



NÓDULOS DE MN DE LA FORMACIÓN BAHÍA INGLESA: GEOQUÍMICA, GÉNESIS E IMPLICANCIAS PALEOAMBIENTALES

ACHURRA, L.¹, MARQUARDT, C.², LACASSIE, J. P.³, LE ROUX, J. P.⁴

¹Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile. E-mail: luciano@esfera.cl

²SERNAGEOMIN. Av. Santa María 0104, Providencia, Santiago, Chile. E-mail: cmarquar@sernageomin.cl

³Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile. E-mail: jlacassi@cec.uchile.cl

⁴Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile. E-mail: jrroux@cec.uchile.cl

INTRODUCCION

Hoy en día los más extensos depósitos de óxidos Mn ocurren en los océanos como nódulos, microconcreciones, envolturas, y cortezas. Nódulos de manganeso oceánicos fueron encontrados por primera vez en 1873 durante la travesía marina del HMS Challenger. Desde entonces los nódulos de manganeso han sido encontrados en casi todas las profundidades y latitudes, en todos los océanos y mares del mundo (Crerar, 1974). En el océano Pacífico se estima que cubren aproximadamente entre un 10-30% del piso oceánico profundo (Menard y Shipek, 1958).

En este trabajo se describe la ocurrencia de nódulos de manganeso en la Formación Bahía Inglesa. Se analizó la geoquímica de estos nódulos, y de nódulos de otras partes del mundo, utilizando análisis de componentes principales (PCA), funciones discriminantes (MDA) y redes neuronales artificiales (RNA). A partir de los resultados se propone un modelo genético para los nódulos de la Formación Bahía Inglesa, con implicancias paleoambientales durante la sedimentación.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS Y ESTRATIGRAFIA

Los depósitos marinos de la Formación Bahía Inglesa (Rojo, 1985; enmendado por Marquardt, 1999) presentan una gran variedad de características sedimentológicas que permiten estudiar las variaciones en las condiciones de depositación. Las lito y biofacies son un detallado registro de las variaciones ambientales, con implicancias locales y regionales. Los distintos estilos de deformación sin y post-tectónicas que presenta esta unidad registran también cambios en el régimen tectónico. Los distintos grados de consolidación, la presencia de enjambres de venas de yeso, así como la presencia de distintos tipos de fosfatos, reflejan la ocurrencia de variados procesos diagenéticos.

Esta formación aflora en la costa de la región de Atacama entre la localidad de Obispito (~26°45'S) y la desembocadura de la quebrada Agua de los Burros (~28°S). Está constituida por litofacies de fangolitas, areniscas, coquinas y, en menor proporción, diatomitas, fosforitas,

conglomerados y brechas, todas ellas interpretadas como depósitos de plataforma continental (Marquardt et al., 2000). Esta unidad está depositada sobre granitoides del Jurásico Inferior y gravas aluviales denominadas como Gravas de Angostura, y subyace, en discordancia de erosión, a depósitos litorales cuaternarios (Estratos de Caldera). Lateralmente engrana con conglomerados fluviales del río Copiapó denominados Gravas del Copiapó (Godoy et al., 2003).

La Formación Bahía Inglesa presenta una de sus secciones estratigráficas más completas en el sector de Playa Chorrillos, ubicado al sur del Morro de Copiapó. Es en esta localidad donde se han podido reconocer distintos niveles con contenidos variables de nódulos de Mn. En la Figura 1 se presenta la columna estratigráfica levantada en playa Chorrillos y se indican los niveles que hospedan los nódulos. De base a techo la sucesión se caracteriza por :

1. Areniscas medias a gruesas masivas intercaladas con niveles fosilíferos de calcarenitas. Estas se disponen sobre el basamento intrusivo Jurásico mediante una superficie de erosión. Estos niveles presentan paleocanales rellenos por areniscas finas intercaladas con limolitas pardo-amarillentas y arcillolitas rojizas bien laminadas formando *slumps* y huellas de escape de fluidos. También, dentro de estos canales se ven algunos intraclastos subredondeados a subangulosos de areniscas finas y limolitas color gris de tamaños entre los 0.5-3.0 cm. La dirección de aporte de los cauces es aproximadamente W.
2. Limolitas y arcillolitas pardo-amarillentas masivas.
3. Conglomerados polimícticos de bloques con intercalaciones de niveles más brechosos. La matriz contiene bloques de fangolitas de hasta 4 m de los niveles inferiores y bloques de hasta 2 m del basamento intrusivo, además de clastos de origen volcánico, clastos fosfatados y huesos de cetáceos.
4. Areniscas finas a limolitas amarillentas, levemente bioturbadas y con presencia de nódulos de manganeso.
5. Limolitas grises poco consolidadas, masivas y con presencia de abundantes fracturas rellenas con yeso. Hacia el techo presenta niveles de 30 cm de areniscas finas, bien consolidadas.

METODOLOGIA

En el Pacífico Oriental han sido realizados diversos estudios geoquímicos sobre nódulos de Mn de zonas profundas. El *Manganese Nodule Program* (MANOP) ha hecho divisiones de los nódulos en base a los distintos tipos de sedimento que los hospedan, diferenciándolos, principalmente, en sitios S (fangos y arcillas pelágicas silíceas), sitios R (arcillas rojas pelágicas), sitios C (fangos calcáreos pelágicos) y sitios H (arcillas hemipelágicas) (Dymond et al, 1984; Roy, 1992).

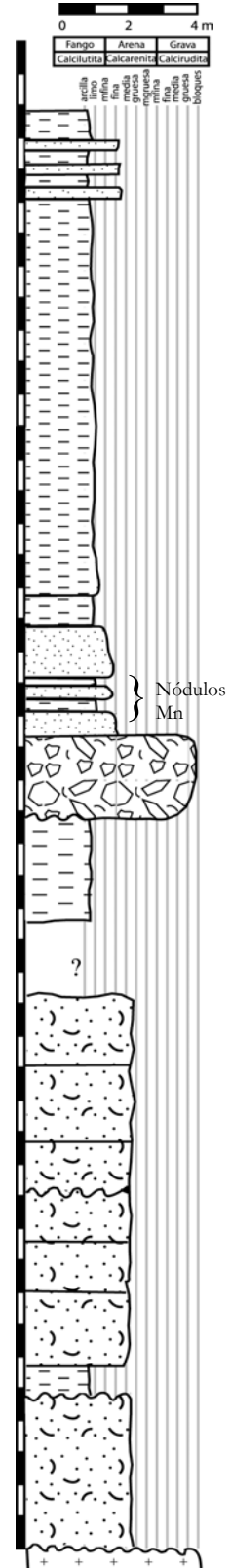


Figura 1: Columna estratigráfica de playa Chorrillos. UTM: 307.040 E; 6.988.950 N.

Sobre la base de estos resultados y de diversos estudios realizados en nódulos de distintos ambientes (lacustres, marino somero, nerítico, hemipelágico y pelágicos) se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA: Principal Component Analysis; Le Maitre, 1982) utilizando un total de 186 análisis geoquímicos extraídos de la literatura (Tabla 1). El análisis de cada una de las muestras utilizadas contiene información (wt%) acerca de 5 variables geoquímicas (Mn, Fe, Co, Ni, Cu).

Clase	# Datos	%	Ubicación	Referencia
H	55	29.6	Océano Pacífico y margen Pacífico oriental	Mero, 1962; Halbach et al., 1981; Dymond et al., 1984.
L	22	11.8	Olso Fjord, Solway Firth Scotland, Gulf of Riga, Black Sea, Loch Fyne, Swedish Lakes, Finnish lakes, UK lake dist., L.Michigan, Eningi-Lampi, Lago Malawi(Africa)	Price, 1967; Audley-Charles, 1965; Williams, 1992; Hlawatsch et al., 2002.
R	72	38.7	Océano Pacífico, Bebalain-Rotti, Noil Tobi-W Timor, Timor, Indian ocean, Atlantic, Pacific.	Mero, 1962; Skornyakova, 1962; Manheim, 1965; Price, 1967; Molengraaff, 1916; Molengraaff, 1922; El Wakeel y Riley, 1961; Audley-Charles, 1965; Williams, 1992; Usui, 1983; Pattan, 1988; Winter et al., 1997; Halbach et al., 1981; Dymond et al., 1984.
S	37	19.9	Central Indian Ocean, Pacífico, Alpha ridge. Central Artic Ocean	Usui, 1983; Pattan, 1988; Winter et al., 1997; Halbach et al., 1981; Dymond et al., 1984.
Total	186	100		

Tabla 1. Número de análisis geoquímicos utilizados en este estudio, por clase de nódulo, ubicación y referencias.

Posteriormente al PCA se realizó un análisis de Funciones Discriminantes (MDA: Multiple Discriminant Analysis; Le Maitre, 1982). Se utilizaron las mismas muestras analizadas por PCA a excepción de 14 cuya proyección en el diagrama resultante del PCA ocurre lejos de su grupo original (*outliers* ; Figura 5a). Luego en el análisis MDA se utilizó un total de 172 muestras obtenidas de la base original (Tabla 1). Finalmente se entrenó una red SOM (Self Organizing Map; Kohonen, 1995) con los mismos datos analizados por PCA (N total = 186; Figura 2).

Utilizando estos análisis más algunos ploteos encontrados en la literatura, para clasificación de nódulos de Mn, se propone un modelo de formación y depositación, en base a datos obtenidos por análisis geoquímicos en roca total, análisis en microscopio electrónico y análisis de difracción de rayos X, para los nódulos de Playa Chorrillos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PETROGRAFIA

El tamaño de los nódulos es variable, encontrándose algunos de unos pocos mm hasta nódulos bien formados de hasta 3 cm. Son de color negro y presentan morfologías elipsoidales a esféricas, con superficies lisas, botroidales y en algunos casos rellenando bioturbaciones. En la microsonda se observa que internamente uno de estos nódulos presenta un núcleo que está compuesto por una asociación de granos minerales amorfos, poco cristalizados de plagioclasa, cuarzo y óxidos de Mn (Figura 2B). Este núcleo presenta una forma ovalada, muy bien redondeada (Figura 2A). En una de las muestras (Cho-1-7n) se encuentra envuelto por una capa de 100-150 micrones de espesor formada por materia orgánica en asociación con otros granos minerales (Figuras 2A, 2C,

2D). Esta envoltura está conectada con vetillas de similar composición las que atraviesan todo el nódulo (Figura 2D), llegando algunas hasta la superficie externa de este. Posteriormente se encuentra la envoltura más importante de un espesor de 1.3 cm. Esta capa esta compuesta tanto de minerales silicatados (cuarzo y plagioclasa), óxidos de Mn, como de microorganismos de composición silícea los que han sido reconocidos como diatomeas (Figura 2E). Esta capa se presenta de forma masiva, sin formar micro capas o láminas marcadas como se acostumbra en los nódulos, lo que indicaría una acresión continua de minerales. Según las descripciones microscópicas realizadas por Halbach et al. (1981) se podría comparar esta envoltura con capas masivas de la sustancia A1 (todorokita) asociada a los nódulos formados por diagénesis temprana. Los óxidos de Mn, estarían formando, principalmente, la matriz de la envoltura, encontrándose como una masa amorfa de minerales poco cristalizados lo que concuerda con las observaciones hechas por Post (1999), quien afirma que las capas de los nódulos están compuestas por una mezcla de minerales de grano fino pobremente cristalinos.

ANALISIS GEOQUIMICOS

Los resultados de la difracción de rayos X realizada en distintos nódulos entregan para las muestras CAL-118 la presencia de una fase mineral correspondiente a todorokita ($\text{NaMn}_6\text{O}_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (Post, 1999). La muestra CAL-75.4 arrojó resultados de contenido en trazas de Criptomelano (Tabla 1), además de abundante albita y cuarzo, algunas micas e indicios de yeso y anfíbolos. .

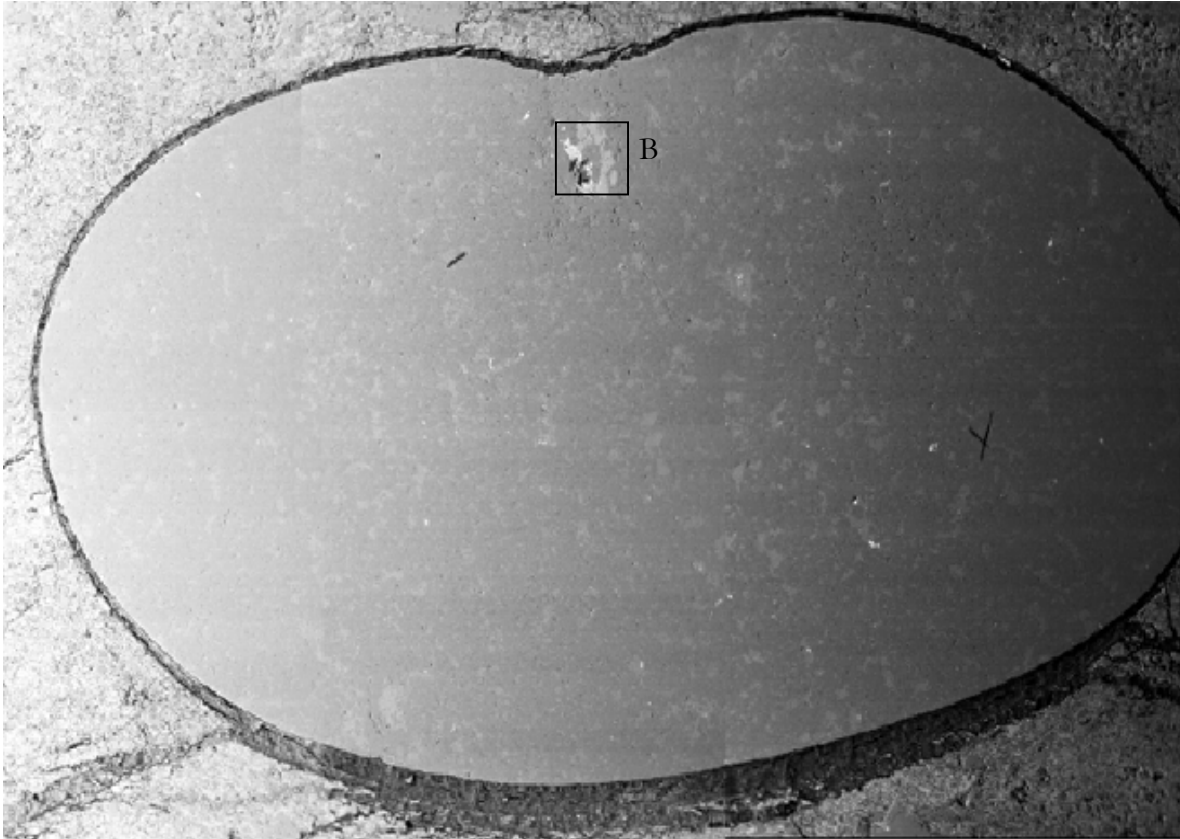
	albita	cuarzo	micas	criptomelano	todorokita	dolomita	yeso	anfíbolos
CAL-75.4	+++	++	+	trazas			indicios	indicios prob
CAL 118 1/3c					X			
CAL 118 2/3c					X			
CAL 118 3/3c					X	x	x	
Cal-122c					X			

Tabla 2 : Resultados de difracción de rayos X realizados en 5 muestras. Se presentan las fases minerales de óxidos de Mn que fueron identificadas (criptomelano y todorokita). (x : se reconoce la presencia del mineral, la cantidad es desconocida ; +++ : muy abundante ; ++ : abundante ; + : poco abundante).

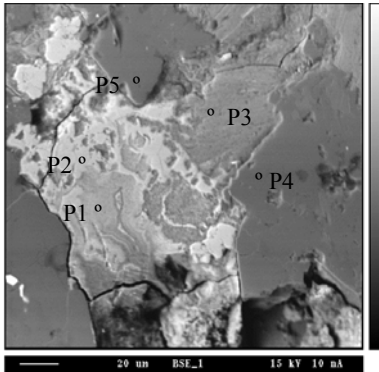
La todorokita, típica de nódulos hemipelágicos, es empobrecida en Cu y Ni y enriquecida en Mn^{+2} y Mn^{+3} reflejando un flujo de agua rica en metales a través de los poros del sedimento durante la ocurrencia de procesos diagenéticos subóxicos (Roy, 1992). Por otra parte, el criptomelano se encontraría como mineral secundario proveniente de zonas mineralizadas terrestres (Nicholson, 1992), aunque su origen podría ser también diagenético (Villiers, 1971).

Para la discriminación entre distintos ambientes de formación de los nódulos, Nicholson (1992) presenta un gráfico Mg vs Na donde se diferencia entre ambientes marino, marino somero y de aguas continentales (lacustre). Las muestras analizadas en este estudio, a las cuales se les realizó análisis de Na y Mg, caen dentro del campo de ambiente marino, descartando una formación de los nódulos en ambientes marinos someros y lacustres (Figura 3).

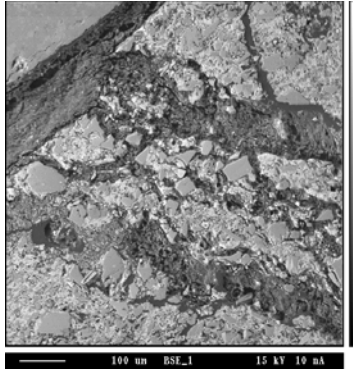
A



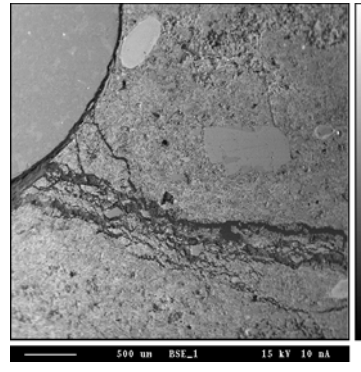
B



C



D



E

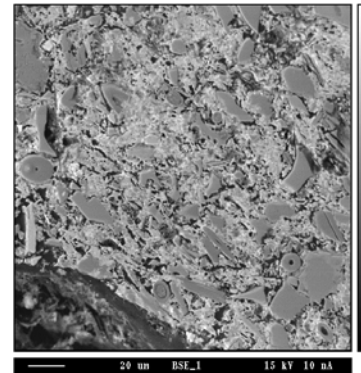


Figura 2: Fotos con el microscopio electrónico.

A: Núcleo del nódulo y envoltura de materia orgánica.

B: Distintas fases minerales que componen la zona del núcleo indicada en A. P1 y P2 son óxidos de Mn, P3 y P4 plagioclasas, P5 cuarzo.

C y D: Acercamiento de contacto entre el núcleo, envoltura orgánica y capa principal. Se observan vetillas de materia orgánica y otras partículas en contacto con la primera envoltura del núcleo

E. Acercamiento de la capa externa principal del nódulo. En E se aprecian algunas partículas redondeadas identificadas como diatomeas. La matriz es la que contiene la mayor cantidad de minerales de Mn amorfos.

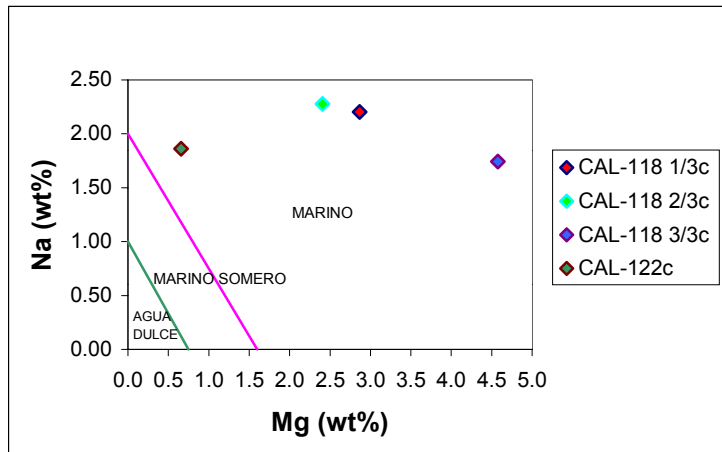


Figura 3: Diagrama Na vs Mg discriminatorio para determinar el ambiente de formación de los nódulos de Mn (Nicholson, 1992). Todas las muestras ploteadas indican un ambiente marino.

A partir de las clasificaciones genéticas realizadas por algunos autores (Roy, 1992 ; Dymond et al., 1984; Halbach et al., 1981), se pueden diferenciar, principalmente, dos tipos de nódulos, aunque existen términos intermedios. Aquellos formados en ambientes hidrogenados, es decir aquellos donde el aporte de metales proviene de la precipitación directa desde el agua de mar cercana al piso oceánico, y aquellos formados durante la diagénesis temprana, es decir, donde el grado de enterramiento es mínimo, alcanzando unos pocos centímetros a decímetros bajo la columna de sedimento, y donde el aporte de los metales proviene del agua intersticial de poros. Las variaciones geoquímicas entre ambos tipos de nódulos son notorias, y un criterio para la clasificación se hace en base a las razones Mn/Fe (Halbach et al., 1981; Roy, 1992). A partir de las razones obtenidas (Tabla 3) se propone un origen diagenético para los nódulos.

Muestra	Mn	Fe	Ni	Cu	Co	Zn	Mn/Fe	Origen
Cal-118 1/3c	27.220	2.150	0.360	0.003	0.027	0.310	12.630	Diagenético temprano
Cal-118 2/3c	18.390	3.100	0.450	0.004	0.055	0.260	5.940	Diagenético temprano
Cal-118 3/3c	13.860	1.920	0.096	0.005	0.013	0.073	7.200	Diagenético temprano
Cal-122c	27.220	1.510	0.004	0.046	0.030	0.008	18.020	Diagenético temprano
CAL-75.4(2)	11.300	1.850	0.043	0.006	0.005	0.036	6.100	Diagenético temprano
CAL-75.4(3)	11.800	1.900	0.041	0.005	0.005	0.048	6.220	Diagenético temprano

Tabla 3: Concentraciones en roca total de Mn, Fe, Ni, Cu, Co, Zn y la razón Mn/Fe para 5 muestras tomadas de Playa Chorrillos. Además se indica el origen asociado a las razones de Mn/Fe respectivas (Roy, 1992).

Las altas concentraciones de Zn en algunas muestras son características de zonas hemipelágicas y reflejarían el enriquecimiento en plankton (Martin y Knauner, 1973), lo que sugiere que materia orgánica inestable, en la interface sedimento agua, liberó Zn por descomposición, el cual posteriormente se acresionó al nódulo (Dymond et al., 1984). Por otra parte, el empobrecimiento en Cu se podría deber a la escasa presencia de esqueletos silíceos de microorganismos (diatomeas y radiolarios), los cuales son importantes portadores del Cu (Halbach et al., 1979 ; Marching et al., 1979). La cantidad de estos aumenta bajo la CCD.

Otra forma de diferenciar los tipos genéticos de nódulos es a partir de un diagrama de tres componentes (Figura 4; Bonatti et al., 1972). Sin embargo, Halbach et al. (1981) sostiene que este diagrama es sólo válido para nódulos abisales. En Dymond et al. (1984) se utiliza este mismo diagrama para diferenciar los sitios MANOP, donde se incluyen además de zonas

abisales, nódulos formados en profundidades batiales de ambientes hemipelágicos. Winter et al. (1997), también utiliza estos diagramas para clasificar micronódulos del Océano Artico en profundidades hemipelágicas menores a 2500 m. Asumiendo que el diagrama es válido para las muestras en estudio, se observa una clara tendencia hacia el sitio H, de arcillas hemipelágicas.

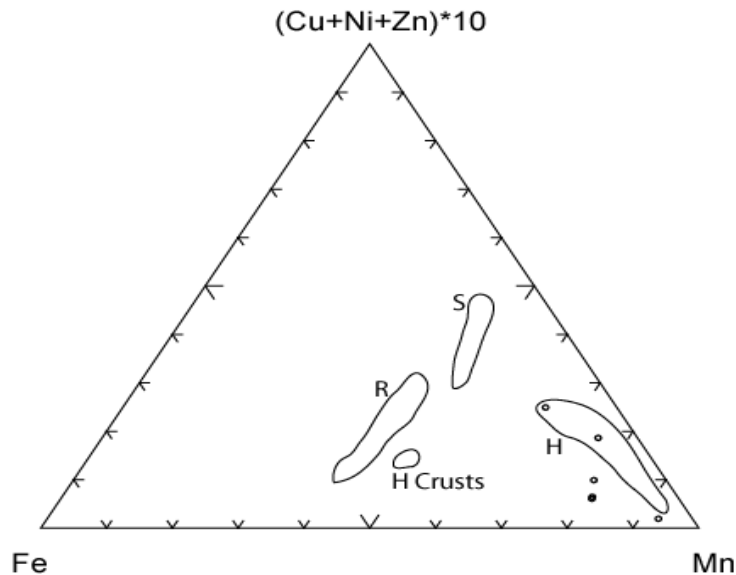


Figura 4. Diagrama ternario Fe-(Cu+Ni+Zn)*10-Mn discriminatorio entre distintos sitios MANOP (Dymond et al, 1984). La tendencia de las muestras analizadas en roca total (círculos) es claramente hacia la zona hemipelágica.

Los resultados del PCA sugieren que las muestras se agrupan en 4 clusters distintos (Figura 5a), denominados H, S, R y L. La denominación de tres de estas clases (H, S y R) se realizó de forma correlativa con la clasificación de las muestras de Dymond et al. (1984) contenidas en ellos. El cluster restante se denominó "L" por contener principalmente muestras de nódulos de manganeso asociadas a depositación lagunar (L) u oceánica somera. En el diagrama FI vs FII resultante del análisis MDA (Figura 5b), se observa una buena separación entre muestras asociadas a las distintas clases.

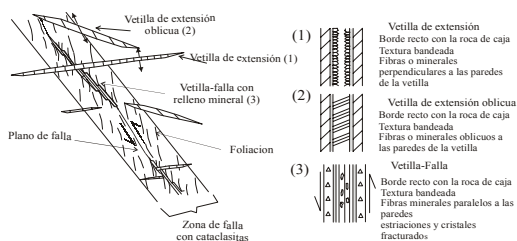


Tabla 4. Coeficientes de las funciones discriminantes FI y FII

De la tabla 4 se desprende que FI y FII son notoriamente sensibles a las concentraciones de Mn y de Fe. Particularmente las distribuciones lineales de las clases H y L con respecto a FI ocurren debido a variaciones en el contenido de Mn. Tanto para FI como para FII, los coeficientes asociados a los elementos en trazas son comparativamente muy bajos, por lo que no serían variables discriminantes importantes.

En la Figura 5a se observa que las muestras de Playa Chorrillos presentan una dispersión importante con respecto a FI, debido a variaciones en el contenido en Mn, para el cual FI es muy sensible. Sólo 3 de las muestras de Playa Chorrillos se proyectan en un campo definido (Clase

R), mientras que las 3 restantes se proyectan fuera de los campos. Lo anterior contradice un supuesto mismo ambiente o clase para las muestras.

Contrariamente a los resultados del MDA, la red SOM clasifica a las muestras de Playa Chorrillos de forma homogénea, resultando todas ellas como del tipo H. Se observa en la Figura 6 que para todas las muestras las primeras tres BMU (*Best Matching Units*) corresponden al tipo H. Es decir, para todas las muestras analizadas las tres unidades del mapa SOM más cercanas en términos topológicos a las muestras, tienen vectores prototipo (*codebook vectors*) del tipo H (Kohonen, 1995). Tales resultados son ampliamente concordantes a los obtenidos mediante el diagrama ternario de Bonatti et al. (1972).

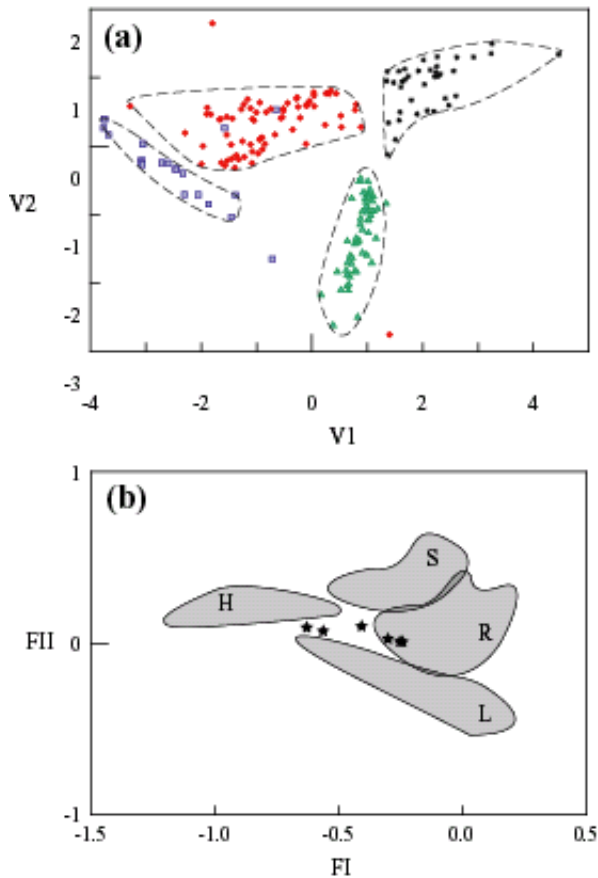


Figura 5

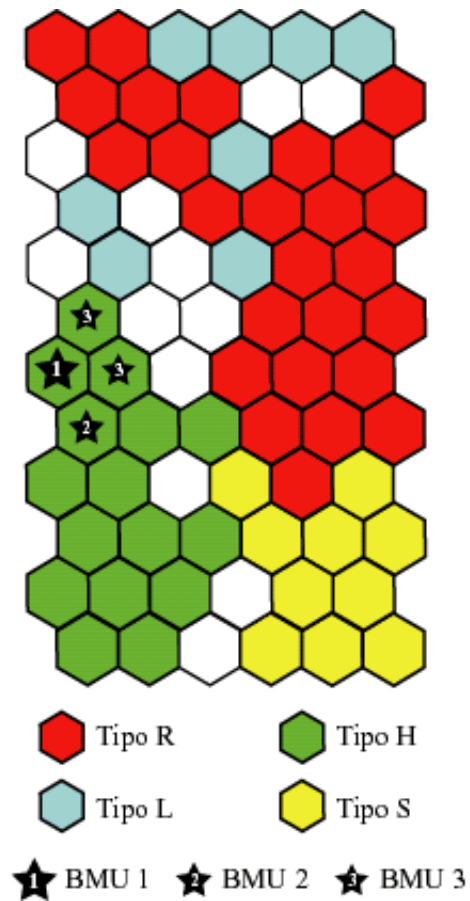


Figura 6

Figura 5. Diagramas resultantes de los análisis PCA (a) y MDA (b) de la base de datos de nódulos de manganeso utilizada en este estudio. a: Resultado del análisis PCA mostrando la distribución de las proyecciones de las muestras de las cuatro distintas clases de nódulos de manganeso: H (triángulos verdes), R (rombos rojos), S (asteriscos negros) y L (cuadrados azules). Se han delimitado los contornos de los campos de proyección de las muestras correspondientes a las cuatro clases. b: Resultado del análisis MDA. Se indican los campos de proyección asociados a cada una de las clases de nódulos utilizadas. Se indica además la proyección de las muestras de Playa Chorrillos (estrellas negras).

Figura 6. Mapa autoorganizado resultante del entrenamiento de una red SOM (Self Organizing Map; Kohonen, 1995) con los datos geoquímicos de nódulos de manganeso utilizados en este estudio (186 datos con 5 variables geoquímicas: Mn, Fe, Ni, Co, Cu). Los colores indican unidades del mapa asociadas a una clase de nódulos de manganeso determinada (ver simbología), a excepción de aquellas unidades no asociadas a ninguna clase específica

(sin color). Se ha utilizado este mapa para clasificar las muestras de Playa Chorrillos. Las posiciones de las unidades del mapa correspondientes a las primeras tres bmu's (Best Matching Units) de las muestras de Playa Chorrillos (estrellas negras) indican que estas clasificarían como del tipo H.

Con el objeto de determinar las razones de crecimiento de los nódulos de Mn, se utilizaron expresiones dadas en dos trabajos. Según la ecuación dada por Lyle (1982) para la acumulación del Mn y Fe en nódulos, se encontró un rango de 31 y 192 mm/Ma. Por otro lado, según la expresión dada por Huh y Ku (1984), las razones de crecimiento serían de 27 a 165 mm/Ma, lo que otorga un amplio rango de tasas de crecimiento para los nódulos de Mn de la Formación Bahía Inglesa.

CONCLUSIONES

Con respecto al proceso de acresión del Mn y otros elementos a los nódulos se propone un origen diagenético temprano, entendiéndose por esto su formación en la parte superior de la columna de sedimentos de piso oceánico, sólo unos pocos centímetros bajo la interface agua sedimento, con un bajo grado de enterramiento y cuando aún no se han desarrollado procesos diagenéticos importantes que alteren las características deposicionales primarias del sedimento. Este proceso se habría llevado a cabo en un ambiente marino hemipelágico.

AGRADECIMIENTOS

Los análisis geoquímicos y de difracción de rayos X fueron realizados en el laboratorio del SERNAGEOMIN y dirigidos por Carmen Espejo y Eugenia Fonseca, respectivamente. Los análisis en microsonda fueron realizados en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile bajo la supervisión de Mauricio Belmar.

REFERENCIAS

- Audley-Charles, M. 1965. A Geochemical Study of Cretaceous Ferromanganiferous Sedimentary Rocks from Timor. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 29. p. 1153-1173.
- Bonatti, E., Kraemer, T. y Rydell, H. 1972. Classification and Genesis of Submarine Iron-Manganese Deposits. In *Papers on a Conference about Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor* (ed. D. R. Horn). Washington D. C., National Science Foundation. p. 149-166.
- Crerar, D. y Barnes, H. 1974. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 38. p. 279-300.
- Dymond, J., Lyle, M., Finney, B., Piper, D., Murphy, K., Conard, R. y Pisias, N. 1984. Ferromanganese Nodules from MANOP Sites H, S, and R-Control of Mineralogical and Chemical Composition by Multiple Accretionary Processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 48. p. 931-949.
- El Wakeel, S. y Riley, J. 1961. Chemical and Mineralogical Studies of Deep-Sea Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 25. p. 110-147.
- Godoy, E., Marquardt, C. y Blanco, N. 2003. Hoja Caldera, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.
- Halbach, P., Rehm, E. y Marching, V. 1979. Distribution of Si, Mn, Fe, Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Mg, and Ca in Grain Size Fractions of Sediment Samples from a Manganese Nodule Field in the Central Pacific Ocean. *Marine Geology*. Vol. 29. p. 237-252.
- Halbach, P., Scherhag, C., Hebisch, U. y Marching, V. 1981. Geochemical and Mineralogical Control of Different Genetic Types of Deep-Sea Nodules from the Pacific Ocean. *Mineral Deposita*. Vol. 16. p. 59-84.
- Hlawatsch, S., Garbe-Schonberg, C., Lechtenberg, F., Manceau, A., Tamura, N., Kulik, D. y M. Kersten. 2002. Trace Metal Fluxes to Ferromanganese Nodules from the Western Baltic Sea as a Record for Long-term Environmental Changes. *Chemical Geology*. Vol. 182. p. 697-709.
- Huh, C. y Ku, T. 1984. Radiochemical Observations on Manganese Nodules from Three Sedimentary Regimes in the North Pacific. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 48. p. 951-963.
- Kohonen, T. 1995. Self-Organising Maps. In: Huang T., Schroeder, M., (Eds.), *Springer Series in Information Sciences*, Vol. 30 : Springer-Verlag, Berlin, Germany. p. 362.

- Le Maitre, R. 1982. Numerical Petrology: Statistical Interpretation of Numerical Data: Elsevier Science, Amstersdam. p. 281.
- Lyle, M. 1982. Estimating Growth Rates of Ferromanganese Nodules from Chemical Composition: Implications for Nodule Formation Processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 46. p. 2301-2306.
- Manheim, F. 1965. Manganese-Iron Accumulations in the Shallow Marine Environment. Narragansett Marine Lab. Occasional Publ. Vol. 3. p. 217-276.
- Marchig, V., Gundlach, H. y Schnier, Ch. 1979. Verhalten von Radiolarienschalen aus dem Zentralpazifik bei der Diagenese. *Geol Rdsch*. Vol. 68. p. 1037-1053.
- Marquardt, C. 1999. Neotectónica de la Franja Costera y Aportes a la Geología Regional entre Caldera y Caleta Pajonal (27°00'-27°45'S), III Región de Atacama. Tesis Ms. Cs., Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 297 p.
- Marquardt, C., Blanco, N., Lavenu, A., Ortlieb, L., Godoy, E., Marchant, M. y Guzmán, N. 2000. Estratigrafía y Morfoestratigrafía marina-litoral del Cenozoico Superior en el área de Caldera (27-28°S). X Congreso Geológico Chileno. Pto. Varas. Chile. Vol. 1. p. 504-508.
- Martin, J. y Knauner, G. 1973. The Elemental Composition of Plankton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 37. p. 1639-1654.
- Menard, H. y Shippek, C. 1958. *Nature (London)*. Vol. 182. p. 1156-1158.
- Mero, J. 1962. Ocean-floor Manganese Nodules. *Economic Geology*. Vol. 57. p. 747-767.
- Molengraaff, G. 1916. On the Occurrence of Nodules of Manganese in Mesozoic Deep-Sea Deposits from Borneo, Timor and Rotti, Their Significance and Mode of Formation. *Proc. Acad. Sci. Amsterdam*. Vol. 18. p. 15-430.
- Molengraaff, G. 1922. On Manganese Nodules in Mesozoic Deep-Sea Deposits from of Dutch Timor. *Proc. Acad. Sci. Amsterdam*. Vol. 23. p. 997-1012.
- Nicholson, K. 1992. Contrasting Mineralogical-Geochemical Signatures of Manganese Oxides: Guides to Metallogenesis. *Economic Geology*. Vol 87. p 1253-1264.
- Pattan, J. 1988. Internal Microfeatures of Manganese Nodules from the Central Indian Ocean. *Marine Geology*. Vol. 81. p. 215-226.
- Post, J. 1999. Manganese oxide minerals: Crystal structures and economic and environmental significance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. Vol. 96. p. 3447-3454. Colloquium paper.
- Price, N. 1967. Some Geochemical Observations on Manganese-Iron Oxide Nodules from Different Depth Environments. *Marine Geology*. Vol. 5. p. 511-538.
- Rojo, M. 1985. Un aporte al conocimiento del Terciario marino: Formación Bahía Inglesa. *Actas IV Congreso Geológico Chileno*, 514 p.
- Roy, S. 1992. Environments and Processes of Manganese Deposition. *Economic Geology*. Vol. 87. p. 1218-1236.
- Skornyakova, N., Andrushchenko, P. y Fomina, L. 1962. Khimicheskikh sostav zhelezo-margant sovykh konkretnykh Tikhogo Okeana. *Okeanologiya*. Vol. 2. p. 264-277.
- Usui, A., Nishimura, A. y Mita, N. 1983. Composition and Growth History of Surficial and Buried Manganese Nodules in the Penrhyn Basin, Southwestern Pacific. *Marine Geology*. Vol. 114. p. 133-153.
- Williams, T. y Owen, R. 1992. Geochemistry and Origins of Lacustrine Ferromanganese Nodules from the Malawi Rift, Central Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 56. p. 2703-2712.
- Winter, B., Johnson, C. y Clark, D. 1997. Geochemical Constraints on the Formation of Late Cenozoic Ferromanganese Micronodules from the Central Arctic Ocean. *Marine Geology*. Vol. 138. p. 149-169.