



USO DE LOS MINERALES PESADOS COMO TRAZADORES DE LA DINÁMICA DE PLAYAS ARENOSAS: LA PLAYA DE CATANIA (SICILIA, ITALIA)

Heavy minerals as tracers on sand beach dynamics: Catania beach (Sicily, Italy)

L. Del Río, F. J. Gracia y L. Barbero

Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real (Cádiz).

E-mail: ldrio@retemail.es. Fax: 956-016276

Resumen: En este trabajo se analizan los minerales pesados de la playa de Catania (Sicilia, Italia), con el fin de obtener información acerca de su procedencia y de las características de la dinámica litoral presente en la zona. Los resultados muestran que el origen de los sedimentos de la playa se encuentra en los aportes del río Simeto, unido a otras fuentes de relevancia muy inferior. En cuanto a los procesos de selección y concentración de los minerales pesados, el oleaje y la configuración de la costa determinan su acumulación, transversalmente en la playa seca, y longitudinalmente en los extremos del litoral estudiado. La distribución de la fracción pesada indica un transporte diferencial de sedimentos motivado por la presencia de dos corrientes longitudinales opuestas, probablemente debidas a la diferencia entre los *fetch* de los oleajes procedentes de las direcciones NE y SE.

Palabras Clave: Minerales pesados, dinámica litoral, áreas fuente, playas micromareales.

Abstract: Heavy minerals from Catania beach (Italy) have been analysed in 41 sand samples collected along 19 cross-shore transects, with the aim of obtaining information about its source, sorting processes and the main patterns of littoral dynamics. The results show that the major source of beach sediments is the Simeto river, other sources being of lesser importance. The most abundant heavy mineral species are opaque minerals and clinopyroxenes, and they show completely different mechanical and hydrodynamical behaviours, which is due to their differences in density and grain size. Regarding selective sorting processes, it is concluded that wave action and coastline orientation make heavy minerals concentrate in the backshore and at the ends of the beach. Moreover, it has been verified that heavy minerals in the study area tend to concentrate in the cross-shore direction into the finest-grained samples, whereas contour conditions prevent this trend in the longshore direction. It has also been found that the heavy fraction distribution indicates differential longshore sediment transport caused by two opposited longshore currents, one to the north and the other to the south. The first one is more important than the other, probably due to the difference between the fetch of waves approaching from NE and SE directions.

Keywords: Heavy minerals, littoral dynamics, source areas, microtidal beaches.



Del Río, L., Gracia, F. J. y Barbero, L. (2001). Uso de los minerales pesados como trazadores de la dinámica de playas arenosas: la playa de Catania (Sicilia, Italia). *Rev. C. & G.*, 15 (1-2), 75-86.
© SEG. AEQUA. GEOFORMAEdiciones

1. Introducción

Los minerales pesados son considerados como trazadores naturales debido a su comportamiento

hidrodinámico y resistencia a la meteorización (Pettijohn, 1975; Frihy & Komar, 1993), por lo que permiten obtener información acerca de la procedencia de la arena de las playas y sobre los proce-

tos que afectan a las mismas, incluyendo los mecanismos de dispersión sedimentaria (Marchesini *et al.*, 2000) y las direcciones de transporte litoral. Por ello, diversos autores han empleado la fracción pesada del sedimento como herramienta para llevar a cabo estudios sobre el origen de los sedimentos costeros (Carriquiry & Sánchez, 1999) y las características de la dinámica litoral en distintas zonas.

Una de las áreas más estudiadas en este sentido es el Delta del Nilo, donde han sido analizados, entre otros aspectos, el transporte longitudinal de sedimento, los cambios recientes en la línea de costa y los diferentes ambientes sedimentarios del delta (Frihy y Komar, 1993; Frihy y Lotfy, 1994; Badr, 1995). Entre las aportaciones de dichos autores cabe destacar la constatación de que las áreas erosionadas se asocian con arenas de grano fino ricas en minerales pesados, mientras que las zonas de acreción se caracterizan por arenas más gruesas y empobrecidas en este tipo de minerales (Frihy y Komar, 1993; Frihy y Lotfy, 1994).

La dinámica litoral puede condicionar la formación de los depósitos de tipo placer en playas, como es el caso del estado de Oregón, EEUU, donde Peterson *et al.* (1986) establecen un modelo para su desarrollo. Según estos autores, las grandes acumulaciones de minerales pesados en esta zona están controladas principalmente por la configuración de la línea de costa y por las variaciones estacionales del oleaje y de la dirección y velocidad de las corrientes que éste genera. También Roy (1999) estudia cuestiones similares, analizando la formación de placeres en la costa australiana.

En España, Pérez-Mateos *et al.* (1982) analizan la mineralogía de los arenales costeros del sur del país, especialmente en lo que respecta a la fracción pesada, y de acuerdo con las diferencias petrográficas y litológicas de las distintas zonas de estudio, establecen diferentes áreas fuente de aporte de materiales hacia las zonas costeras. De esta forma definen, por un lado, la génesis de las playas y, por otro, las direcciones predominantes de transporte a lo largo del litoral.

En el presente trabajo se aplica el análisis de los minerales pesados con el objetivo de establecer las principales características de la dinámica litoral presente en el Golfo de Catania (Sicilia, Italia), así como la procedencia de los sedimentos que componen la playa y los procesos que les afectan.

2. Área de estudio

2.1 Localización y marco geológico

El Golfo de Catania está situado en la costa oriental de Sicilia. En su parte central se extiende la playa objeto del presente trabajo en dirección N-S, formada por una franja litoral rectilínea de cerca de 20 km de longitud y unos 12 m de anchura media, interrumpida por las desembocaduras de los ríos Simeto y San Leonardo (figura 1). En el extremo septentrional del Golfo de Catania se levanta el macizo volcánico del Etna, mientras que al Sur se extienden los afloramientos carbonatados miocenos y las vulcanitas pliocenas y pleistocenas de los Montes Ibleos. Así, la playa está limitada al Norte por una colada lávica procedente del Etna, que forma un acantilado de 2 a 5 m de altura, y al Sur por las vulcanitas ibleas del promontorio de Agnone, en la bahía del mismo nombre (Amore *et al.*, 1979), formando un acantilado de más de 20 m de altura (figura 2).

La provincia de Catania se extiende a lo largo del límite entre las placas tectónicas africana y europea (Corsaro y Cristofolini, 1996). En la geología regional (figura 1) destacan, además de los Montes Ibleos y del macizo del Etna, otras formaciones relevantes de litologías diversas: las Unidades Externas, la Serie Numídica, de edad Oligoceno-Mioceno (Amore *et al.*, 1983), y el Complejo Sicílido, del Eoceno-Oligoceno (Lentini, 1982), cuyos niveles más altos están ocupados en parte por la Unidad Antisicílido (Carmisciano *et al.*, 1983). Por último, las Zonas Internas comprenden los Montes Peloritano, en el extremo NE de la isla, y el Arco de Calabria; los primeros están formados por diversas unidades del Eoceno, en las que las rocas metamórficas varían desde esquistos de bajo grado a gneises (Lentini, 1982). El segundo está compuesto principalmente por un basamento Paleozoico, con metamorfismo que varía desde de muy bajo grado a facies granulítica (Rottura *et al.*, 1993).

La cuenca del río Simeto, el más importante de Sicilia, consta de dos áreas de diferentes características tectónicas y estratigráficas: las series autóctonas, que comprenden el basamento y la sucesión sedimentaria postorogénica, y las series alóctonas (Amore *et al.*, 1983) (figura 3).

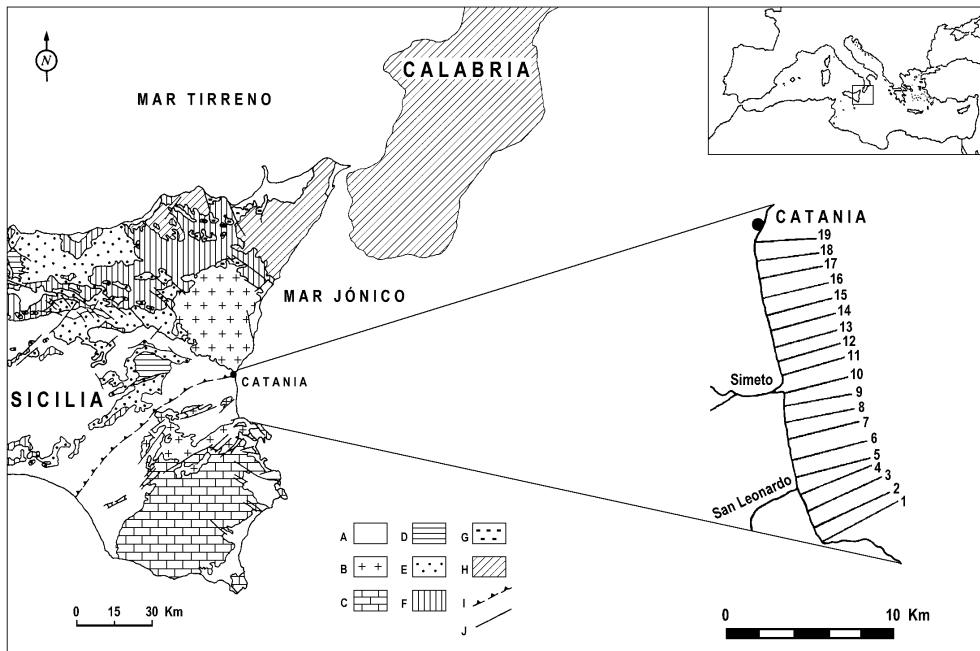


Figura 1. Localización y esquema geológico de la zona de estudio, con situación de los perfiles de muestreo (modificado de Guerrero *et al.*, 1992). A: Depósitos postorogénicos. B: Vulcanitas del Neógeno y Cuaternario. C: Plataforma carbonatada Iblea (Mioceno). D: Unidades Externas. E: Serie Numídica (Oligoceno-Mioceno). F: Complejo Sicílide (Eoceno-Oligoceno). G: Unidad Antisicílide. H: Zonas Internas. I: Frente de cabalgamiento principal. J: Falla.

Figure 1. Location and geological sketch of the studied area (modified from Guerrero *et al.*, 1992). Beach profiles and sampling locations are also included. A: Post-orogenic deposits. B: Neogene to Quaternary volcanites. C: Hyblean carbonatic platform (Miocene). D: External Units. E: Numidian Sequence (Oligocene-Miocene). F: Sicilide Complex (Eocene-Oligocene). G: Antisicilide Unit. H: Internal Zones. I: Main overthrust front. J: Fault.



Figura 2. Vista general del promontorio de Agnone y extremo meridional de la playa.
Figure 2. Agnone headland and southernmost part of the beach.

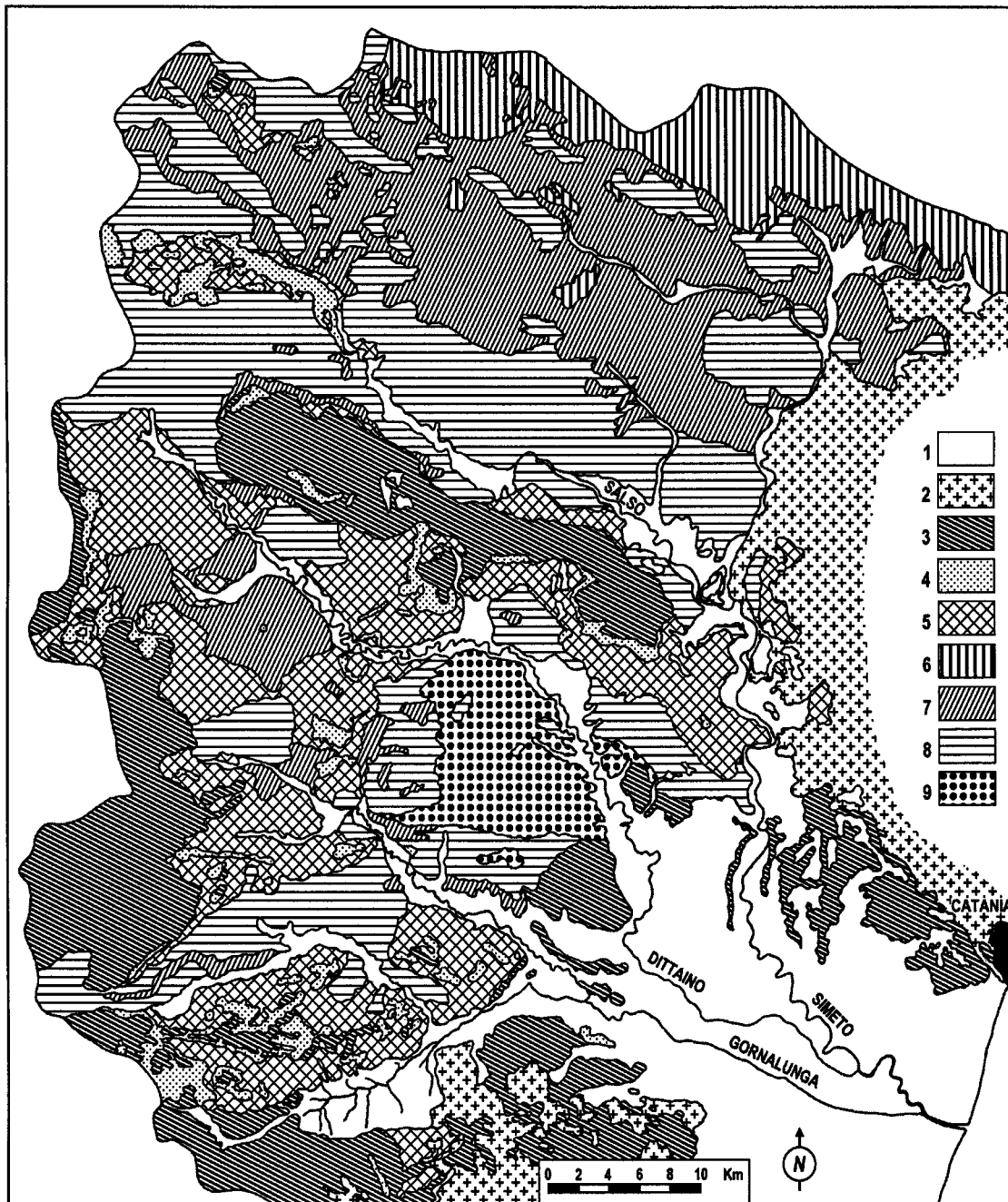


Figura 3. Mapa geológico de la cuenca del río Simeto (modificado de Amore *et al.*, 1983). 1: Sedimentos aluviales cuaternarios. 2: Vulcanitas. 3: Formaciones terrígenas del Plioceno y Pleistoceno. 4: Depósitos evaporíticos del Messiniense. 5: Margas azules del Tortonense. 6: Flysch de Reitano (Oligoceno) y de Monte Soro (Jurásico sup.-Cretácico inf.). 7: Arcillas versicolores (Cretácico medio-sup.) y Formación de Polizzi (Eoceno). 8: Flysch Numidico del Oligoceno-Mioceno medio. 9: Secuencia de M. Iudica - M. Scalpello del Triás al Mioceno.

Figure 3. Geological map of Simeto river drainage basin (modified from Amore *et al.*, 1983). 1: Alluvial Quaternary sediments. 2: Vulcanites. 3: Pliocene and Pleistocene terrigenous formations. 4: Messinian evaporitic deposits. 5: Tortonian blue marls. 6: Reitano (Oligocene) and Monte Soro (upper Jurassic-lower Cretaceous) Flysch. 7: Variegated clays (middle-upper Cretaceous) and Polizzi Formation (Eocene). 8: Numidian Flysch (Oligocene-middle Miocene). 9: M. Iudica - M. Scalpello sequence (Triassic-Miocene).

- Los materiales del basamento (símbolos 8-9 de la figura 3) son fundamentalmente areniscas, calizas, margas y lutitas del Triásico al Mioceno.
- La sucesión postorogénica (símbolos 1-5) está constituida por sedimentos diversos: margas, arcillas, areniscas, gravas, así como depósitos evaporíticos y vulcanitas, del Mioceno hasta la actualidad.
- En cuanto a las series alóctonas (símbolos 6-7), se componen de areniscas, calizas, margas, arcillas y lutitas del Jurásico superior al Oligoceno.

En lo que respecta al río S. Leonardo, su cuenca está ocupada principalmente por cuatro tipos de materiales (Beccaluva *et al.*, 1991): sedimentos carbonatados del Mioceno, formaciones volcánicas del Plioceno y Pleistoceno, formaciones arcillosas pleistocenas y otros materiales detríticos de la cobertera sedimentaria cuaternaria.

2.2 Clima marítimo

El área de estudio registra un régimen de vientos donde la frecuencia máxima y la mayor persistencia corresponden a los procedentes del E y

del O, seguidos de los del NE y SO (Amore *et al.*, 1992). En consecuencia, el oleaje proviene principalmente del E (Levante), dirección que presenta la máxima frecuencia anual (figura 4). No obstante, las direcciones de aproximación de oleaje más relevantes, en lo que a corrientes y dinámica litoral se refiere, son las que presentan cierto ángulo de aproximación a la costa, NE (Grecal) y SE (Sirocco) en el Golfo de Catania, ambas con frecuencias de aparición equiparables. Sin embargo, la magnitud aproximada de las distancias de *fetch* o recorrido de incidencia que presentan, es decir, la longitud de mar libre de obstáculos a lo largo de la cual estos vientos pueden incidir sobre la superficie del mar generando olas, es muy diferente. En el caso del Grecal, el *fetch* está limitado por la Península Itálica, a unos 80 km de distancia, mientras que para el Sirocco se extiende unos 1200 km hasta las costas de Egipto. La relevancia del *fetch* del SE favorece la existencia de mar de fondo procedente del segundo cuadrante, frente a la predominancia de la mar de viento para el primer cuadrante.

En cuanto a las mareas, son prácticamente inapreciables, habiéndose registrado para las costas del mar Jónico oscilaciones del nivel medio del mar del orden de 20 cm (Tsimplis, 1994).

Dirección de procedencia		Frecuencia media
Tramontana	N	0,6
Grecal	NE	25
Levante	E	43,1
Sirocco	SE	22,1
Austral	S	2,1
Libeccio	SO	3,1
Poniente	O	3,4
Mistral	NO	0,7
Total		100

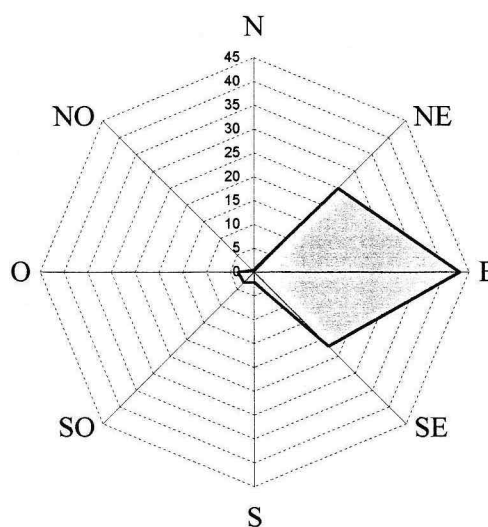


Figura 4. Frecuencia media anual del oleaje por direcciones de aproximación para la boya de oleaje de Catania (Geremia, 2000).
 Figure 4. Mean annual wave frequency by approach directions in Catania wave buoy (Geremia, 2000).

3. Metodología

Las muestras objeto del estudio mineralógico fueron tomadas entre el 11 y el 17 de Diciembre de 1996, dentro del proyecto STOA (Scientific and Technological Options Assessment) de la UE. El muestreo se llevó a cabo según 19 perfiles distribuidos de Sur a Norte a lo largo de la playa, con una distancia media entre ellos de 1 km (figura 1). En total se tomaron 41 muestras de los primeros 5 cm de sedimento, recogiendo en cada perfil una muestra en la playa seca y otra en la orilla del mar; en los perfiles 11, 12 y 13 se tomaron también muestras de arena de dunas, ausentes en el resto de los perfiles.

Se realizó el análisis granulométrico de las muestras mediante tamizado en seco, calculando sus parámetros granulométricos con el método gráfico de Folk & Ward (1957), y posteriormente se llevó a cabo la separación de los minerales pesados. Ésta se efectuó sobre la fracción de arena media de cada muestra (1-2 f), ya que los análisis deben ser realizados sobre la fracción modal de la mayoría de las muestras para ser representativos (Ockay & Hubert, 1996), y el 83% de ellas se encontraba en dicha fracción. La técnica empleada fue la separación por gravedad con tetrabromoetano (densidad 2,96 g/cm³).

Para la identificación de los minerales pesados se llevó a cabo, en primer lugar, una observación de los mismos bajo lupa binocular; a continuación se analizaron sus espectros de rayos X al SEM para determinar su composición cualitativa. Finalmente, se procedió a su identificación y recuento en todas las muestras bajo el microscopio petrográfico de luz transmitida, empleando como medio de montaje el bálsamo de Canadá (n=1,538). El recuento se llevó a cabo según el método del contaje en línea, identificando y contando 200 granos en cada muestra.

4. Resultados y discusión

El tamaño medio de grano de las muestras presenta un valor promedio de 1,63 f (arena media), con unos valores de la mediana muy similares. En cuanto a la desviación típica o selección, su valor promedio es de 0,42, correspondiente a una distribución bien clasificada (McManus, 1980) (figura 5).

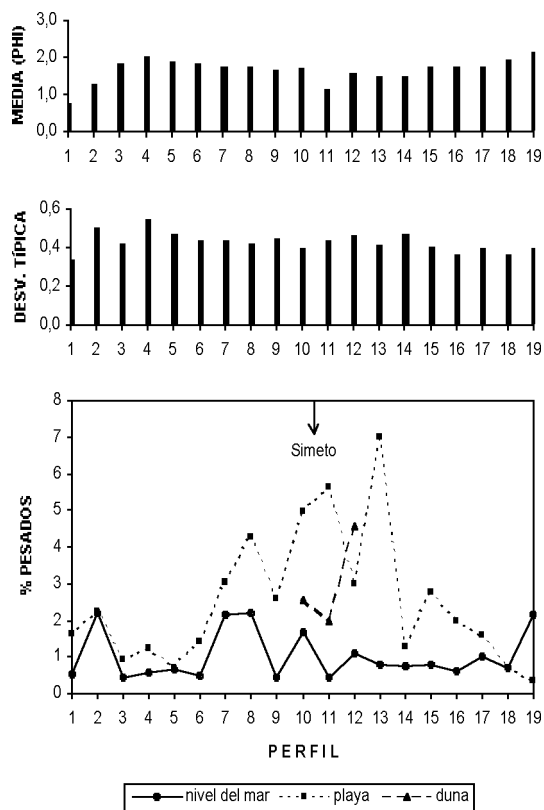


Figura 5. Tamaño medio de grano de las muestras, desviación típica de la granulometría y variación transversal y longitudinal del porcentaje de fracción pesada sobre el total de sedimento. *Figure 5. Mean sediment grain size and standard deviation, and along- and across-shore variations in heavy mineral weight percentages.*

El porcentaje medio de minerales pesados en las muestras es de un 1,85%, oscilando entre un valor mínimo del 0,36% y un máximo del 7%. En la figura 5 se observa cómo la fracción pesada es más abundante en los sedimentos de la playa seca que en los del nivel del mar, mientras que las dunas presentan porcentajes intermedios. En sentido longitudinal las variaciones son notables, apareciendo la mayor cantidad de minerales pesados a ambos lados de la desembocadura del Simeto, situada entre los perfiles 10 y 11. Se aprecia además una ligera tendencia hacia una mayor proporción al Norte de dicha desembocadura que al Sur de la misma. En la zona más batida por el oleaje, el nivel del mar, el porcentaje de pesados tiende a aumentar ligeramente en los extremos de la playa, lo que

puede relacionarse con la existencia de promontorios acantilados en dichas zonas, que determinan que se trate de áreas más protegidas donde el oleaje posee menor energía y no es capaz de removilizar y transportar la fracción pesada.

En las muestras se identificaron principalmente minerales opacos, en cantidades que oscilaron entre un 25% y un 75% de la fracción pesada, así como clinopiroxenos, con entre un 8% y un 42%, anfíboles y ortopiroxenos; en proporciones inferiores al 10% para todas las muestras aparecieron olivinos, baritina, granate y apatito. En la figura 6 se observa cómo los minerales opacos tienden a concentrarse en gran medida en la zona del nivel del mar, mientras que, en general, las especies transparentes presentan los mayores porcentajes en la duna. A pesar de que los datos referentes a las dunas deben ser tomados con cautela, al existir sólo en tres de los perfiles de muestreo, la inversión entre las distribuciones de minerales opacos y transparentes es clara.

Para considerar solamente las especies representativas, se realizó el cálculo de los errores

correspondientes al porcentaje de cada mineral en cada perfil, considerándolos equivalentes al inverso de la raíz cuadrada del número de observaciones del mismo. Se obtuvo que las distribuciones de las especies de menor abundancia están sujetas a errores de tal magnitud que imposibilitan su interpretación; en consecuencia, ésta se basó tan sólo en los minerales opacos, clinopiroxenos, anfíboles y ortopiroxenos (figura 7). Pese a la notable irregularidad apreciable, se observa claramente que las distribuciones de opacos y clinopiroxenos son opuestas, debido a las diferencias entre el comportamiento mecánico de ambas especies a causa de la distinta densidad y geometría de sus granos. Por otro lado, las distribuciones de anfíboles y ortopiroxenos tienden a ser subparalelas a la de clinopiroxenos.

4.1 Aporte de minerales pesados desde las áreas fuente

Uno de los principales factores que afectan a una población de minerales pesados es la meteorización de la roca madre, que determina la entrada de espe-

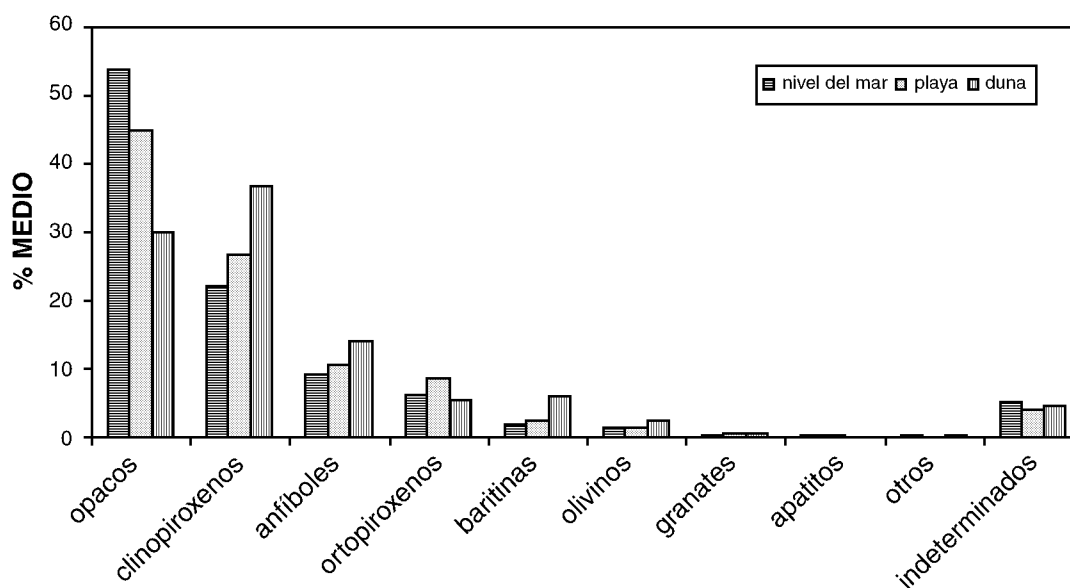


Figura 6. Distribución perpendicular a la costa de las diferentes especies de minerales pesados, promediada a lo largo del litoral.
 Figure 6. Across-shore distribution of heavy mineral species, averaged along the coast.

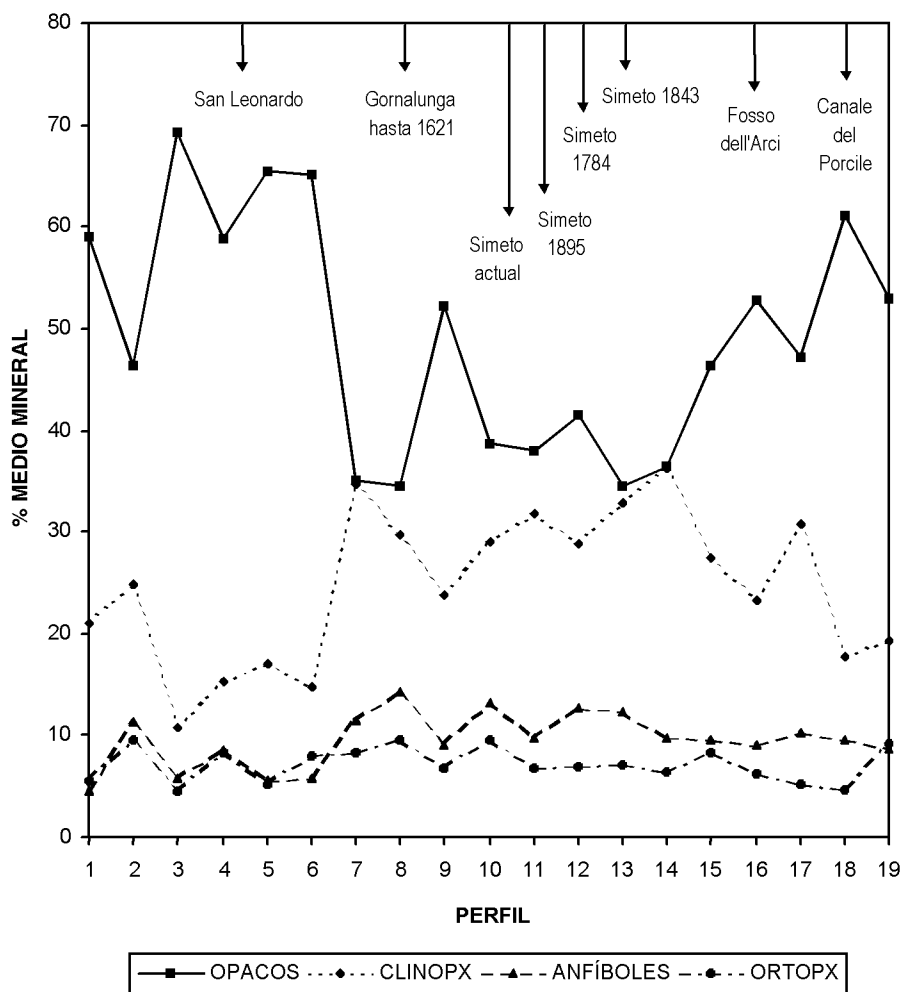


Figura 7. Distribución longitudinal del porcentaje de las principales especies de minerales pesados. Se ha incluido también la posición que ocupan en el litoral las desembocaduras antiguas y actuales de los principales cursos de agua.
 Figure 7. Alongshore distribution of main heavy mineral species. Positions of ancient and present-day outlets of main water courses along the shoreline are also included.

cies minerales en el ciclo sedimentario. En la zona de estudio, las variadas características climáticas conllevan que la influencia del clima sobre la meteorización de las rocas madre sea variable para diversas áreas, existiendo distintos procesos a través de los cuales se puede producir la aportación de granos minerales a los cursos fluviales de la zona de estudio. Entre ellos se encuentran, en lo que a meteorización física se refiere, la gelifracción en el área del Etna, la dilatación diferencial por insolación y cambios de temperatura entre el día y la noche, los cam-

bios de volumen por humectación y secado, etc. En cuanto a la meteorización química, los principales procesos incluirían reacciones de hidrólisis y degradación química, hidratación mineral, oxidación de los cementos ferruginosos de las areniscas, así como la disolución de minerales por elevadas precipitaciones en el área del Etna, que se vería acentuada por la acidificación del agua meteórica relacionada con la emisión de gases del volcán.

Además de los procesos de meteorización de los materiales de las cuencas, también la dinámica flu-

vial del Simeto y el S. Leonardo determina el tipo y cantidad de los aportes de sedimento a la playa. En el caso del Simeto, las formaciones de su cuenca presentan diversos grados de erosionabilidad, contribuyendo de forma variable a los aportes de la carga sólida fluvial. Así, materiales como los sedimentos recientes, las margas del Plio-Pleistoceno o los depósitos evaporíticos muestran una elevada erosión, mientras que otros, como las vulcanitas etneas o la Formación de Polizzi, presentan un bajo grado de erosión (Amore *et al.*, 1983).

En lo que respecta a las especies concretas de minerales pesados que pueden aportar los distintos tipos de materiales, las lavas del Etna contienen principalmente augita, olivino y magnetita (Corsaro y Cristofolini, 1993, 1996). El Flysch de Monte Soro presenta al mismo tiempo especies de elevada madurez mineralógica y especies químicamente inestables como clinopiroxenos y anfíboles; aparecen también elevados porcentajes de minerales autigénicos, como opacos y baritina (Carmisciano y Puglisi, 1983). También parte de las formaciones evaporíticas miocenas contienen baritina (Amore *et al.*, 1979).

En conjunto, a partir de los resultados obtenidos y de la información disponible, se deduce que el Simeto es la principal fuente de aporte de fracción pesada al litoral; el S. Leonardo también aporta minerales pesados, pero en mucha menor medida. En concreto, los clinopiroxenos y olivinos, así como gran parte de los minerales opacos, procederían principalmente de las lavas del Etna. Los ortopiroxenos, minerales característicos de los basaltos Ibleos (Amore *et al.*, 1979), tendrían su origen en estas vulcanitas, al menos para la mitad meridional de la playa. La baritina procedería de los depósitos evaporíticos de la cuenca del Simeto, mientras que el origen del granate estaría en el transporte costero longitudinal desde las formaciones metamórficas de Calabria (Rottura *et al.*, 1993) y/o del NE de Sicilia (Lentini, 1982), al no existir materiales de estas características en las cuencas del Simeto y el S. Leonardo.

4.2 Distribución transversal

Los agentes dinámicos litorales actúan sobre la distribución de los minerales pesados, produciendo una clasificación selectiva y una concentración

diferencial de los mismos en función de su tamaño de grano y densidad (Komar *et al.*, 1989; Frihy, 1994). Así, en líneas generales, de forma perpendicular a la costa se verifica en la zona de estudio la afirmación de diversos autores según la cual un menor tamaño de grano del sedimento implica un mayor contenido en minerales pesados (Briggs, 1965; Lotfy, 1997); la mayor granulometría y los menores porcentajes de fracción pesada se dan en los sedimentos del nivel del mar. En este sentido, el que la zona de la playa esté enriquecida en minerales pesados (figura 5) puede atribuirse a que la energía del oleaje es capaz de removilizar materiales de diferente densidad y tamaño de grano, por lo que arrastra los minerales pesados del nivel del mar y los conduce tanto hacia la playa como hacia la zona sublitoral y en la dirección del transporte litoral (Badr, 1995). Las dunas presentan un porcentaje intermedio de fracción pesada, ajustándose levemente su distribución a la del nivel del mar, si bien se trata de un resultado poco significativo, al existir dunas en sólo tres de los perfiles de muestreo.

En cuanto al comportamiento de las distintas especies de la fracción pesada, no se ha encontrado una relación entre el tamaño de grano de las muestras y su composición en especies de minerales pesados (Swift *et al.*, 1971; Flores & Shideler, 1978). Por otro lado, la inversión observada entre la distribución transversal de los minerales opacos y la de los transparentes (figura 6) se debe probablemente a que los opacos son más difíciles de removilizar, ya que tienen mayor densidad, que acelera su velocidad de caída, y menor tamaño de grano, que hace que queden atrapados en los intersticios (May, 1973; Ockay & Hubert, 1996). Necesitan, por tanto, una mayor energía del oleaje para ser transportados (Komar *et al.*, 1989) y pueden acumularse selectivamente en la zona del nivel del mar. Además, su elevada densidad dificulta su transporte eólico, siendo los minerales que menos tienden a concentrarse en las dunas (figura 6).

4.3 Distribución longitudinal

En general, en la zona de estudio no se verifica paralelamente a la costa la relación inversa entre tamaño de grano y porcentaje de fracción pesada (figura 5), probablemente debido a las fuertes condiciones de contorno y a la presencia de

diversas desembocaduras fluviales con aporte de minerales pesados.

Las distribuciones de la fracción pesada indican la existencia de un transporte diferencial de sedimentos a ambos lados de la desembocadura del Simeto, algo superior al Norte del mismo (figuras 5 y 7). Las causas de este transporte deben relacionarse con las características de las corrientes longitudinales costeras, por lo que cabría plantear la existencia de una corriente dirigida hacia el Norte a lo largo del litoral. En este sentido, las corrientes paralelas a la playa se originan a partir del oleaje que presenta cierto ángulo de aproximación a la costa, que en la zona de estudio procede del NE y SE (figura 4). La intensidad del transporte litoral de sedimentos de dicho oleaje se puede expresar a través de la potencia de ola o flujo neto de energía (P_n), que representa su eficacia en la transferencia energética (CERC, 1973):

$$P_n = (\rho/8) \cdot g \cdot H^2 \cdot C$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, g es la constante gravitatoria, H es la altura de ola y C es la velocidad de la ola. En la tabla 1 se observa claramente cómo los valores de la potencia de ola en el Golfo de Catania son más importantes para el oleaje procedente del segundo cuadrante que para el procedente del primer cuadrante. En la época del muestreo, entre el otoño y el invierno, cuando la energía del oleaje es mayor, se acentúa la superioridad energética de los oleajes del SE, mientras que en verano, con potencias de ola mínimas, esta diferencia se reduce.

La mayor energía del oleaje del SE está relacionada con la mayor altura de las olas procedentes de

esta dirección. Esta diferencia de altura se debe a que dicha variable está controlada en gran medida por el *fetch* o recorrido de incidencia, muy superior para el oleaje del SE frente al del NE. Así, la gran diferencia entre los *fetch* provocaría que el oleaje del SE, generador de un mar de fondo con mayor altura de ola, fuera el que originase la corriente longitudinal principal en la playa de Catania, dirigida de Sur a Norte. Paralelamente, las importantes velocidades del viento del NE (Amore *et al.*, 1992) permitirían al oleaje del primer cuadrante, de frecuencia también considerable (figura 4), generar otra corriente, de sentido contrario a la anterior y de menor energía, aunque también significativa.

Al tratarse de un tramo litoral con deriva dominante dirigida hacia el Norte, la parte meridional de la playa tendería a erosionarse y a quedar enriquecida en minerales pesados (Frihy & Komar, 1993; Frihy & Lotfy, 1994). No obstante, es posible que la corriente Sur-Norte posea la velocidad y energía suficientes como para arrastrar los minerales ligeros y pesados, mientras que la corriente Norte-Sur sólo pueda transportar los minerales ligeros; así, la zona Norte quedaría enriquecida en fracción pesada, tal y como se observa en los resultados de este trabajo.

En cuanto a las especies de minerales pesados, los transparentes presentan distribuciones similares a lo largo del litoral (figura 7), con máximos en la zona central, coincidiendo con la fuente de aporte (el río Simeto), y disminución hacia los laterales por efecto de las corrientes longitudinales. El incremento en la concentración de los minerales opacos en los extremos de la playa puede relacionarse principalmente con el efecto de sombra energética

Tabla 1. Distribución estacional del flujo neto de energía del oleaje para la boya de oleaje de Catania (Archetti & Franco, 1995).
Table 1. Seasonal distribution of wave energy net flux in Catania wave buoy (Archetti & Franco, 1995).

Año	Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	Pn (kW/m)	Dir (°N)	Pn (kW/m)	Dir (°N)	Pn (kW/m)	Dir (°N)	Pn (kW/m)	Dir (°N)
89-90	0,4	83	5,3	98	2,6	93	1,2	92
90-91	0,6	71	6	104	7,6	100	1,6	86
91-92	0,7	87	4,4	87	6,2	104	2,4	101
92-93	0,6	91	2,6	100	2,8	87	1,2	90
93-94	0,4	79	4,1	108	5,7	108	1,3	100
94-95	0,4	64	1,8	102	3,8	101	1,3	99
Media	0,5	79	4	100	4,8	99	1,5	95

ejercido por los promontorios: dado que los opacos poseen una mayor densidad y tienden a ser equidimensionales, la disminución de la energía del oleaje favorece el transporte de los minerales transparentes, más planos y menos densos, por lo que su cantidad disminuye en los extremos de la playa. Una posible causa secundaria estaría en los aportes locales procedentes de los afloramientos volcánicos de los extremos de la playa, por escorrentía superficial, y para el extremo Sur también en los aportes del S. Leonardo.

5. Conclusiones

Se han estudiado los minerales pesados de la playa del Golfo de Catania con el fin de determinar las principales características de la dinámica litoral de la zona y establecer la procedencia de los sedimentos que componen la playa. Los resultados obtenidos permiten concluir que la fracción pesada, compuesta mayoritariamente por minerales opacos y clinopiroxenos, tiene su origen principalmente en los aportes del río Simeto al litoral. Una pequeña parte procede del río San Leonardo, y como fuentes puntuales de importancia muy inferior aparecen las vulcanitas iblicas erosionadas del promontorio de Agnone, pequeños cursos de agua de ámbito local, y el transporte litoral desde Calabria y el NE de Sicilia.

Por otra parte, se ha verificado que en la zona de estudio y transversalmente a la playa los minerales pesados tienden a concentrarse en las fracciones más finas del sedimento, mientras que las condiciones de contorno impiden que esto suceda también en sentido longitudinal. Asimismo, dadas las características de los agentes dinámicos, se puede deducir que el oleaje provoca el enriquecimiento relativo de la playa seca en minerales pesados con respecto a la situada al nivel del mar, y que los promontorios de los extremos de la playa generan zonas de sombra energética, determinando que el porcentaje de fracción pesada sea allí mayor. Se ha comprobado también que los minerales opacos presentan un comportamiento mecánico e hidrodinámico totalmente opuesto al de los clinopiroxenos, debido a sus diferencias en densidad y tamaño de grano.

La distribución de la fracción pesada a lo largo del litoral permite deducir que la diferencia entre la potencia energética de los frentes de oleaje proce-

denes del SE y NE, motivada por sus distintos *fetch*, podría determinar la existencia de dos corrientes longitudinales, una de ellas dirigida hacia el Norte y la otra hacia el Sur, la primera de mayor relevancia que la segunda. Los minerales pesados transparentes se concentran principalmente en torno a la desembocadura del Simeto, mientras que los afloramientos volcánicos de los promontorios situados en los extremos de la playa, los cursos de agua locales y las mencionadas corrientes contribuyen a que los minerales opacos se acumulen en los extremos Norte y Sur de la playa.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado de un proyecto de acción integrada entre las universidades de Cádiz y de Catania. Debemos expresar nuestro agradecimiento al profesor C. Amore (Universidad de Catania) por sugerir esta investigación y proporcionar gran parte del material para su realización, así como a F. Geremia por aportar información sobre la zona de estudio. Igualmente, agradecemos a los Dres. G. Flor y J. Lario sus sugerencias y comentarios constructivos. Este trabajo se ha realizado con la subvención del Grupo de Investigación RNM-161 del Plan Andaluz de Investigación.

Referencias bibliográficas

- Amore, C.; D'Alessandro, L.; Giuffrida, E.; LoGiudice, A. & Zanini, A. (1992). Dinamica litorale tra Capo Peloro e Capo Passero (Sicilia orientale). *Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat.*, Vol. 25, nº 339, 69-114.
- Amore, C.; Gandolfi, C.; Giuffrida, E.; Paganelli, L. & Zanini, A. (1979). Caratteristiche morfologiche, tessiture e composizioni del litorale del Golfo di Catania. *Miner. Petrogr. Acta*, Vol. 23, 47-75.
- Amore, C.; Giuffrida, E. & Zanini, A. (1983). Variazioni del trasporto torbido del fiume Simeto e loro influenza sul litorale del Golfo di Catania. *Atti 23° Congresso Geografico Italiano*, Catania, Vol. II, Tomo III, 1-16.
- Archetti, R. & Franco, L. (1995). Nuove analisi di dati ondometrici dei mari italiani. *Atti Giornate Italiane di Ingegneria Costiera*, Ravenna, 150-166.
- Badr, A.A. (1995). Ideal beach profile as indicated by grain size, roundness and heavy mineral analyses, Burullus coast, Egypt. *MBSS Newsletter*, 17, 42-52.
- Beccalupa, L.; Di Grande, A.; LoGiudice, A.; Macciotta, G. & Siena, F. (1991). Carta Geopetrografica dell'area Centro-settentrionale Iblea, escala 1:50.000. SELCA.
- Briggs, L.I. (1965). Heavy mineral correlations and provenances. *J. Sedim. Petrol.*, 35 (4), 939-955.

- Carmisciano, R.; Pennisi, M.; Puglisi, D. & Romeo, M. (1983). Dati preliminari sulla composizione, provenienza ed età dei livelli torbiditici calcarei del flysch di Monte Soro (Monti Nebrodi, Sicilia Centro Settentrionale). *Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat.*, Vol. 16, n° 321, 113-129.
- Carmisciano, R. & Puglisi, D. (1983). Studio composizionale delle arenarie del flysch di Monte Soro (Monti Nebrodi, Sicilia centro-settentrionale). *Miner. Petrogr. Acta*, Vol. 27, 73-90.
- Carriquiry, J.D. & Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Mar. Geol.*, 158, 125-145.
- CERC, Coastal Engineering Research Center (1973). *Shore Protection Manual, vol. 1*. Superintendent of Documents, Washington D.C.
- Corsaro, R. & Cristofolini, R. (1993). Nuovi dati petrochimici ed isotopici sulla successione del Mongibello Recente (M. Etna). *Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat.*, Vol. 26, n° 341, 185-225.
- Corsaro, R. & Cristofolini, R. (1996). Origin and differentiation of recent basaltic magmas from Mount Etna. *Mineral. Petrol.*, 57, 1-21.
- Flores, R.M. & Shideler, G.L. (1978). Factors controlling heavy-mineral variations on the south Texas outer continental shelf, Gulf of Mexico. *J. Sedim. Petrol.*, 48 (1), 269-280.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27, 3-26.
- Frihy, O.E. (1994). Discrimination of accreted and eroded coasts using heavy mineral compositions of the Nile Delta beach sands, Egypt. *Sedimentology*, 41, 905-912.
- Frihy, O.E. & Komar, P.D. (1993). Long-term shoreline changes and the concentration of heavy minerals in beach sands of the Nile Delta, Egypt. *Mar. Geol.*, 115, 253-261.
- Frihy, O.E. & Lotfy, M.F. (1994). Mineralogic evidence for the remnant Sebennitic promontory on the continental shelf off the central Nile Delta. *Mar. Geol.*, 117, 187-194.
- Geremia, F. (2000). *Evoluzione Morfologica e Dinamica Sedimentaria dei Pantani di Vendicari (Sicilia Sudorientale)*. Tesis Doctoral, Universidad de Catania, 185 p. (Inédita).
- Guerrera, F.; Loiaco, F.; Puglisi, D. & Moretti, E. (1992). The Numidian Nappe in the Maghreb Chain: state of the art. *Boll. Soc. Geol. It.*, 111, 217-253.
- Komar, P.D.; Clemens, K.E.; Li, Z. & Shih, S. (1989). The effects of selective sorting on factor analyses of heavy-mineral assemblages. *J. Sedim. Petrol.*, 59 (4), 590-596.
- Lentini, F. (1982). The geology of the Mt. Etna basement. En: *Mount Etna volcano. A review of the recent Earth Sciences studies* (R. Romano, ed.). Mem. Soc. Geol. It., 23, 7-25.
- Lotfy, M.F. (1997). Distribution of heavy mineral grains by granulometric fractions in some modern Nile Delta coast sands, Egypt. *MBSS Newsletter* 19, 33-41.
- Marchesini, L.; Amorosi, A.; Cibin, U.; Zuffa, G.G.; Spadafora, E. & Preti, D. (2000). Sand composition and sedimentary evolution of a late Quaternary depositional sequence, Northwestern Adriatic coast, Italy. *J. Sedim. Res.*, 70 (4), 829-838.
- May, J.P. (1973). Selective transport of heavy minerals by shoaling waves. *Sedimentology*, 20, 203-211.
- McManus, J. (1980). Grain size determination and interpretation. En: *Techniques in Sedimentology* (M. Tucker, ed.). Blackwell Sc. Publ., 63-85.
- Ockay, C. & Hubert, J.F. (1996). Mineralogy and provenance of Pleistocene outwash-plain and modern beach sands of outer Cape Cod, Massachusetts, USA. *Mar. Geol.*, 130, 121-137.
- Pérez-Mateos, J.; Pinilla, A.; Alcalá del Olmo, L. & Aleixandre, T. (1982). Mineralogía de los arenales costeros españoles. Tramo Málaga-Ayamonte. *Bol. Geol. Min.*, 93, 1-18.
- Peterson, C.D.; Komar, P.D. & Scheidegger, K.F. (1986). Distribution, geometry, and origin of heavy mineral placer deposits on Oregon beaches. *J. Sedim. Petrol.*, 56 (1), 67-77.
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary Rocks*. Harper & Row, London, 718 p.
- Rottura, A.; Caggianelli, A.; Campana, R. & Del Moro, A. (1993). Petrogenesis of Hercynian peraluminous granites from the Calabrian Arc, Italy. *Eur. J. Mineral.*, 5, 737-754.
- Roy, P.S. (1999). Heavy mineral beach placers in southeastern Australia: Their nature and genesis. *Econ. Geol. Bull. Soc.*, 94 (4), 567-588.
- Swift, D.J.P.; Dill, C.E.Jr. & McHone, J. (1971). Hydraulic fractionation of heavy mineral suites on an unconsolidated retreating coast. *J. Sedim. Petrol.*, 41 (3), 683-690.
- Tsimplis, M.N. (1994). Tidal oscillations in the Aegean and Ionian Seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39, 201-208.

Recibido el 4 de diciembre de 2000

Aceptado el 23 de marzo de 2001