

Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la Tierra

Interpreting sedimentary environments: sedimentological workshop with sands as a teaching activity in Earth Science

HUGO CORBÍ Y JAVIER MARTÍNEZ-MARTÍNEZ

Departamento Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Apdo. Correos 99, San Vicente del Raspeig, 03080 Alicante, España. E-mail: hugo.corbi@ua.es; javier.martinez@ua.es

Resumen El proceso de aprendizaje de las Ciencias de la Tierra, en particular en las disciplinas de la sedimentología y petrología sedimentaria, requiere de la realización de actividades prácticas, tanto en el campo como en el laboratorio. En este contexto examinar mediante lupa binocular distintos tipos de arena supone, además de un placer estético, un buen punto de partida para introducir al alumnado en la interpretación de ambientes sedimentarios. En este trabajo se propone un taller de iniciación a la reconstrucción de ambientes sedimentarios mediante el análisis de sedimentos detríticos (principalmente arenas). Se presenta una guía de procedimientos en laboratorio que incluye el análisis de los siguientes parámetros: tamaño, composición y forma de los granos, selección y color. Para vertebrar la propuesta didáctica se examinan ejemplos “tipo” de sedimentos detríticos representativos de ambientes de depósito tanto fluviales como marinos y de transición (playa), todos ellos incluidos en diferentes puntos de la geografía de la provincia de Alicante (España).

Palabras clave: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, taller didáctico, sedimentología, arena, ambientes sedimentarios

Abstract *The learning process of Earth Sciences, including the disciplines of sedimentology and sedimentary petrology, requires practical activities in the field, as well as in the laboratory. In this context, examining different types of sand under the stereomicroscope involves, apart from an aesthetic pleasure, a good starting point for introducing students to the interpretation of sedimentary environments. In this article a workshop related to the reconstruction of sedimentary environments and the analysis of detrital sediments (mainly sand) is proposed. It provides a guide to laboratory procedures including analysis of the following parameters: grain size, composition and shape sorting and color. To implement this didactic proposal, prime examples of detrital sediments representative of different depositional environments (fluvial, marine and transitional -beach-) from Alicante province (Spain) are examined.*

Keywords: *Geoscience teaching, Didactic workshop, sedimentology, sand, sedimentary environments*

*To see a world in a grain of sand
And a heaven in a wild flower,
Hold infinity in the palm of your hand,
And eternity in an hour.*

INTRODUCCIÓN

En el contexto de un laboratorio de Ciencias de la Tierra, la arena es posiblemente una de las cosas más fascinantes para observar con el microscopio. Observar una arena puede suponer, por tanto, “descubrir un mundo nuevo” (*to see a world*

in a grain of sand, aludiendo al poema de William Blake), en el que percibir distintas formas, texturas y colores en cada uno de los granos o clastos que conforman la arena. De hecho, para una playa, la arena puede considerarse, de alguna forma, como la “huella geológica o sedimentaria” que nos cuenta la procedencia y origen de la misma. Por tanto,

visualizar y examinar una arena bajo el microscopio constituye, no solo un placer estético, sino también una importante fuente de información geológica de vital importancia, por ejemplo, en la reconstrucción de ambientes sedimentarios.

El estudio de la arena posee un alto potencial, no solo a nivel de investigación científica (p.ej. Friedman, 1961; Medina *et al.*, 1994; Blott y Pye, 2001; Carranza-Edwards, 2001; Carranza-Edwards *et al.*, 2009), sino también como recurso didáctico en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra, como ponen de manifiesto las numerosas páginas web dedicadas a esta temática. De hecho, algunos institutos de enseñanza secundaria han elaborado de forma sistemática colecciones de arenas (Carrillo *et al.*, 1993; <http://www.arenasdelmundo.org/>). Dentro del ámbito de los talleres docentes, otros autores proponen como recurso didáctico la caracterización (fundamentalmente de los componentes microfósiles) y técnicas de análisis de sedimentos (Caracuel *et al.*, 2004; Corbí *et al.*, 2012). Incluso hay autores, que han abordado el estudio de la arena de playa, desde la perspectiva de la microfotografía artística (Greenberg, 2008).

En este trabajo se presenta un taller de sedimentología o guía de actividades que aborda el análisis de sedimentos arenosos como recurso didáctico dentro del contexto de un laboratorio de Geología o Ciencias de la Tierra. El taller está planteado inicialmente para alumnos de la ESO (desde cuarto curso) y Bachillerato (cursos preuniversitarios), aunque también podría incluirse en las actividades prácticas de los planes docentes de los Grados de Ciencias del Mar, Ciencias Ambientales, Biología y Geología. El taller permite, a través del estudio de un conjunto de sedimentos detríticos (principalmente arenosos), introducir conceptos básicos de sedimentología y petrología sedimentaria, así como iniciarse en la interpretación de ambientes de depósito. El objetivo de este trabajo es, por tanto, exponer la metodología a seguir en un laboratorio de análisis de sedimentos detríticos (principalmente arenas), a través del estudio de unos “ejemplos tipo”, que sirven de base para que el profesorado pueda desarrollar este taller con las muestras de sus colecciones propias. El artículo comienza con una breve revisión de los conocimientos teóricos necesarios para el adecuado aprovechamiento del taller por parte del alumnado. A continuación, se desarrolla una guía de laboratorio de los principales procedimientos empleados en el análisis de arenas (tamaño de grano, mineralogía, morfoscopía, selección y color). Por último, se examinan en detalle, como ejemplo de aplicación, una serie de “ejemplos tipo” de arena, contextualizados en el marco de la interpretación de los ambientes sedimentarios.

LAS ARENAS Y LA INTERPRETACIÓN DE AMBIENTES SEDIMENTARIOS: CONOCIMIENTOS PREVIOS

Erosión, transporte y sedimentación. Las arenas en las playas, en los ríos, en las dunas, en los deltas, etc., son el resultado de la acumulación de

pequeñas partículas desde un área fuente que se está erosionando, su transporte mediante los ríos, el viento, el hielo, etc., hasta un lugar más o menos deprimido y de ambiente tranquilo donde se sedimentan.

El área fuente de una arena hace referencia al entorno original de donde proceden los granos terrígenos del depósito. Es muy frecuente encontrar granos de cuarzo en un sedimento arenoso; sin embargo, ¿de dónde procede ese cuarzo? Sin lugar a dudas, ese cuarzo procede de una roca que estaba expuesta a la erosión, y que al disgregarse “liberó” un fragmento de cuarzo que fue modificando su forma hasta convertirse en el grano de arena que vemos actualmente. Por lo tanto, existe una relación directa entre los componentes minerales que vemos en el depósito y la naturaleza mineral del área fuente. Si un área fuente montañosa está formada por granito (roca plutónica cuyos minerales mayoritarios son cuarzo, feldespato y mica), los granos de arena acumulados en la playa resultantes de su erosión serán granos de cuarzo, de feldespato y de mica. Si un área fuente montañosa está formada por mármoles, las playas resultantes serán ricas en granos de calcita. Sin embargo, la relación mineralógica entre el área fuente y el sedimento arenoso no siempre es tan clara. Por una parte, diferentes áreas fuentes pueden alimentar un único depósito, y por lo tanto, la variedad mineralógica en el sedimento final puede ser mucho mayor que la de una única área fuente. En cambio, por otra parte, es necesario que para que se generen zonas de depósito y acumulación de arenas, las partículas viajen desde el área fuente hasta la cuenca sedimentaria mediante los diferentes agentes de transporte. Este viaje puede llegar a ser muy agresivo, y las partículas se pueden degradar y fragmentar mucho. No todos los minerales son igual de resistentes, por lo que si el viaje es intenso, los más débiles acaban erosionándose por completo y desapareciendo. Es por ello que, en ocasiones, el depósito arenoso posee una variedad mineralógica menor que el área fuente del que procede. Uno de los minerales más resistentes en condiciones ambientales es el cuarzo. Por ello, es muy habitual encontrar granos de cuarzo en el sedimento, a pesar de que haya sido transportado intensamente.

El transporte, como vemos, es otra pieza clave en la configuración del depósito final. Las partículas generadas por la erosión de la roca en el área fuente pueden ser transportadas por el viento, la lluvia, los ríos, el hielo, las coladas de barro, etc. Tal y como hemos visto anteriormente, el agente de transporte tiene un carácter selectivo, ya que deteriora y elimina los componentes más débiles, mientras que mantiene aquellos más resistentes. Sin embargo, ese carácter selectivo no sólo se manifiesta en qué minerales prevalecen y cuáles no, sino que también se realiza una selección de tamaños de partícula. Es evidente que un río de alta montaña posee mucha más energía que uno que transcurre en su tramo final por una larga llanura, por ejemplo. Igualmente, el viento puede acelerarse, aumentando su energía, o puede frenarse, disminuyéndola. Cuanto mayor es la energía de transporte de un medio, más capacidad tiene ese

agente para transportar partículas más gruesas. Conforme la energía vaya disminuyendo, las partículas más gruesas se irán depositando puesto que el agente no puede desplazarlas, mientras que las más finas continuarán el viaje. Por ello, cuanto mayor sea el transporte sufrido, la energía del medio habrá disminuido lentamente (o habrá sufrido diferentes procesos de aceleración y deceleración) por lo que el sedimento se habrá ido “tamizando” intensamente. El resultado final será un depósito con un tamaño de partícula homogéneo. Por el contrario, cuando el transporte es muy corto, la energía del medio disminuye súbitamente y toda la carga transportada se acumula a la vez, por lo que el “tamizado” es mucho menos intenso. El depósito, en este caso, estará formado por granos de un rango más amplio de tamaños. Este “efecto tamiz” del agente de transporte se traduce en un sedimento mejor o peor seleccionado. Cuanto mayor es el transporte, mejor seleccionado es el depósito final.

Otra consecuencia directa del grado de transporte que sufren las partículas es su grado de redondez y su esfericidad. Durante el transporte, las partículas se golpean entre sí y golpean el sustrato. Como consecuencia, se van reabajando morfológicamente, perdiendo las aristas y suavizando las formas. El resultado de un transporte intenso, por lo tanto, será una arena con partículas más redondeadas (con menos ángulos y esquinas) y esféricas (geometría más próxima a la esfera). Esta afirmación se cumple siempre que comparemos dos depósitos que han sido transportados por el mismo medio de transporte. Por ejemplo, si en un río encontramos un banco de arenas redondeadas y esféricas podremos decir que ha sufrido un transporte mayor que aquellos depósitos fluviales con partículas angulosas y muy alargadas. Pero, consideremos ahora una morrena frontal, que son sedimentos glaciares que se forman en el frente de avance de los glaciares de hielo. Las partículas se transportan en el hielo a lo largo de grandes distancias, y se acumulan en barras cuando éste se derrite. En este ejemplo, las partículas sufren largos transportes, pero como las partículas permanecen estáticas dentro del hielo y no se golpean entre sí, su redondez y esfericidad apenas cambia. Por este motivo, aunque las arenas de un río hayan sufrido

el mismo transporte que las partículas de una morrena, la redondez y esfericidad de las primeras siempre será mayor que las del segundo caso.

Por último, cabe mencionar los conceptos de madurez composicional y textural de un sedimento. Si nos imaginamos un sedimento procedente de un área fuente muy lejana, y que por tanto ha sufrido un transporte y retrabajamiento muy intenso, debemos pensar en unos granos muy redondeados, muy esféricos y muy bien seleccionados, teniendo en cuenta lo que hemos visto anteriormente. Cuando se cumplen estas tres características decimos que un sedimento posee una madurez textural muy alta. En el caso contrario, un sedimento poco transportado poseerá granos angulosos, poco esféricos y con una gran variabilidad de tamaños. Es decir, será un sedimento con una madurez textural muy baja. Pero, ¿cuál será la mineralogía predominante en uno u otro caso? Como hemos visto anteriormente, la mineralogía final de un depósito depende en gran medida del tipo de rocas que afloran en el área fuente, pero a muy grandes rasgos podemos decir que cuanto mayor sea el porcentaje de minerales “duros” (cuarzo, y en menor medida feldespatos), mayor será la madurez composicional. Mientras que cuando predominen los minerales “blandos” (calcita, micas, etc.), menor será la madurez composicional.

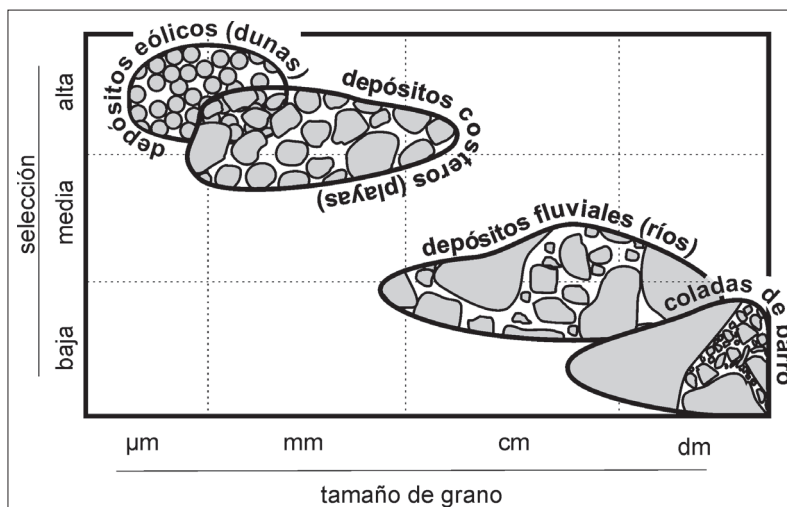
Conociendo la madurez textural y composicional de un sedimento podemos deducir muchos aspectos del ambiente en el que se desarrolló un determinado depósito. Una arena muy mal seleccionada, con granos angulosos y poco esféricos y una mineralogía muy variada incluyendo minerales resistentes y menos resistentes (es decir, una arena inmadura) nos indica una zona tectónicamente activa, en la que existen relieves montañosos próximos y por tanto, una región con bastante inestabilidad. Por el contrario, una arena bien seleccionada, con granos redondeados y una mineralogía donde predominan los minerales resistentes (una arena madura) nos indica que ha existido un largo e intenso transporte desde las áreas fuente hasta la zona de acumulación (las zonas montañosas están alejadas) y por tanto constituye una zona tectónicamente estable y poco activa.

Ciertos ambientes sedimentarios se caracterizan por una determinada energía del medio y por una determinada intensidad de transporte de sus partículas. Eso da lugar a que estos ambientes sedimentarios presenten habitualmente un determinado tamaño de grano, selección y/o redondez en sus granos. La figura 1 muestra un ejemplo de cómo suele ser la arena de una playa, de una duna, de un río y de una colada de barro según su tamaño de grano y su selección.

ANALIZANDO LOS SEDIMENTOS: GUÍA DE PROCEDIMIENTOS EN LABORATORIO

A continuación se exponen los principales aspectos teóricos, así como los procedimientos de obtención de las características o parámetros empleados en este taller de arenas. Considérese que estas características son una muestra del total de

Fig. 1. Ejemplos de distintas arenas de una playa, de una duna, de un río y de una colada de barro según su tamaño de grano y su selección.



		1	2	3	4	5	6
Tamaño y selección	Mínimo						
	Medio						
	Máximo						
	Selección						
Composición	bioclastos						
	cuarzo						
	calcita						
	fragmentos de roca						
	otros						
	(nº bioclastos)/ (nº de partículas no bioclásticas)						
	nº de partículas "resistentes", cuarzo)/ (nº de partículas "fácilmente alterables", calcita + fragmentos de roca)						
Forma	Redondez/Esfericidad						
Color							

Tabla I. Tabla de adquisición de datos para cada muestra objeto de estudio.

parámetros que pueden obtenerse en el estudio de una arena, que podría incluir también el volumen/porosidad, ángulo de reposo, etc.

Tamaño de grano y selección

El término arena está dedicado para el conjunto de partículas de rocas disgregadas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros. El *sorting* o selección hace referencia al grado de similitud en el tamaño de grano de las partículas, de forma que se considera que el sedimento está bien seleccionado, si todas las partículas son del mismo tamaño, y mal seleccionado, si presenta grandes diferencias entre el tamaño de grano. La determinación de este parámetro (selección) puede realizarse por varias vías. La primera, se basa en obtener en laboratorio las frecuencias granulométricas de cada uno de los tamaños de grano representados en el sedimento. Para ello, se realiza un ensayo de tamizado donde las partículas pasan por una serie de mallas o tamices de distintos diámetros (a modo de coladores), de forma que finalmente es posible separar el sedimento en distintas fracciones, cada una de ellas con un tamaño de grano determinado. Otra vía de obtención de la selección es comparar visualmente el sedimento con cartas de *sorting* estándar, en las que se diferencian normalmente seis tipos, desde extraordinariamente seleccionado hasta muy pobremente seleccionado.

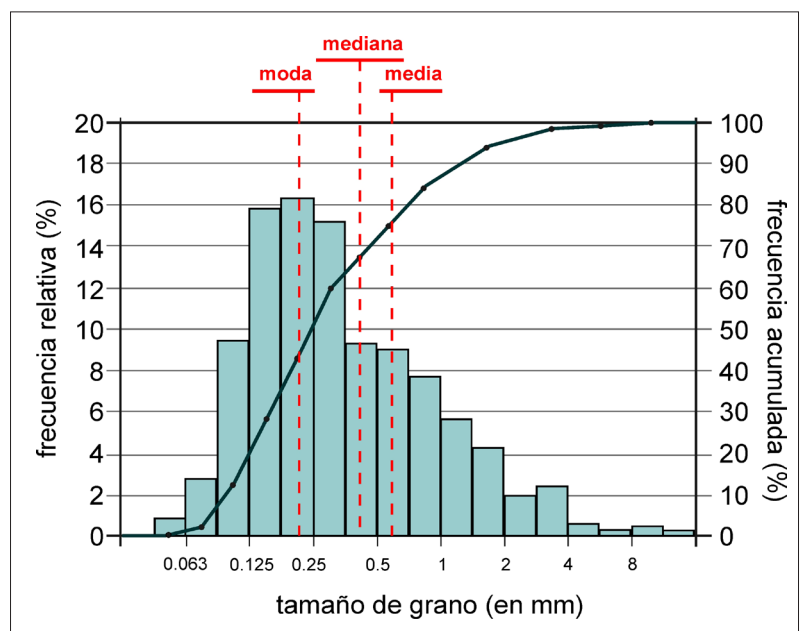
Los datos de distribución de frecuencias de tamaño de grano de un sedimento arenoso normalmente son representados mediante un histograma (que relaciona tamaño de partícula - % de representación en el total), o bien mediante curvas granulométricas de porcentaje acumulado (Fig. 2). Esta curva es simplemente una representación de los resultados obtenidos de forma que utilizando un papel log-normal (que tiene en la horizontal una escala logarítmica, y en la vertical una escala natural) se relacionan los valores acumulados y el tamaño de grano. Existe numerosa bibliografía sobre este sencillo procedimiento y la interpretación

de los numerosos parámetros que se derivan del estudio de dicha curva (por ejemplo, Tucker, 1988), e incluso programas informáticos que permiten obtener de forma automatizada todos los parámetros relacionados con la distribución de tamaños de una arena (Blott y Pie, 2001)

Al margen de los análisis más precisos y técnicos expuestos anteriormente, en este trabajo se plantea una metodología sencilla para determinar la distribución de tamaños de grano (selección) en el laboratorio con el alumnado.

- Con la ayuda de papel milimetrado, y si es posible, con la toma de fotografías convencionales en modo macro, se realiza una aproximación al tamaño del sedimento, observando la muestra sobre papel milimetrado. Dentro de esta actividad se propone obtener aproximadamente el tamaño de grano mínimo, medio y máximo que puede ser incluido en la tabla I de adquisición de datos.

Fig. 2. Formas de expresión de los datos de distribución de frecuencias de tamaño de grano en un sedimento arenoso (histograma y curva granulométrica acumulada). Queda expresado en el gráfico el valor de la "moda" que indica el tamaño de grano que tiene más "peso" o "porcentaje" en la curva granulométrica.



- A continuación cada alumno selecciona un número de granos significativo de su muestra (se aconseja un número igual o superior a 25 granos, evidentemente, cuanto mayor sea el número de granos observados, más objetivos serán los resultados obtenidos). Se debe procurar que la muestra seleccionada sea representativa de la arena (es decir, evitando seleccionar únicamente aquellos granos más vistosos, más llamativos o únicamente los bioclastos). Se deben seleccionar los granos al azar, y en el caso de que la selección de tamaños sea muy baja (gran variedad de tamaños) se debe procurar que haya representación de todos los tamaños.

- Finalmente, se calcula (siempre con la ayuda del papel milimetrado) el tamaño aproximado de cada grano (de todos los granos seleccionados), incorporándose a una tabla todos los resultados.

- A partir de los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes representaciones: a) Histograma de representación que relacione porcentualmente tamaño de grano/frecuencia o porcentaje y b) Curva granulométrica o de acumulado (Fig. 2).

Composición

Cuando observas los granos de una muestra de arena, éstos pueden corresponder a bioclastos o a granos detríticos. Los bioclastos son restos de organismos con exoesqueletos duros (conchas, caparzones, espículas de esponja, radiolas de erizo, etc.), que al morir se descomponen y son transportados y acumulados por el mar, mezclándose con el resto de sedimentos. Unas ocasiones reconoceremos estructuras enteras. Otras, en cambio, únicamente veremos pequeños fragmentos curvos y quizá nacarados que nos recuerdan a esas estructuras. El grado de fragmentación dependerá tanto de la intensidad de la energía del medio en el que se acumularon como de la duración del transporte sufrido desde el área fuente.

Los granos detríticos son aquellas partículas formadas por fragmentos de roca. En ocasiones, sobre todo cuando el tamaño de la arena es fino o muy fino, estos fragmentos son monominerales. Sin embargo, cuando el tamaño alcanza los varios milímetros de diámetro, o incluso el orden centimétrico/decimétrico, es poco frecuente que las partículas sean monominerales, sino que suelen constituir fragmentos de roca con características texturales y minerales reconocibles.

Las partículas monominerales más frecuentes en el sedimento son: cuarzo, feldespatos y calcita. Evidentemente, en arenas de composición compleja podemos encontrar muchísimos otros minerales. Por ejemplo, cuando el área fuente es ígnea, es habitual encontrar diversos minerales silicatados en el sedimento, tales como olivinos, piroxenos, micas, etc. Si por el contrario, en el área fuente predominan las rocas metamórficas, en el depósito resultante podremos encontrar abundantes micas o granates.

El cuarzo se reconoce fácilmente en una muestra de arena por su gran transparencia. El color suele ser blanco o grisáceo, pero no es difícil encontrar granos de cuarzo con tonalidades rosadas, rojizas o más oscuras. Otra característica identificativa es

la ausencia de maclas o planos de exfoliación, de forma que aparecen como masas más o menos homogéneas y masivas.

Los feldespatos son también bastante frecuentes, sobre todo cuando las litologías predominantes en el área fuente son ígneas o metamórficas. Se reconocen por su aspecto opaco y porque frecuentemente presentan planos de exfoliación. Los colores son similares a los del cuarzo, virando del blanco al rosado.

La calcita es otro de los componentes frecuentes en las arenas. Un grano monomineral de calcita caracteriza por ser opaco, tiende a adquirir coloraciones ocres, amarillentas o marrones (aunque pueden existir cristales de calcita de muchos otros tonos), y presenta frecuentemente planos de exfoliación lo cual hace que su superficie pueda estar marcada por sutiles escalones.

Otros minerales fácilmente reconocibles en las arenas son las micas, aunque éstos sólo son frecuentes cuando las rocas del área fuente son plutónicas o metamórficas, y la madurez de las arenas no es excesivamente alta. Las micas se identifican por su hábito laminar. Constituyen pequeñas “escamas” y su color puede variar desde negro o muy oscuro (biotitas) hasta traslucido (moscovitas).

Para determinar la composición de los granos de una arena en la actividad con el alumnado, se propone la siguiente metodología:

Tomando como punto de partida los granos seleccionados previamente para la primera actividad, y con la ayuda de un pincel (incluso de un pincel húmedo) se individualiza cada grano y se observan sus características según lo explicado anteriormente (color, transparencia, presencia de planos de exfoliación, etc.). Estas observaciones se pueden realizar a simple vista, con lupas de mano, o con lupas binoculares, en función del tamaño de los granos y de los medios disponibles. Al igual que en la actividad anterior, se puede utilizar una tabla como la propuesta (tabla 1) para ir anotando los resultados. A partir de estos resultados se pueden calcular los siguientes parámetros:

- $(n^{\circ} \text{ bioclastos}) / (n^{\circ} \text{ de partículas no bioclásticas})$: este parámetro nos indica la producción orgánica del medio. Cuanto más próximo es a 1 el cociente, más producción posee el medio.
- $(n^{\circ} \text{ de partículas "resistentes", cuarzo}) / (n^{\circ} \text{ de partículas "fácilmente alterables", calcita + fragmentos de roca})$: el número de partículas fácilmente alterables corresponde a la suma de partículas de fragmentos de roca, micas y calcita. Las partículas resistentes corresponderían al cuarzo. El resultado es una forma de cuantificar la intensidad del transporte. Cuando más próximo a 1 es el cociente, menor ha sido el transporte y la intensidad del mismo.

Forma

Para el análisis de la forma existen una serie de cartas de estimación visual del redondeamiento y la esfericidad que pueden presentar los granos (Fig. 3). El redondeamiento indica el grado de suavidad que presenta la superficie de un grano, o en sentido opuesto, la angulosidad de los contornos

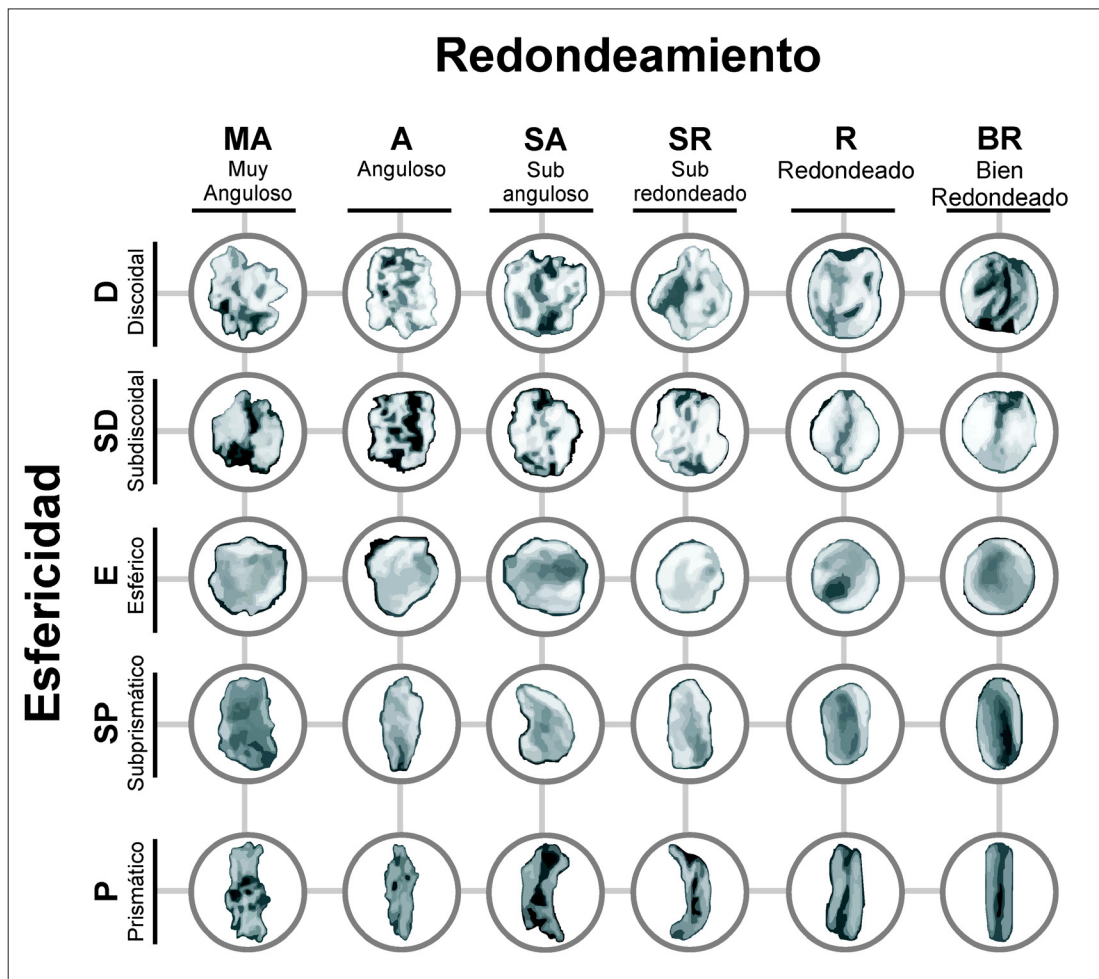


Fig. 3. Tabla comparativa para la caracterización del grado de redondez y esfericidad que presenta un grano de arena (basado en Powers, 1982).

de la partícula. Por su parte, la esfericidad expresa la forma de la partícula por comparación con tres figuras geométricas simples: disco, esfera y prisma.

Para analizar la forma de los granos se propone realizar la comparación visual con la figura 3. En primer lugar, se considerará toda la muestra, estableciendo la redondez y esfericidad del conjunto de la población de granos. Así mismo, y siempre que sea posible diferenciar dos o más poblaciones dentro del conjunto de granos (cuarzo, feldespatos y calcita normalmente), podrán establecerse distintos rangos de esfericidad y redondez para cada uno de estos componentes.

Color

Existen arenas realmente llamativas con múltiples coloraciones: rosa, verde, negro, blanco, púrpura, etc. El color que presenta una arena depende de su composición mineral. Las playas rosas se asocian a la acumulación de fragmentos de coral rojo entre los granos; las playas de un blanco níveo se debe a la pureza de su composición, fundamentalmente de cuarzo; las playas verdes, por su alto contenido en olivinos; las púrpuras, por presencia de granates, etc. En Internet existen multitud de fotos de estas playas exóticas para mostrar a los alumnos, disponibles fácilmente a través de cualquier buscador de imágenes en la red.

Sin embargo, la gran mayoría de depósitos arenosos suelen variar entre los tonos grises y los ocres-amarillentos. Es necesario anotar el color de

la arena que el alumnado está estudiando para realizar una completa caracterización. Para determinar el color de la arena se pueden emplear diferentes métodos. El método más simple y económico es el de anotar la apreciación visual del alumno. También hay disponibles en el mercado cartas estandarizadas con las que calcular por comparación visual las coordenadas cromáticas del sedimento (Cartas internacionales de colores: Rock Color Chart – Munsell). Pero, sin duda, el sistema más objetivo y preciso, a la vez que el más caro y sofisticado, es determinar el color del sedimento mediante un colorímetro (mediante fotodetectores).

Generalmente se considera que los tonos amarillentos y rojizos en las arenas se deben a que el hierro de las partículas se encuentra en su estado oxidado (Fe^{+3}), mientras que los tonos más grisáceos y verdosos se asocian a estados reducidos del mismo (Fe^{+2}). La presencia de materia orgánica, por otra parte, oscurece el sedimento acercando su tono a los grises o incluso negro. Por este motivo, las arenas recién dragadas del fondo marino suelen presentar tonos grisáceos y ligeramente verdosos, mientras que transcurrido cierto tiempo tienden a aclararse por la descomposición de la materia orgánica y la oxidación de los átomos de hierro. Aunque estas afirmaciones son generalistas y existen multitud de excepciones y muchos otros factores que también condicionan el color de la arena, pueden servir para clarificar al alumnado la relación entre el color de la arena y su composición.

EJEMPLOS TIPO: GUÍA DE ACTIVIDADES

Muestras estudiadas

A continuación presentamos un ejemplo de aplicación de la actividad didáctica propuesta. Se han seleccionado seis sedimentos actuales, recogidos en diferentes puntos de la geografía de la provincia de Alicante (España). Las muestras engloban desde ambientes marinos a fluviales, distinguiendo dentro de los primeros diferentes subambientes:

- SA: arena procedente de la parte subaérea de una playa (en inglés: *backshore*). Este subambiente corresponde a la playa propiamente dicha, es decir, la parte ubicada por encima del nivel medio del mar y que solo en momentos puntuales de tormenta puede quedar parcialmente sumergida. En nuestro caso, la muestra estudiada procede de la playa del Carabassí (Arenales del Sol, Alicante).

- BT: arena procedente de la zona de batida de las olas en una playa (en inglés: *swash zone o foreshore*). Es la zona donde las olas rompen en la orilla. Este ejemplo también procede de la playa del Carabassí (Alicante).

- DN: arena procedente de una duna costera. Al igual que los casos anteriores, esta muestra también ha sido recogida en la playa alicantina del Carabassí.

- FP: arena procedente de fondos arenosos de la plataforma continental (en inglés: *offshore*). La muestra procede de la playa de El Campello (Alicante).

- GR: muestra recogida en la playa regenerada con arena procedente de los fondos marinos de Benidorm.

- FL: muestra recogida en el sistema fluvial del río Vinalopó (Novelda).

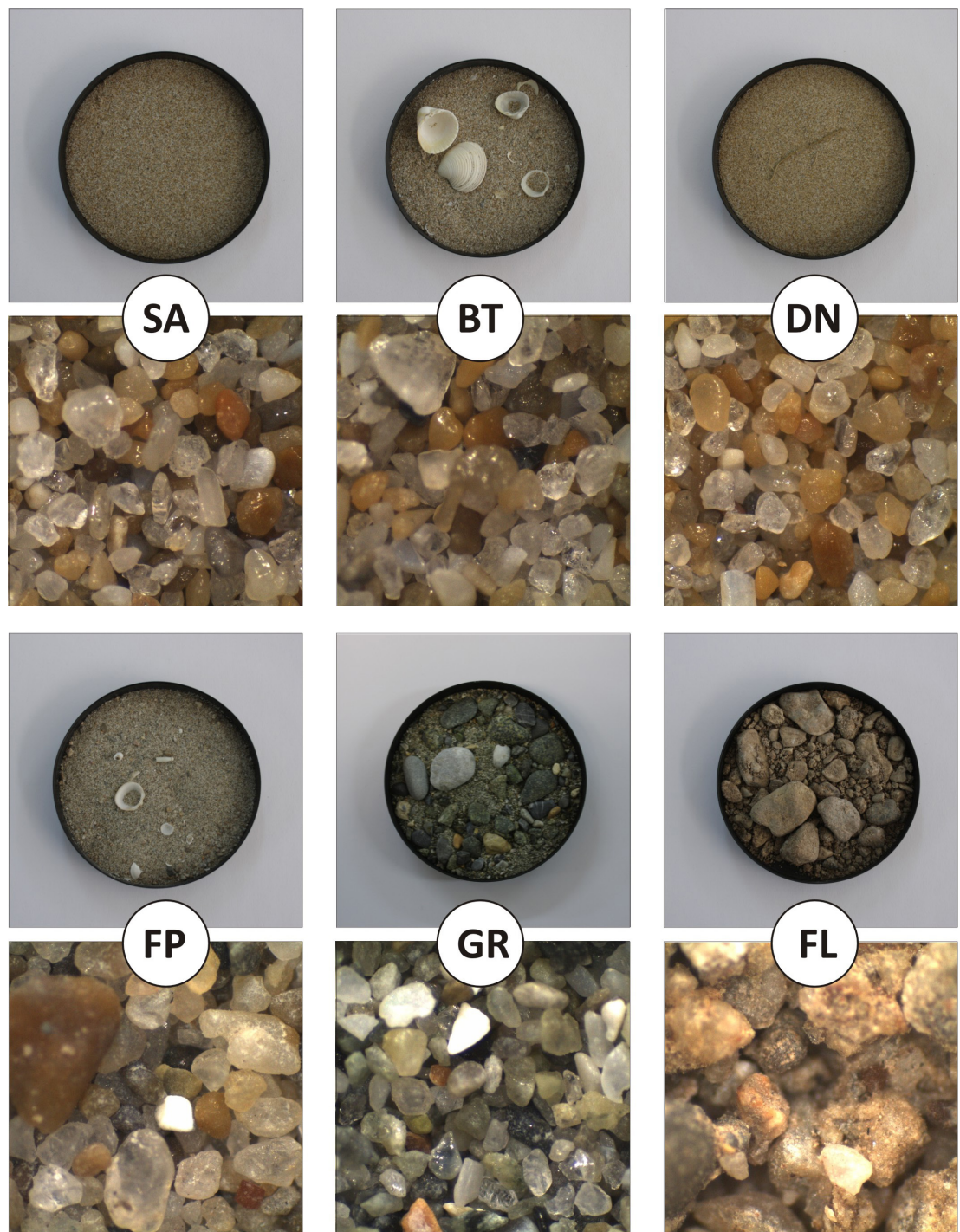


Fig. 4. Aspecto de cada una de las muestras de arena estudiadas. Para cada muestra: arriba: fotografía directa con cámara digital (ancho del portamuestra: 10 cm); abajo: fotografía a través de lupa binocular (ancho de la fotografía: 0,5 mm). SA: parte subaérea playa (*backshore*); BT: zona de batida (*swash zone o foreshore*); DN: duna costera (SA, BT y DN en el sistema costero de El Carabassí, Santa Pola, Alicante); FP: fondos arenosos de la plataforma (*offshore*). Muestra recogida en El Campello (Alicante), playa regenerada con arena procedente de los fondos marinos de Benidorm.; GR: playa mixta de arena y grava de la isla de Nueva Tabarca (Alicante); y FL: sistema fluvial del río Vinalopó (Novelda).

TAMIZ (MM)	BT			DN			SA		
	P	%P	AC	P	%P	AC	P	%P	AC
8	18,52	12,26	12,26	0,01	0,01	0,01	0	0,00	0
4	1,88	1,24	13,50	0	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
2	0,02	0,01	13,51	0	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
1	0,4	0,26	13,77	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03
0,5	0,7	0,46	14,24	0,03	0,02	0,04	0,63	0,42	0,45
0,25	27,92	18,48	32,72	5,42	3,55	3,59	11,62	7,69	8,13
0,125	101,42	67,14	99,86	146,4	96,01	99,61	138,38	91,53	99,66
0,063	0,2	0,13	100,00	0,61	0,40	100,00	0,53	0,35	100,00
0	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00	0	0,00	100,00
	151,06	100		152,48	100		151,19	100	

TAMIZ (MM)	FL			FP			GR		
	P	%P	AC	P	%P	AC	P	%P	AC
8	50,46	33,46	33,46	0	0,00	0	43,23	28,81	28,81
4	30,2	20,03	53,49	1,18	0,78	0,78	27,53	18,35	47,16
2	15,93	10,56	64,05	3,32	2,20	2,98	9,75	6,50	53,65
1	12,36	8,20	72,25	4,12	2,73	5,71	6,78	4,52	58,17
0,5	19,97	13,24	85,49	5,92	3,92	9,63	12,87	8,58	66,75
0,25	12,5	8,29	93,78	51,54	34,13	43,76	19,89	13,25	80,00
0,125	7	4,64	98,42	77,62	51,41	95,17	29,98	19,98	99,98
0,063	1,32	0,88	99,30	5,99	3,97	99,14	0,03	0,02	100,00
0	1,05	0,70	100,00	1,3	0,86	100,00	0	0,00	100,00
	150,79	100		150,99	100		150,06	100	

Fig. 5. Tabla de datos y curvas granulométricas de los ejemplos tipo de arenas. Para cada muestra de arena se ha obtenido el peso retenido en cada uno de los tamices (P), el porcentaje retenido (%P), y el porcentaje acumulado retenido (AC). Siglas de las muestras en la figura 4.

cante), la cual fue regenerada en la década de los 90 a partir de arena dragada de los fondos arenosos ubicados en la plataforma continental frente a la Serra Gelada (Benidorm). De esta forma, la arena de esta playa puede considerarse representativa de unos medios marinos más profundos.

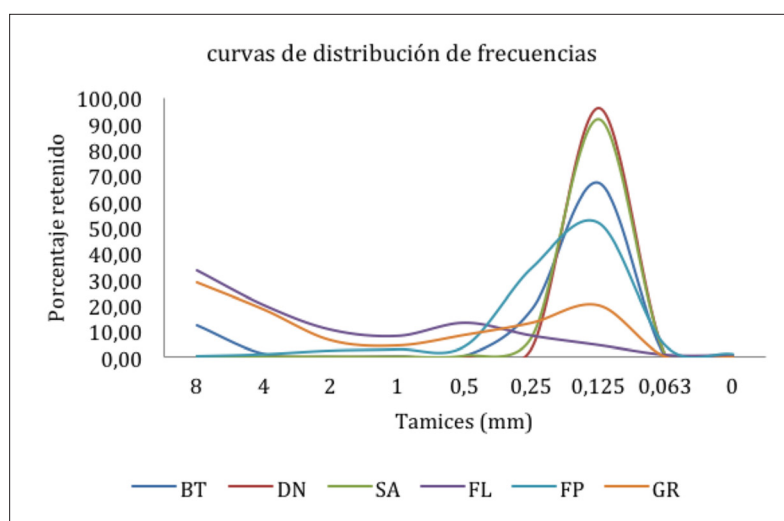
- GR: muestra procedente de una playa mixta de arena y gravas ubica a pie de los acantilados de la isla de Nueva Tabarca (Alicante).

- FL: muestra procedente de un pequeño meandro fluvial del río Vinalopó a su paso por la localidad de Novelda (Alicante).

El aspecto de estos sedimentos se muestra en la figura 4, tanto a mesoescala como a microescala (fotografía con lupa binocular).

Resultados

Las seis muestras seleccionadas se han caracterizado mediante la metodología propuesta en los apartados anteriores y constituyen un ejemplo de aplicación práctica de este taller. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla II. Además, en la figura 5 se incluyen tanto los datos cuantitativos obtenidos tras la realización de una granulometría como las curvas granulométricas de cada una de las muestras. Estas curvas son muy interesantes y aportan mucha información sedimentológica, como se expondrá y desarrollará más adelante. La obtención de las granulometrías se puede hacer de forma precisa mediante columna de tamices y básculas de precisión. Sin embargo, si no se dispone de este material también se puede estimar la selección de una arena comparando los valores máximo, medio y mínimo de tamaño de partícula observado. A partir de estas curvas se puede cuantificar también la selección de las arenas. Curvas más verti-



calizadas (por ejemplo la muestra de duna, DN) corresponderían a muestras bien seleccionadas, mientras que curvas más tendidas (por ejemplo, la muestra fluvial, FL) se asocian a depósitos mal seleccionados.

Tamaño de grano y selección. Las muestras presentan un amplio rango de tamaños de partícula, si bien la mayor parte de ellas están comprendidas en el tamaño de la fracción arena (entre 63 μ m y 2 mm) como la muestra DN y SA, aunque podemos encontrar otras muestras con tamaños tanto de la fracción arena como grava (diámetros superiores a 2 mm) (por ejemplo FL y GR). Esto está directamente relacionado con el grado de selección que presentan las muestras, variando desde muestras altamente seleccionadas (DN) a muy mal seleccionadas (FL).

		DN	BT	SA	PF	FL	GR
Tamaño y selección	Mínimo	0,1	0,2	0,1	0,05	<0,05	0,2
	Medio	0,2	0,45	0,3	0,5	0,6	0,5
	Máximo	0,6	3cm (conchas)	1	1,5	>5cm	>5cm
	Selección	alta	media	media/alta	media/baja	baja	baja
Composición	bioclastos	0	10	8	7	0	2
	cuarzo	12	10	11	8	3	5
	calcita	13	15	15	8	0	15
	fragmentos de roca	25	15	16	27	47	20
	otros	0	0	0	0	0	8 (pirox. y anfíb.)
	(nº bioclastos)/ (nº de partículas no bioclásticas)	0	10/40	8/42	7/43	0	2/48
	nº de partículas “resistentes”, cuarzo)/ (nº de partículas “fácilmente alterables”, calcita + fragmentos de roca)	12/38	10/30	11/31	8/35	0/50	5/23
Forma	Redondez/Esfericidad	R-BR/E-SD	SR-R/SD	SR/SD-E	A/E-SP-P	MA-A/SP-E	A-SA/E-SP
Color		ocre (dorado)	gris ocre	ocre	gris	marrón	gris verdosa

Tabla II. Características y parámetros calculados de las arenas estudiadas. BR, bien redondeado; R, redondeado; SR, subredondeado; SA, subanguloso; A, anguloso; MA, muy angulosos; D, discoidal; SD, subdiscoidal; E, esférico; SP, subprismático; P, prismático. Siglas en figura 4.

Composición y color. Las muestras estudiadas se pueden agrupar composicionalmente en tres tipos. El grupo mayoritario incluye las muestras DN, FP, BT y SA e incluye principalmente calcita, cuarzo, fragmentos de roca y bioclastos. Esta composición otorga a las muestras un color dorado, salvo en la arena FP que presenta un tono más grisáceo. Por otra parte, las muestras GR y FL constituyen los otros dos tipos. FL se caracteriza por su alto contenido en fragmentos de roca (principalmente carbonatados), mientras que GR presentan abundantes fragmentos de roca (carbonatos y ofitas) y granos monominerales de calcita. De forma puntual, en esta última también se observan minerales ferromagnesianos. El color de estos dos tipos varía de marrónáceo (muestra FL) a gris verdoso (GR).

Redondez y esfericidad. Respecto a la morfología de las partículas, nuestras muestras se pueden agrupar en dos tipos principales: un grupo de mayor redondeamiento y una geometría esférica-discoidal y otro más anguloso y esférico-prismático. En el primer grupo se incluyen las muestras BT, DN y SA, mientras que el segundo queda definido por FP, FL y GR.

Madurez textural y composicional. Tal y como se ha comentado en los apartados anteriores, la madurez textural viene cuantificada por el grado de redondeamiento de las partículas y la selección de las mismas. Cuanto más redondeados y mejor seleccionados sean los clastos, mayor madurez textural poseerá la arena. Según este criterio, las arenas más maduras texturalmente son DN y SA, mientras que las más inmaduras corresponden FL y GR. La madurez composicional cuantifica la estabilidad mineralógica de las partículas y en esta actividad se ha propuesto calcularla por el ratio “nº partículas resistentes/nº de partículas fácilmente alterables”. Las partículas fácilmente alterables corresponderían a los fragmentos de roca y calcita,

mientras que las más resistentes a cuarzo. Según este parámetro, la arena más madura composicionalmente es la DN, mientras que la más inmadura a FL, pudiéndose diferenciar a grandes rasgos dos grupos de muestras según la madurez composicional: el grupo de arenas maduras composicionalmente correspondería a los depósitos de playa (exceptuando la playa de gravas de Tabarca) y el grupo de arenas inmaduras incluiría al sedimento fluvial y al de Tabarca.

Interpretación de las muestras

A modo conclusivo, el taller propuesto se puede finalizar realizando una interpretación individual de cada una de las muestras, en la que se razone conjuntamente con el alumno la relación que existe entre las características sedimentológicas de las arenas y el proceso de formación y ambiente de sedimentación de las mismas. A continuación se interpretan las muestras utilizadas en el ejemplo de taller propuesto.

Las arenas SA, DN y BT corresponden a depósitos de tres subambientes diferentes dentro del litoral (playa subaérea, duna y zona de batida). A pesar de ser sedimentos muy próximos entre sí, poseen ciertas diferencias, especialmente en su tamaño de grano y selección. Esto se debe a que los granos de arena de la playa subaérea, de la duna y de la zona de batida han sido depositados por diferentes agentes de transporte y/o con diferente energía. Mientras que en la arena de la duna el agente es el viento, en la zona de batida y en la subaérea es el agua. El viento y el agua poseen diferentes densidades, y la densidad de un medio se correlaciona con la granoselección de la carga que puede transportar. A mayor densidad (en este caso, el agua) peor selección, por lo que los sedimentos asociados al agua (BT y SA) se encontrarán peor seleccionados en comparación con la duna. Si

consideramos el mismo agente de transporte (el agua) vemos que también puede generar dos tipos de sedimentos con diferentes características. Estas diferencias se atribuyen a la energía del medio: a mayor energía, mayor tamaño de grano. Medios más energéticos (como la zona de batida de las playas) presentan generalmente arenas ligeramente más gruesas que zonas más tranquilas (playa subaérea y playa subacuática).

La muestra FP se caracteriza por su color grisáceo, mala selección, mayor cantidad de bioclastos y baja redondez de los granos. Estos parámetros se pueden comparar con las arenas anteriores (en particular con la SA) y observar las diferencias entre los sedimentos litorales y los fondos arenosos de mayor profundidad dentro de la plataforma. La cantidad y tipo de bioclastos es uno de los indicadores más notables de la procedencia de la arena FP. La presencia de gasterópodos, pequeños erizos irregulares o escafópodos, observables en la muestra FP, no sería posible en las muestras de playa (BT, SA, DN). Por otra parte, el color gris (FP) o dorado (SA, DN, BT) de las arenas se relaciona directamente con el área fuente de suministro. Finalmente, la mala selección de la muestra procedente de ambiente profundo se debe a la mayor cantidad de finos. Tal y como hemos comentado en el párrafo anterior, la mayor cantidad de finos se debe a ambientes menos energéticos, y en este caso, los fondos arenosos profundos son mucho más tranquilos que las zonas de batida o playas subaéreas.

Las muestras FL y GR presentan un gran tamaño de partícula (tamaño arena gruesa a grava), muy mala selección, alta angulosidad y coloraciones marronáceas (FL) y gris-verdosas (GR). La mala selección y la alta angulosidad de estas muestras se relaciona con la baja intensidad de transporte sufrida por las partículas, es decir, éstas han recorrido una corta distancia desde el área fuente donde se generaron hasta el área de sedimentación. Por una parte, en el caso de la muestra FL, la arena y grava fueron recogidas en el curso medio del río, por lo que la distancia transportada es mucho menor que en el caso de las arenas de la desembocadura o playas adyacentes. Por otra parte, la muestra GR procede de las playas de grava acumuladas en la base de los acantilados de la isla de Nueva Tabarca. Las partículas han recorrido una distancia prácticamente nula, pues se han desprendido de los acantilados y han sido retrabajadas por el oleaje. Tal como se ha expuesto previamente, el color o tono de una muestra está directamente relacionado con la composición de las partículas (y a su vez vinculado a la litología del área fuente). De esta forma, el tono marronáceo de la arena FL se asocia al color de los fragmentos de roca que la conforman (rocas carbonatadas aflorantes en la cuenca del Vinalopó pertenecientes a las Zonas Externas de la Cordillera Bética). Por otra parte, el tono gris-verdoso de la grava de Tabarca se lo otorga el alto contenido en fragmentos de gabros verdosos (ofita) y dolomías oscuras, aflorantes en los acantilados de la isla y pertenecientes en este caso al dominio de las Zonas Internas de la Cordillera Bética.

Ambientes sedimentarios y características de la arena

Finalmente, el taller docente se puede cerrar proponiendo que el alumnado concluya las relaciones lógicas entre el ambiente de sedimentación y las características de las arenas. Utilizando como ejemplo las muestras estudiadas en este artículo, podríamos concluir de la siguiente forma:

- El tamaño de grano, la selección y la morfología de las partículas, dependen fundamentalmente de la energía del medio de sedimentación y de la cantidad de transporte sufrido. La arena de la duna (DN) y de la playa subaérea (SA) son los ejemplos más claros de arena texturalmente madura, es decir, muy bien seleccionada y formada por partículas redondeadas. Estos depósitos se forman a partir de granos que han sufrido mayoritariamente un transporte muy intenso. Por el contrario, las arenas de río (FL) y la grava del pie del acantilado de la isla de Tabarca (GR) son depósitos muy inmaduros texturalmente.

- El color está directamente relacionado con la composición del sedimento y, a su vez, con las litologías presentes en el área fuente de la cual provienen los granos. Áreas fuentes con litologías y mineralogías oscuras (isla de Tabarca) darán lugar a arenas oscuras (muestra GR). La abundante cantidad de cuarzo (translúcido) y carbonatos (ocre-amarillo-blanco) otorgan el color dorado de las arenas DN y BT. La relación entre composición y color se pone de manifiesto en ejemplos tan espectaculares como playas de arena negra (playa del Bollullo, Tenerife), verde (playa de Papakolea, Hawaii), blanca (playa de Rodas, Islas Cíes o Hyams Beach, Australia) o púrpura (Pfeiffer Beach, California), vinculadas a minerales máficos de origen volcánico, olivinos, cuarzo/carbonato o granates, respectivamente.

CONSIDERACIONES FINALES

El estudio de sedimentos arenosos posee un gran interés desde el punto de vista didáctico ya que permite realizar actividades que conjuguen el trabajo de campo y laboratorio, imprescindibles en la didáctica de las Ciencias de la Tierra. El taller propuesto pone de manifiesto que la observación mediante lupa binocular de arenas puede considerarse como un buen punto de partida para introducir al alumnado en la caracterización de ambientes sedimentarios. Asimismo, el taller permite introducir distintos procedimientos de laboratorio, que pueden ser desarrollados de forma amena y sencilla por parte del alumnado. Aunque en principio la propuesta aquí planteada puede ser adecuada para un amplio rango de titulaciones, especialmente para cursos pre-universitarios, también puede suponer un buen punto de partida para introducir conceptos de sedimentología y petrología sedimentaria en los primeros cursos de los grados de Geología, Ciencias del Mar o Ciencias Ambientales.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del grupo de investigación "Cambios Paleoambientales VIGROB- 167" de la Universidad de Alicante y los

Proyectos GRE13-23 y GRE14-05 (Investigaciones Emergentes del Programa Propio de la Universidad de Alicante). Se agradecen también los comentarios de Irene Alejo (Universidad de Vigo) y de otro revisor anónimo que han contribuido a mejorar este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Blott, S. J. y Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11): 1237-1248.

Carranza-Edwards, A. (2001). Grain size and sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research*, 17: 38-52.

Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J. J., Rosales-Hoz, L., Alfredo-Morales, E. y Santa-Cruz, R. L. (2009). Beach sand composition and provenance in a sector of the southwestern Mexican Pacific. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2): 433-447.

Carrillo, L., Gisbert Aguilar, J. y Rodríguez, J.M. (1993). Las arenas y el aprendizaje de la Geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 1 (1): 37-43.

Caracuel, J. E., Corbí, H., Pina, J. A. y Soria, J. M. (2004). Geología en la costa: Técnicas de análisis de se-

dimentos en interpretación de ambientes sedimentarios. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12(12.1): 77-82.

Corbí, H., Giannetti, A., Baeza-Carratalá, J. F. y Delgado, S. F. (2012). Los microfósiles y la crisis de salinidad del Mediterráneo como recurso didáctico en ciencias de la tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20(3): 249-261.

Friedman, G. M. (1961). Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. *Journal of Sedimentary Research*, 31(4): 514-529.

Greenberg, G. (2008). A grain of sand-Nature's Secret Wonder. Voyageur Press, 112 p. Edwards, A. C. (2001). Grain size and sorting in modern beach sands. *Journal of Coastal Research*, 17 (1): 38-52.

Medina, R., Losada, M. A., Losada, I. J. y Vidal, C. (1994). Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. *Marine Geology*, 118(3): 195-206.

Powers, M. (1982). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal Sedimentary Petrology*, 23: 117-119.

Tucker, M. E. (1988). *Techniques in sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, 404 pp. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 4 de octubre de 2014 y aceptado definitivamente para su publicación el 8 de mayo de 2015.