

*Nota de Investigación/Research Note*

## Rhodolith detritus impounded by a coastal dune on Isla Coronados, Gulf of California

## Detrito de rodolitos capturados por la duna costera en Isla Coronados, Golfo de California

AA Sewell<sup>1</sup>, ME Johnson<sup>1\*</sup>, DH Backus<sup>1</sup>, J Ledesma-Vázquez<sup>2</sup><sup>1</sup> Department of Geosciences, Williams College, Williamstown, MA 01267, USA. \* E-mail: markes.e.johnson@williams.edu<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Apartado postal 453, Ensenada, CP 22800, Baja California, México.**Resumen**

Al suroeste de Isla Coronados se encontró arena de duna con un volumen estimado de 30,000 m<sup>3</sup>, formada hasta en 86.5% de fragmentos de rodolitos de carbonato de calcio. Alrededor del Golfo de California en general, las dunas de arena costeras se presentan comúnmente en la parte norte de las islas o líneas de costa y el carbonato de calcio presente se relaciona con moluscos bivalvos de las planicies arenosas adyacentes. El volumen de carbonato de calcio para la costa oeste de Isla Coronados deberá de considerar el número de rodolitos de una talla determinada necesarios para la edificación de una duna de tamaño y composición conocida. Para lo anterior, se recolectaron 135 rodolitos completos por encima de la línea de marea en Punta Bajo en la península al lado de la isla. Se determinó que un metro cúbico requiere 8,640 rodolitos completos con un diámetro medio de 5 cm y una esfericidad de 0.86. La edad de este tamaño de rodolitos puede ser varias décadas. En etapas, los rodolitos recolectados fueron fragmentados hasta un tamaño máximo de grano  $\leq 2.38$  mm de diámetro ( $-1.25\phi$ , con el material resultante se determinó la cantidad necesaria para elaborar 1 m<sup>3</sup> de arena de carbonato de calcio pura. Considerando una merma del 2% durante el proceso, serían necesarios ~16,265 rodolitos fragmentados para producir 1 m<sup>3</sup> de arena, de tal forma que para una duna de 30,000 m<sup>3</sup> se requieren aproximadamente 488, 000,000 rodolitos para producir 86% del volumen de la duna. Dunas de esta naturaleza podrán ser raras, pero el cálculo se puede aplicar a cualquier duna originada por rodolitos en el Golfo de California.

*Palabras clave:* Deflación de playa, dunas carbonatadas, ciclo del carbón, rodolitos.

**Abstract**

Sand from a small dune on the southwest side of Isla Coronados with an estimated volume of 30,000 m<sup>3</sup> is enriched as much as 86.5% by calcium-carbonate detritus from beached rhodoliths. Elsewhere in the Gulf of California, coastal sand dunes often occur on the north sides of islands or north-facing peninsular shores, and calcium-carbonate input is more commonly linked to bivalve mollusks from adjacent sand flats. The local calcium-carbonate budget for the west-facing shore of Isla Coronados must take into account how many rhodoliths of a given size are required to build a sand dune with a known composition and volume. To this end, 135 whole rhodoliths were collected from above the tide line at Punta El Bajo, across from Isla Coronados, on the peninsular mainland. One cubic meter is calculated to accommodate 8640 whole rhodoliths with an average diameter of 5 cm and an average sphericity of 0.86. The age of a rhodolith this size could be several decades. Through stages, the sample rhodoliths were crushed to a maximum grain size  $\leq 2.38$  mm in diameter ( $-1.25\phi$  equivalent), and the product was used to estimate the proportion required to generate 1 m<sup>3</sup> of pure carbonate sand. Accounting for 2% loss throughout the reduction process, about 16,265 crushed rhodoliths are needed to produce 1 m<sup>3</sup> of carbonate sand. Thus, a 30,000-m<sup>3</sup> dune requires approximately 488,000,000 rhodoliths to generate 86% of the dune's volume. Dunes of this kind may be rare, but the computation is applicable to other rhodolith-derived dunes in the Gulf of California.

*Key words:* beach deflation, carbonate dunes, carbon cycle, rhodoliths.

**Introducción**

Con base a un estudio de 50 playas representativas de ambas costas de la Península de Baja California, Carranza-Edwards *et al.* (1998) reportaron que la arena en el golfo muestra una presencia significativa de carbonato de calcio en comparación con las playas más maduras del Pacífico, ricas en cuarzo. En parte, esta dicotomía se atribuye a las aguas más cálidas y con mayor transparencia en el Golfo de California, factores que promueven la fertilidad en organismos marinos

**Introduction**

Based on a survey of 50 beaches equally represented on opposite coasts of the Baja California peninsula, Carranza-Edwards *et al.* (1998) found that gulf sand has a significant calcium-carbonate component compared with more mature, quartz-dominated sand from Pacific beaches. In part, this dichotomy is attributed to warmer waters and better water clarity in the Gulf of California, factors that promote fecundity in marine organisms with skeletal calcium carbonate. The gulf

con esqueletos de carbonato de calcio. La región del golfo presenta vientos dominantes del norte que pueden soplar por varios días entre Octubre y Abril. Durante el invierno, vientos hasta de 10–15 m sec<sup>-1</sup> se concentran a lo largo de golfo (Bray y Robles 1991). Esto genera trenes de oleaje y un amplio fetch que impacta a las islas, playas y penínsulas orientadas hacia el norte. Las olas en el invierno fragmentan las conchas que se depositan sobre las playas orientadas al norte y el viento transporta la arena carbonatada resultante hacia tierra a los sistemas de duna.

Las primeras dunas con una componente significativa de carbonato de calcio en el Golfo de California fueron identificadas por primera vez en la parte norte de Isla Carmen (Anderson 1950) y en los alrededores de Puerto Peñasco en la costa de Sonora (Ives 1959). Russell y Johnson (2000) y Skudder *et al.* (2006) posteriormente realizaron estudios en dunas carbonatadas en Punta Chivato, Mulegé y San Nicolás, todo en Baja California Sur. Estas dunas presentan un enriquecimiento común debido a los materiales transportados por el viento de fragmentos de conchas de moluscos, principalmente bivalvos. Las concentraciones de CaCO<sub>3</sub> exceden 70% del volumen de algunas dunas en Puerto Peñasco (Ives 1959) y Punta Chivato (Russell y Johnson 2000). El propósito de esta colaboración es resaltar un enriquecimiento diferente a las dunas costeras con carbonato de calcio procedente de rodolitos, algas calcáreas coralinas de vida libre. Los rodolitos requieren de movimiento rotatorio en el sustrato marino dentro de la zona fótica para alcanzar su forma esférica, alcanzando comúnmente tamaños de 2 a 11 cm en diámetro (Foster *et al.* 1997). Describimos un ejemplo de Isla Coronados en el cual la concentración de detritos de rodolitos domina al sistema de dunas de manera similar.

## Métodos y materiales

Punta El Bajo está situada 11 km al norte de Loreto en la costa del Golfo de California, en Baja California Sur. Isla Coronados es una pequeña isla, de 7.59 km<sup>2</sup> de área, separada de Punta El Bajo por aproximadamente 2.5 km (fig. 1) La isobata de 50 brazas define una plataforma que se proyecta hacia fuera de Punta El Bajo, que rodea la isla, y sobre la que actúan fuertes corrientes generadas por los vientos del norte en los meses de invierno. Foster *et al.* (1997) reportan rodolitos vivos desde el canal relativamente somero entre la Isla Coronados y la costa de la península. Rodolitos completos son arrojados a la costa por encima de la línea de marea cerca de Punta El Bajo (fig. 2), en ocasiones en grandes cantidades (fig. 2b). En contraste, la playa principal de la ensenada al suroeste de Isla Coronados está dominada por sedimento resultante de la fragmentación de rodolitos. Esto es fácilmente confirmado mediante el examen de la playa y su arena, la cual muestra amplias evidencias de puntas rotas provenientes de rodolitos que se caracterizan por una apariencia abultada o de costra.

Se realizaron cinco pruebas aleatorias de análisis de composición a partir de una muestra de arena de duna recolectada al suroeste de Isla Coronados. Para cada prueba se esparcieron

region also features prevailing northerly winds that blow for days at a time between October and April. During the winter season, winds with peak speeds from 10–15 m s<sup>-1</sup> are funneled down the length of the gulf (Bray and Robles 1991). They generate wave trains over a large fetch to impact north-facing beaches on islands and peninsular shores that project into the gulf. The winter waves reduce shells that wash onto north-facing beaches and the winter winds transfer the resulting carbonate sand inland to dune systems.

Sand dunes along the Gulf of California with a significant component of calcium carbonate were first detected on the north end of Isla Carmen (Anderson 1950) and around Puerto Peñasco on the Sonoran coast (Ives 1959). Russell and Johnson (2000) and Skudder *et al.* (2006) subsequently studied carbonate dunes in the vicinity of Punta Chivato, Mulegé, and San Nicolás, all in Baja California Sur. These dunes all share a common enrichment from the wind-blown detritus of mollusk shells, mainly bivalves. Concentrations of calcium carbonate exceed 70% by volume in some dunes at Puerto Peñasco (Ives 1959) and Punta Chivato (Russell and Johnson 2000). The purpose of this contribution is to call attention to a different kind of coastal dune enriched with calcium carbonate derived from rhodoliths or unattached coralline red algae. Rhodoliths depend on circumrotary movement on the seafloor within the photic zone to attain a spherical shape, and they commonly attain sizes from 2 to 11 cm in diameter (Foster *et al.* 1997). We describe an example from Isla Coronados where the concentration of rhodolith detritus dominates the dune system at a comparable level.

## Material and methods

Punta El Bajo is situated 11 km north of Loreto on the gulf coast of Baja California Sur (Mexico). Isla Coronados is a small island, 7.59 km<sup>2</sup> in area, separated from Punta El Bajo by a distance of about 2.5 km (fig. 1). The 50-fathom isobath defines a distinct shelf that projects broadly outward from Punta El Bajo to surround the island. Vigorous currents stimulated by northerly winds affect this shelf during the winter months. Foster *et al.* (1997) described living rhodoliths from the relatively shallow channel between Isla Coronados and the adjacent peninsular coastline. Whole rhodoliths are washed ashore above the high-tide mark near Punta El Bajo (fig. 2a), sometimes in large numbers (fig. 2b). In contrast, sediments derived from crushed rhodoliths dominate the main beach within the semi-protected cove on the southwest side of Isla Coronados. This is readily confirmed by casual examination of the beach sand, which shows ample evidence of the broken distal tips from rhodoliths as characterized by a lumpy or pustular appearance.

Five random trials for compositional analysis were made from a sample of dune sand collected on the southwest side of Isla Coronados. For each test, approximately 25 g of sand were scattered on a tray ruled with a grid and studied under a binocular microscope. Each assay required a count of 400

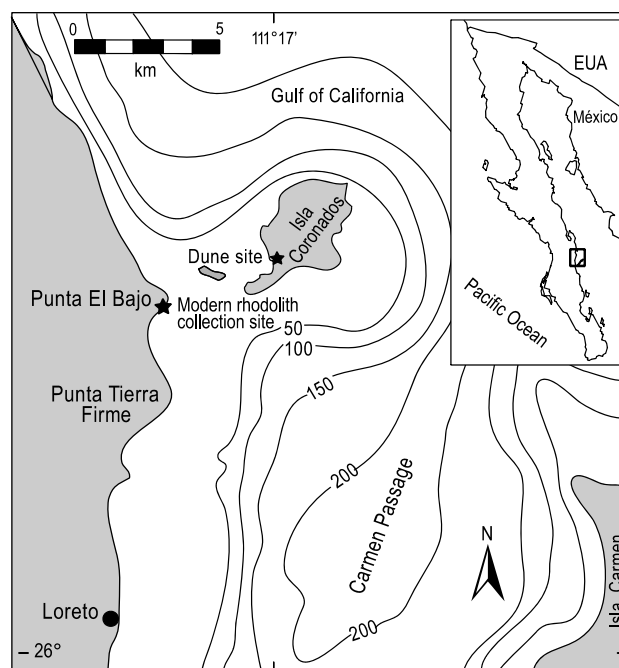
aproximadamente 25 g de arena sobre una charola trazada con una cuadrícula para luego ser estudiada bajo un microscopio binocular. Cada corrida requirió de 400 granos individuales. Esta cifra es considerada suficiente para generar datos de composición dentro de un intervalo de confianza del 5% (Van der Plas y Tobi 1965). Los granos fueron distribuidos en diez categorías que incluyen: fragmentos de rodolitos, conchas, silicatos, minerales oscuros (en su mayoría volcanoclasticos), magnetita, fragmentos de gasterópodos, foraminíferos, esponjas y erizos, al igual que fragmentos de briozoarios.

Una población de 135 rodolitos en total fue recolectada por encima de la línea de marea alta en Punta El Bajo (figs. 1, 2). En el laboratorio, cada rodolito fue medido sobre tres ejes utilizando un vernier. El eje *X* es el más largo del rodolito y yace perpendicular al eje intermedio *Y*. El eje corto es *Z* y éste yace perpendicular a los planos de proyección de *X* y *Y*. La esfericidad fue calculada en base a las mediciones de los tres ejes utilizando la fórmula (Sneed y Folk 1958):

$$\sqrt[3]{Y \times (Z/X^2)}$$

Cada rodolito fue pesado utilizando una balanza, mientras que su volumen se determinó mediante un cilindro graduado. La cantidad de agua desplazada fue evaluada después de permitir que las bolsas de aire emergieran del rodolito sumergido. De acuerdo con lo anterior, la densidad fue calculada con la referencia de masa por unidad de volumen. Basado en las tres dimensiones axiales, el volumen fue reevaluado para cada uno de los rodolitos como esferas sólidas de carbonato de calcio. También, la masa se calculó nuevamente utilizando el nuevo volumen y la densidad del carbonato de calcio ( $2.7 \text{ g mL}^{-1}$ ). La reevaluación de los datos obtenidos de masa permitieron la evaluación entre la masa de la esfera sólida de carbonato de calcio y el rodolito actual, que contiene numerosas cavidades.

Las mediciones experimentales del volumen de los rodolitos bajo niveles progresivos de reducción mecánica fueron logrados mediante la utilización de una caja especialmente construida con dimensiones internas de 25 cm por lado. Las cuatro paredes de esta caja se marcaron con una escala de medición en centímetros para la profundidad. Se utilizó un martillo para lograr la reducción inicial de los rodolitos para que alcanzaran el tamaño aproximado de una roseta de maíz tostado, que a su vez fueron copiados dentro de una bolsa de lona. Este material fue transformado a tamaño arena por medio de un pulverizador Bico tipo UA. Para poder establecer un tamaño de 2.38 mm de diámetro ( $-1.25\phi$ ), el material fue procesado por medio de un tamiz de malla 8. Durante el proceso inicial de reducción se realizó una inspección para poder identificar algas e invertebrados marinos pequeños que viviesen en las cavidades de los rodolitos. Siempre que fue posible se consultaron las guías de campo de Keen (1971), Brusca (1980) y Kerstitch (1989) para la región, para identificar a la biota a nivel de especie. Una muestra menor de arena de rodolitos resultante de la destrucción mecánica fue estudiada



**Figure 1.** Maps for the Baja California Peninsula and the Loreto region. (a) Inset showing the location of the Loreto region (black square). (b) Regional overview of Loreto showing Isla Coronados and the bathymetry of the Carmen Passage (in fathoms). Star on Isla Coronados marks the location of a small carbonate dune; star on mainland near Punta El Bajo marks the site where a large number of rhodoliths are beached above the tide line as a storm deposit.

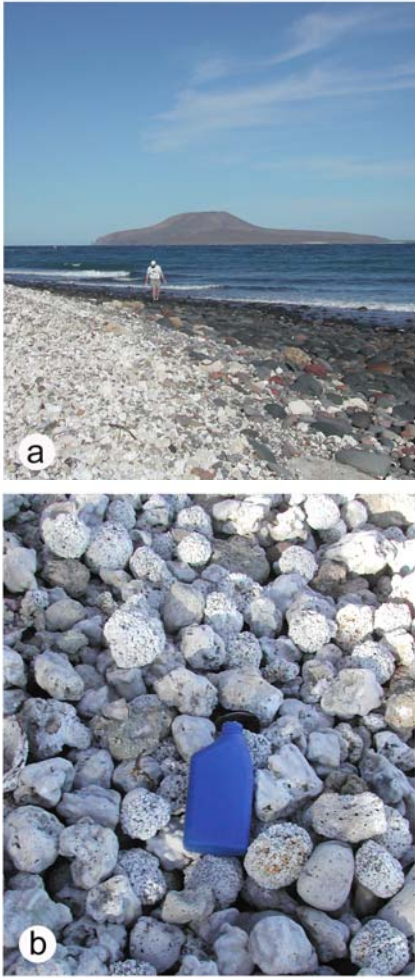
**Figura 1.** Mapas de la Península de Baja California y la región de Loreto. (a) Amplificación que muestra la región de Loreto (cuadrado negro). (b) Panorama general de la región de Loreto mostrando Isla Coronados y la batimetría del canal que separa Isla Carmen (en brazas). La estrella en Isla Coronados marca la ubicación de una pequeña duna de carbonato; la estrella del lado de la península cerca de Punta El Bajo indica el sitio donde se encuentra varada gran cantidad de rodolitos sobre la línea de marea como un depósito de tormenta.

individual grains. This number is considered sufficient to generate compositional data within a 5% confidence interval (Van der Plas and Tobi 1965). Grains were sorted into ten categories that included rhodolith debris, shell fragments, silicates, dark minerals (mainly volcanic lithics), magnetite, gastropod fragments, foraminifera fragments, sponge fragments, sea-urchin fragments, and bryozoan fragments.

A population of 135 whole rhodoliths was collected above the tide line at Punta El Bajo (figs. 1, 2). In the laboratory, each rhodolith was measured on three axes using a vernier caliper. The *X*-axis is the longest dimension of the rhodolith and lies perpendicular to the intermediate axis, *Y*. The short axis, *Z*, lies perpendicular to the *X* and *Y* projection planes. Sphericity was calculated based on measurements of the three axes using the following formula (Sneed and Folk 1958):

$$\sqrt[3]{Y \times (Z/X^2)}$$

Each rhodolith was also weighed using a mass scale and its volume was determined using a graduated cylinder. The



**Figure 2.** Shore near Punto El Bajo covered by beached rhodoliths. (a) General view looking to the northeast with Isla Coronados in background; rhodoliths on upper shore (white) with figure for scale. (b) Close-up of upper beach showing approximately 25 large rhodoliths (motor-oil container for scale).

**Figura 2.** Línea de costa cubierta de rodolitos varados cerca de Punta El Bajo. (a) Vista general hacia el noroeste con Isla Coronados al fondo; los rodolitos aparecen en la costa superior (blanco) con una figura como escala. (b) Acercamiento de la playa superior que muestra ~25 grandes rodolitos (bote de aceite como escala).

con un microscopio binocular para análisis comparativos de composición.

El tamaño y los límites del campo de dunas en Isla Coronados fue determinado por medio del análisis de imágenes satelitales. La máxima altura de la duna fue determinada en campo sobre la pendiente frontal de la duna.

## Resultados

### *Área y volumen de la duna en Isla Coronados*

Se utilizó una imagen satelital para determinar el área superficial de la duna en Isla Coronados. En una imagen ASTER de falso color la arena de carbonato de calcio resalta

amount of water displacement was evaluated after allowing air pockets to rise from the submerged rhodolith. Accordingly, density was calculated using mass per unit volume. Based on the three axial dimensions, volume was recalculated for each rhodolith as a solid sphere of calcium carbonate. Also, mass was recalculated using the new volume and the true density of calcium carbonate ( $2.7 \text{ g mL}^{-1}$ ). The recalculated mass measurements allowed for comparison between the mass of a solid sphere of calcium carbonate and the actual rhodolith, which contains numerous cavities.

Experimental measurements on diminishing rhodolith volume under progressive stages of mechanical reduction were accomplished using a specially constructed box with internal dimensions of 25 cm on each side. The four sidewalls of this box were inscribed to measure depth on a centimeter scale. A hammer was used to achieve the initial reduction of rhodoliths to popcorn-size fragments constrained in a heavy canvas bag. This material was further reduced to sand-size grains using a Bico UA pulverizer. In order to establish a clast size with a maximum diameter of  $2.38 \text{ mm}$  ( $-1.25\phi$ ), the material was passed through a number 8 sieve. During the initial reduction process, a survey was made to identify other algae and small marine invertebrates living within the cavities of the rhodoliths. Guidebooks to the region by Keen (1971), Brusca (1980), and Kerstitch (1989) were consulted to identify the biota to species level, where possible. A small sample of rhodolith sand from the mechanical process was studied under a binocular microscope for comparative compositional analysis.

The size and boundaries of the dune field on Isla Coronados were determined through analysis of a satellite image. Maximum dune height was measured in the field on the lee slope of the dune.

## Results

### *Area and volume of the Isla Coronados dune*

A satellite image was employed to determine the surface area of the dune on Isla Coronados. Calcium-carbonate sand stands out as white on false-colored ASTER images. Dunes can be easily distinguished from surrounding volcanic rocks, which appear red to purple in color. The dune was outlined using GIS remote-sensing tools and the surface area inside the perimeter was calculated to be about 1.5 ha or  $15,000 \text{ m}^2$ . The volume of the Coronados dune was estimated by multiplying the surface area by one half the maximum thickness of the dune. In general, any dune can be constrained in a three-dimensional rectangle divided by a diagonal plane extending from a zero point on the stoss side to the maximum height on the leeward side. Thus, the average thickness of the dune is roughly half the maximum height of the dune. As the maximum thickness of the dune on Isla Coronados is 4 m, it follows that the dune contains roughly  $30,000 \text{ m}^3$  of dune sand ( $2 \text{ m} \times 15,000 \text{ m}^2$ ).

como de color blanco. Las dunas son fácilmente distinguibles de las rocas volcánicas adyacentes, las cuales aparecen como de color rojo a púrpura. La duna se delimitó utilizando herramientas de SIG y el área interna del perímetro se determinó en 1.5 ha o 15,000 m<sup>2</sup>. El volumen de la duna se calculó al multiplicar el área por la mitad de la altura máxima de la duna. En general, cualquier duna se puede delimitar como un rectángulo tridimensional dividido por un plano diagonal que se origina desde un punto cero en la base de la cara de sotavento hasta la altura máxima a barlovento. Así tendremos que el espesor de la duna es aproximadamente la mitad de la altura máxima de la altura de la duna. Siendo 4 m la altura máxima de la altura de la duna en Isla Coronados, se determina que ésta contiene aproximadamente 30,000 m<sup>3</sup> de arena de duna (2 m × 15,000 m<sup>2</sup>).

#### *Composición de la duna de Isla Coronados vs. rodolitos completos*

Se recolectó una muestra de arena (~250 g) en el centro de la cara frontal, 100 m tierra dentro de la línea de costa de Isla Coronados (fig. 1b). Se recolectaron 5 submuestras para determinar la composición de la arena, analizando 400 granos (IC-1 to IC-5). La tabla 1 muestra los resultados de los análisis por conteo por punto con la generación de diez categorías. Los bioclastos predominan sobre los granos de minerales, representando el 96.5% de acuerdo con los resultados acumulativos de las submuestras. Los granos provenientes de rodolitos son los predominantes, aportando en promedio el 86.5%. Con un resultado medio de 7.5%, otros bioclastos que incluyen material fragmentario derivado de gasterópodos, foraminíferos, esponjas y espinas de erizo y briosuarios. Los granos de minerales y sílice en conjunto sólo aportan el 3.5%. Por tanto, es evidente que los rodolitos funcionan como la materia prima para el entrapamiento de arena de duna en Isla Coronados.

#### *Composition of the Isla Coronados dune vs whole rhodolith*

A single sand sample (about 250 g) was collected from the middle of the dune's leeward face, 100 m inland from the east shore of Isla Coronados (fig. 1b). Five random trials were drawn from this sample to determine the composition of the sand, each based on the analysis of 400 grains (IC-1 to IC-5). Table 1 shows the results of the point-count analysis with determinations listed in ten categories. Bioclastic grains predominate over mineral grains, accounting for 96.5% based on the cumulative trials. Grains from a rhodolith source account for most of this, amounting to an average value of 86.5%. With a combined average yield of 7.5%, other bioclastics include fragmental material derived from gastropods, foraminifera, sponges, urchin spines, and bryozoa. Mineral and silicate grains combine for a total average yield of only 3.5%. Thus, it is evident that rhodoliths act as the primary source for the sequestration of dune sand on Isla Coronados.

A single whole rhodolith from Punta El Bajo was sacrificed in order to perform a point-count analysis on the crushed rhodolith detritus for comparison with the dune sand. Table 2 shows the results for five randomly selected samples drawn from the detritus consisting of 400 grains each. As expected, the composition is overwhelmingly bioclastic, with rhodolith debris accounting for 94.1% of the sample. In addition to rhodolith material, other bioclastic grains consist mostly of shelly material, yielding 0.7% of the sample. Surprisingly, mineral grains are more frequent in the rhodolith sample than in the dune sample. On average, the rhodolith sample includes 4% dark minerals, including grains of magnetite.

#### *Biota associated with rhodoliths*

Each of the 135 rhodoliths was examined thoroughly with a hand lens before and during breakage in order to complete a

**Tabla 1.** Datos de conteo de puntos basado en cinco muestras de la duna de Isla Coronados (IC). Cada muestra está basada en el conteo de 400 granos de arena en un microscopio binocular; los ensayos están numerados en orden consecutivo.

**Table 1.** Point-count data based on five samples from the dune on Isla Coronados (IC). Each sample is based on a count of 400 grains under a binocular microscope; trials are numbered consecutively.

Composition	IC-1	IC-2	IC-3	IC-4	IC-5	Average	Percent
Rhodolith grains	345	351	344	346	344	346.00	86.50%
Shell fragments	36	23	32	33	26	30.00	7.50%
Clear grains	3	9	5	3	6	5.20	1.30%
Dark minerals	6	7	9	6	15	8.60	2.15%
Gastropod	2	2	4	3	2	2.60	0.65%
Foraminifera	3	4	2	3	3	3.00	0.75%
Sponge	2	0	0	1	1	0.80	0.20%
Sea urchin	2	2	4	3	2	2.60	0.65%
Bryozoan	1	2	0	2	0	1.00	0.25%
Unknown	0	0	0	0	1	0.20	0.05%
Total number of grains	400	400	400	400	400	400.00	100.00%

**Tabla 2.** Datos de conteo de puntos basados en cinco muestras de rodolitos recolectados cerca de Punta El Bajo (PB) triturados. Cada muestra está basada en el conteo de al menos 400 granos en un microscopio binocular; los ensayos están numerados en orden consecutivo. **Table 2.** Point-count data based on five samples from a crushed rhodolith collected near Punta El Bajo (PB). Each sample is based on a count of at least 400 grains under a binocular microscope; trials are numbered consecutively.

Composition	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	Average	Percent
Rhodolith grains	381	368	377	375	381	376.40	94.10%
Shell fragments	5	0	3	3	2	2.60	0.65%
Clear grains	1	8	3	9	3	4.60	1.15%
Dark minerals	8	21	12	13	13	13.60	2.95%
Gastropod	0	0	3	0	0	0.20	0.05%
Foraminifera	0	0	1	0	0	0.20	0.05%
Green flakes	5	3	4	0	0	2.40	0.60%
Total number of grains	400	400	400	400	400	400.00	100.00%

Se destruyó un rodolito completo de Punta El Bajo para realizar un análisis de conteo por punto de sus fragmentos para realizar una comparación con la arena de la duna. La tabla 2 muestra los resultados de cinco ejemplares aleatorios recolectados de los detritos que constan de 400 granos cada uno. Como era de esperarse, la composición es en su mayoría bioclástica, con restos de rodolito que representan 94.1% del total de la muestra. Además del material de los rodolitos, otros granos bioclásticos consisten en su mayoría de material de conchas, correspondiendo al 0.7% de la muestra. Sorprendentemente, los granos minerales son más frecuentes en la muestra de rodolitos que en la muestra de duna. En promedio, la muestra de rodolitos incluye un 4% de minerales opacos, incluyendo granos de magnetita.

#### *Biota asociada con rodolitos*

Cada uno de los 135 rodolitos fueron examinados exhaustivamente con lupa antes y durante la fragmentación, para así completar una encuesta biológica sobre asociaciones macro-faunísticas. Las hojas del talo de la alga da protección a alrededor de 20 especies directamente relacionadas con los rodolitos (tabla 3). Las asociaciones de plantas más abundantes son las pequeñas algas coralinas con una morfología particular en forma de palo. Los organismos invertebrados más abundantes pertenecen a los briozoarios incrustantes. Los que presentan zooecia con aspecto de saco (una especie no identificada A), son más numerosos que los que la presentan más aplanada y espaciada (especie no identificada B). Ambos están ubicados en la familia ascophoran cheilostomata, debido a que éstos presentan claramente un opérculo (Banta 1980). También se pueden encontrar moluscos poliplacóforos, bivalvos y gasterópodos que habitan en los rodolitos. El bivalvo arcoide, *Barbatia* cf. *illota* y el bivalvo unguilínido *Phlyctiderma* cf. *discrepans* son los moluscos comunes más representativos. Los tubos de gusanos representantes de los poliquetos también son comunes. Entre los escasos se encontraron una esponja

biological survey on macro-faunal associations. The branches of the algal thallus provide protected living space for no less than 20 species directly connected with the rhodoliths (table 3). The most abundant plant associates are small coral-line algae with stick-shape morphology. The most abundant invertebrates are encrusting bryozoans. Those with sac-like zooecia (unnamed species A) are more numerous than those with more flattened and more evenly spaced zooecia (unnamed species B). Both are in the family of ascophoran cheilostomata, because they clearly show an ascus (Banta 1980). Mollusks spanning the classes Polyplacophora, Bivalvia, and Gastropoda inhabit the rhodoliths. The arcoid bivalve, *Barbatia* cf. *illota*, and the unguilínid bivalve, *Phlyctiderma* cf. *discrepans*, are the most common molluscan representatives. Tube worms representative of the Polychaeta are also common. A sponge attributed to *Leucetta losangelensis*, a small ophiuroid echinoderm, and barnacles identified as *Armatobalanus durhami* are rare. It is evident that the rhodoliths provide shelter for a self-contained ecosystem of small invertebrates, many of which secrete calcium carbonate. Elsewhere in this volume, Foster *et al.* (2007) also report on the cryptofauna associated with rhodoliths in the Gulf of California.

#### *Physical parameters of the Punta El Bajo rhodoliths*

The 135 rhodoliths collected at Punta El Bajo provide statistics for a "model rhodolith" that represents the average dimensions and quantitative measurements used in this study. In general, the average rhodolith from this collection had a diameter of about 5 cm, but the shape is not perfectly spherical. The model rhodolith was computed to have long, intermediate, and short axes of 5.67, 4.87, and 4.22 cm, respectively. It has a mass of 67.77 g, a weight of 0.66 Newtons, a volume of 35.27 mL, a density of 1.92 g mL<sup>-1</sup>, and an average sphericity (Sneed and Folk 1958) of 0.86.

Mass was recalculated to determine the percent loss adjusted for a sphere composed of solid calcium carbonate. Using three axes to define a sphere that represents a solid

**Tabla 3.** Diversidad taxonómica y abundancia relativa de invertebrados marinos hospedados por una muestra de 135 rodolitos de Punta El Bajo.  
**Table 3.** Taxonomic diversity and relative abundance of marine invertebrates hosted by a sample of 135 rhodoliths from Punta El Bajo.

Phylum/Class	Family	Species	Count	Reference	
Rhodophyta	Unknown	Stick coralline algae	72		
Porifera					
Demospongiae	Leucascidae	<i>Leucetta losangelensis</i>	1	Kerstitch (1989)	
Cnidaria	Poritidae	<i>Porities panamensis</i>	21		
Bryozoa	Anascan type	Species A	119	Banta (1980)	
		Species B	32	Banta (1980)	
Mollusca					
Polyplacophora	Ischnochitonidae	<i>Stenoplex conspicua sonorana</i>	1	Brusca (1980)	
Bivalvia	Arcidae	<i>Barbatia cf. illota</i>	89	Brusca (1980)	
	Ungulinidae	<i>Phlyctiderma cf. discrepans</i>	9	Keen (1971)	
Gastropoda		<i>Phlyctiderma cf. phoebe</i>	1	Keen (1971)	
		Mytilidae	<i>Modiolus capax</i>	1	Keen (1971)
		Semelidae	<i>Cumingia cf. lamellosa</i>	3	Keen (1971)
		Vermetidae	<i>Vermetus indentatus</i>	3	Brusca (1980)
		Eulimidae	<i>Stilifer sp.</i>	2	Keen (1971)
		Unknown	Species A	2	
Annelida	Polychaeta	Species A (black tube)	18		
		Species B (white tube)	16		
Arthropoda	Archaeobalanidae	<i>Armatobalanus durhami</i>	2	Brusca (1980)	
Echinodermata	Cidaridae	<i>Eucidaris thouarsii</i>	6		
	Echinometridae	<i>Echinometra vanbrunti</i>	2	Brusca (1980)	
	Ophiochitonidae	<i>Ophionereis annulata</i>	1	Brusca (1980)	

asociada a *Leucetta losangelensis*, un pequeño equinodermo ofiuroido y percebes identificados como *Armatobalanus durhami*. Es evidente que los rodolitos proveen refugio para un ecosistema autocontenido de pequeños invertebrados, muchos de los cuales secretan carbonato de calcio. En otra parte de este volumen, Foster *et al.* (2007) también reportan sobre la cripto-fauna asociada a los rodolitos en el Golfo de California.

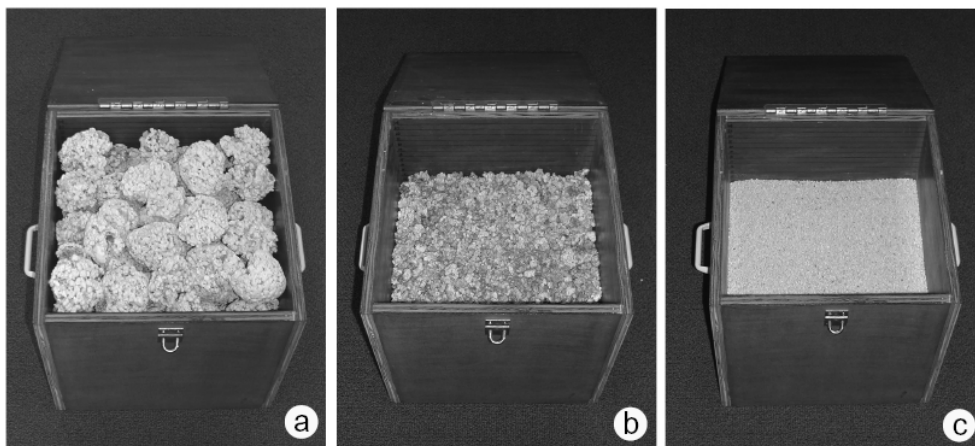
#### Parámetros físicos del rodolito de Punta El Bajo

Los 135 rodolitos recolectados en Punta El Bajo proporcionan estadísticas para un "rodolito modelo" que representa las dimensiones en promedio, así como las mediciones cuantitativas utilizadas en este estudio. En general, el rodolito medio de esta colección tuvo un diámetro de aproximadamente 5 cm, pero la forma no siempre fue totalmente esférica. El modelo del rodolito fue computado para que tuviera ejes largos, intermedios y cortos de 5.67 cm, 4.87 cm y 4.22, respectivamente. Tiene una masa de 67.77 g, un peso de 0.66 Newtons, un volumen de 35.27 mL, una densidad de 1.92 g mL<sup>-1</sup>, y una esfericidad media (Sneed y Folk 1958) de 0.86.

rhodolith with a density of 2.7 g mL<sup>-1</sup>, the average mass would be 116.52 g. This result is about one and a half times the mass of the model rhodolith, as experimentally determined (see methods above). Thus, there is a 37.21% difference in mass between a model rhodolith with radial branches, in comparison to a hypothetical rhodolith as a solid. This difference provides the rhodolith with ample open space to host other organisms.

#### Mechanical reduction of rhodolith volume

The progression of mechanical abrasion from whole rhodoliths to sand-size debris was conducted in the lab through three stages. First, whole rhodoliths were randomly packed in a wooden box, measuring 25 cm on each side (fig. 3a), in order to determine as a proportion the number of whole rhodoliths needed to fill a 1-m<sup>3</sup> space. Based on several trials, the test box was found to accommodate 135 rhodoliths having an average diameter of 5 cm. Sixty-four equivalent boxes, each 25 × 25 × 25 cm, make 1 m<sup>3</sup>. Thus, the 135 rhodoliths needed to fill the test box translate to about 8640 whole rhodoliths necessary to fill a 1-m<sup>3</sup> box.



**Figure 3.** Experimental apparatus used to calculate the volume of carbonate materials consisting of a box with internal dimensions that measure 25 cm on each side: (a) box filled with 135 whole rhodoliths, (b) box with 135 rhodoliths reduced to popcorn-size fragments, and (c) box with 135 rhodoliths reduced to sand-size particles  $\leq 2.38$  mm in diameter ( $-1.25\phi$  equivalent or less).

**Figura 3.** Aparato experimental usado para calcular el volumen de materiales carbonatados consistente en una caja con dimensiones internas de 25 cm por lado: (a) caja llena con 135 rodolitos enteros, (b) caja con 135 rodolitos reducidos a fragmentos del tamaño de rosetas de maíz, y (c) caja con 135 rodolitos reducidos a granos de arena  $\leq 2.38$  mm de diámetro (equivalentes a  $-1.25\phi$  o menos).

La masa fue nuevamente calculada para determinar el porcentaje de pérdida ajustado para una esfera compuesta de carbonato de calcio sólido. Utilizando tres ejes para definir una esfera que representa a un rodolito sólido con una densidad de  $2.7 \text{ g mL}^{-1}$ , la masa media debería de ser 116.52 g. Este resultado es aproximadamente una y media veces mayor que la masa del rodolito modelo, como fue determinado experimentalmente (ver metodología). Por lo tanto, hay una diferencia de 37.21% en masa entre el modelo del rodolito con ramificaciones radiales y un rodolito hipotéticamente sólido. Esta diferencia muestra que el rodolito cuenta con gran espacio para albergar a otros organismos.

#### *Reducción mecánica del volumen de un rodolito*

La abrasión mecánica desde un rodolito entero hasta restos del tamaño de partículas de arena se realizó en el laboratorio en tres etapas. Primero, se empaquetaron aleatoriamente rodolitos enteros en una caja de madera, con medidas de 25 cm por lado (fig. 3a) para así poder determinar como una proporción la cantidad de rodolitos enteros requeridos para llenar un espacio de  $1 \text{ m}^3$ .

El siguiente paso consistió en reducir 135 rodolitos a piezas pequeñas, no mayores que una roseta de maíz (fig. 3b). No se conoce ninguna playa formada de restos de rodolitos de estas dimensiones, pero las piezas de este tamaño representan una etapa intermedia entre rodolitos vivos enteros en el lecho marino y residuos finos de rodolitos transportados por el viento de una playa a alguna duna costera. Luego, con el uso de una tapa de cartón para la caja de prueba utilizada para nivelar los rodolitos molidos, se registró el llenado respecto a una regla en centímetros grabada en una de las paredes de la caja. De esta manera se encontró que los restos con tamaño de rosetas de maíz llenaron la caja al nivel de 16.5 cm (fig 3b).

The next stage saw the 135 rhodoliths reduced to coarse pieces, no larger than popcorn (fig. 3b). No known beach consists of rhodolith debris in this size class, but the popcorn-sized pieces represent an intermediate stage between whole rhodoliths alive on the sea floor and the fine rhodolith detritus transported by wind from a beach to a coastal dune. A cardboard cap fitted to the open top of the test box was used to level the crushed rhodoliths and register the fill against a centimeter scale inscribed on the walls of the box. It was found that popcorn-size debris filled the test box to the 16.5-cm level (fig. 3b). Proportionately, it may be calculated that it requires 13,091 rhodoliths beginning with an average diameter of 5 cm to fill a  $1\text{-m}^3$  space with fragments of this size.

The final stage in the reduction process allowed all the crushed rhodolith material to pass through a number 8 sieve. The largest rhodolith-derived clasts were granules 2.38 mm in diameter ( $-1.25\phi$  equivalent), although much of the material was smaller in size. The final product filled the test box to a level of 13 cm (fig. 3c). Taking into consideration a mass loss of 2.1%, the pulverized rhodoliths should have reached the 13.28-cm level in the test box. Thus, approximately 16,265 pulverized rhodoliths starting with an average diameter of 5 cm are required to fill a  $1\text{-m}^3$  space. This represents an 88.25% increase in comparison to the number of whole rhodoliths required to fill a  $1\text{-m}^3$  space.

#### *Volume of rhodolith dune enrichment on Isla Coronados*

Knowing that it takes 16,265 pulverized rhodoliths to fill a  $1\text{-m}^3$  space, it is possible to estimate the number of whole rhodoliths needed to generate  $30,000 \text{ m}^3$  of carbonate sand to 86.5% purity. Out of the estimated  $30,000 \text{ m}^3$  of sand in the dune,  $25,950 \text{ m}^3$  has a rhodolith source. By application of a proportionate relationship, 487,950,000 rhodoliths originally



Proporcionalmente, se puede calcular que se requieren 13,091 rodolitos con un diámetro medio a partir de 5 cm para llenar un espacio de 1 m<sup>3</sup> con fragmentos de ese tamaño.

La etapa final en el proceso de reducción permitió que todo el material de rodolito fragmentado pasara a un tamiz número 8. Por ende, los clastos de rodolito más grandes tenían 2.38 mm de diámetro (equivalente a  $-1.25\phi$ ), aunque mucho del material fuera más pequeño. El producto final llenó la caja de prueba a un nivel de 13 cm (fig. 3c). Tomando en consideración una pérdida en masa de 2.1%, los rodolitos pulverizados debieron haber alcanzado la marca de 13.28 cm en el nivel de la caja de prueba. Por lo tanto se requieren aproximadamente 16,625 rodolitos pulverizados con un diámetro medio a partir de 5 cm para llenar un espacio de 1 m<sup>3</sup>. Esto representa un incremento de 88.25% en comparación con el número de rodolitos requeridos para llenar un espacio de 1 m<sup>3</sup>.

#### *Volumen de enriquecimiento por rodolitos en Isla Coronados*

Sabiendo que se requieren 16,625 rodolitos pulverizados para llenar un espacio de 1 m<sup>3</sup> es posible estimar el número de rodolitos enteros necesario para generar 30,000 m<sup>3</sup> de arena carbonatada, con un 86.5% de pureza. De los 30,000 m<sup>3</sup> calculados de arena en una duna, 25,950 m<sup>3</sup> tienen una fuente de rodolitos. Mediante la aplicación de una relación proporcional, 487,950,000 rodolitos con un diámetro original de 5 cm integran el volumen de los rodolitos necesarios para generar el detritus pulverizado de tamaño de arena para la duna. Por ende, aproximadamente quinientos millones de rodolitos han sido almacenados en la pequeña duna del lado sudoeste de la Isla Coronados.

#### **Discusión**

Restringida por su geografía, la fuente para la arena de alga roja coralina en la duna en Isla Coronados está limitada a la pequeña plataforma trazada por la isobata de 50 m, entre la isla y Punta El Bajo en la península (fig. 1b). Estrictamente, y con bases locales, quinientos millones de rodolitos representan una gran cantidad de material de carbonato de calcio generado. Se sabe que los rodolitos en el Golfo de California muestran un estilo de vida rotatorio en bancos agitados por olas generalmente de 2 a 12 m de profundidad o en camas generadas por la corriente por debajo de los 12 m de profundidad (Foster *et al.* 1997). Algunos temas que merecen discusiones más profundas en el contexto de dunas carbonatadas tienen que ver con la longevidad de los rodolitos en su ambiente natural, comparada con el ritmo de sucesión de las ricas poblaciones de bivalvos que son fuentes de otras dunas costeras alrededor del Golfo de California.

En la mayoría de los organismos el tamaño tiene algún tipo de relación proporcional con la edad. Se sabe muy poco acerca del ritmo de crecimiento de los rodolitos, o de su edad máxima.

5 cm in diameter is the volume of rhodoliths required to yield the pulverized sand-size detritus for the dune. Hence, nearly one-half billion rhodoliths have been impounded in the small dune on the southwest side of Isla Coronados.

#### **Discussion**

Constrained by geography, the source for the coralline red algae impounded in dune sand on Isla Coronados is limited to the shallow shelf region defined by the 50-fathom isobath between the island and Punta El Bajo on the peninsular mainland (fig. 1b). Strictly on a local basis, a half billion rhodoliths is a large quantity of biologically generated calcium-carbonate material. Rhodoliths in the Gulf of California are known to live a circumrotary lifestyle in wave-agitated banks generally between 2 and 12 m water depth or in current-generated beds below a depth of 12 m (Foster *et al.* 1997). Topics worthy of further discussion in the context of carbonate dune sand concern longevity of rhodoliths in their natural habitat, as compared with the turnover rate for the rich populations of bivalves that supply other coastal dunes around the Gulf of California.

Size has a proportional relationship of some kind with age in most organisms. Very little is known about the growth rates of rhodoliths or the maximum age of a large rhodolith. Steller *et al.* (2007) have shown that rhodolith growth in the Gulf of California is seasonally dependent on seawater temperature. With a staining technique using alizarin, Rivera *et al.* (2004) studied growth rates in the rhodolith species *Lithothamnium muelleri* in the southwestern Gulf of California. They found that the growth rate for this species under field conditions was 0.6 mm yr<sup>-1</sup> and calculated that some rhodoliths lived to be more than 100 years old. As the diameter of the test rhodoliths was about 15 cm, it had a diameter three times that of the average rhodolith in our sample of 135 rhodoliths from Punta El Bajo. Assuming that the growth rate of rhodoliths in our sample is comparable to that found by Rivera *et al.* (2004), the model rhodolith ascribed to our dune study took several decades (30 to 40 years) to grow prior to death and disaggregation on a beach. Based on this age estimate, the turnover rate of rhodoliths in the supply of calcium carbonate to coastal dunes is quite slow compared with estimates for bivalve turnover.

This study is analogous to the research by Skudder *et al.* (2006) on sequestration of mollusk shell detritus in the coastal dunes of Baja California Sur. There are important differences, however, in the dune sites and the nature of the bivalve model based on *Megapitaria squalida* employed by Skudder *et al.* (2006) in comparison with the rhodolith model. *Megapitaria squalida* is an infaunal species that reaches adult size in four to five years and forms large populations in subtidal sand flats. East-west coasts on islands such as Isla Carmen or promontories such as Punta Chivato are exposed to the full force of northerly winds during the winter months. Sand flats offshore these areas provide a rich seasonal harvest of shells that wash ashore on beaches to be disaggregated by waves and eventually

Steller *et al.* (2007) mostraron que el crecimiento de los rodolitos en el Golfo de California depende estacionalmente de la temperatura del agua de mar. Mediante una técnica de tinción utilizando alizarina, Rivera *et al.* (2004) estudiaron el ritmo de crecimiento el rodolito *Lithothamnium muelleri* en el suroeste de Golfo de California, y encontraron que la tasa de crecimiento para esta especie en el campo era de 0.6 mm año<sup>-1</sup>, llegando a la estimación de que los rodolitos someros vivían más de cien años. El diámetro de los rodolitos de prueba de Rivera *et al.* (2004) era de aproximadamente 15 cm, lo que resulta tres veces el diámetro de uno medio en nuestra muestra de 135 rodolitos de Punta El Bajo. Suponiendo que la tasa de crecimiento en los rodolitos de nuestra muestra es comparable con la encontrada por Rivera *et al.* (2004), el modelo de rodolito considerado en nuestro estudio de dunas tomó varias décadas (de 30 a 40 años) para crecer antes de morir y disgregarse en la playa. Basado en estas estimaciones, el ritmo de producción en el suministro de carbonato de calcio a las dunas costeras es relativamente lento comparado con el generado por bivalvos.

Este estudio es análogo al de Skudder *et al.* (2006) acerca del secuestro del detritus de la concha de los moluscos en las dunas costeras de Baja California Sur. Hay diferencias importantes, aunque en comparación con el modelo basado en el rodolito, en las dunas y el modelo natural analizados por Skudder *et al.* (2006) el bivalvo *Megapitaria squalida* utilizado es una especie de infauna que alcanza su tamaño adulto en 4 o 5 años y forma grandes poblaciones en las arenas sublitorales. Las costas este y oeste de islas tales como Isla Carmen o penínsulas como Punta Chivato, están expuestas a toda la fuerza de los vientos del norte durante los meses de invierno. Planicies de arena mar adentro proveen una abundante cosecha estacional de conchas son llevadas a la costa para ser segregadas por las olas y eventualmente transportadas tierra adentro por el viento. Las tasas de producción y crecimiento son lo suficientemente altas para que sólo se requieran unas cuantas generaciones de bivalvos para aportar toda la arena carbonatada de las dunas perfiladas al norte en El Gallo, cerca de Mulegé y de San Nicolás.

La Isla Coronados tiene una línea de costa orientada al oeste sobre la cual los restos de rodolitos atraviesan hacia el continente (fig. 1), y que está sólo parcialmente protegida de los vientos invernales del norte. Como resultado, la duna al lado sudoeste de Isla Coronados no es tan grande como las dunas estudiadas por Skudder *et al.* (2006) en El Gallo o San Nicolás al norte. Tampoco secuestra gran parte de los detritos originados por los moluscos. Los fragmentos de concha encontrado en Isla Coronados representan tan sólo el 7.5% (tabla 1), de los cuales algunos se derivan de moluscos presentes dentro de los rodolitos. En contraste con la arena de duna en Isla Coronados, los sedimentos volcánicos constituyen los mayores aportadores de la fracción más representativa de arena de las dunas en El Gallo y San Nicolás, siguiéndole en importancia los detritos de moluscos. La cantidad de arena de duna derivada del alga coralina en El Gallo y San Nicolás es mínima, variando entre 1–3% (Skudder *et al.* 2006)

transported inland by wind. Productivity and growth rates are high enough that only a few bivalve generations are required to account for all the carbonate sand in the north-facing dunes at Cerro El Gallo near Mulegé and near San Nicolás.

Isla Coronados has a west-facing shore over which rhodolith debris traverses inland (fig. 1). It is only semi-protected from the northerly winter winds. As a result, the dune on the southwest side of Isla Coronados is not nearly as large as the dunes studied by Skudder *et al.* (2006) at El Gallo or San Nicolás to the north. Nor does it sequester a large fraction of mollusk-derived detritus in its dune sand. Shell fragments found in the Isla Coronados sand dune amount to only 7.5% (table 1), some of which derives from the mollusks immured within rhodoliths. In contrast to the dune sand on Isla Coronados, volcanic sediments comprise the largest fraction of the dune sand at El Gallo and San Nicolás, with mollusk detritus of secondary importance. The amount of dune sand derived from coralline algae found in the El Gallo and San Nicolás dunes is negligible, varying between 1% and 3% (Skudder *et al.* 2006).

Russell and Johnson (2000) studied dunes on the west end of the Punta Chivato promontory. Located to the west of Punta Chivato, Ensenada El Muerto is defined by a northerly-exposed shore. Molluscan fragments dominate the point-count data for sediment samples from Ensenada El Muerto and its associated dunes, accounting for more than 50% of the total bulk. All other bioclasts form a distinct minority, similar to the results at Isla Coronados, with the exception of rhodolith material. Overall, molluscan fragments predominate over coralline red algae in the Punta Chivato dunes with ratios from 25:1 to 50:1. Infaunal bivalves are able to thrive under the rough-water conditions present on a windward-facing coast like Ensenada El Muerto. Rhodolith beds are not stable under these tumultuous conditions. Instead, Libbey and Johnson (1997) claim, on the basis of fossil evidence, that rhodoliths inhabit the southeast side of the Punta Chivato promontory. Likewise, Ledesma-Vázquez *et al.* (2007) describe a major accumulation of crushed rhodolith debris trapped as an overwash deposit in a Pleistocene lagoon on the south side of Isla Coronados.

Geographic segregation of areas for the optimum development of rhodolith and mollusk beds appears to be the case. Rhodolith beds thrive adjacent to north-south oriented shorelines that are somewhat more protected from the wind, but still allow enough wave and current movement to promote spherical growth. According to this pattern, it is possible to predict that mollusk beds occur on the narrow shelf off the northern coast of Isla Coronados, while rhodolith beds thrive off the eastern coast of Punta Chivato.

## Conclusions

The small coastal sand dune on Isla Coronados is the first of its kind to be described for the Gulf of California with a high concentration of bioclasts derived from the coralline red algae of rhodoliths. Active eolianites with a significant carbonate input have a worldwide distribution, as reviewed recently by

Russel y Johnson (2000) estudiaron las dunas en la punta oeste de Punta Chivato. Localizada al oeste de Punta Chivato, la ensenada El Muerto está definida por una costa expuesta al norte. Fragmentos de moluscos dominan la base de datos del conteo por puntos en las muestras de sedimento de la ensenada El Muerto y sus dunas asociadas, constituyendo más de 50% del monto total. Todos los demás bioclastos forman una minoría distinta, similar a los resultados en Isla Coronados, a excepción del material de rodolito. En general los fragmentos de moluscos predominan sobre las algas coralinas rojas en las dunas de Punta Chivato con relaciones de 25:1 a 50:1. Los bivalvos son capaces de persistir a pesar de la intensa exposición al oleaje en una costa perfilada a sotavento como la de la ensenada El Muerto. Las camas de rodolitos no son tan estables bajo este tipo de condiciones tumultuosas. En cambio, Libbey y Johnson (1997) aseguran, en base a evidencia fósil, que los rodolitos habitaban el lado sudeste de Punta Chivato. De la misma manera, Ledesma-Vázquez *et al.* (2007) describen una importante acumulación de restos de rodolitos quebrados atrapados en forma de depósitos perimetrales en una laguna del Pleistoceno en el lado sur de Isla Coronados.

Todo parece indicar que las áreas de desarrollo óptimo de rodolitos y las camas de moluscos se encuentran separadas geográficamente. Las camas de rodolitos progresan adyacentes a las líneas de costa orientadas de norte a sur, que de alguna forma están más protegidas del viento, pero que aún permiten la suficiente corriente y oleaje para promover el crecimiento esférico. De acuerdo a este patrón, es posible predecir que las camas de moluscos surgen en la plataforma estrecha de la costa norte de Isla Coronados, mientras que las camas de rodolitos aprovechan la costa este de Punta Chivato.

## Conclusiones

La pequeña duna de la costa en la Isla Coronados es la primera en su tipo en ser descrita en el Golfo de California con una concentración elevada de bioclastos derivados de algas rojas coralinas de rodolitos. Las eoleanitas activas con un aporte significativo de carbonato tienen una distribución mundial, según se revisó recientemente por Brooke (2001). Los bioclastos en las dunas de la costa consisten comúnmente de esqueletos detríticos derivados de un amplio rango de invertebrados marinos, incluyen a los foraminíferos, corales, moluscos y equinoideos. El aporte de esqueletos a las eoleanitas de algas rojas coralinas se ha reconocido en otros sitios (Brooke 2001), pero en general como una fracción menor del total. La alta concentración de material de rodolito por encima del 85% en la arena de duna de Isla Coronados no se compara con ningún otro sistema de dunas previamente descrito en el Golfo de California.

Las dunas que están orientadas al norte en el Golfo de California son más propicias a contener una elevada fracción de material de moluscos, pero sólo pocos detritos de algas rojas coralinas (Russel y Johnson 2000, Skudder *et al.* 2006). Las

Brooke (2001). Bioclasts in coastal sand dunes commonly consist of detrital skeletal material derived from a range of marine invertebrates, including foraminifera, corals, mollusks, and echinoids. Skeletal contributions to eolianites from coralline red algae are recognized elsewhere (Brooke 2001), but generally as a lesser fraction of the whole. The high concentration of rhodolith material in excess of 85% in the Isla Coronados sand dune compares with no other dune system previously described in the Gulf of California.

North-facing dunes in the Gulf of California are more likely to contain a large fraction of molluscan material, but only very minor detritus from coralline red algae (Russell and Johnson 2000, Skudder *et al.* 2006). Shallow shelves on the east or west flanks of islands or large embayments such as Bahía Concepción are more prone to develop rhodolith banks that still receive moderate wave and current energy but avoid the high energy of a surf zone. Isla Coronados has a westward exposure to a channel that separates the island from the peninsular mainland. The sand dune on Isla Coronados has accommodated the reduced product of almost a half billion rhodoliths to fill most of the dune's estimated volume of 30,000 m<sup>3</sup>. Foster *et al.* (1997) documented the presence of living rhodoliths in wave- and current-agitated beds between Punta El Bajo and Isla Coronados, but the evidence of rhodolith material impounded in the Isla Coronados sand dune underscores the long-term richness of this area for rhodoliths that continued to thrive over intervals of several decades or more. Assuming that the search for additional dunes of this kind is successful, the method used here to quantify the carbonate contribution to the dune on Isla Coronados can be applied elsewhere in the Gulf of California to predict areas of adjacent rhodolith productivity.

## Acknowledgements

Field excursions to Isla Coronados and Punta El Bajo in Baja California Sur were undertaken during January 2005 with support from the Freeman Foote Fund in the Geosciences Department and funds associated with the Charles L MacMillan chair in geology at Williams College. Support from UABC is gratefully acknowledged by J Ledesma-Vázquez. We also thank the Director of Loreto Bay National Park and the Director of Centro INAH in Baja California Sur for granting the permits. Leon Fichman of Baja Outpost in Loreto, Baja California Sur (Mexico), generously contributed to logistical support. Ashley Sewell is grateful for additional support for summer laboratory research in 2005 from the Bronfman Science Fund at Williams College. Diana L Steller (Moss Landing Marine Laboratories) kindly drew our attention to literature on growth rates in rhodoliths.

plataformas someras en los flancos este u oeste de las islas, o grandes ensenadas tales como Bahía Concepción son más propensas a desarrollar bancos de rodolitos que aún reciben oleaje moderado y energía de las corrientes pero que evitan la alta

energía de una zona de rompiente. La Isla Coronados está expuesta al oeste en un canal que la separa del continente. La duna de arena en Isla Coronados ha acomodado el producto reducido de quinientos millones de rodolitos para llenar la mayor parte del volumen de las dunas, estimado en 30,000 m<sup>3</sup>. Foster *et al.* (1997) documentaron la presencia de rodolitos viviendo en camas agitadas por oleaje y corriente entre Punta El Bajo e Isla Coronados, pero la evidencia de material de rodolitos secuestrado por las dunas de arena de Isla Coronados enfatiza la riqueza de rodolitos en el área que continúa prosperando en intervalos de varias décadas o más. Suponiendo que la búsqueda de otras dunas de este tipo sea exitosa, el método utilizado aquí para cuantificar la contribución del carbonato para la duna de Isla Coronados puede ser empleado en otros sitios dentro del Golfo de California para predecir áreas adyacentes a la producción de rodolitos.

### Agradecimientos

Las excursiones a Isla Coronados y Punta El Bajo en Baja California Sur fueron realizadas en enero de 2005 con el apoyo del Freeman Foote Fund del Geosciences Department y con fondos asociados a la dirección de geología Charles L. MacMillan en Williams College. Jorge Ledesma-Vázquez reconoce el apoyo de la UABC. Se agradecemos también al director del Parque Nacional Bahía de Loreto y al Director del Centro INAH en Baja California Sur los permisos respectivos. Leon Fichman de Baja Outpost en Loreto, Baja California Sur, México, contribuyó generosamente con apoyo logístico. Ashley Sewell agradece el apoyo adicional en la investigación de laboratorio 2005 recibido del Bronfman Science Fund en Williams College. Diana L Steller (Moss Landing Marine Laboratories) dirigió amablemente nuestra atención a literatura acerca de los ritmos de crecimiento de los rodolitos.

Traducido al español por JE Ledesma-Martínez

### Referencias

- Anderson CA. 1950. 1940 EW Scripps Cruise to the Gulf of California. Part I. Geology of islands and neighboring land areas. Geol. Soc. Am. Mem. 43: 1–53.
- Banta WC. 1980. Bryozoa (moss animals). In: Brusca RC (ed.), Common Intertidal Invertebrates of the Gulf of California. 2nd ed. Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 356–396.
- Bray NA, Robles JM. 1991. Physical oceanography of the Gulf of California. In: Dauphin JP, Simoneit BRT (eds.), The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 47: 511–553.
- Brooke B. 2001. The distribution of carbonate eolianite. Earth-Sci. Rev. 55: 13–164.
- Brusca RC. 1980. Common Intertidal Invertebrates of the Gulf of California. 2nd ed. Univ. Arizona Press, Tucson, 512 pp.
- Carranza-Edwards A, Bocanegra-García G, Rosales-Hoz L, Galan L de P. 1998. Beach sands from Baja California Peninsula, Mexico. Sediment. Geol. 119: 263–274.
- Foster MS, Riosmena-Rodríguez R, Steller DL, Woelkerling WJ. 1997. Living rhodolith beds in the Gulf of California and their implications for paleoenvironmental interpretation. In: Johnson ME, Ledesma-Vázquez J (eds.), Pliocene Carbonates and Related Facies Flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 318: 127–139.
- Foster MS, McConnico LM, Lundsten L, Wadsworth T, Kimball T, Brooks LB, Medina-López M, Riosmena-Rodríguez R, Hernández-Carmona G, Vázquez-Elizondo RM, Johnson S, Steller DL. 2007. Diversity and natural history of a *Lithothamnion muelleri*-*Sargassum horridum* community in the Gulf of California. Cienc. Mar. 33: 367–384.
- Ives RL. 1959. Shell dunes of the Sonoran shore. Am. J. Sci. 257: 449–457.
- Keen AM. 1971. Sea Shells of Tropical West America. Stanford Univ. Press, Stanford, California, 1064 pp.
- Kerstitch A. 1989. Sea of Cortez Marine Invertebrates. Sea Challengers, Monterey, California, 112 pp.
- Ledesma-Vázquez J, Johnson ME, Backus DH, Mirabal-Davila C. 2007. Coastal evolution from transgressive barrier deposit to marine terrace on Isla Coronados, Baja California Sur, Mexico. Cienc. Mar. 33: 335–351.
- Libbey LK, Johnson ME. 1997. Upper Pleistocene rocky shores and intertidal biotas at Playa La Palmita (Baja California Sur, Mexico). J. Coast. Res. 13: 216–225.
- Rivera MG, Riosmena-Rodríguez R, Foster MS. 2004. Age and growth of *Lithothamnion muelleri* (Corallinales, Rhodophyta) in the southwestern Gulf of California, Mexico. Cienc. Mar. 30: 235–249.
- Russell P, Johnson ME. 2000. Influence of seasonal winds on coastal carbonate dunes from the Recent and Plio-Pleistocene at Punta Chivato (Baja California Sur, Mexico). J. Coast. Res. 16: 709–723.
- Skudder PA III, Backus DH, Goodwin DH, Johnson ME. 2006. Sequestration of carbonate shell material in coastal dunes on the Gulf of California (Baja California Sur, Mexico). J. Coast. Res. 22: 611–625.
- Sneed ED, Folk RL. 1958. Pebbles in the lower Colorado River, Texas, a study in particle morphogenesis. J. Geol. 66: 114–150.
- Steller DL, Hernández-Ayón JM, Cabello-Pasini A. 2007. Effect of temperature on photosynthesis, growth and calcification rates of the free-living coralline alga *Lithophyllum margaritae*. Cienc. Mar. 33: 443–448.
- Van der Plas L, Tobi AC. 1965. A card for judging the reliability of point counting results. Am. J. Sci. 263: 87–90.

Recibido en mayo de 2006;  
aceptado en febrero de 2007.