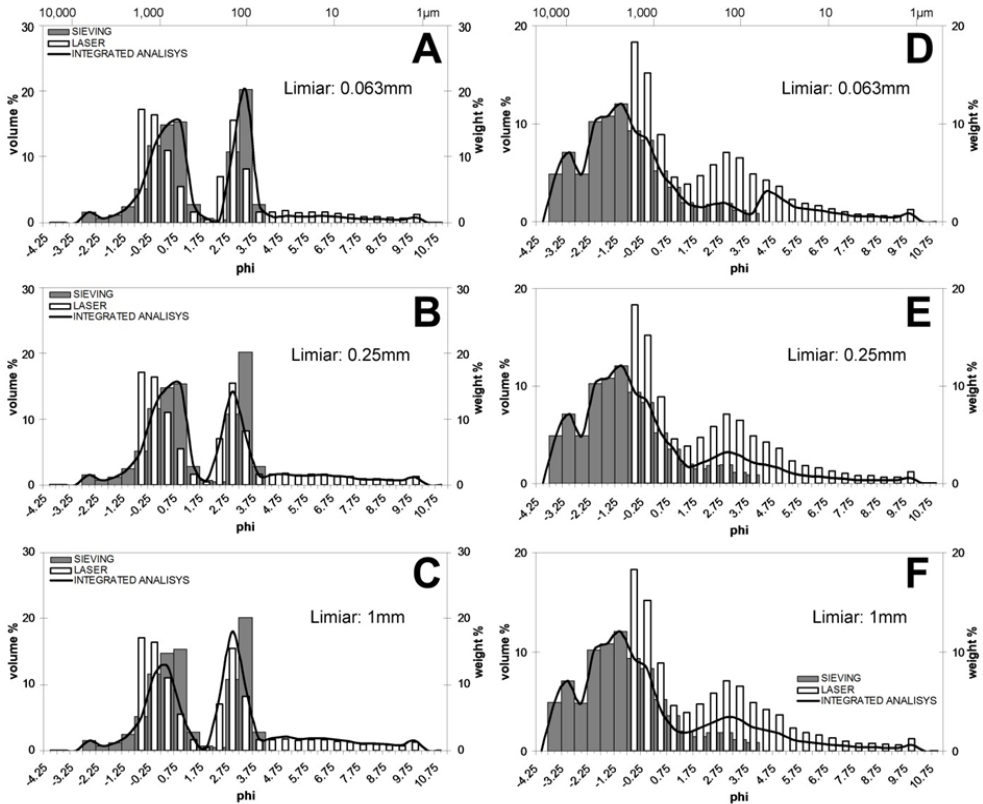


Figura 5. Curvas de distribuição granulométrica obtidas com a aplicação SLCombo para a fusão de dados de duas técnicas recorrendo a diferentes diâmetros de limiar nos cálculos matemáticos. (A, B e C) Exemplo para uma amostra com duas populações dominantes em frações arenosas; note-se o carácter simétrico da população mais grosseira, não suportado pelos dados analíticos, quando se aplica um diâmetro limiar de 1 mm. (E, F e G) Exemplo para uma amostra com uma população areno-cascalhenta e uma população areno-siltosa; note-se a moda artificial quando se aplica um diâmetro limiar de 0,063 mm.

Figure 5. Grain size distribution curves obtained with SLCombo for merging data from two techniques using different threshold diameters in the mathematical calculations. (A, B, and C) Example for a sample with two dominant populations in sandy fractions; note the symmetrical nature of the coarser population, not supported by the analytical data, when applying a threshold diameter of 1 mm. (E, F and G) Example for a sample with sand-gravel and a sand-silt populations; note the artificial mode at coarse silt size when applying a threshold diameter of 0.063 mm.

5. Considerações finais

A origem de partículas que constituem um corpo sedimentar pode ser avaliada a partir da identificação de populações granulométricas constituintes desde que se consiga associar processos genéticos, que envolvem proveniências específicas. A identificação das populações pode ser baseada em diferentes métodos, com diferentes complexidades, sendo necessária uma amostra representativa para todas as fracções granulométricas e intervalos constantes para as várias classes granulométricas. A granulometria como indicador de proveniência tem sido usado com sucesso na análise de sedimentos de grão fino (marinhos, lacustres, eólicos, fluviais, de planície de inundação). Também pode ser aplicada a sedimentos mais grosseiros, desde que as premissas da representatividade e constância de classes sejam respeitadas. À semelhança do que acontece com outros dados composicionais, se as características granulométricas são especialmente adequadas para a definição da proveniência elas terão menor utilidade na investigação de outros processos envolvidos na geração dum corpo detrítico.

Referências

- Ashley G.M. 1978. Interpretation of polymodal sediments. *Journal of Geology* 86: 411-421.
- Asselman N.E.M. 1999. Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, river Waal, the Netherlands. *Journal Sedimentary Research* 69: 51-61.
- ASTM 1996. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes, ASTM D-2487. American Society for Testing and Materials, Annual Book of Standards, Volume 04.08 on Soil and Rock, Section 4 - Construction, West Conshohocken.
- Bagnold R.A., Barndorff-Nielsen O. 1980. The pattern of natural size distributions. *Sedimentology* 27: 199-207.
- Beuselincx L., Govers G., Poesen J., Degraer G., Froyen L. 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method: *Catena* 32: 193-208.
- Bianchi G.G., Hall I.R., McCave I.N., Joseph L. 1999. Measurement of the sortable silt current speed proxy using the Sedigraph 5100 and Coulter Multisizer II: Precision and accuracy. *Sedimentology* 46: 100-1014.
- Bianchini G., Marrocchino E., Vaccaro C. 2004. Chemical and mineralogical characterization of historic mortars in Ferrara (northeast Italy). *Cement and Concrete Research* 34: 1471-1475.
- Blatt H., Middleton G., Murray R. 1980. *Origin of Sedimentary Rocks*. Prentice-Hall, Nova Jérсия.
- Blott S.J., Pye K. 2001. GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26: 1237-1248.
- Blott S.J., Pye K. 2006. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology* 53: 671-685.
- Bokhorst M.P., Vandenberghе J., Sümegi P., Lanczont M., Gerasimenko N.P., Matviishina Z.N., Markovic S.B., Frechen M. 2011. Atmospheric circulation patterns in central and eastern Europe during the Weichselian Pleniglacial inferred from loess grain-size records. *Quaternary International* 234: 62-74.
- Bridge J.S., Bennett S.J. 2010. A model for the entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes, and densities. *Water Resources Research* 28: 337-363.
- BSI 1999. British Soil Classification System. In: BS 5930:1999 - The Code of Practice for Site Investigations. BSI, British Standards Institution, UK.
- Christiansen C., Hartmann D. 1991. The hyperbolic distribution. In: Syvitski, J.P.M. (Ed.), *Principles, Methods, and Applications of Particle Size Analysis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge: 237-248.

- Christiansen C., Blaesild P., Dalsgaard K. 1984. Reinterpreting "segmented" grain-size curves. *Geological Magazine* 121: 47-51.
- Coakley J.P., Syvitski J.P.M. 1991. SediGraph technique. In: Syvitski, J.P.M. (Ed.), *Principles, Methods, and Applications of Particle Size Analysis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge: 129-142.
- Curry J.R. 1960. Tracing sediment masses by grain size modes. Report of the Twenty-First Session Norden. *International Geological Congress*: 119-130.
- Dias A. 2004. A Análise Sedimentar e o Conhecimento dos Sistemas marinhos (Uma Introdução à Oceanografia Geológica). E-book disponível em: http://w3.uaig.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html
- Dias J.A., Neal, W. 1990. Modal size classification of sands: an example from the northern Portugal continental shelf. *J. Sediment. Petrol.* 60: 426-437.
- Dinis P.A., Castilho A.M. 2012. Integrating sieving and laser data to obtain bulk grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Research* 82: 747-754.
- Dinis P.A. 2008. Conjugação de técnicas em análise granulométrica de sedimentos. Algumas dificuldades e remedeios. In: Callapez, P.M., Rocha, R.B., Marques, J.F., Cunha, L.S., Dinis, P.M. (Eds.). *A Terra: Conflitos e Ordem, Livro de Homenagem ao Professor Ferreira Soares*: 25-30.
- Dinis P.A., Bernardes C., Callapez P., Carvalho M. 2009. Comparative study of inner shelf sediments (Pliocene and present day cover) in the western Portuguese margin. *Thalassas* 25: 9-20.
- Du J. 2002. Combined Algorithms for Fitting Finite Mixture Distributions, McMaster University unpublished M.Sc. project.
- Eshel G., Levy G.J., Mingelrin U., Singer M.J. 2004. Critical evaluation of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Science Society of America Journal* 68: 736-743.
- FAO, 2006. Guidelines for soil description (4th Ed.). Food and Agriculture Organization of the United States, Rome.
- Ferguson R.I., Church M. 2004. A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity. *Journal of Sedimentary Research* 74: 933-937.
- Flores-Aqueveque V., Alfaro S.C., Caquineau S., Foret G., Vargas G., Rutllant J.A. 2012. Inter-annual variability of southerly winds in a coastal area of the Atacama Desert: implications for the export of aeolian sediments to the adjacent marine environment. *Sedimentology* 59: 990-1000.
- Friedman G.M., Sanders J.E. 1978. *Principles of Sedimentology*. Wiley, New York.
- Gao S., Collins M. 1992. Sand sediment transport patterns inferred from grain-size trends based upon definition of "transport vectors". *Sediment. Geol.* 80: 47-60.
- Ghosh J.K., Mazumder B.S., Saha M.R., Sengupta S. 1986. Deposition of sand by suspension currents: experimental and theoretical studies. *J. Sediment. Petrology* 56: 57-66.
- Gibbs R.J., Matthews M.D., Link D.A. 1971. The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of sedimentary Petrology* 41: 7-18.
- Goossens D. 2008. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. *Sedimentology* 55: 65-96.
- Hayton S., Nelson C.S., Ricketts B.D., Cooke S., Wedd M.W. 2001. Effect of mica on particle-size analysis using the laser diffraction technique. *Journal of Sedimentary Research* 71: 507-509.
- Holz C., Stuut J.B.W., Henrich R. 2004. Terrigenous sedimentation processes along the continental margin off NW-Africa: implications from grain-size analyses of surface sediments. *Sedimentology* 51: 1145-1154.
- Konert M., Vandenbergh J. 1997. Comparison of laser grain-size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* 44: 523-535.
- Krumbein W.C. 1934. Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 4: 65-77.
- Krumbein W.C., Pettijohn F.J. 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York.

Assinatura granulométrica como indicador da proveniência: potencialidades e limitações

- Le Roux J.P., Rojas E.M. 2007. Sediment transport patterns determined from grain-size parameters: overview and state of the art. *Sedimentary Geology* 202:473-488.
- Le Roux J.P. 1994. An alternative approach to the identification of sand sediment transport paths based on a grain-size trends. *Sedimentary Geology* 94: 97-107.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. W. H. Freeman & Sons, San Francisco.
- Leys J., McTainsh G., Koen T., Mooney B., Strong, C. 2005. Testing a statistical curve-fitting procedure for quantifying sediment populations within multi-modal particle-size distributions. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 579-590.
- Macdonald P.D.M., Green P.E.J. 1988. User's Guide to Program MIX: An Interactive Program for Fitting Mixtures of Distributions. Available from: <http://www.math.mcmaster.ca/peter/mix/mix.html>.
- Matthews M.D. 1991. The effect of grain shape and density on size measurement. In: Syvitski, P.M. (Ed.), *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge: 22-42.
- Mc Laren P., Bowles D. 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *J. Sediment. Petrol.* 55: 457-470.
- McBride E.F., Picard M.D. 1987. Downstream changes in sand composition, roundness, and gravel size in a short-headed high-gradient stream, northwestern Italy. *J. Sediment. Petrol.* 57: 1018-1026.
- McCave I.N., Manighetti B., Robinson S.G. 1995. Sortable silt and fine sediment size-composition slicing: Parameters for paleocurrent speed and paleoceanography. *Paleoceanography* 10: 593-610.
- McCave I.N., Hall I.R., Bianchi G.G. 2006. Laser vs. settling velocity differences in silt grain size measurements: estimation of palaeocurrent vigour. *Sedimentology* 53: 919-928.
- McManus J. 1988. Grain size determination and interpretation. In: Tucker, M. (Ed.), *Techniques in Sedimentology*. Blackwell, Oxford 63-85.
- Middleton G.V. 1976. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology* 84: 405-426.
- Morgan R.M., Bull P.A. 2007. The use of grain size distribution analysis of sediments and soils in forensic enquiry. *Science & Justice* 47: 125-135
- Nickling W.G. 1994. Aeolian sediment transport and deposition. In: Pye K. (Ed.), *Sediment Transport and Depositional Processes*. Blackwell Scientific, Boston: 293-350.
- Pedrerós R., Howa H.L., Michel D., 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Mar. Geol.* 135: 35-49.
- Pettijohn F.G., Potter P.D., Siever R. 1972. *Sand and sandstone*. Springer, New York.
- Poizot E., Méar Y., Biscara K. 2008. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications. *Earth-Science Reviews* 86: 15-41.
- Prins M.A., Bouwer L.M., Beets C.J., Troelstra S.R., Weltje G.J., Kruk R.W., Kuijpers A., Vroon P.Z. 2002. Ocean circulation and iceberg discharge in the glacial North Atlantic: inferences from unmixing of sediment distributions. *Geology* 30: 555-558.
- Prins M.A., Vriend M.G.A., Nugteren G., Vandenberghe J., Lu H., Zheng H., Weltje G.J. 2007. Late Quaternary aeolian dust flux variability on the Chinese Loess Plateau: inferences from unmixing of loess grain-size records. *Quaternary Science Reviews* 26: 242-254.
- Qin X.G., Cai B.G., Liu T.S. 2005. Loess record of the aerodynamic environment in the East Asia monsoon area since 60,000 years before present. *Journal of Geophysical Research* 110: B01204, 1-16
- Rey S., Bernardes C. 2004. Short-Term morphodynamics of intertidal bars. The case of Areão Beach (Aveiro Northwest Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 39: 588-593.
- Soares A.F. 1966. Estudo das formações pós-jurássicas da região de entre Sargento-Mor e Montemor-o-Velho (margem direita do rio Mondego). *Memórias e Notícias* 62: 1-343.

- Sun D.H., Bloemendal J., Rea D.K., An Z., Vandenberghe J., Lu H., Su R., Liu T. 2004. Bimodal grain-size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications. *Catena* 55: 325-340.
- Sun D.H., Bloemendal J., Rea D.K., Vandenberghe J., Jiang F.C., An Z.S., Su R.X. 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology* 152: 263-277.
- Syvitski J.P.M., Leblanc K.W.G., Asprey K.W. 1991. Interlaboratory instrument calibration experiment. In: Syvitski, J.P.M. (Ed.), *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge: 174-193.
- Tamura T. 2004. Preservation and grain-size trends of Holocene wave-dominated facies succession in eastern Japan: implications for high resolution sequence stratigraphy analysis. *Journal of Sedimentary Research* 74: 718-729.
- Udden J.A. 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bull. Geol. Soc. Am.* 25: 655-744.
- USDA 1978. *Soil Taxonomy*. Agriculture Handbook no. 436. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C.
- Varga G., Kovács J., Újvári G. 2012. Late Pleistocene variations of the background aeolian dust concentration in the Carpathian Basin: an estimate using decomposition of grain-size distribution curves of loess deposits. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw* 91: 111-123.
- Visher G.S. 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology* 39: 1074-1106.
- Weltje G.J., Prins M.A. 2003. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics. *Sedimentary Geology* 162: 39-62.
- Weltje G.J., Prins M.A. 2007. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions. *Sedimentary Geology* 202: 409-424.
- Weltje G.J. 1997. End-member modeling of compositional data: numerical–statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Journal of Mathematical Geology* 29: 503-549.
- Wentworth C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30: 377-392.