

Estudio geoquímico de siete muestras de las formaciones fosfáticas del sur de la península de Baja California, México

Alejandro Alvarez Arellano¹ y Federico Páez Osuna²

¹Departamento de Geología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, Baja California Sur.

²Estación Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Mazatlán, Sinaloa.

Recibido: 16 de abril, 1994; aceptado: 21 de febrero, 1995.

RESUMEN

Se presenta la composición geoquímica de siete muestras de fosforitas y sedimentos fosfáticos colectadas en las formaciones terciarias San Raymundo y San Gregorio y en una duna reciente del sur de la península de Baja California. La composición promedio del material analizado (número de muestras, n=7) es: P₂O₅ 30.5% (82.3% como apatita), materia orgánica (como pérdidas por ignición) 2.0%, CaO 24.0%, Cd 12 ppm, Co 12 ppm, Cr 342 ppm, Cu 17 ppm, Mn 60 ppm, Ni 23 ppm, V 60 ppm y Zn 80 ppm. Las relaciones y variaciones geoquímicas revelan que la arena fosfática reciente puede proceder de la erosión y redepositación de las fosforitas. La relación Cu/Zn y los niveles de Mn sugieren que hubo diferencias en las condiciones redox de los ambientes de formación de los materiales fosfáticos estudiados.

PALABRAS CLAVE: Geoquímica, fosforitas, metales pesados, Baja California.

ABSTRACT

Geochemical data are presented for seven samples of phosphorites and phosphatic sediments collected from the San Raymundo and San Gregorio Formations and one recent dune from the south of the Peninsula of Baja California. The average composition of the material analyzed (number of samples, n=7) is: P₂O₅ 30.5% (82.3% as apatite), organic matter (as lost on ignition) 2.0%, CaO 24.0%, Cd 12 ppm, Co 12 ppm, Cr 342 ppm, Cu 17 ppm, Mn 60 ppm, Ni 23 ppm, V 60 ppm and Zn 80 ppm. The geochemical relationships and variations reveal that the recent phosphatic sands may originate by erosion and redeposition of the phosphorites. The ratio Cu/Zn and levels of Mn suggest that the redox conditions of the formation environments were different for the phosphatic material studied.

KEY WORDS: Geochemistry, phosphorites, heavy metals, Baja California.

INTRODUCCION

Los yacimientos fosfatados del sur de la península de Baja California abarcan desde el Terciario hasta el Reciente (D'Anglejan, 1967; Galli-Olivier *et al.*, 1990). Actualmente se explotan las areniscas fosfáticas de la Formación San Gregorio (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) en San Juan de la Costa, Baja California Sur, y se han identificado otras capas sedimentarias fosfáticas terciarias en Tembabi-che, San Hilario, La Purísima y San Raymundo, Baja California Sur. Además se han explorado arenas fosfáticas de edad Plio-Pleistoceno y Reciente en la margen costera occidental del sur de la península (Alvarez-Arellano, 1992; Mavrer-Romero, 1992).

En este estudio examinamos la composición geoquímica de sedimentos de las formaciones fosfáticas San Gregorio y San Raymundo en el sur de la península de Baja California y su variabilidad química con el propósito de dilucidar las afinidades geoquímicas entre las distintas localidades, así como su relación con las extensas arenas fosfáticas de las dunas vecinas.

GEOLOGIA

Las muestras de fosforita analizadas corresponden estratigráficamente a las formaciones San Raymundo (Mioceno Medio) (Mina, 1957) y San Gregorio (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) (Hausback, 1984) cuya litología consiste de una alternancia de areniscas tobáceas, lutitas, fangolitas, areniscas conglomeráticas y capas de fosforita intercaladas. Son formaciones muy fosilíferas particularmente en sus ca-

pas fosfóricas. Sobreyacen a estas formaciones la Formación San Isidro (Mioceno Medio) y la Formación Comon-dú (Mioceno Superior) y las subyace la Formación Tepe-tate (Paleoceno-Eoceno) (Hausback, 1984).

La Formación San Raymundo contiene característicamente partículas fosfáticas oolíticas de poco más de 1 mm de diámetro. Esta formación aflora sobre una amplia superficie del centro-norte del estado de Baja California Sur (BCS). Las fosforitas de la Formación San Gregorio también contienen oolíticas fosfáticas pero menores de 1 mm de diámetro; afloran sobre un extenso territorio del centro y centro-sur de BCS. Petrográficamente las fosforitas corresponden a areniscas con textura clástica oolítica con matriz de material terrígeno y cementados por calcita microcristalina. La exoganga está formada principalmente por partículas finas de cuarzo y plagioclasas, y la endoganga por partículas de cuarzo, micas, plagioclasas, fragmentos de roca y microfósiles (Machorro-Jiménez, 1991; Prieto-Mendoza, 1991). Por lo anterior, el material fosfático puede ser clasificado como predominantemente silíceo. Otras dos muestras correspondieron a material sedimentario de arenas fosfatadas no consolidadas, una procedente de un depósito de duna reciente de la margen costera suroccidental de la península caracterizada por Alvarez-Arellano (1992) como una región con arenas de concentraciones altas de fósforo y la otra procedente del concentrado minero que obtiene la empresa Roca Fosfórica Mexicana (ROFOMEX) al procesar fosforitas de la Formación San Gregorio en la localidad de San Juan de la Costa, aproximadamente 50 km al norte de la ciudad de La Paz. Este concentrado se obtiene al triturar la fos-

forita, tamizarla para eliminar los fragmentos gruesos y finalmente flotar las arenas fosfáticas separándolas del material muy fino.

METODOLOGIA

Las localizaciones de los sitios de colecta de las siete muestras se dan en la Tabla 1 (Figura 1). En todas las muestras se determinó el contenido de materia orgánica (MO), y las concentraciones de P, Fe, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, V y Zn. Una vez en el laboratorio el material fue molido y secado (90°C a peso constante) para su análisis. La materia orgánica se estimó por medio de las pérdidas por ignición a una temperatura de 550°C (Páez-Osuna *et al.*, 1984). La determinación analítica del fósforo fue realizada por un método espectrofotométrico mediante el procedimiento del azul de fosfomolibdeno (Páez-Osuna *et al.*, 1991); el fósforo y los metales fueron extraídos del material sedimentario con HNO₃/HCl (3/1 volumen/volumen) después de la ignición a 550°C (Aspila *et al.*, 1976) y una vez en la disolución ácida éstos fueron cuantificados. Las concentraciones de los metales pesados en las muestras fueron determinadas a la flama en un espectrofotómetro de absorción atómica (Shimadzu AA-630-12). La confiabilidad del método empleado fue verificada mediante el análisis de una muestra de referencia de sedimento SDN-1/2 propor-

cionada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1985). Con excepción del Co, la concordancia entre los resultados analíticos para la muestra de referencia y sus valores certificados fue aceptable. La exactitud expresada como la diferencia en porcentaje de los niveles encontrados con respecto a los de la muestra de referencia y la precisión como desviación estándar (en paréntesis) fueron como sigue: Cu, 11.0% (0.7 ppm); Ni, 6.8% (1.2 ppm); Co, 20.5% (0.9 ppm); Cr, 3.2% (10.0 ppm); Zn, 2.2% (1.4 ppm); Cd, 2.5% (0.6 ppm); Mn, 7.4% (0.8 ppm); Fe, 1.9% (81.7 ppm); V, 10.7% (6.6 ppm). Mayores detalles del procedimiento analítico se presentan en Páez-Osuna y Osuna-López (1990a,b).

Con los datos obtenidos se realizaron correlaciones entre las concentraciones de los componentes de las muestras. Este procedimiento permitió hacer agrupamientos que sugieren afinidades geoquímicas. Las correlaciones fueron ejecutadas con el paquete computacional Statgraphics (Statistical Graphics System, versión 5.0).

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 2 se presentan las concentraciones de los constituyentes analizados. El P, Fe y Ca se presentan en la

Tabla 1
Características generales de las muestras y sus localidades

Muestra	Latitud Norte	Longitud Oeste	Localidad	Formación	Tipo de muestra
A	26° 23'	112° 34'	San Raymundo (a)	San Raymundo	Roca sedimentaria
B	26° 22'	112° 36'	San Raymundo (b)	San Raymundo	Roca sedimentaria
C	26° 11'	112° 02'	La Purísima	San Gregorio	Roca sedimentaria
D	25° 16'	110° 58'	Tembabiche	San Gregorio	Roca sedimentaria
E	24° 21'	110° 40'	San Juan de la Costa	San Gregorio	Roca sedimentaria
F	24° 21'	110° 40'	San Juan de la Costa	San Gregorio	Concentrado
G	24° 14'	111° 16'	Flor de Malva		Arena de duna reciente

(a) Rancho San Antonio, sobre el arroyo San Raymundo; (b) Rancho La Ballena, sobre el arroyo San Raymundo.

Tabla 2
Resultados analíticos de las muestras colectadas en las Formaciones fosfáticas del Sur de Baja California y el promedio general de fosforitas marinas

Muestra	MO%	P ₂ O ₅ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mn ppm	Ni ppm	V ppm	Zn ppm
A	2.73	37.71	0.43	25.66	8	14	245	16	44	21	72	53
B	1.46	23.22	0.77	22.70	9	11	331	20	59	23	65	108
C	2.64	35.27	0.25	26.46	16	12	475	23	95	24	94	60
D	1.33	26.09	1.12	21.58	13	10	324	12	36	20	20	94
E	1.73	28.05	0.82	23.31	14	12	335	16	67	28	28	93
F	1.59	33.38	0.63	26.72	16	11	159	16	230	30	17	100
G	0.37	3.21	0.58	3.05	1	4	15	9	70	7	<1	19
H	2.02	30.47	0.68	23.99	12	12	342	17	60	23	60	80
I	-	-	-	-	18	7	125	75	1230	53	100	195
J	-	26.95	4.43	39.31	-	4	100	73	195	24	223	107
K	-	25.44	4.10	40.12	-	2	88	66	45	29	229	112

MO= Materia orgánica; A-G ver Tabla 1; H, promedio de las muestras de Baja California Sur colectadas en este estudio; I promedio de las fosforitas marinas de 18 regiones del mundo (Altschuler, 1980); J (Point South, n=6), K (Twin Knolls, n=5) Análisis promedio de sedimentos marinos del margen continental de la parte central de California según Mullins y Rasch (1985).

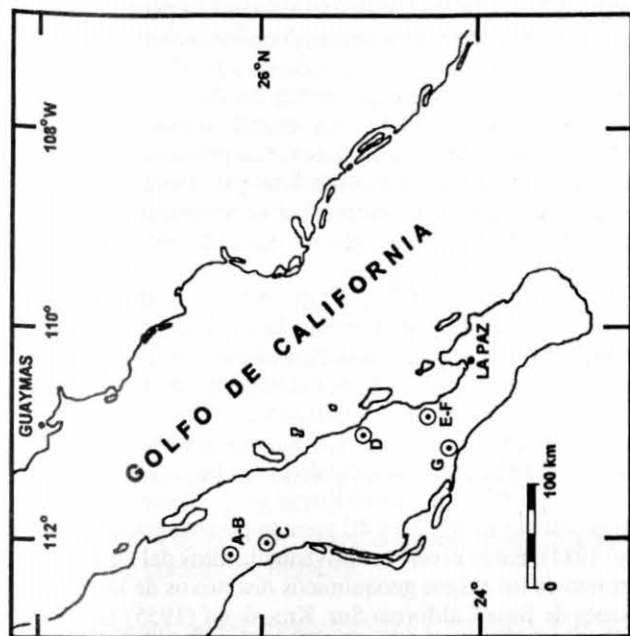


Fig. 1. Localización del área de estudio y de los puntos de muestreo. A y B corresponden a la Formación de San Raymundo; C, D, E y F corresponden a la Formación de San Gregorio; y G a las dunas recientes.

forma equivalente de sus óxidos respectivos P_2O_5 , Fe_2O_3 y CaO para hacerlos comparables a los análisis de otros autores. Las concentraciones de materia orgánica (MO), P_2O_5 , Fe_2O_3 y CaO se expresan en porcentajes y los metales pesados en partes por millón (ppm), ambos con base en peso seco. Las Tablas 3 y 4 muestran los resultados de la correlación entre localidades y la correlación de los constituyentes analizados.

La MO se presentó entre 1.33 y 2.73% para las fosforitas, el valor más bajo fue de 0.37% correspondiente a la muestra de arena de dunas. El contenido de P_2O_5 en las muestras de fosforitas osciló entre 23.2 y 37.7% (62.7 a 100% como apatita), mientras que en la muestra de la arena de dunas la concentración fue de 3.21%. La relación entre MO y la concentración de P_2O_5 tiene una alta correlación (Tabla 4) lo que para el caso de las fosforitas es congruente con la hipótesis de que estas rocas se formaron en mares de alta productividad orgánica (Slansky, 1986). Los metales pesados de mayor concentración encontrados fueron el Cr, Mn y Zn, y los de menor concentración el Cd y el Co. Este comportamiento en general es consistente con el encontrado para material fosfático de otras localidades (e.g. Altschuler, 1980; Slansky, 1986)(Tabla 2).

Cuando se hace un cálculo de la relación CaO/P_2O_5 con los datos analíticos de la Tabla 2, es posible observar que en todas las muestras, los valores son siempre inferiores a uno (0.68-0.98). En las rocas sedimentarias la apatita se presenta usualmente como una variedad carbonato fluorapatita (francolita) (McClellan y Van Kauwenbergh, 1990) con una CaO/P_2O_5 de 1.56. Se ha observado que cuando esta variedad de la apatita es intemperizada, su mineralogía

cambia, reduciéndose la relación CaO/P_2O_5 con una fuerte tendencia hacia la fluorapatita, siendo la calcita parcialmente disuelta (Lucas *et al.*, 1980). De acuerdo con este mismo autor en adición a estos cambios se presenta también una desdolomitización y una argilitización. Los bajos valores de CaO/P_2O_5 en las muestras de las formaciones de Baja California Sur pueden ser interpretados como resultado de una fuerte y/o prolongada intemperización.

Con la traspuesta de la matriz de la Tabla 2 (menos los renglones de H a K) se realizó un análisis de correlación lineal para descubrir similitudes o afinidades geoquímicas entre localidades. Los índices de correlación entre las muestras de las localidades San Raymundo (a y b), La Purísima, Tembabiche y San Juan de la Costa (muestras de la A a la E) son mayores de 0.84 y entre las del concentrado minero y del depósito de dunas recientes (muestras F y G) es de 0.895 (Tabla 3). La afinidad de las muestras de las localidades del primer grupo sugiere que las condiciones tanto paleoceanográficas como diagenéticas para la formación de las rocas fosfáticas terciarias en los antiguos fondos marinos de la región que hoy comprenden el sur de la península fueron muy similares. La afinidad de las dos muestras del segundo grupo tiene otras implicaciones. Su similitud geoquímica sugiere que las arenas de las dunas recientes pudieran contener material fosfático erosionado de las formaciones terciarias y redepositado en ambientes sedimentarios recientes como dunas y playas donde se ha diluido con partículas de cuarzo, feldepatos y otros silicatos. Esto explicaría los relativos bajos niveles de metales y fósforo determinados para esta muestra de dunas.

Tabla 3

Matriz de correlación entre localidades. Solamente se indican los coeficientes de correlación significativos en $P=0.95$.

Localidad	A	B	C	D	E	F	G
A	1	0.983	0.848	0.965	0.970	-	-
B		1	0.979	0.988	0.991	-	-
C			1	0.988	0.978	-	-
D				1	0.995	-	-
E					1	-	-
F						1	0.895
G							1

Tabla 4

Matriz de correlación entre los constituyentes analizados. Solamente se indican los coeficientes de correlación significativos en $P=0.95$.

	MO	P_2O_5	Fe_2O_3	CaO	Co	Cu	Mn	V	Zn
MO	1	0.96	-0.92	0.97	0.84	-	-	0.76	-0.96
P_2O_5		1	-0.80	0.89	0.82	-	-	-	-0.99
Fe_2O_3			1	-0.98	-	-0.76	-	-0.82	0.80
CaO				1	0.77	-	-	0.84	-0.89
Co					1	-	-	-	-0.77
Cr						-	0.88	-	-
Cu						1	0.88	0.85	-

La separación geoquímica de los dos grupos así definidos puede explicarse debido a que en el material rocoso las partículas arenosas fosfatadas están unidas mediante una matriz de grano fino (Machorro-Jiménez, 1991), también muy fosfatizada, que se incluye en el análisis geoquímico, mientras que en la arena, tanto del concentrado minero como de la duna, no se halla presente dicha matriz. Consistente con este planteamiento se observa que en el material que contiene la matriz de grano fino hay una mayor concentración de MO, Cr y V presumiblemente asociados a la fracción sedimentaria más fina (matriz), mientras que en la arena no consolidada aumenta la concentración relativa de Mn, lo que indicaría que este elemento está más asociado a las masas fosfáticas arenosas (ooideos) de las fosforitas.

Para encontrar relaciones o afinidades entre las concentraciones de los constituyentes analizados del primer grupo de materiales (fosforitas) se realizó un análisis de correlación (Tabla 4), del cual se obtuvieron tres agrupamientos de constituyentes con altos índices de correlación positiva entre sus elementos. El primero formado por MO, P₂O₅, CaO, Co y V; el segundo por Cu, Cr y Mn y el tercero por Fe₂O₃ y Zn. El Fe₂O₃ está más asociado a la formación de hidróxidos y arcillas, procesos de ambientes de depósito distintos al de formación de fosforitas, lo que podría explicar la alta correlación negativa entre los grupos uno y tres. Los niveles de Cd y Ni no mostraron correlación significativa con ningún otro elemento ni entre ellos.

Comparando los niveles encontrados de los metales traza respecto a otros materiales sedimentarios fosfáticos (Tabla 2) se observa que son en general del mismo orden de magnitud. Incluso en comparación con arenas metalíferas no fosfáticas del norte de la península (Carranza-Edwards *et al.*, 1988), o con sedimentos terrígenos de lagunas costeras (Rosales-Hoz *et al.*, 1986; Páez-Osuna y Osuna-López, 1987) los niveles son equiparables. Sin embargo, la diferencia con los distintos materiales no fosfáticos estriba en que mientras en los sedimentos lagunares o en las arenas metalíferas, los metales se encuentran en sustituciones parciales y formando parte de la estructura de diversos minerales como hornblenda, ilmenita, hematita, cromita, monazita, magnetita, manganita, etc., en las fosforitas están en forma de sustituciones parciales dentro de la estructura cristalina de la apatita o adsorbidos a la materia orgánica (Krauskopf, 1955; Gulbrandsen, 1966).

En las fosforitas marinas ha sido ampliamente documentado y discutido (e.g. Altschuler, 1980; Kolodny, 1981) el enriquecimiento sustancial de una gran variedad de metales pesados tanto de los elementos de transición como de la serie de los lantánidos y actínidos. De manera general, se tiene que en la mayoría de las rocas sedimentarias de origen marino la abundancia de Zn excede a la del Cd por un factor de varios cientos (Zn/Cd = x100) (Altschuler, 1980) mientras que en las fosforitas se ha observado que el Cd es enriquecido diferencialmente sobre el Zn, encontrándose relaciones Zn/Cd del orden de 10 (Altschuler, 1980). En el caso de las muestras de los materiales fosfáticos del presente trabajo se tiene una relación Zn/Cd de 6.7. Este incre-

mento sustancial de Cd en las fosforitas se puede explicar con base en las propiedades cristalóquímicas y al radio iónico del Cd y Ca que son casi idénticos (0.97 y 0.99 Å respectivamente), mientras que el del ión Zn (0.74 Å) es más pequeño (Moeller, 1961). Así, cuando ambos elementos sustituyen al Ca en la apatita, el Cd es preferentemente incorporado en la estructura cristalina. Este mecanismo también ha sido invocado para explicar el enriquecimiento relativo del U, Sr, Pb y lantánidos (Altschuler, 1980).

En el caso del Ni, V y Cr el enriquecimiento relativo en las fosforitas ha sido relacionado con el acomplejamiento orgánico o adsorción de dichos elementos. De los metales pesados analizados en las muestras de las formaciones de Baja California Sur, sobresale el Cr por sus niveles comparativamente altos (245-475 ppm) en relación a fosforitas de otras regiones del mundo como las de las costas española, namibiana y chilena donde se han encontrado niveles promedio de 49, 37 y 40 ppm respectivamente (Kolodny, 1981). Estos niveles relativamente altos del Cr parecen ser uno de los rasgos geoquímicos distintivos de las formaciones de Baja California Sur. Krauskopf (1955) ha postulado que la incorporación del Cr en las fosforitas ricas en materia orgánica se presenta como Cr(OH)₃.

Finalmente, a partir de los datos de la Tabla 2 se calculó la relación Cu/Zn y se examinó el contenido de Mn para las muestras de fosforita de Baja California Sur, con el fin de emplear los valores como indicadores de las condiciones redox que predominaron en el momento de su formación. Diversos autores (e.g. Manheim, 1961; Buckley y Cranstoun, 1988) han utilizado estos parámetros como herramienta geoquímica para inferir dichas condiciones en la columna sedimentaria.

La relación Cu/Zn es mayor para las fosforitas de La Purísima (muestra C) y San Raymundo (a) (muestra A) (0.38 y 0.30 respectivamente) y menor en las fosforitas de Tembache (muestra D) y San Juan de la Costa (muestra E) (0.12 y 0.17 respectivamente). Dado que el Cu tiende a quelatarse con más facilidad que el Zn en condiciones óxicas, los valores altos de esta relación estarán indicando condiciones más óxicas (Páez-Osuna y Osuna-López, 1987). Por su parte, el Mn tiende a movilizarse hacia la columna de agua en condiciones de agotamiento de oxígeno disuelto en las aguas intersticiales. Por lo tanto, sus concentraciones en la fase sólida también son más elevadas en fondos óxicos (Lynn y Bonatti, 1965; Páez-Osuna y Osuna-López, 1990a). Aunque los niveles encontrados de Mn en las fosforitas de este estudio no son muy contrastantes, el mayor valor se observa en la fosforita de La Purísima (muestra C) (95 ppm) y el menor en la de Tembache (muestra D) (36 ppm), siendo estos resultados congruentes con los encontrados para la relación Cu/Zn. Se puede concluir que las fosforitas de la región La Purísima-San Raymundo se formaron en condiciones menos reductoras que en la región de San Juan de la Costa-Tembache.

CONCLUSIONES

Los metales pesados y el P₂O₅ en las fosforitas de las Formaciones San Raymundo y San Gregorio están en ni-

veles de concentración y proporciones similares, por lo que sus procesos de depósito y diagénesis fueron semejantes. La arena del concentrado minero y la de las dunas recientes, a pesar de que denotan niveles de concentración distintos, mantienen una alta correlación por la similitud de las proporciones. Esta similitud en la composición sugiere la posibilidad de que las arenas fosfáticas de las dunas provengan del redepósito de formaciones terciarias y se encuentren diluidas por diversos minerales silíceos terrígenos (cuarzo, feldespatos, micas, etc).

El P_2O_5 en las fosforitas de las formaciones de Baja California Sur está muy relacionado con los metales pesados asociados. Entre los constituyentes analizados existen agrupamientos bien diferenciados por la alta correlación positiva entre los elementos que los conforman, siendo el más importante el constituido por MO, P_2O_5 , Ca, Co y V, seguido por el grupo de Cu, Cr y Mn y finalmente el formado por el Fe_2O_3 y Zn. Entre el primer y tercer grupo hay una alta correlación negativa.

Finalmente, por el cociente Cu/Zn y los niveles de Mn se infiere que los ambientes de formación de las fosforitas fueron menos reductoras en la región La Purísima-San Raymundo que en la de San Juan de la Costa-Tembabiche.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de H. Bojórquez-Leyva en los análisis químicos de las muestras. El financiamiento para la realización de este estudio se obtuvo a través del Convenio PII-93-05-CM del Programa Institucional de Investigación de la Universidad Autónoma de Baja California Sur. Asimismo, se agradece a tres árbitros de la revista por sus sugerencias y comentarios constructivos sobre una versión anterior de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- ALTSCHULER, Z. S., 1980. The geochemistry of trace elements in marine phosphorites: Part I. Characteristic abundances and enrichment. *In*: Y.K. Bendor (Ed), Marine phosphorites-geochemistry, occurrence, genesis. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, 19-30.
- ALVAREZ-ARELLANO, A., 1992. Las arenas fosfáticas de la zona costera suroeste de la Península de Baja California. Memoria de la I Reunión Internacional sobre Geología de la Península de Baja California. Universidad Autónoma de Baja California Sur, 116 p.
- ASPILA, K.I., H. AGEMIAN y A.S.Y. CHAU, 1976. A semiautomated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst* 101, 1987-197.
- BUCKLEY, D.E. y R.E. CRANSTON, 1988. Early diagenesis in deep sea turbidites: the imprint of paleo-oxidation zones. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2925-2939.
- CARRANZA-EDWARDS, A., L. ROSALES-HOZ y R. LOZANO-SANTACRUZ, 1988. Estudio de metales en arenas de playa de San Antonio del Mar, Baja California, México. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol.*, Univ. Nal. Autón. México, 15, 215-222.
- D'ANGLEJAN, B., 1967. Origin of marine phosphorites off BC, Mexico. *Mar. Geol.* 3, 15-44.
- GALLI-OLIVIER, C., G. GARDUÑO y J. GAMIÑO, 1990. Phosphorite deposits in the Upper Oligocene, San Gregorio Formation at San Juan de la Costa, Baja California Sur, Mexico. *In*: Burnett, W.C. y S.R. Riggs (Eds), Phosphate deposits of the world. Cambridge Univ. Press, 122-126.
- GULBRANDSEN, R.A., 1966. Chemical composition of phosphorites of the Phosphoria Formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 30, 789-778.
- HAUSBACK, B.P., 1984. Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur. *In*: Frizzell V.A. (Ed), Geology of Baja California Península, Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists 39, 219-236.
- IAEA, 1985. Intercomparison of trace element measurements in marine sediment sample SD-N-1/2. Report No. 24. International Atomic Energy Agency, Monaco, 74 pp.
- KOLODNY, Y., 1981. Phosphorites. *In*: C. Emiliani (Ed.), The Sea, The Oceanic Lithosphere, Vol. 7, John Wiley & Sons Inc., New York, 981-1023.
- KRAUSKOPF, K.B., 1955. Sedimentary deposits of rare metals. *Econ. Geol.* 50th Ann. Vol., 411-463.
- LUCAS, J., L. PREVOT, G. ATAMAN y N. GUNDOĞDU, 1980. Mineralogical and geochemical studies of the phosphatic Formations in Southeastern Turkey. *In*: Y.K. Bendor (Ed.), Marine phosphorites-geochemistry, occurrence, genesis. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, 149-152.
- LYNN, D.C. y E. BONATTI, 1965. Mobility of manganese in diagenesis of deep sea sediments. *Mar. Geol.*, 3, 457-474.
- MACHORRO-JIMENEZ, M., 1991. Comparación petrográfica de algunas capas de fosforita de la Formación San Gregorio en San Juan de la Costa, El Aguajito, San Hilario y Tembabiche, B.C.S., México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur, 130 p.
- MANHEIM, F.T., 1961. A geochemical profile from the Baltic Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 25, 52-70.

- MARAVAR-ROMERO, O., 1992. Geología y explotación por fosfato en el yacimiento Santo Domingo, Baja California, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur, 71 p.
- MCCLELLAN, G. H. y S. J. VAN KAUWENBERGH, 1990. Mineralogy of sedimentary apatites. In: A.J.G. Notholt y I. Jarvis (Eds), Phosphorite Research and Development. *Geol. Soc. Special Publication 52*, 23-31.
- MINA, F., 1957. Bosquejo geológico del territorio sur de la Baja California. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.* 9, 139-269.
- MOELLER, T., 1961. Química Inorgánica. Editorial Reverté, S.A. Zaragoza, 873 p.
- MULLINS, H. T. y R. F. RASCH, 1985. Sea-floor phosphorites along the Central California continental margin. *Econ. Geol.* 80, 696-715.
- PAEZ-OSUNA, F., M.L. FONG-LEE y H. FERNANDEZ-PEREZ., 1984. Comparación de tres técnicas para analizar materia orgánica en sedimentos. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol.*, Univ. Nal. Autón. México, 1, 257-264.
- PAEZ-OSUNA, F. y J.I. OSUNA-LOPEZ, 1987. Acumulación de metales pesados en Mitla: Una laguna costera tropical. *Ciencias Marinas*, 13, 97-112.
- PAEZ-OSUNA, F. y J.I. OSUNA-LOPEZ, 1990a. Heavy metals distribution in geochemical fractions of surface sediments from the lower Gulf of California. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol.*, Univ. Nal. Autón. México, 17, 287-298.
- PAEZ-OSUNA, F. y J.I. OSUNA-LOPEZ, 1990b. Aspectos genéticos de los sedimentos marinos de la boca del Golfo de California evidenciados por la geoquímica de sus metales pesados. *Geofis. Int.*, 29, 47-58.
- PAEZ-OSUNA, F., H. BOJORQUEZ-LEYVA y J. I. OSUNA-LOPEZ, 1991. Accumulation and distribution of phosphorus in sediments of the Gulf of California. *Marine Mining*, 10, 285-301.
- PREVOT, L. y J. LUCAS, 1980. Behavior of some trace elements in phosphatic sedimentary formations. In: Bentor, Y.K. (Ed), Marine phosphorites-geochemistry, occurrence, genesis. SEMP, Spec. Pub. 29,31-39.
- PRIETO-MENDOZA, J., 1991. Características petrográficas de las masas fosfáticas de la Formación San Gregorio (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) y de los sedimentos modernos, B.C.S., México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur, 82 p.
- ROSALES-HOZ, L. A. CARRANZA-EDWARDS y U. ALVAREZ-RIVERA, 1986. Sedimentological and chemical studies in sediments from Alvarado Lagoon System, Veracruz, Mexico. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol.*, Univ. Nal. Autón. México, 13, 19-28.
- SLANSKY, M., 1986. Geology of Sedimentary Phosphates. Elsevier Science Publishing Co. inc. New York, 210 p.

Alejandro Alvarez Arellano¹ y Federico Páez Osuna²

¹Departamento de Geología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, Baja California Sur, México.

²Estación Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Mazatlán, Sinaloa, México.