



Evaluación geoquímica de elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos de Bahía Concepción (B.C.S., México)

Guadalupe Durga Rodríguez-Meza^{1,*}, Evgueni Shumilin^{2,**}, Dmitry Sapozhnikov³, Lía Méndez-Rodríguez⁴, Baudilio Acosta-Vargas⁴

¹Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional,
Blvd. Juan de Dios Bátiz 250, Apdo. Postal 280, 81101, Guasave, Sinaloa, México

²Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional,
Av. IPN s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, Apdo Postal 592, 23096, La Paz, Baja California Sur, México

³Instituto V. I. Vernadsky de Geoquímica y Química Analítica, Academia de Ciencias de Rusia, Moscú, Rusia

⁴Centro de Investigaciones Biológicas-CIBNOR,
Mar Bermejo 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur, 23090, México

*gmeza@ipn.mx **eshumili@ipn.mx

Resumen

La geoquímica de los componentes mayoritarios y oligoelementos de los sedimentos de Bahía Concepción es de gran interés dadas las características de este ecosistema marino. Es una bahía semicerrada altamente productiva que presenta en forma alternada condiciones óxicas-subóxicas-anóxicas en la columna del agua. Está localizada en una zona árida semidesértica, donde recibe esporádicamente aportes fluviales y terrígenos asociados principalmente a ciclones tropicales en verano-otoño temprano o durante los frentes meteorológicos de invierno. Se encuentra influenciada por descargas subaéreas o someras hidrotermales submarinas, causadas por la actividad tectónica de esta área. En octubre de 1997, fueron recolectadas un total de 158 muestras de sedimentos marinos superficiales, además de 24 muestras de sedimentos del fondo de los arroyos que desembocan en la citada bahía y una muestra de la costra de la pared de manantial de aguas termales de playa Santispac. Los siguientes análisis les fueron realizados: tamaño de grano, contenido de carbonatos de calcio, carbono orgánico, elementos mayoritarios (Ca y Fe) y 34 oligoelementos. Los resultados indican una alta abundancia del carbonato de calcio (en promedio 41%) en los sedimentos gruesos de la parte occidental somera de la bahía, especialmente los que se encuentran enfrente del estuario Mulegé, de la playa Santispac, de la playa Santa Bárbara y de El Remate. Las partículas finas, que predominan en los sedimentos de la zona central más profunda localizada a lo largo del eje longitudinal de la bahía, se encontraron enriquecidas en carbono orgánico (2% en promedio). Varias asociaciones entre los componentes mayoritarios, los elementos mayoritarios y los oligoelementos pueden ser distinguidas con base en los resultados del análisis de los componentes principales (ACP) y que son las siguientes: (i) asociación I constituida por Ba, Cs, Cu, Fe, Hf, lantánidos, Rb, Th, U y Zn; (ii) asociación II, la cual incluye Ca, CaCO₃, Cd y Pb; (iii) asociación III presentada por Br, Cd, C_{org}, Cu, Hg, Hf, Ni and Zn; (iv) asociación IV que reúne Se, Ta y Zr y (v) asociación V constituida por Co y Cr.

Palabras clave: Bahía Concepción, geoquímica, oligoelementos, sedimentos

Abstract

The geochemistry of major components and trace elements of the sediments in Concepción Bay is of great interest. This highly productive semi-closed marine ecosystem of the western Gulf of California has alternating oxic-suboxic-anoxic conditions in the water column. Being in an arid semidesertic zone, it receives only episodic water and terrigenous sediment input associated with the summer-early autumn tropical cyclones or meteorological fronts in the winter and is affected by a subaerial or shallow hydrothermal water discharges caused by active tectonics. A set of 158 surface sediment samples, 24 samples of the bed sediments from the arroyos discharging to this bay and one sample from the crust of the wall of the playa Santispac hot water spring were collected in October 1997. The following analyses were done: grain size, calcium carbonate content, organic carbon, major elements (Ca and Fe) and 34 trace elements. A high

abundance of calcium carbonate (41% on average) occurs in the coarse sediments of the shallow western part of bay, especially in front of the Mulegé estuary, playa Santispac, playa Santa Barbara and El Remate. The finer particles, enriched in organic carbon (2% on average), prevail in the deeper central part of the bay along its longitudinal axis. Various associations of the major components, major and trace elements can be distinguished from the results of Principal Component Analysis (PCA): (i) association I constituted by Ba, Cs, Cu, Fe, Hf, lanthanides, Rb, Th, U and Zn; (ii) association II, which includes Ca, CaCO₃, Cd and Pb; (iii) association III presented by Br, Cd, C_{org}, Cu, Hg, Hf, Ni and Zn; (iv) association IV, which joins Se, Ta and Zr and (v) association V constituted by Co and Cr.

Key words: Bahía Concepción, geochemistry, trace elements, sediments

1. Introducción

La distribución espacial de los niveles de los elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos de las bahías y lagunas costeras proporciona información muy útil para identificar fuentes que pueden estar afectando la composición química de un ecosistema marino, así como su grado de contaminación. Adicionalmente, también se tiene la posibilidad de deducir que procesos están involucrados en la formación y transformación de las partículas en la columna del agua y su depositación al fondo marino (Salomons y Förstner, 1984; Anikiev *et al.*, 1994; Caccia *et al.*, 2003; Valdés *et al.*, 2005; Caccia y Millero, 2007). En este último aspecto, Bahía Concepción es un ambiente que genera gran interés geoquímico. Esta bahía se encuentra localizada en la costa occidental del Golfo de California, en la Península de Baja California. Abarca una parte de la subprovincia fisiográfica de la Sierra de La Giganta, donde existen algunos yacimientos minerales de manganeso y cobre, además afloran rocas vulcanosedimentarias de la Formación Comondú. Su ubicación geográfica y alta productividad biológica la convierten en uno de los cuerpos costeros más importantes de la parte central del Golfo de California dado que en ella existe una amplia biodiversidad de especies marinas (Mateo-Cid *et al.*, 1993; Villalejo-Fuerte y Ochoa-Báez, 1993; Martínez-López y Gárate-Lizárraga, 1994; Rodríguez-Romero *et al.*, 1994; Palomares-García *et al.*, 2002).

La batimetría, granulometría y mineralogía de los sedimentos superficiales de Bahía Concepción han sido descritas de manera general (Cruz-Orozco *et al.*, 1991; Pérez-Soto, 1995, 1998; Motolinía-Hidalgo, 1996; Meldahl *et al.*, 1997; Solís-Núñez *et al.*, 1997; González-Yajimovich y Pérez Soto, 1998).

Shumilin *et al.* (1996) en su trabajo de prospección geoquímica mostraron que las concentraciones de los oligoelementos en los sedimentos superficiales de esta bahía corresponden a un ambiente prístino, aunque registran algunas anomalías locales de origen natural (concentraciones elevadas de As, Ba, Sr y U). Es importante resaltar que recientemente fueron descubiertas ventilas hidrotermales someras que podrían estar influyendo en los enriquecimientos de elementos químicos en los sedimentos (Greene y Forrest, 2002; Canet *et al.*, 2004; Prol-Ledesma *et al.*, 2004; Forrest *et al.*, 2005).

El objetivo del presente estudio es contribuir al cono-

cimiento de la concentración de los componentes y elementos químicos mayoritarios y oligoelementos, presentes en los sedimentos, obtener las distribuciones espaciales de sus concentraciones en los sedimentos y material terrígeno de Bahía Concepción con el propósito de identificar las fuentes de aporte, caracterizar las asociaciones entre los elementos y mostrar con mejor precisión las zonas donde estos se acumulan en el fondo del ambiente marino.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción del área de estudio

Bahía Concepción tiene aproximadamente 40 km de largo y 9 km en su parte más ancha. Está orientada en dirección noroeste-sureste entre los paralelos 26° 33' y 26° 53' de latitud norte y 110° 42' y 112° 56' de longitud oeste (Figura 1). Se localiza en una región desértica árida, donde el promedio de la temperatura ambiente es de 32°C en los meses de verano, y de 6°C a 12°C en el invierno (Mateo-Cid *et al.*, 1993). La precipitación pluvial es escasa y alcanza pocos centímetros en el transcurso del año, con excepción del verano, cuando la lluvia comúnmente es torrencial y se asocia con ciclones tropicales desde el Océano Pacífico (Mendoza-Salgado *et al.*, 2006).

El material terrígeno es aportado a la bahía por numerosos arroyos con un volumen evaluado de $1.48 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Pérez Soto, 1995). Entre las mayores cuencas identificadas con base al volumen estimado de aporte del material sólido se encuentran Mulegé ($7290 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$), Amolares ($231 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$), Cadeje ($1458 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$), La Mantita ($188 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) y La Travesía ($428 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$).

Las costas de la bahía están constituidas por rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Comondú, apófisis graníticas, escasas rocas sedimentarias marinas y derrames de lava, domos y rocas piroclásticas, relativamente recientes (McFall, 1968; CRM, 1999; Ledesma-Vázquez y Johnson, 2001). Además, existen depósitos y minas abandonadas de manganeso en la Península Concepción (SGM, 2002; Blanco-Florido *et al.*, 2006; Camprubí *et al.*, 2008).

La profundidad promedio de Bahía Concepción es de 17 m. Las áreas más someras se encuentran a lo largo de su costa y la depresión más profunda sobre su eje central alcanza una profundidad de hasta 30 m en su parte sur (Cruz Orozco *et al.*, 1991; Pérez Soto, 1995).

La hidrología de esta bahía está influenciada por el intercambio de las masas de agua con el Golfo de California,

por su circulación residual que depende del viento y por sus mareas (Dressler, 1981). El rango de salinidad es entre 35 ups y 37 ups (Gilmartin y Revelante, 1978). Este cuerpo de agua se ha definido como un estuario negativo a causa de alta tasa de evaporación (Félix-Pico y Sánchez, 1976). El tipo de marea es diurno, con un rango de 1 m. La circulación en la parte norte de la bahía, que comprende el canal de acceso, es dominada por el flujo y reflujo de la marea. En la superficie existe una componente neta de flujo hacia el interior de la bahía y en el fondo una componente neta hacia el exterior. En la parte interior de la bahía la circulación superficial consiste de un flujo ciclónico con poca evidencia de modulación por la marea en la superficie (Gutiérrez de Velasco, 2008, comunicación personal).

En Bahía Concepción, la composición química del agua depende de los procesos físicos (estratificación y homogenización de la columna del agua) y biológicos que en ella ocurran. En la zona más profunda, la alta productividad biológica provoca episódicamente las condiciones subóxicas o anóxicas. En verano se dan las condiciones necesarias tanto para el crecimiento de dinoflagelados, como para la liberación de sulfuro de hidrógeno al estratificarse la columna de agua, lo que genera un ambiente tóxico (Lechuga-Devéze *et al.*, 2000, 2001; López-Cortés *et al.*, 2003). Las lluvias torrenciales de verano introducen grandes cantidades de agua fresca atmosférica y continental, lo que incrementa el volumen de mezcla, cambiando el balance de los iones de los elementos mayoritarios y nutrientes entre Bahía Concepción y el Golfo de California. El tiempo de residencia del agua disminuye, pero la introducción de material terrígeno ocasiona un incremento moderado de nutrientes en la columna del agua de la bahía, requiriéndose al menos 12 días para que se restablezca el balance hidráulico que tuvo lugar antes de la lluvia (Mendoza-Salgado *et al.*, 2006).

Las ventilas hidrotermales localizadas en dos sitios del margen occidental de la bahía, aportan algunos elementos disueltos como As, Ba, Hg y Mn, además de algunos minerales que precipitan en las áreas adyacentes, entre los que destacan los estromatolitos constituidos de sílice y carbonatos de calcio y enriquecidos en los oligoelementos mencionados (Prol-Ledesma *et al.*, 2004; Canet *et al.*, 2004, 2005; Forrest *et al.*, 2005). Las fuentes termales de la playa Santispac y playa El Coyote se ubican en la costa plana a pocos metros del mar. Presentan la temperatura del fluido de hasta 62°C y son afectadas por las mareas (Cruz-Orozco *et al.*, 1991).

Otra área de la actividad hidrotermal se encuentra sobre la falla tectónica denominada El Requesón (Greene y Forrest, 2002; Prol-Ledesma, 2003; Blanco-Florido *et al.*, 2006). En ella, las descargas hidrotermales se presentan en la zona intermareal de la costa. También existen emisiones submarinas de gases y aguas hidrotermales a profundidades entre 5 y 15 m. La temperatura del fluido en el área de descarga submarina varía de 50°C en la interfase agua-sedimentos a 87°C dentro de la columna sedimentaria (a 10 cm de la superficie de los sedimentos). Al comparar la

composición química de las aguas hidrotermales de esta zona con la del agua de mar de la bahía se observa, que las primeras son más diluidas en los componentes mayoritarios, pero están enriquecidas en elementos menores, así como en varios oligoelementos y silicatos (Prol-Ledesma *et al.*, 2004).

2.2. Muestreo y análisis

2.2.1. Muestreo de sedimentos y material terrígeno

Se recolectó un total de 158 muestras de sedimentos marinos, mediante una draga Van Veen, del 16 al 20 de octubre del 1997 en Bahía Concepción y del 6 al 8 de octubre del 1998 fuera de esta bahía frente al estuario Mulegé. Adicionalmente se tomaron 24 muestras de material terrígeno en los cauces o desembocaduras de los arroyos y una muestra del material de la costra de la pared de la fuente hidrotermal de la playa Santispac (Figura 1).

El material extraído se colocó en bolsas de plástico y se almacenó en hielo hasta su traslado al laboratorio.

2.2.2. Preparación de las muestras y análisis

El sedimento recolectado se secó a 60°C y se fraccionó para el análisis granulométrico y químico (carbono total, carbono orgánico, elementos mayoritarios y oligoelementos). Mediante la técnica de Folk (1974) se determinó el tamaño de grano de la fracción arenosa y se calculó el grado de clasificación. Para ello, se emplearon tamices con un intervalo de 0.5 Φ y un equipo Rotap (Sieve Shaker, Mod. RX86, serie 19042).

Los contenidos del carbono total (C_{tot}) y carbono orgánico (C_{org}) en la submuestra seca de los sedimentos se determinaron por el método de combustión a la temperatura de 600°C en el flujo de oxígeno descrito en Ljutsarev (1987). El carbono inorgánico (C_{inorg}) se calculó por la diferencia de los contenidos de C_{tot} y C_{org} . Los contenidos de C_{inorg} se usaron para calcular la contribución del carbonato de calcio mediante la relación estequiométrica. La exactitud del método fue controlada a través el uso de los materiales de referencia estándar de los sedimentos, siendo mejor del 1.5%. La precisión se determinó analizando las series de los análisis ciegos por triplicado y se obtuvo un error estándar menor al 8.5%.

Los contenidos de los elementos mayoritarios (%) y oligoelementos ($mg\ kg^{-1}$) se obtuvieron por medio de dos técnicas: (i) método del análisis por activación neutrónica (As, Ba, Br, Ca, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, K, lantánidos, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Ta, Th, U y Zr); (ii) espectrofotometría de absorción atómica con flama: aire-acetileno (Cd, Cu, Ni, Pb y Zn). En ambos casos, el sedimento y el material terrígeno fue homogenizado en morteros de ágata para trabajar con la fracción menor a 200 μm . En el método de análisis por activación neutrónica las muestras junto con materiales de referencia fueron irradiadas con neutrones termales (flujo $2.8 \times 10^{13}\ n\ s^{-1}\ cm^{-2}$) (Shumilin *et al.*, 2005). Los estándares empleados fueron de sedimento marino IAEA-356 y

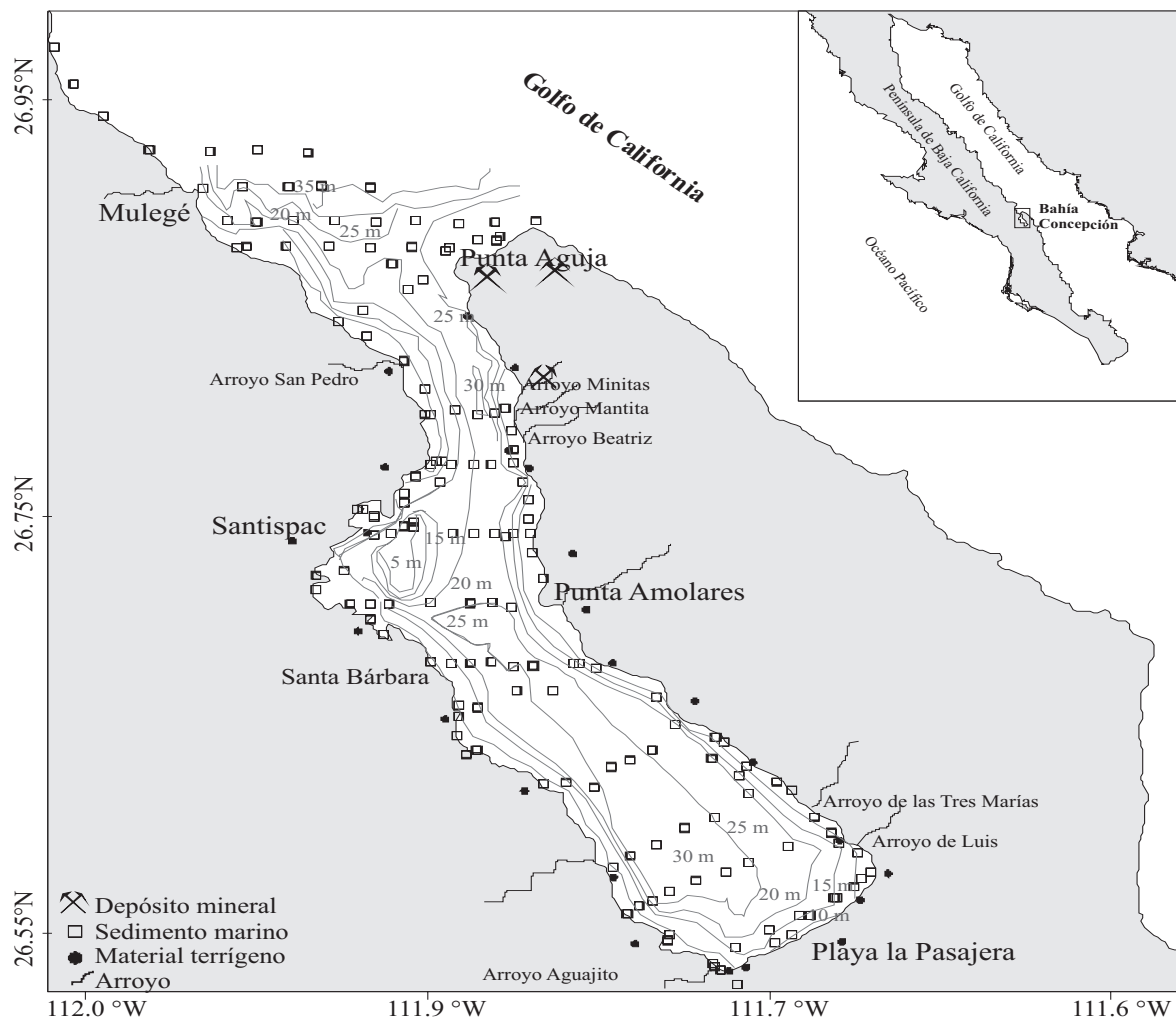


Figura 1. Localización de las estaciones de recolecta de sedimentos y material terrígeno en Bahía Concepción.

SD-N-1/2 de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1985; Horvat *et al.*, 1994).

La exactitud del análisis del estándar IAEA-356 fue 0.6% para Cr, 12% para Hf, 4% para U y 23% para Zr, mientras del estándar SD-N-1/2 fue 1.4% para Fe, 4.9% para Ca, 32% para As, 3% para Ba, 9% para Co, 7.5% para Cs, 11.8% para Rb, 3.3% para Sb, 1.6% para Sc, 15% para Se, 20% para Sr, 17% para Ta y 2.9% para Th. La precisión fue 2-5% para Co, Cr, Fe, La, Sc, Sm y Eu; 5-8% para Ce, Yb, Lu y 8-10% para Ca, Cs y Tb.

La determinación de elementos por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) consistió en la digestión con 5 ml de la agua regia, formada por la mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado en la proporción de una a tres, de 0.5 g de sedimentos o del material terrígeno en contenedores de teflón con su calentamiento a 120°C por aproximadamente 4 horas. La solución se aforó con agua desionizada a 25 ml y la concentración de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn se midió con un espectrofotómetro de absorción atómica (flama aire-acetileno), marca Buck Scientific modelo 200A. Los materiales de referencia certificados

empleados fueron NIST 1646a (Sedimento estuarino, Instituto Nacional de Estándar y Tecnología, E.U.A) y PACS-2 (Sedimento marino, Consejo Nacional de Investigación, Canadá). La exactitud analítica fue 24% for Cd, 8% for Cu, 9% for Ni, 11% for Pb y 22% for Zn y la precisión de las determinaciones por EAA fue mejor que 10%.

La concentración del mercurio en los sedimentos se determinó por EAA con flama fría como fue descrito por Kot *et al.* (1999) con la exactitud y precisión de 10%.

A partir de la concentración de los elementos se construyó su distribución espacial en los sedimentos de la bahía con el programa SURFER 7.4 (Surface Mapping System, Golden Software, Inc. 2003). Para identificar las anomalías geoquímicas de los elementos en los sedimentos y relacionarlas con sus posibles fuentes y procesos de aporte, se calculó el factor de enriquecimiento (FE), usando el Sc como elemento normalizador (Salomons y Förstner, 1984).

Se aplicó la ecuación

$$FE = \frac{([El]/[Sc])_{muestra}}{([El]/[Sc])_{corteza}}$$

donde $[E]$ representa la concentración de cada elemento (mg kg^{-1}) y $[Sc]$ (mg kg^{-1}) en los sedimentos de la bahía o abundancia promedio en la corteza continental respectivamente (Taylor, 1964; Chester, 2003). El escandio fue seleccionado a causa de alta precisión y exactitud de su determinación en los sedimentos por INAA y típicamente más altos coeficientes de correlación entre Fe y Sc versus Fe y Al en las partículas de la zona costera de la parte occidental del Golfo de California (Rodríguez-Castañeda, 2008).

El análisis de componentes principales (ACP) y de factores se empleó para conocer las agrupaciones de los elementos (Danielsson *et al.*, 1999).

3. Resultados y Discusión

3.1. Granulometría

El tamaño de grano de los sedimentos de Bahía Concepción varía de arena muy gruesa a muy fina, con mayor predominancia de arena media y fina moderadamente clasificada.

El intervalo de la media del phi (X_0) fue de -0.98 (arena muy gruesa) a 3.28 (arena muy fina). La arena fina a muy fina correspondía a la porción central de la bahía, donde se observan las mayores profundidades (> 25 m) y bajas velocidades del flujo de agua, condiciones que favorecen la depositación del material fino (Figura 2). Este último tipo de sedimento también se encontró en la boca, quizás como resultado de la presencia de pequeñas cuencas profundas (~ 20 m).

La arena gruesa a muy gruesa se observó al sur de la boca de la bahía (cerca de playa Santispac) y en zonas adyacentes a la línea de costa. Aparte de abundantes gruesos fragmentos calcáreos, el material terrígeno grueso es abundante en la zona costera a causa de su descarga después de las lluvias torrenciales del verano por la presencia de fenómenos meteorológicos (huracanes y tormentas tropicales). Otro factor que probablemente podría contribuir es el aporte eólico, que se ve favorecido por las condiciones desérticas que fragmentan las rocas de la cuenca.

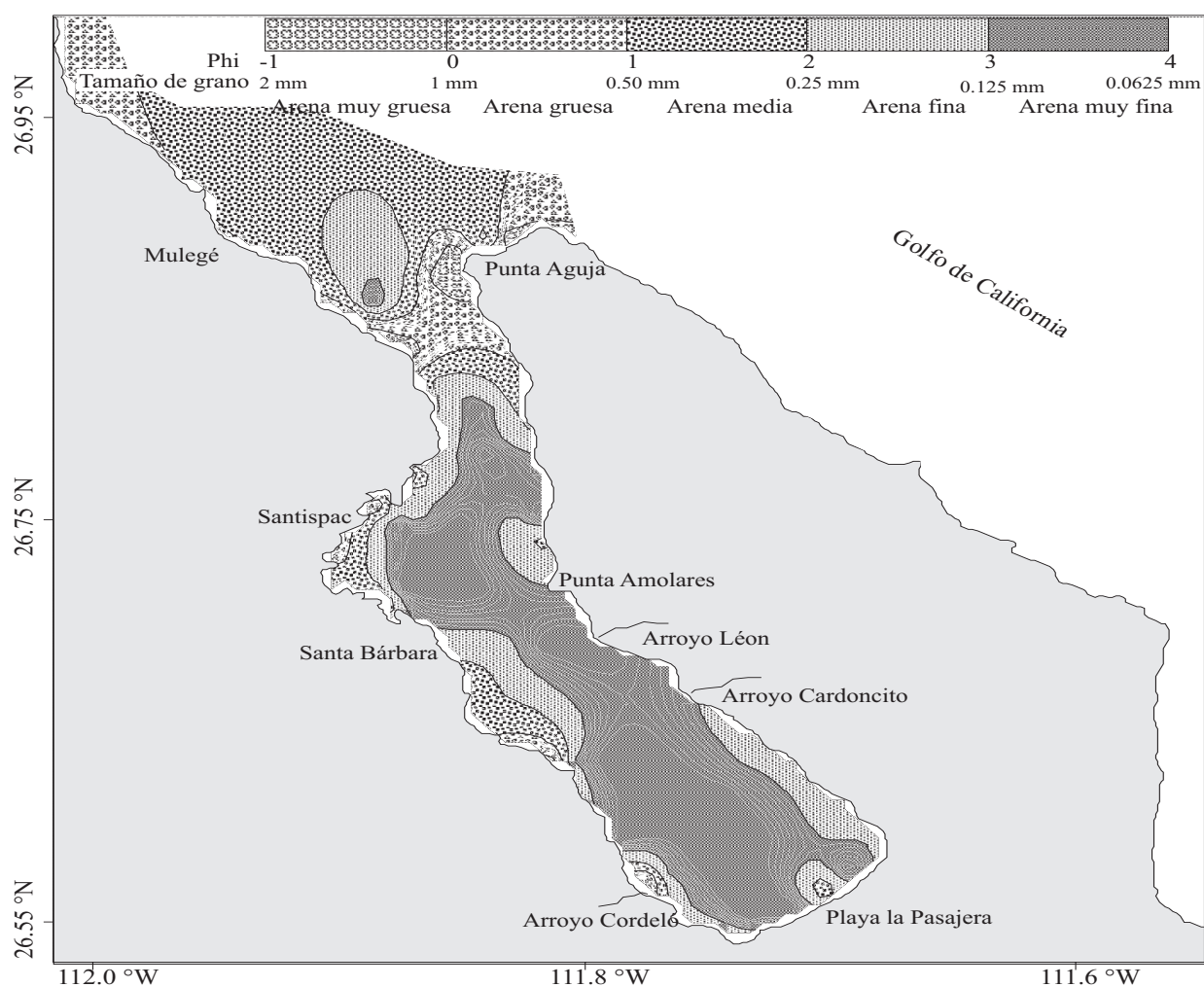


Figura 2. Distribución espacial del tamaño de grano de los sedimentos de Bahía Concepción

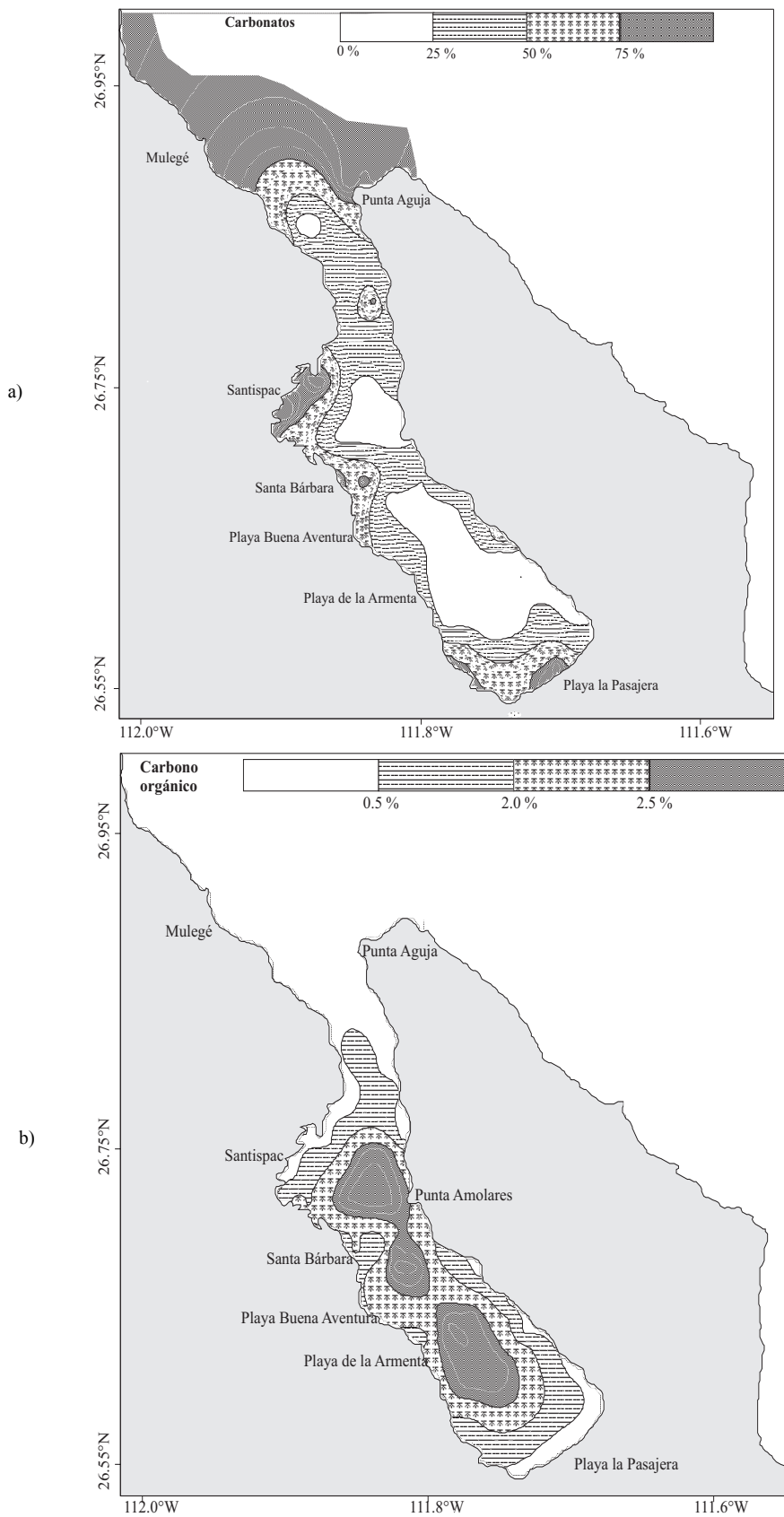


Figura 3. Distribución espacial de las concentraciones (%) de diferentes formas del carbono en los sedimentos superficiales de Bahía Concepción: a) carbonatos; b) carbono orgánico.

El patrón de la distribución del tamaño de grano en este estudio fue semejante a las distribuciones obtenidas por otros autores (Cruz Orozco *et al.*, 1991; Pérez Soto, 1995, 1998; Motolinía Hidalgo, 1996; Meldahl *et al.*, 1997; González Yajimovich y Pérez Soto, 1998).

3.2. Niveles y distribución espacial de las concentraciones de los componentes en los sedimentos

La Tabla 1 presenta los datos de concentración promedio de los componentes mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos marinos, el material terrígeno de la zona de arroyos de Bahía Concepción y sus abundancias promedio en la corteza continental (Taylor, 1964). Los datos originales para cada estación de muestreo se pueden recibir en forma electrónica del primer autor.

3.2.1. Componentes mayoritarios: carbonatos y carbono orgánico

Los carbonatos de calcio fueron el componente biogénico con mayor abundancia en los sedimentos de la bahía y de la parte adyacente costera del Golfo de California (rango de 5% a 96% y promedio 41%). La distribución espacial de los contenidos de CaCO_3 en los sedimentos superficiales revela los mayores valores frente al estuario Mulegé y a lo largo de la costa occidental al sur de la boca de la bahía, en las playas Santispac, Santa Bárbara y El Remate (Figura 3a). Al contrario, el carbono orgánico tuvo sus mayores contenidos (>2%) en la parte central más profunda de Bahía Concepción, ocupada por sedimentos más finos (Figura 3b).

3.2.2. Elementos mayoritarios y oligoelementos

El contenido de Ca en los sedimentos de la Bahía Concepción osciló de 3% a 22% con un promedio de 10%, que sobrepasó el valor de referencia (4.15%) de la corteza continental (Taylor, 1964). Es un elemento asociado principalmente con el carbonato de calcio biogénico y es abundante en las zonas de alto contenido de este componente mayoritario, sobretodo en los sedimentos frente a Punta Aguja, playa Santispac y playa la Pasajera (Rodríguez-Meza, 2005). En cambio, en las zonas con mayor contribución de material terrígeno (fragmentos de rocas, cantos rodados) el nivel de Ca en los sedimentos fue bajo.

En verano los fenómenos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes contribuyen con los mayores aportes de los materiales sólidos de procedencia continental desde las costas de la bahía, donde destaca la presencia de algunos yacimientos minerales de hematita, limolita y otros enriquecidos en Fe (CRM, 1999). La distribución espacial de la concentración de Fe indica que los sedimentos con más de 4.5% se localizaron en la porción oriental de la bahía, frente a la desembocadura de los arroyos Beatriz y de las Tres Marías, al norte de la boca de la bahía en la costa occidental frente al estuario Mulegé y en los sedimentos finos de la porción central de la bahía (Rodríguez-Meza, 2005). Un patrón similar de

la distribución espacial en los sedimentos de la bahía se observó para los contenidos del escandio, los lantánidos y otros elementos terrígenos (Rodríguez-Meza, 2005).

Las distribuciones espaciales de las concentraciones de los componentes y elementos ya descritos y los del resto de los elementos en los sedimentos superficiales de la Bahía Concepción (Rodríguez-Meza, 2005) permitieron identificar tres patrones específicos los cuales podrían agruparlos por las zonas de acumulación en común. El primer patrón se caracteriza por las mayores concentraciones de As, Ba, Ca, Hf, Rb, Sb y Th en los sedimentos de la porción este de la bahía adyacente a la Península Concepción, donde se tienen algunos depósitos minerales y existen numerosos arroyos. En particular, la distribución espacial de As, cuya concentración promedio en el sedimento fue de 8.3 mg kg^{-1} , llegó a sobrepasar el valor de referencia (1.8 mg kg^{-1}) en más de 4 veces (Tabla 1), lo cual indica que es abundante en este ambiente. Las concentraciones por arriba de 20 mg kg^{-1} As, tanto en los sedimentos como en el material terrígeno, se encontraron adyacentes a Punta Blanca (Arroyo León) y Punta San Ignacio (Arroyo Cardoncito) de la porción este de la bahía (Figura 4).

El segundo patrón muestra la acumulación de carbono orgánico, Br, Co, Cr, Cu, Hf, Ni, Se, Ta, U, Zn y Zr en los sedimentos frente al estuario Mulegé y de la zona de mayor profundidad (25 m a 30 m) a lo largo del eje central de la bahía. Esta última zona se caracteriza por la predominancia en los sedimentos de las arenas finas a muy finas enriquecidas en C_{org} (> 3.5%), que mostraron más altos contenidos de Br, Co, Cr, Cu, Hf, Ni, Se, Ta, U, Zn y Zr (Rodríguez-Meza, 2005). Estos elementos presentan una alta afinidad a las partículas finas del sedimento y al carbono orgánico, probablemente producido por el fitoplanctón en la columna del agua y depositado al fondo. Entre ellos sobresale el Zn, que presentó en los sedimentos concentraciones por arriba de los 60 mg kg^{-1} en la porción central de la bahía, así como frente al estuario Mulegé (Figura 5) que es una fuente importante de este grupo de elementos. En este sentido también destacan los sedimentos de los arroyos Santo Domingo, Minitas y León con un alto contenido de Zn (> 90 mg kg^{-1}).

El tercer patrón se define por la presencia en los sedimentos de abundantes restos de los organismos calcáreos tales como los fragmentos de conchas de moluscos bivalvos y gasterópodos, corales, testas de foraminíferos planctónicos, los campos de rodolitos de organismos libres y algas coralinas (Shumilin *et al.*, 1996; Meldahl *et al.*, 1997; Forrest *et al.*, 2002). Esto ocurre en las áreas someras de la costa occidental (playa Santispac, playa Santa Bárbara, playa la Pasajera, El Remate, Isla Requesón, Punta Aguja, Punta Concepción, así como el área frente al arroyo Cordeló y al estuario Mulegé). Aquí se observan mayores concentraciones de Cd, Pb y Sr en los sedimentos probablemente a causa de la sustitución de Ca por Sr o Pb durante la formación biogénica de carbonato de Ca (Figuras 3 y 6). Se sabe que la estructura de CaCO_3 (calcita o aragonita) permite fácilmente sustituir

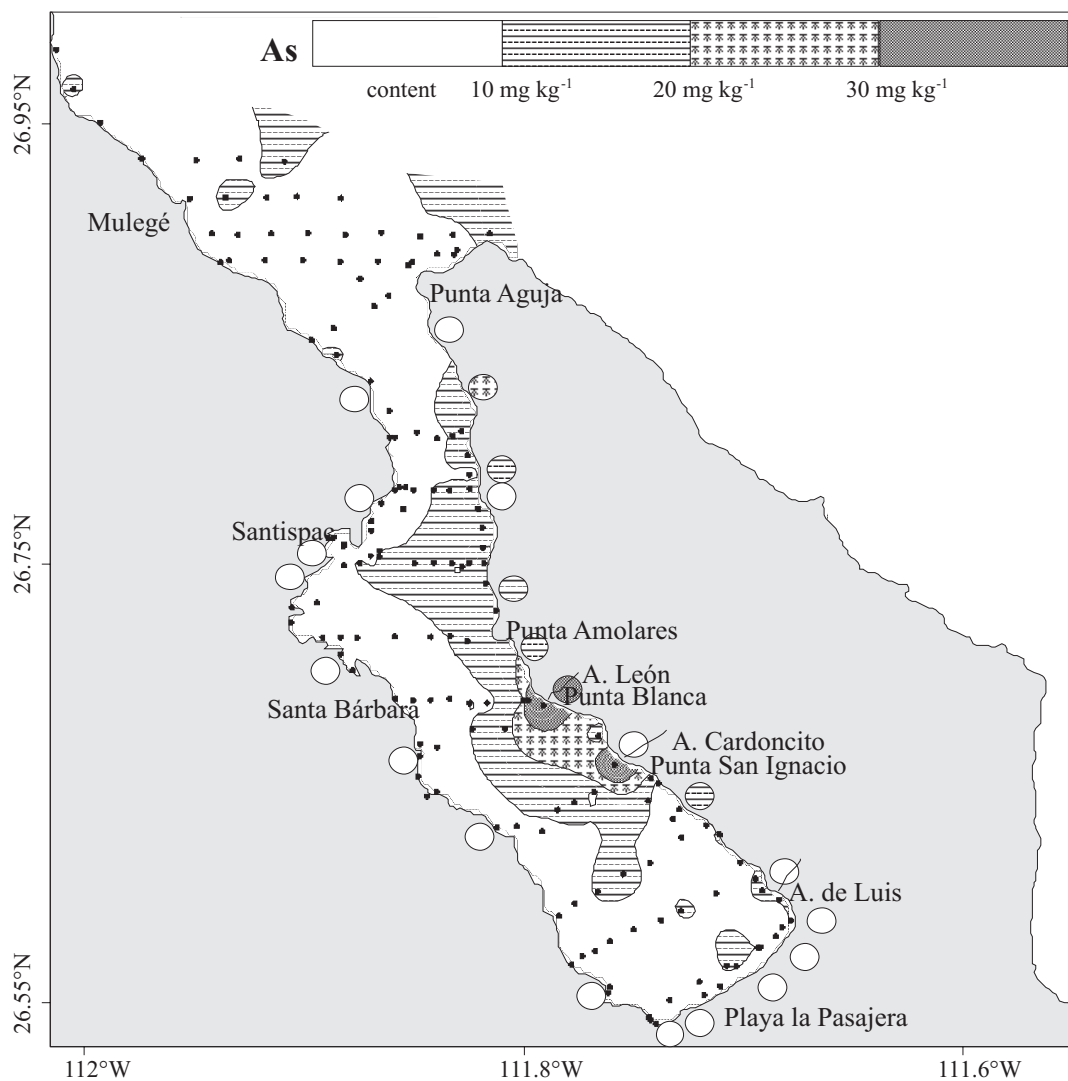


Figura 4. Distribución espacial del contenido de As (mg kg^{-1}) en los sedimentos de Bahía Concepción

los cationes de Ca^{2+} por los cationes de Cd^{2+} , Sr^{2+} y Pb^{2+} (Boyle, 1994; Mottl *et al.*, 1998). Los contenidos promedio de dichos elementos en los sedimentos de Bahía Concepción sobrepasaron los datos para sus abundancias promedias en la corteza terrestre (Taylor, 1964), confirmando la existencia de gran actividad biológica en el fondo marino de este cuerpo de agua. Otra fuente local que probablemente ha contribuido con el abastecimiento de carbonatos en el fondo, son las ventilas hidrotermales, dado que se ha reportado la precipitación en estas zonas de calcita autógena con posible coprecipitación de algunos oligoelementos antes mencionados (Blanco-Florido *et al.* 2006).

López-Cortés *et al.* (2003) señalan que en Bahía Concepción la composición química del agua favorece el desarrollo de la biomasa planctónica (Gárate-Lizárraga *et al.*, 2004) dado que aumentan los niveles de nutrientes que a su vez son asimilados y transformados en compuestos orgánicos por autótrofos, fotoautótrofos y bacterias (Valiela, 1984). El excedente de material orgánico en los sedimentos

de este cuerpo costero (valor promedio 2%) con respecto a otros sistemas como los sedimentos del complejo lagunar Magdalena-Almejas (promedio 0.3%) propicia la liberación de sulfuro de hidrógeno al oxidarse la materia orgánica, lo que genera un ambiente subóxico o anóxico de finales de verano a mediados de otoño (Lechuga-Deveze *et al.*, 2001).

En general, se considera que el crecimiento de especies planctónicas en la bahía y el aporte de material terrígeno de los alrededores, donde destacan algunos yacimientos minerales de Cu y Mn, contribuyen a la incorporación de Br, Co, Cr, Cu, Fe, Hf, Ni, Se, Ta, U, Zn y Zr en los sedimentos marinos de esta bahía, sobretudo en su porción central. Lacerda (1994) indica que los florecimientos algales contribuyen a la formación de complejos de los oligoelementos disueltos con sustancias húmicas marinas que a su vez interactúan con los precipitados, detritus biogénico, compuestos de azufre, otros materiales sólidos orgánicos e inorgánicos (minerales arcillosos) (Salomons y Förstner, 1984).

El material de la costra, que rodea el manantial de playa

Tabla 1. Concentración promedio y desviación estándar de componentes mayores, elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos superficiales (158 muestras) y material terrígeno (25 muestras) de Bahía Concepción

Elemento	Sedimento	Material terrígeno	Corteza continental Taylor (1964)
Componentes mayores			
Carbonatos de calcio (%)	41 ± 28	-	-
C _{org} (%)	2.0 ± 2.0	-	-
Ca (%)	10 ± 6	4.0 ± 1.0	4.2
Fe (%)	3 ± 1	5.0 ± 2.0	5.6
Oligoelementos			
As (mg kg ⁻¹)	8.0 ± 7.0	9.0 ± 11.0	1.8
Ba (mg kg ⁻¹)	310 ± 160	615 ± 170	425
Br (mg kg ⁻¹)	20 ± 21	0.2 ± 0.3	2.5
Cd (mg kg ⁻¹)	4 ± 2	-	0.2
Co (mg kg ⁻¹)	17 ± 48	19 ± 7.0	25
Cr (mg kg ⁻¹)	71 ± 53	101 ± 81	100
Cs (mg kg ⁻¹)	2.0 ± 1.0	3.0 ± 3.0	3
Cu (mg kg ⁻¹)	20 ± 11	-	55
Hf (mg kg ⁻¹)	2.0 ± 0.9	3.0 ± 0.8	3.0
Hg (mg kg ⁻¹)	0.04 ± 0.02	-	0.08
Ni (mg kg ⁻¹)	30 ± 9	92 ± 56	75
Pb (mg kg ⁻¹)	31 ± 10	-	12.5
Rb (mg kg ⁻¹)	18 ± 10	22.0 ± 15.0	90
Sb (mg kg ⁻¹)	0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.7	0.2
Sc (mg kg ⁻¹)	10.0 ± 5.03	17.0 ± 6.0	22
Se (mg kg ⁻¹)	2.4 ± 2.0	1.0 ± 1.0	0.05
Sr (mg kg ⁻¹)	1400 ± 840	529 ± 176	375
Ta (mg kg ⁻¹)	0.02 ± 0.1	0.4 ± 0.3	2.0
Th (mg kg ⁻¹)	1.0 ± 1.0	2.0 ± 0.7	9.6
U (mg kg ⁻¹)	2.0 ± 1.0	1.0 ± 1.0	2.7

* Los espacios con un guión o raya corta corresponden a los componentes u oligoelementos no analizados

Santispac, muestra concentraciones muy elevadas de As (1650 mg kg⁻¹). Una alta concentración de As en dicha zona puede ser asociada a la descarga del fluido hidrotermal, altamente enriquecido en este elemento y su coprecipitación con los minerales inorgánicos que forman la costra. Esto coincide con los resultados de Prol-Ledesma *et al.* (2004) quienes reportan elevadas concentraciones de As (10.4 μmol kg⁻¹) en muestras hidrotermales con respecto a las del agua de mar circundante (~15 nmol kg⁻¹ As). El arsénico es abundante no sólo en depósitos hidrotermales, pero también se asocia a la presencia de rocas magmáticas y volcánicas (pirita sedimentaria o la arsenopirita, FeAsS), que en Bahía Concepción es posible observar por la afloración de la Formación Comondú.

La presencia de 25 cuencas de drenaje parece ser un factor importante en la geoquímica de los sedimentos, dado que se observó un alto contenido de As, Ba, Co, Fe, lantánidos, Rb, Sb y Th en los sedimentos adyacentes al estuario

Mulegé, en los de la porción este (yacimientos minerales) y en los localizados frente a la playa la Pasajera. Dada la localización de estos puntos y a la escasa actividad humana en la zona, es factible considerar la presencia de una fuente natural debido a la predominancia de rocas volcánicas y metamórficas de la Formación Comondú, así como de yacimientos minerales (Pilares, Las Mantitas, La Trinidad) con vestigios de Mn y Cu (SGM, 2002).

Similares resultados fueron obtenidos por Shumilin *et al.* (1996) en su estudio de prospección, debido a que observaron un enriquecimiento de los sedimentos de la costa oriental con Co (> 10 mg kg⁻¹), Sc (> 13 mg kg⁻¹), As (> 10 mg kg⁻¹), Hf (> 5 mg kg⁻¹), Th (> 2 mg kg⁻¹) y U (> 2 mg kg⁻¹). Algunos de estos elementos posiblemente proceden o están bajo la influencia de los depósitos minerales Pilares (Cu), Guadalupe o La Trinidad y Las Mantitas (Mn) (CRM, 1999), y que están caracterizados por los contenidos elevados de Co, Cu, Fe, Mn y Ni.

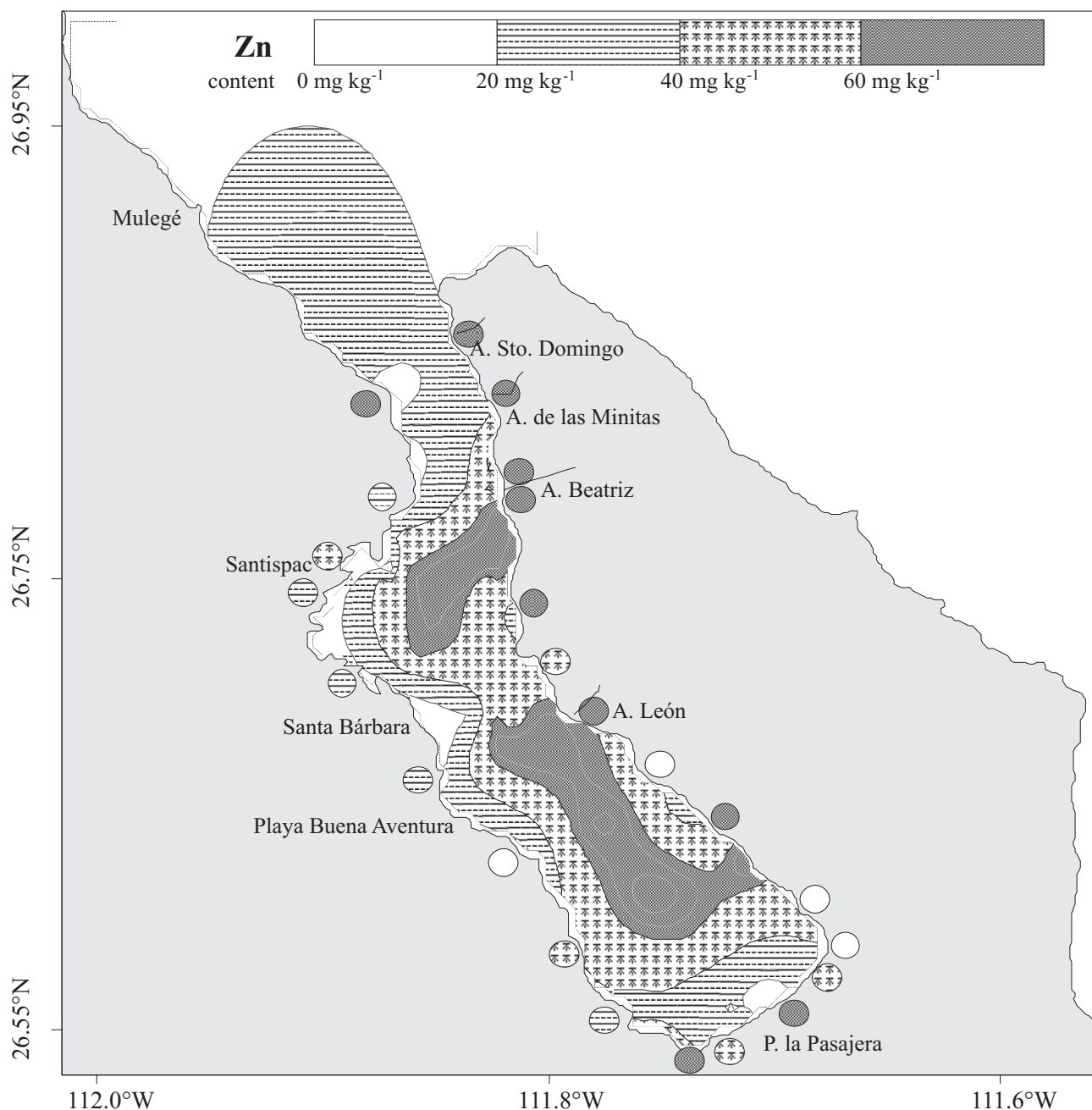


Figura 5. Distribución espacial de la concentración de Zn (mg kg^{-1}) en los sedimentos superficiales de Bahía Concepción

Lo anterior, relacionado con la presencia de manganita, calcopirita, hematina, limonita, como ganga de cuarzo, calcita, magnetita y óxidos de hierro y cobre; los cuales son minerales que provienen de los yacimientos minerales que caracterizan la porción oriental de la bahía (SGM, 2002).

A pesar que poco se conoce de los lantánidos, Fleet (1983) indica que los depósitos hidrotermales contribuyen a su enriquecimiento, sin embargo su concentración disminuye por la influencia de material biogénico, como la calcita, que es de las fases sólidas formadas una vez que el fluido hidrotermal

alcanza el piso marino. Probablemente, esto ocurre en Bahía Concepción debido que en las zonas con manifestaciones hidrotermales el contenido de carbonato de calcio fue alto, y se observó no sólo la dilución del contenido de lantánidos sino también del resto de los elementos (Tabla 1).

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que las características geoquímicas de los sedimentos de la Bahía Concepción son controladas por el aporte de material terrígeno procedente de las rocas volcánicas, también en forma importante por los yacimientos minerales

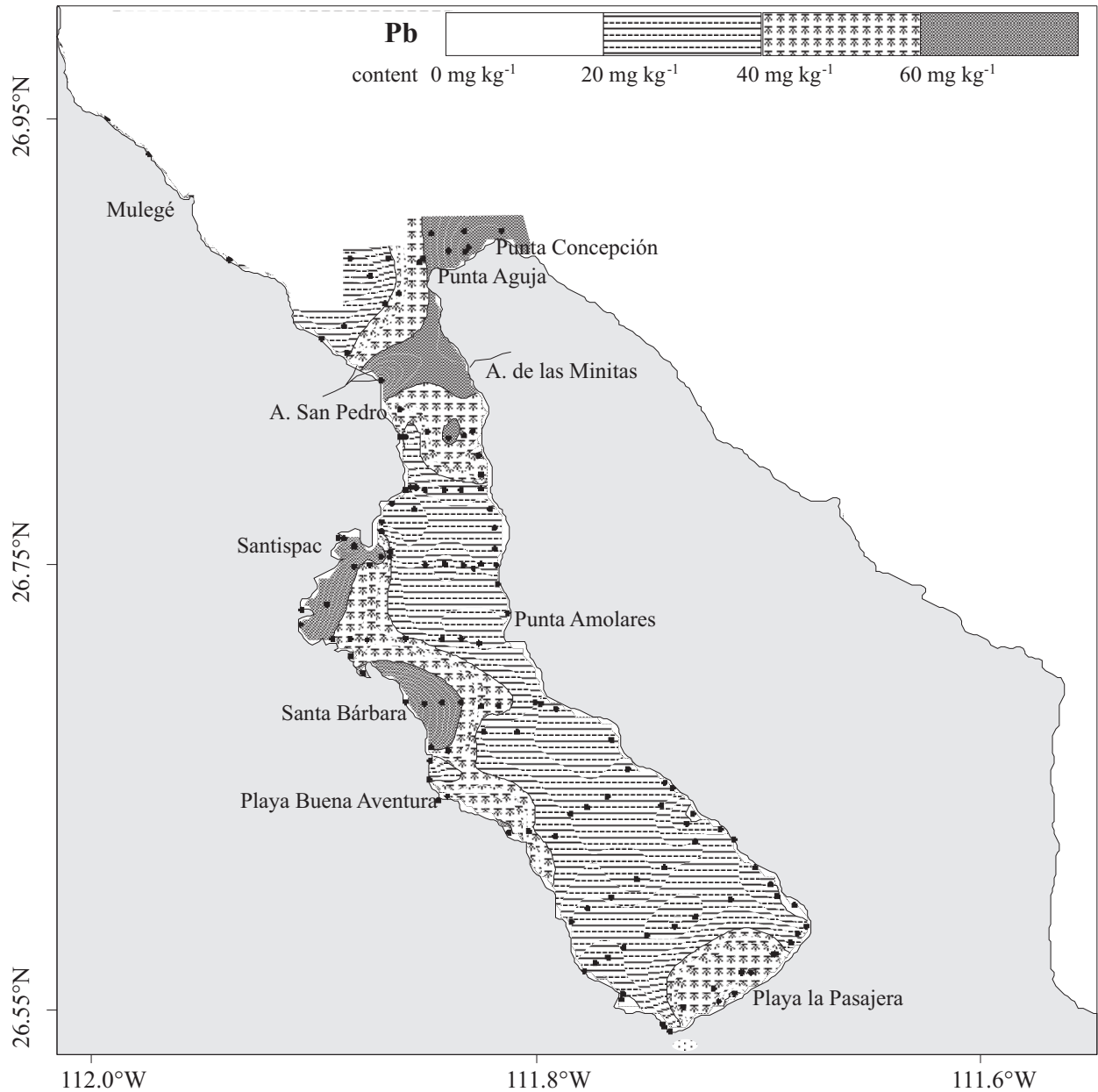


Figura 6. Distribución espacial de la concentración de Pb (mg kg^{-1}) en los sedimentos de Bahía Concepción

de la porción oriental, en su mayoría activos durante los fenómenos meteorológicos que contribuyen con el arrastre de grandes cantidades de material continental; por la productividad biológica en la columna del agua y, en menor grado, por introducción de algunos elementos a causa de la actividad hidrotermal (As, Ba, Ca, Cs, Fe, Hg, Rb y Sr) (Prol-Ledesma *et al.*, 2004).

La concentración de la mayoría de oligoelementos en los sedimentos obtenida en el presente estudio comparada con las reportadas para otras localidades adyacentes a la Península de Baja California, permite considerar a la Bahía Concepción como ambiente prístino semejante al complejo

lagunar Magdalena-Almejas, Bahía Loreto y Bahía Vizcaíno (Rodríguez-Meza, 2005; Rodríguez-Meza *et al.*, 2007). En los sedimentos de la Bahía Concepción los contenidos promedio de As (10 mg kg^{-1}), Ba (301 mg kg^{-1}), Cd (4 mg kg^{-1}), Sb (0.4 mg kg^{-1}) y U (2 mg kg^{-1}) fueron cercanos a los encontrados por Rodríguez-Meza (1999) para los sedimentos de la Laguna de La Paz afectada por los aportes del material fosfático. Los niveles de Se (3 mg kg^{-1}), Sb (0.4 mg kg^{-1}) y U (2 mg kg^{-1}) son similares a los reportados para las lagunas Ojo de Liebre y Guerrero Negro (Choumiline *et al.*, 2000), donde resultados reflejan la influencia del material volcánico de la cuenca de drenaje (Ba, Sb y Se).

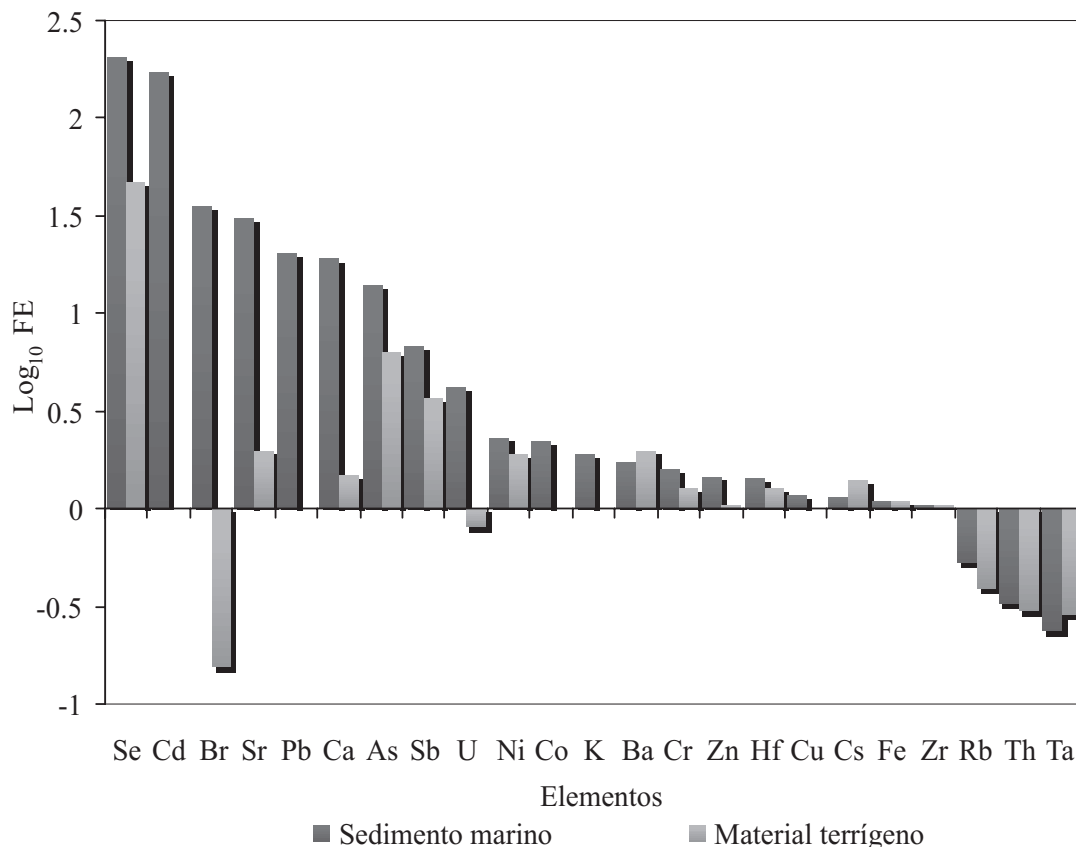


Figura 7. Factores de enriquecimiento promedio de los elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos superficiales y material terrígeno de Bahía Concepción

3.3. Asociaciones de los elementos en los sedimentos de Bahía Concepción

Los resultados de la aplicación del ACP a la matriz de los datos sobre los contenidos de los componentes y elementos en los sedimentos de la bahía muestran que un 78% de la varianza puede ser explicada por cuatro factores: F1 (44%), F2 (20%), F3 (7%) y F4 (7%) (Tabla 2).

Al observar las cargas altas de diferentes elementos en los factores presentados en esta tabla, se puede distinguir algunas asociaciones, definidas por la influencia de carbono orgánico, carbonatos de calcio y del material continental.

El Factor 1 muestra altas cargas positivas (> 0.5) para Ba, Cs, Cu, Fe, Hf, los lantánidos, Rb, Sc, Th, U y Zn (asociación I) y altas cargas negativas para Ca, CaCO₃, Cd y Pb (asociación II). La asociación I incluye los elementos del origen terrígeno, típicamente incorporados en la matriz de los aluminosilicatos. La peculiar acumulación de los elementos de esta asociación es elevada en los sedimentos marinos de las zonas adyacentes a los depósitos minerales de oxihidróxidos de Fe, Mn y Cu de la porción oriental (CRM, 1999) y frente al estuario de Mulegé. La asociación II corresponde a los carbonatos de calcio muy abundantes en

los sedimentos de la bahía, así como a Cd y Pb, conocidos por su afinidad a los carbonatos y posibilidad de ser incorporados dentro los componentes calcáreos biogénicos.

El Factor 2 revela las altas cargas positivas para Br, Cd, C_{org}, Cu, Hg, Hf, Ni y Zn (asociación III) y las cargas altas negativas para Ca y CaCO₃ (parte de la asociación II). La asociación III en su mayoría se presenta por los elementos con la posibilidad de ser incluidos a la materia orgánica producida por la fotosíntesis, mientras Ca y CaCO₃ es probable que actúen como diluyentes biogénicos. Es muy importante subrayar que la asociación III reúne los componentes biogénicos (C_{org}, Br, el micronutriente Cd que participa en el fotosíntesis), los elementos con alta afinidad a la materia orgánica como Cu y Hg, así como Ni, posiblemente adsorbido por las partículas finas o incorporado igual a Fe y Sc a su matriz de los aluminosilicatos o coprecipitado con oxihidróxidos de Fe y Mn. La asociación III, controlada por la presencia del C_{org}, es bastante común en los sedimentos de varias bahías y lagunas marinas. En particular, la relación de C_{org} con Cu y Ni recientemente fue mostrada para la materia particulada en hundimiento, recolectada en la Cuenca Alfonso de la Bahía de La Paz (Rodríguez-Castañeda, 2008).

El Factor 3 muestra las cargas altas positivas para Se,

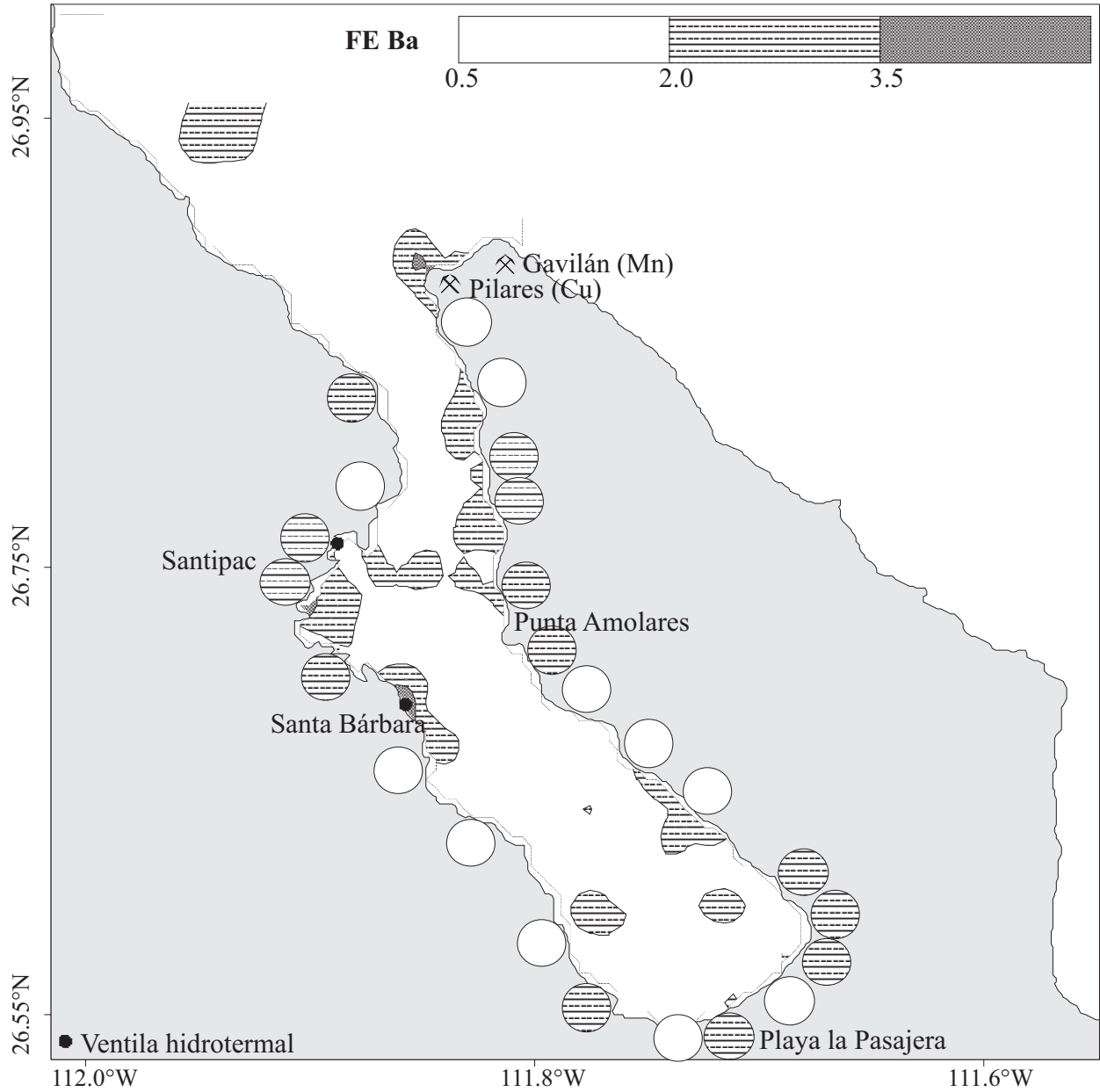


Figura 8. Distribución espacial de los factores de enriquecimiento de bario en los sedimentos superficiales de Bahía Concepción.

Ta y Zr y las cargas altas negativas para Sb. El factor 4 indica cargas altas positivas para Co y Cr. Todavía es difícil interpretar estos factores, los cuales posiblemente reflejan la influencia de los aportes de los productos de erosión de las rocas volcánicas o de los depósitos específicos en último caso.

3.4. Factores de enriquecimiento de elementos en sedimentos

Los resultados de los cálculos de los valores promedios del factor de enriquecimiento (FE) de los elementos en los sedimentos marinos y material terrígeno de la Bahía

Concepción se presentan en la Figura 7.

A partir de los valores promedios del factor de enriquecimiento (FE), en Bahía Concepción se diferencian cuatro grupos de elementos: (i) altamente enriquecidos (As, Ca, Cd, Pb, Se y Sr); (ii) enriquecidos (Co, Ni, Sb y U); (iii) elementos no enriquecidos (Ba, Cr, Cs, Cu, Fe, Hf, K, Zn y Zr) y (iv) empobrecidos (Rb, Ta y Th).

El primer grupo incluye As, Ca, Cd, Pb, Se y Sr, altamente enriquecidos debido que sus FEs promedios fueron mayores de 10 (14-204). Los valores más altos se obtuvieron en los sedimentos adyacentes a los depósitos minerales cerca de la boca de la bahía, así como frente a las playas de

Tabla 2. Resultado del análisis de factores para los datos de concentración de elementos en los sedimentos superficiales de Bahía Concepción.

Elemento o Componente	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 3
As	0.43	0.09	-0.48	-0.22
Ba	0.82	0.03	0.09	0.25
Br	0.11	0.81	0.08	-0.11
Ca	-0.74	-0.55	0.06	0.10
CaCO ₃	-0.79	-0.53	-0.07	0.09
Cd	-0.58	0.60	0.27	0.00
Ce	0.93	0.15	-0.06	0.12
Co	0.18	-0.13	-0.34	0.79
C _{org}	0.15	0.97	0.07	-0.07
Cr	0.17	0.15	0.33	0.81
Cs	0.71	0.38	-0.33	0.19
Cu	0.58	0.72	0.06	-0.34
Eu	0.85	0.18	0.12	0.08
Fe	0.94	0.16	0.01	0.14
Hg	0.16	0.81	-0.10	0.23
Hf	0.73	0.59	0.01	0.07
La	0.90	0.18	-0.10	0.19
Lu	0.78	-0.09	0.14	-0.11
Na	0.34	0.77	-0.17	0.16
Nd	0.94	0.09	0.01	0.01
Ni	-0.17	0.89	0.17	0.16
Pb	-0.87	-0.21	-0.03	0.07
Rb	0.65	0.19	0.21	-0.36
Sb	0.44	-0.01	-0.58	-0.08
Sc	0.93	0.19	0.04	0.20
Se	0.22	0.28	0.66	-0.06
Sm	0.93	0.09	0.03	-0.03
Sr	-0.41	-0.62	-0.20	0.14
Ta	0.49	0.15	0.64	-0.24
Tb	0.95	0.00	0.05	-0.08
Th	0.80	0.31	0.01	-0.41
U	0.52	0.20	-0.29	0.15
Yb	0.81	-0.08	0.13	-0.09
Zn	0.61	0.69	0.02	-0.24
Zr	0.27	0.11	0.60	0.24
Var. Expl.	15.25	7.03	2.53	2.35
Prp. Total	0.44	0.20	0.07	0.07

Santispac y Santa Bárbara, donde son abundantes los carbonatos de calcio (> 50%). En el material terrígeno sólo destacó Se con un FE promedio de 47. Algunos de los elementos que constituyen este grupo y que son considerados de importancia ambiental (As, Cd, Pb y Se), también se asocian a los carbonatos (Ca, Cd, Pb y Sr). Sin embargo, dados los valores obtenidos, exceptuando ya mencionados procesos biológicos involucrados en la formación de los fragmentos calcáreos, se considera que varios de estos elementos

proceden de fuentes relacionadas con la presencia de depósitos minerales tales como los óxidos de Fe y Mn (Pilares, Guadalupe y Mantitas) en la porción oeste de la Península Concepción (CRM, 1999). Además hay que añadir la influencia de dos ventilas hidrotermales, una en la playa Santispac (subaérea), y la otra, submarina que se encuentra al sur de la playa Santa Bárbara (Greene y Forrest, 2002; Prol-Ledesma *et al.*, 2004; Forrest *et al.*, 2005). Es importante mencionar esta particularidad debido a que la distribución espacial del FE de los elementos de este grupo mostró valores altos adyacentes a los depósitos en la boca de la bahía y en las zonas donde están las ventilas hidrotermales (Rodríguez-Meza, 2005).

El segundo grupo está constituido por Co, Ni, Sb y U moderadamente enriquecidos en los sedimentos con los valores del FE promedios en un rango entre 2 y 7, mientras en el material terrígeno fueron As, Ba y Sb. En ambos casos la procedencia se asocia a los fluidos hidrotermales debido que valores altos en los sedimentos coincidieron con los puntos donde se manifiestan, las playas Santispac y Santa Bárbara.

El tercer grupo presentan Ba, Cr, Cs, Cu, Fe, Hf, K, Zn y Zr, los cuales son elementos, denominados no enriquecidos, debido a que el FE estimado osciló de 1 a 2, resultado similar para los sedimentos de la bahía y material terrígeno. Las distribuciones espaciales de los FEs de los elementos de este grupo (Rodríguez-Meza, 2005) indican que la posible fuente de los elementos a la bahía es el aporte continental debido a que los sedimentos con valores por arriba de 2 se observaron en la zona de arroyos intermitentes de la porción oriental (Rodríguez-Meza, 2005). Canet *et al.* (2005) reportaron que alrededor de los manantiales o ventilas hidrotermales se forman mineralizaciones de Mn-Ba-Hg, como resultado del aporte de los fluidos hidrotermales y su interacción con el agua marina, los sedimentos y rocas encajonantes. En la bahía, la distribución espacial del factor de enriquecimiento de Ba indica que sus elevados valores se observan en los sedimentos de la playa Santispac y en la porción oriental donde se encuentran los yacimientos minerales (Figura 8).

Los elementos del cuarto grupo (Rb, Ta y Th) muestran promedios de FE menores a 1 tanto en los sedimentos, como en el material terrígeno. En este último también los FE promedios de Br y U fueron menores a 1, lo que confirma que sus enriquecimientos en los sedimentos de la Bahía Concepción se deben a los procesos biogeoquímicos que ocurren en este ecosistema.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. González Yajimovich (Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Ensenada, Baja California) por proporcionar las muestras de material terrígeno de los arroyos principales que descargan en la Bahía Concepción. El estudio en su fase final fue apoyado por el proyecto de SIP IPN clave 20080825

“Geoquímica de los elementos traza en los sedimentos de los ambientes contrastantes del Golfo de California” (enero-diciembre de 2008) y por el proyecto CONACyT-Ciencia Básica CB -2005-01-50421 “Evaluación del papel del zooplancton y material particulado en biogeoquímica de los elementos traza en la región central del Golfo de California”.

Referencias bibliográficas

- Anikiev, V.V., Perepelitsa, S.A., Shumilin, E., 1994, Effects of man-made and natural sources on the heavy-metal patterns in bottom sediments in the Gulf of Peter the Great, Sea of Japan: *Geochemistry International*, 31, 73-85.
- Blanco-Florido, D., Canet, C., Camprubí, A., Prol-Ledesma, R. M., Bán-cora, C., Villanueva-Estrada, R. E., Rodríguez-Díaz, A. A., 2006, Caracterización de las mineralizaciones asociadas a manantiales hidrotermales costeros en Bahía Concepción, Baja California Sur (resumen): *Boletín de Mineralogía*, 17, 17-18.
- Boyle, E., 1994, Isotopic and elemental tracers in calcium carbonate fossils: *Mineralogical Magazine*, 58A, 111-112.
- Caccia, V.G., Millero, F.J., 2007, Distribution of yttrium and rare earths in Florida Bay sediments: *Marine Chemistry*, 104, 171-185.
- Caccia, V.G., Millero, F.J., Palanques, A., 2003, The distribution of trace metals in Florida Bay sediments: *Marine Pollution Bulletin*, 46, 1420-1433.
- Camprubí, A., Canet, C., Rodríguez-Díaz, A.A., Prol-Ledesma, R.M., Blanco-Florido, D., Villanueva, R.E., López-Sánchez, A., 2008, Geology, ore deposits, and hydrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico: *The Island Arc*, 17, 6-25.
- Chester, R., 2003, *Marine Geochemistry*: London, Unwin Hyman.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., Torres-Alvarado, I., Gilg, H. A., Villanueva, R. E., Lozano-Santa Cruz, R., 2004, Silica-carbonate stromatolites related to coastal hydrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, México: *Sedimentary Geology*, 174, 97-113.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Proenza, J., Rubio-Ramos, M.A., Forrest, M.J., Torres-Vera, M.A., Rodríguez-Díaz, A.A., 2005, Mn-Ba-Hg mineralization at shallow submarine hydrothermal vents in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico: *Chemical Geology*, 224, 96-112.
- Choumiline, E., Windom, H., Smith, R., Grajeda, M., Gódinez-Orta, L., Sapozhnikov, D., Mironenko, M., Derkachev, A., Nikolayeva, N., 2000, Estudio piloto de los oligoelementos en los sedimentos de las Lagunas Ojo de Liebre, Guerrero Negro y estanques de concentración de la empresa Exportadora de Sal: La Paz, B.C.S. México, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Departamento de Oceanología, Informe Técnico Final, 254 p.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1999, *Monografía Geológico-Minera del Estado de Baja California Sur*, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Pachuca, Hidalgo.
- Cruz-Orozco, R., Godínez-Orta, L., Nava-Sánchez, E. H., Solís-Nuñez, S.L., 1991, Algunos aspectos geológicos de Bahía Concepción, B.C.S: *Oceanotas*, no.2, 1 p.
- Danielsson, A., Cato, I., Carman, R., Rahm, L., 1999, Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/Kattegat: *Applied Geochemistry*, 14, 689-706.
- Dressler, R., 1981, Preliminary knowledge of hydro-static summer conditions within Bahía Concepción, Baja California: *Ensenada, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*.
- Félix-Pico, E., Sánchez, R. S., 1976, Tercer informe final del programa de orientación técnica para el aprovechamiento de los recursos naturales existentes y prácticas de maricultivo en Bahía Concepción y Ensenada de La Paz: *Secretaría de Recursos Hidráulicos*.
- Fleet, A. J., 1983, Hydrothermal and hydrogenous ferro-manganese deposits: do they form a continuum? The rare earth element evidence, in Rona, P. A., Boström, K., Laubier, L., Smith, K. L. (eds.), *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*: New York, Plenum Press, 535-555.
- Folk, R. L., 1974, *Petrology of Sedimentary Rocks*: Austin, U.S.A., Hemphill Publishing Co.
- Forrest, M. J., Greene, H. G., Foster, M. S., 2002, Cartografía en detalle de capas de rodolitos en Bahía Concepción, Baja California Sur, México por medio de radas de barrido lateral (resumen), en VI International Meeting on Geology of the Baja California Peninsula: La Paz, Baja California Sur, México.
- Forrest, M.S., Ledesma-Vázquez, J., Ussler W., III, Kulongoski, J.T., Milton, D.R., Greene, H.G., 2005, Gas geochemistry of a shallow submarine hydrothermal vent associated with El Requesón fault zone in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico: *Chemical Geology*, 224, 82-95.
- Gárate-Lizárraga, I., Bustillos-Guzmán, J. J., Alonso-Rodríguez, R., Luckas, B., 2004, Comparative paralytic shellfish toxin profiles in two marine bivalves during outbreaks of *Gymnodinium catenatum* (Dinophyceae) in the Gulf of California: *Marine Pollution Bulletin*, 48, 397-402.
- Gilmartin, M., Revelante, N., 1978, The phytoplankton characteristics of the barrier island lagoons of the Gulf of California: *Estuarine and Coastal Marine Science*, 7, 29-47.
- González-Yajimovich, O.E., Pérez Soto, J.L., 1998, Patrón de dispersión de sedimentos modernos de Bahía Concepción, Baja California Sur. Resúmenes de Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias de UNAM, México, D.F.
- Greene, H. G., Forrest, M. J., 2002, Emanación hidrotermal de gases en aguas someras a lo largo de una falla sobre y fuera de la costa; Bahía Concepción, Baja California Sur, México y su influencia en la geología y biología del fondo marino (resumen), en VI International Meeting on Geology of the Baja California Peninsula: La Paz, Baja California Sur.
- Horvat, M., Mee, L.D., Oregoni, B., 1994, World-wide and regional inter-comparison for the determination of trace elements in polluted marine sediment IAEA-356. International Atomic Energy Agency, Marine Environmental Laboratory-MESL Report No.56, September 1994, p.10.
- Internacional Atomic Energy Agency (IAEA), 1985, Intercomparison of trace element measurements in marine redimem simple SD-N-1/2. Report No 24, Laboratory of Marine Radioactivity, 70 p.
- Kot, F.S., Green-Ruiz, C., Páez-Osuna, F., Shumilin, E., Rodríguez-Meza, D., 1999, Distribution of mercury in sediments from La Paz Lagoon, Peninsula of Baja California, Mexico: *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 63, 45-51.
- Lacerda, L., 1994, Biogeochemistry of heavy metals in coastal lagoons, in Kjerfve, B. (ed), *Coastal Lagoon Processes*: Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 221-241.
- Lechuga-Devéze, C.H., Morquecho-Escamilla, M.L., Reyes-Salinas, A., Hernández-Alfonso, J.R., 2000, Environmental natural disturbances at Bahía Concepción, Gulf of California, in Munawar, M., Lawrence, S.G., Munawar, I.F., Malley, D.F. (eds). *Aquatic Ecosystems of Mexico. Status and Scope*: Leiden, Ecosivision World Monograph Series, Backhuys Publishers, 245-255.
- Lechuga-Devéze, C. H., Reyes-Salinas, A., M. L. Morquecho-Escamilla, 2001, Anoxia in a coastal bay: case study of a seasonal event: *Revista de Biología Tropical*, 49, 525-534.
- Ledesma-Vazquez, J., Johnson, M. J., 2001, Miocene-Pleistocene tectono-sedimentary evolution of Bahía Concepción región, Baja California Sur (Mexico): *Sedimentary Geology*, 144, 83-96.
- Ljutsarev, S. V., 1987, La determinación del carbono orgánico en los sedimentos marinos por oxidación seca: *Okeanologiya (Soviet Oceanology)*, 26, 704-708 (en ruso).
- López-Cortés, D. J., Gárate-Lizárraga, I., Bustillos-Guzmán, J. J., Alonso-Rodríguez, R., Murillo-Murillo, I., 2003, Variabilidad del estado trófico y la biomasa del fitoplancton de Bahía Concepción, Golfo de California (1997-1999): *Hidrobiología*, 13, 195-206.
- Martínez-López, A., Gárate-Lizárraga, I., 1994, Cantidad y calidad de la materia orgánica particulada en Bahía Concepción, en la temporada de reproducción de la almeja catarina *Argopecten circularis* (Sowerby, 1835): *Ciencias Marinas*, 20, 301-320.

- Mateo-Cid, L. E., Sánchez-Rodríguez, I., Rodríguez-Montesinos, Y. E., Casas-Valdez, M. M., 1993, Estudio florístico de las algas marinas bentónicas de Bahía Concepción, B.C.S., México: Ciencias Marinas, 19, 41-60.
- McFall, C. C., 1968, Reconnaissance geology of the Concepcion Bay area Baja California Mexico: Stanford University Publications, Geological Sciences, 10 (5), 1-25.
- Meldahl, K.H., González-Yajimovich, O.E., Empedocles, C.D., Gustafson, C., Motolinia Hidalgo, M., Reardon, T.W., 1997, Holocene sediments and molluscan faunas of Bahía Concepción: A modern analogue to Neogene rift basins of the Gulf of California, in Johnson, M.E., Ledezma-Vázquez, J. (eds), Pliocene Carbonates and Related Facies Flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 318, 39-56.
- Mendoza-Salgado, R.A., Lechuga-Devéze, C.H., Ortega-Rubio, A., 2006, Influence of rainfall on a subtropical arid zone coastal system: Journal of Arid Environments, 66, 247-256.
- Motolinia Hidalgo, J.M., 1996, Características granulométricas de los sedimentos modernos de Bahía Concepción, Baja California Sur, México: Ensenada, B.C., México, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Tesis de Licenciatura.
- Mottl, M.J., Wheat, C.G., Baker, E., Becker, N., Davis, E., Feely, R., Grehan, A., Kadko, D., Lilley, M., Massoth, G., Moyer, C., Sansone, F., 1998, Warm springs discovered on 3.5 Ma oceanic crust, eastern flank of the Juan de Fuca Ridge: Geology, 26, 51-54.
- Palomares-García, R., Martínez-López, A., Garate-Lizarraga, I., 2002, Plankton community changes during the warm season in Bahía Concepcion, Mexico: Oceanides, 17, 113-128.
- Pérez-Soto, J. L., 1995, Volumen de sedimento drenado a Bahía Concepción, Baja California Sur, México (1922-1988): Ensenada, B.C., México, Universidad Autónoma de Baja California, Tesis de Licenciatura.
- Pérez-Soto, J. L., 1998, Origen y patrón de dispersión de sedimentos superficiales, en Bahía Concepción, Baja California Sur, México: Ensenada, B.C., México, Universidad Autónoma de Baja California, Tesis de Maestría.
- Prol-Ledesma, R. M., 2003, Similarities in the chemistry of shallow submarine hydrothermal vents: Geothermics, 32, 639-644.
- Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Torres-Vera, M. A., Forrest, M. J., Armienta, M. A., 2004, Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 137, 311-328.
- Rodríguez-Castañeda, A. P., 2008, Variación de los flujos de los elementos particulados en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, en el periodo 2002-2005: La Paz, Baja California Sur, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, Tesis Doctoral.
- Rodríguez-Meza, G. D., 1999, Metales pesados en sedimentos de la Ensenada de La Paz, B.C.S., México: La Paz, Baja California Sur, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, Tesis de Maestría.
- Rodríguez-Meza, G.D., 2005, Caracterización geoquímica por componentes mayores y elementos traza de sedimentos de los ambientes marinos costeros adyacentes a la península de Baja California: La Paz, Baja California Sur, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional, Tesis Doctoral.
- Rodríguez-Meza, D., Choumiline, E., Méndez-Rodríguez, L., Acosta-Vargas, B., Sapozhnikov, D., 2007, Composición química de los sedimentos y macroalgas del complejo lagunar Magdalena-Almejas, en Funes-Rodríguez, R., Gómez-Gutiérrez, J., Palomares-García, R. (eds.), Estudios ecológicos en Bahía Magdalena: La Paz, B.C.S., México, Instituto Politécnico Nacional, 61-81.
- Rodríguez-Romero, J., Abitia-Cárdenas, L. A., Galván-Magaña, F., Chávez-Ramos, H., 1994, Composición, abundancia y riqueza específica de peces de Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico: Ciencias Marinas, 20, 321-350.
- Salomons, W., Förstner, U., 1984, Metals in the Hydrocycle: Heidelberg, Springer-Verlag.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2002, Carta Geológico-Minera. Loreto G12-5. Baja California Sur, Secretaria de Economía, Pachuca, Hidalgo. 1 Hoja.
- Shumilin, E., Gódinez-Orta, L., Cruz-Orozco, R., Sapozhnikov, D., Solís-Núñez, S., Sapozhnikov, Y., 1996, Características litológico-geoquímicas de los sedimentos superficiales de Bahía Concepción, B.C.S.: Actas INAGEQ, 2, 79-84.
- Shumilin, E., Rodríguez-Meza, G. D., Sapozhnikov, D., Lutsarev, S., Murrillo de Nava, J., 2005, Arsenic concentrations in the surface sediments of the Magdalena-Almejas Lagoon complex, Baja California Peninsula, Mexico: Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 74, 493-500.
- Solís Núñez, S.L., Cruz-Orozco, R., Godínez-Orta, L., Nava Sánchez, E., Shumilin, E., 1997, Composición mineralógica de los sedimentos superficiales de Bahía Concepción, Golfo de California. VI Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés A.C., Febrero 1997, Mazatlán, Sinaloa, México. Resúmenes, p.76.
- Taylor, S. R., 1964, Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table: Geochimica et Cosmochimica Acta, 28, 1273-1285.
- Valdés, J., Vargas, G., Sifeddine, A., Ortlieb, B., Guiñez, M., 2005, Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23° S), Northern Chile: Geochemical and statistical approach: Marine Pollution Bulletin, 50, 1558-1568.
- Valiela, I., 1984, Marine Ecological Processes: New York, Springer-Verlag.
- Villalejo-Fuerte, M., Ochoa-Báez, R. I., 1993, El ciclo reproductivo de la almeja catarina, *Argopecten circularis* (Sowerby, 1835) en relación con temperatura y fotoperiodo, en Bahía Concepción, B.C.S., México: Ciencias Marinas, 19, 181-202.

