

**HYDROTHERMAL INPUT IN RECENT SEDIMENTS PROXIMAL TO THE
EASTERN LAU SPREADING CENTRE, LAU BASIN, SW PACIFIC**

**APORTE HIDROTHERMAL EN SEDIMENTOS RECIENTES CERCANOS AL
CENTRO DE DISPERSIÓN ORIENTAL DE LA CUENCA LAU, PACÍFICO
SUR OCCIDENTAL**

L.W. Daesslé*

D.S. Cronan

T.H. Huxley School of Environment
Earth Sciences and Engineering
Imperial College of Science Technology and Medicine
London SW7 2BP, UK

*Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Ensenada, Baja California, México
E-mail: w.dae@faro.ens.uabc.mx

Recibido en mayo de 2001; aceptado en septiembre de 2001

ABSTRACT

The partition geochemistry and recent Mn accumulation rates have been studied in 14 sediment cores collected adjacent to the Eastern Lau Spreading Centre (ELSC) in the Lau Basin, SW Pacific. The sediments are oxic in nature, formed of ash with abundant nannofossil ooze and hydrothermal Mn oxides dispersed within the calcareous sediments. These oxides represent distal plume fallout derived mainly from the hydrothermal fields along the ELSC and possibly from the nearby Central Lau Spreading Centre (CLSC). Nickel, Mo, Pb and, to a lesser extent, Co and V are associated with the Mn-oxide phase, possibly scavenged by Mn precipitates. Only low proportions of Fe, Zn and Cu are found in the oxide phase, these elements being mainly associated with the detrital/altered-detrital sediment phases. Some peaks in the Mn distribution downcore appear to correlate among the cores studied, indicating common pulses of hydrothermal plume fallout. The similar Fe/Mn oxide ratios (1.4–1.9) in surficial sediments proximal to the Eastern and Central Lau Spreading Centres, suggest similar plume fallout compositions in these two areas. Mean Mn accumulation rates average $26 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$. The hydrothermal sedimentation near the ELSC is probably related to a fully developed hydrothermal plumbing at the spreading centre and thus the ELSC has a good potential for hosting massive sulphide deposits, although a lower hydrothermal input at its northernmost tip may indicate a drop in magmatic activity and mineral potential in the oldest section of this spreading ridge.

Key words: Lau Basin, sediment, geochemistry, hydrothermal, manganese accumulation.

RESUMEN

Se estudiaron la geoquímica de partición y las tasas recientes de acumulación de Mn en 14 núcleos recolectados en la zona adyacente al Centro de Dispersión Oriental de la Cuenca Lau (CDOL), en el Pacífico suroccidental. Los sedimentos son de naturaleza óxica, formados por cenizas y abundantes lodos nanofosilíferos, así como de óxidos hidrotermales de Mn dispersos en estos sedimentos calcáreos. Estos óxidos representan partículas precipitadas a partir de fumarolas lejanas, derivadas principalmente de campos hidrotermales a lo largo del CDOL y posiblemente del Centro de Dispersión Central de la Cuenca Lau (CDCL). Níquel, Mo, Pb y, en menor grado, Co y V, se encuentran asociados con la fase de óxidos de Mn, posiblemente secuestrado por precipitados de Mn. Solamente se encontraron pequeñas proporciones de Fe, Zn y Cu en la fase de óxidos, estando asociados principalmente con las fases detrítico/detrítico alteradas en los sedimentos. Algunos máximos en la concentración del Mn núcleo abajo, parecen estar correlacionados entre los núcleos estudiados, indicando pulsos comunes de precipitación de partículas de fumarolas hidrotermales. Las relaciones similares de óxidos de Fe/Mn (1.4–1.9) en sedimentos superficiales cercanos al CDCL y al CDOL, sugieren una composición similar de las partículas precipitadas de las fumarolas en estas dos áreas. Las tasas medias de acumulación de Mn promedian $26 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$. La sedimentación hidrotermal cercana al CDOL probablemente se encuentra relacionada con una actividad hidrotermal totalmente desarrollada, localizada sobre el centro de dispersión y, por lo tanto, éste tiene un buen potencial para albergar depósitos importantes de sulfuros, aunque un bajo aporte hidrotermal en su extremo norte puede indicar una disminución de la actividad magmática y del potencial de mineralización en la sección más antigua de la dorsal de dispersión.

Palabras clave: Cuenca Lau, sedimento, geoquímica, hidrotermal, acumulación de manganeso.

INTRODUCTION

Submarine hydrothermal activity is most commonly found associated with tectonic plate boundaries, such as Mid-Ocean Ridges (MOR), but it also occurs on backarc spreading centres and hot spot seamounts (German *et al.*, 1996). After hydrothermal fluids discharge from the sea floor, some of the phases contained are dispersed within the water column as a buoyant/ neutrally buoyant plume (Feely *et al.*, 1994; German *et al.*, 1996); Fe and Mn are oxidized and fall out of the plume to form metalliferous sediments (Edmond *et al.*, 1979). By this process a halo of metal-rich sediments may be formed surrounding the hydrothermal source (Edmond *et al.*, 1982) that can be used to pinpoint the source and its oftenly associated high-graded sulphide deposits (Bignell *et al.*, 1976). Once hydrothermal fluids discharge on the sea bottom, Fe-Mn oxihydroxides scavenge trace

INTRODUCCIÓN

La actividad hidrotermal submarina se encuentra comúnmente asociada a zonas de contacto entre placas tectónicas, tales como las Dorsales Meso-Oceánicas (DMO), pero también ocurre en centros de dispersión tipo “back arc” y en montes submarinos en focos calientes (German *et al.*, 1996). Después de que los fluidos hidrotermales son descargados del piso oceánico, algunas de las fases contenidas en ellos son dispersadas en la columna de agua como una fumarola boyante o neutralmente boyante (Feely *et al.*, 1994; German *et al.*, 1996). El Fe y el Mn son oxidados y se precipitan de la fumarola para formar sedimentos metalíferos (Edmond *et al.*, 1979). Por medio de este proceso se puede formar un halo de sedimentos rico en metales alrededor de la fuente hidrotermal (Edmond, *et al.*, 1982), el cual puede utilizarse para localizar la fuente

elements from the seawater (e.g. Y, Be, V, P, Ni, As, Cr and rare earth elements, amongst others) (Froehlich *et al.*, 1982; Trocine and Trefry, 1988; German *et al.*, 1991; Feely *et al.*, 1994; Wheat *et al.*, 1996).

The Lau Basin is a shallow (2- to 3-km-deep) active backarc basin between the Lau Ridge remnant arc to the West, and the Tonga Ridge and Tofua active arc to the East (fig. 1a). Within the basin, two spreading ridges are found propagating southward on which active hydrothermal venting is taking place. The Eastern Lau Spreading Centre (ELSC), comprises a group of ridge and valley structures with a thin sediment cover and a 5- to 10-km-wide rift zone (Parson *et al.*, 1990a). This neovolcanic rift is segmented between 21°10'S and 20°10'S and is formed, apparently, by overlapping spreading centres (fig. 1a, b) (Parson *et al.*, 1990b).

According to the tectonic model for the Lau Basin by Parson and Hawkins (1994), a protracted extensional phase opened the basin floor approximately 10 Ma ago; true back arc spreading at the ELSC starting 5.5 Ma ago. According to Taylor *et al.* (1996), the ELSC started propagating southwards 4 Ma after its formation and, at 2 Ma, it rotated 20° clockwise and subdivided into left-stepping overlapping segments, propagating even faster. It appears that the southward propagation of the ELSC has been episodic and that its propagating tip is, nowadays, located at the same latitude (23°00'S) at which the "upstanding ridge" morphology of the southern Valu Fa Ridge (VFR) terminates (Wiedicke and Collier, 1993). Some 1.5 Ma ago, the Central Lau Spreading Centre (CLSC) started propagating southwards into seafloor generated at the ELSC (Parson and Hawkins, 1994).

Direct evidence of active hydrothermal systems on the ELSC was first reported from a few km behind its actively propagating tip (Fouquet *et al.*, 1993). However, the only direct

que comúnmente está asociada a depósitos de sulfuro de alta ley (Bignell *et al.*, 1976). Una vez que los fluidos hidrotermales descargan en el piso oceánico, los oxihidróxidos de Fe-Mn secuestran los elementos traza del agua de mar (v.g. Y, Be, V, P, Ni, As, Cr y elementos de tierras raras, entre otros) (Froehlich *et al.*, 1982; Trocine y Trefry, 1988; German *et al.*, 1991; Feely *et al.*, 1994; Wheat *et al.*, 1996).

La Cuenca Lau es una cuenca tipo "back arc" somera (de 2 a 3 Km de profundidad), ubicada entre el arco remanente de la elevación de Lau, al oeste, y la elevación de Tonga y el arco activo de Tofua, al este (fig. 1a). Dentro de la cuenca se encuentran dos dorsales de dispersión que se propagan hacia el sur en las que existen ventilas hidrotermales activas. El Centro de Dispersión Oriental de Lau (CDOL), comprende un grupo de estructuras de altos topográficos y valles con una cubierta sedimentaria delgada y una zona de fracturas de entre 5 y 10 km de ancho (Parson *et al.*, 1990a). Esta fractura neovolcánica está segmentada entre los 21°10'S y los 20°10'S y aparentemente esta formada por centros de dispersión superpuestos (fig. 1a, b) (Parson *et al.*, 1990b).

De acuerdo al modelo tectónico para la Cuenca Lau de Parson y Hawkins (1994), una prolongada fase extensional abrió el piso oceánico hace aproximadamente 10 Ma, comenzando la verdadera dispersión hace 5.5 Ma. De acuerdo con Taylor *et al.* (1996), el CDOL comenzó a propagarse hacia el sur 4 Ma después de su formación, rotando, hace 2 Ma, 20° en el sentido de las manecillas del reloj y subdividiéndose en segmentos superpuestos y escalonados hacia la izquierda, propagándose aún más rápido. Parece que la propagación del CDOL hacia el sur ha sido episódica y que su extremo en dispersión se localiza a la misma latitud (23°00'S) donde termina la morfología de la Dorsal Valu Fa (DVF) del sur (Wiedicke y Collier, 1993). Hace aproximadamente 1.5 Ma, el Centro de Dispersión Central de la Cuenca

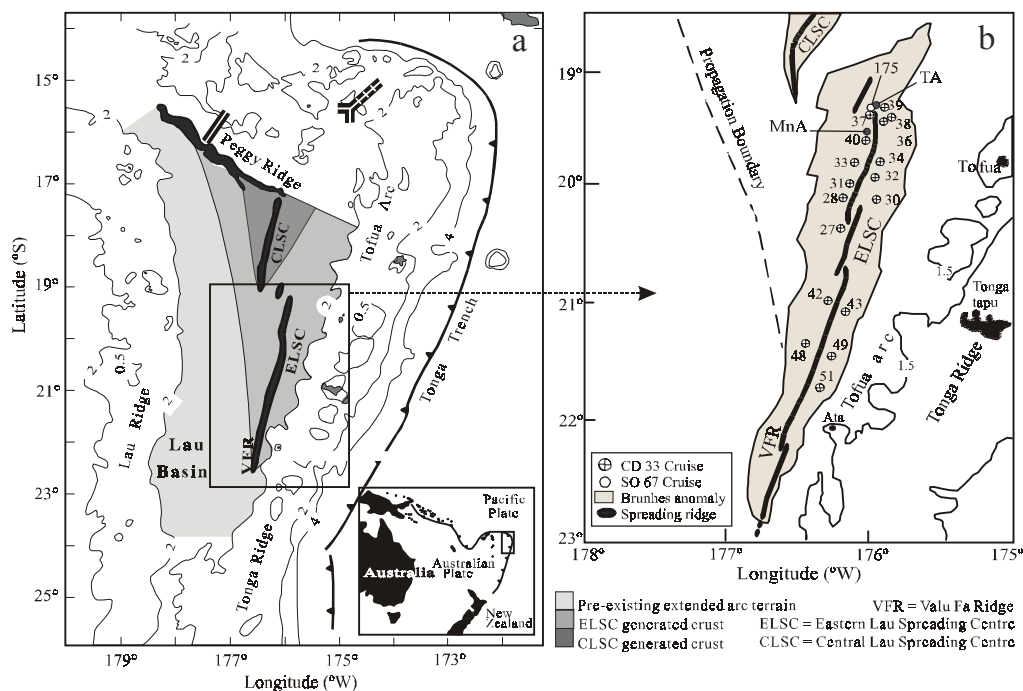


Figure 1. (a) Lau Basin and its spreading centres (modified from Parson and Hawkins, 1994); (b) location of cores studied, adjacent to the Eastern Lau Spreading Centre (base map modified from Taylor *et al.*, 1996). MnA = Manganese anomaly in water column (Lisitsyn *et al.*, 1992); TA = Near-bottom temperature anomaly (Marchig *et al.*, 1992).

Figura 1. (a) Cuenca Lau y sus centros de dispersión (modificado de Parson y Hawkins, 1994); (b) localización de los núcleos estudiados cerca del Centro de Dispersión Oriental de Lau (ELSC, por sus siglas en inglés; mapa base modif. de Taylor *et al.*, 1996). MnA = Anomalia de manganeso en la columna de agua (Lisitsyn *et al.*, 1992); TA = Anomalia de la temperatura de fondo (Marchig *et al.*, 1992).

evidence for modern hydrothermal activity occurring at the older, more evolved northern ELSC, is the presence of a strong manganese anomaly in the water column and a bottom temperature anomaly (fig. 1) (Lisitsyn *et al.*, 1992; Marchig *et al.*, 1992).

In order to assess the hydrothermal input to the sediments proximal to the ELSC, 14 cores collected adjacent to the ELSC (north of the VFR) were studied geochemically. The aim of this paper is both to estimate the recent hydrothermal flux to the sediments in the area and

Lau (CDCL) comenzó a propagarse hacia el sur a través del piso oceánico generado anteriormente en el CDOL (Parson y Hawkins, 1994).

La primera evidencia directa de los sistemas hidrotermales activos en el CDOL fue reportada pocos kilómetros detrás de su extremo en propagación (Fouquet *et al.*, 1993). Sin embargo, la única evidencia directa de actividad hidrotermal moderna en la parte más vieja y evolucionada al norte del CDOL, es la presencia de una fuerte anomalía de manganeso en la columna de agua y una anomalía de la

the temporal and regional variation of the hydrothermal plume fallout associated with the hydrothermal activity at the ELSC, and to assess the likelihood of high grade sulphide deposits to occur on it.

METHODS

Sampling and geochemical techniques

Fourteen cores were collected by means of a gravity corer with a 3-m maximum penetrating capacity and stored in a cool dark room (fig. 1b; table 1). The maximum core length retrieved was only 184 cm. This short sediment penetration resulted, possibly, by the presence of compacted ash layers and hyaloclastite beds within the sediments. Only core SO67/175 (collected at the northern tip of the ELSC) reached the basement, as seen from glass fragments found in the core cutter (Riech and Gehrke, 1992). All cores were well preserved at the time of retrieval and analysis.

Twenty-seven samples of dominantly calcareous units, from the different cores were subjected to bulk and partition geochemical analyses. Bulk analyses were performed according to the methods described by Thompson and Walsh (1989), using a combination of HNO₃, HClO₄ and HF. Partition analyses (sequential extractions) were carried out using the method of Chester and Hughes (1967), modified by Cronan (1976). The four operationally-defined phases extracted were:

- (1) the "acetic-acid-soluble" phase, including carbonates, loosely adsorbed phases and interstitial water evaporates, leached with 25% acetic acid;
- (2) the "acid-reducible" phase, including (1) plus reducible ferromanganese oxides and associated elements, leached with 1M hydroxylamine HCl in 25% acetic acid;
- (3) the "HCl soluble" phase, which includes (2)

temperatura en el fondo (fig. 1) (Lisitsyn *et al.*, 1992; Marchig *et al.*, 1992).

Con el fin de evaluar el aporte hidrotermal a los sedimentos próximos al CDOL, se estudiaron geoquímicamente 14 núcleos recolectados cerca del CDOL (al norte de la DVF). El objetivo de este trabajo es estimar tanto el flujo hidrotermal reciente hacia los sedimentos en el área como la variación temporal y regional de las partículas precipitadas a partir de las fumarolas hidrotermales asociadas con la actividad hidrotermal del CDOL, así como evaluar la posibilidad de que se presenten depósitos importantes de sulfuros de alta ley.

METODOS

Muestreo y técnicas geoquímicas

Se recolectaron 14 núcleos con un nucleador de gravedad con penetración máxima de 3 m, que posteriormente fueron almacenados en un cuarto oscuro y frío (fig. 1b; tabla 1). La longitud máxima de núcleo obtenida fue de solo 184 cm. Esta escasa penetración en el sedimento posiblemente se debió a la presencia de capas de ceniza compactadas y de lechos hialoclasticos dentro de los sedimentos. Sólo el núcleo SO67/175 (recolectado en el extremo norte del CDOL) alcanzó el basamento, lo que pudo verificarse por la presencia de fragmentos de vidrio encontrados en el nucleador (Riech y Gehrke, 1992). Todos los núcleos se encontraban bien preservados al momento de su recuperación y análisis.

Se analizó la geoquímica total y la de partición de veintisiete muestras de unidades predominantemente calcáreas, provenientes de distintos núcleos. Los análisis totales fueron realizados de acuerdo a los métodos descritos por Thompson y Walsh (1989), utilizando una combinación de HNO₃, HClO₄ y HF. Los análisis de partición (extracciones secuenciales) se llevaron a cabo utilizando el método de Chester

Table 1. Location, depth, total core recovery, length of core section studied (cm below sea floor) and dominant lithology of R.R.S. Charles Darwin and R/V Sonne cores collected adjacent to the northern Eastern Lau Spreading Centre.

Tabla 1. Localización, profundidad, núcleo total recuperado, longitud de la sección estudiada (cm bajo el piso oceánico) y litología dominante de los núcleos del B/O Charles Darwin y el B/O Sonne recolectados cerca del Centro de Dispersión Oriental de Lau.

Core	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Depth (m)	Distance to spreading centre (km)	Core recovery (cm)	Section studied (cmbsf)	Dominant lithology
CD33/27	20°21.14'	176°12.13'	2396	10.4	117	117	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/28	20°08.04'	176°11.51'	2487	8.6	144	100	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/30	20°07.70'	175°57.90'	2340	12.8	130	130	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/31	19°58.65'	176°08.85'	2679	14.2	35	-	Volcanic ash
CD33/32	19°53.69'	175°57.07'	2612	10.4	116	116	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/33	19°45.27'	176°06.37'	2642	10.0	75	75	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/34	19°42.48'	175°56.37'	2630	7.2	173	173	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/36	19°31.09'	175°53.30'	2632	9.2	71	71	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/37	19°22.60'	176°00.42'	2825	7.2	31	31	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/38	19°16.98'	175°52.01'	2807	5.4	29	-	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/39	19°15.63'	175°54.39'	3138	1.4	50	50	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/40	19°35.04'	176°00.74'	2785	4.6	79	79	Volcanic ash with nannofossil ooze
CD33/42	20°58.59'	176°18.65'	2359	6.8	30	-	Volcanic ash
CD33/43	21°05.12'	176°12.04'	2469	6.0	77	77	Volcanic ash
CD33/48	21°19.32'	176°30.01'	2535	17.4	125	125	Clayey nannofossil ooze with volcanic ash
CD33/49	21°25.86'	176°17.81'	2476	7.2	56	42	Volcanic ash
CD33/51	21°44.37'	176°22.00'	2479	11.0	41	-	Volcanic ash
SO67/175	19°19.97'	176°00.04'	2109	9.2	184	184	Nannofossil ooze with volcanic ash

plus more crystalline Fe oxides, clays, altered-detrital phases and partially dissolved sulphides, leached with hot 50% HCl; and

- (4) the “residual” phase, including the most resistant detrital phases, by subtracting elements in phases (1), (2) and (3) from their bulk concentrations.

The elements determined were: Li, Na, K, Mg, Al, Ti, La, Fe, V, Co, Mn, Ni, Mo, Cu, Zn, Pb, P, Be and Ba. All analyses were carried out by means of inductive coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The analytical precision was checked with duplicate subsample analysis, being this better than $\pm 10\%$. Bias (for bulk analysis), better than $\pm 5\%$, was determined using certified international reference (United States Geological Survey), as well as in-house reference material. In order to assess in detail the downcore distribution of the hydrothermal component along the cores, they were additionally sampled at 2-cm intervals for analysis after hot HCl extraction. Core SO67/175 was sampled at 8-cm intervals. The results of the HCl leach were recalculated on a detrital-free (HCl-insoluble residue) and CaCO_3 -free basis (based on Ca concentrations) in order to correct for any dilution of the hydrothermal component by the dominant components of the sediments. The instantly deposited volcanogenic layers have a diluting effect on the deposition of hydrothermally-derived elements. They have been subtracted and core lengths recalculated in order to consider only the dominant pelagic intervals in them for the geochemical analyses (Hodkinson and Cronan, 1994; 1995; 1998).

Sediment age determinations

Dating was carried out using ^{14}C techniques at the NERC Radiocarbon Laboratories in East Kilbride, Scotland, with a LKB 1220

and Hughes (1967), modificado por Cronan (1976). Las cuatro fases definidas operacionalmente fueron:

- (1) la fase “soluble en ácido acético”, que incluye carbonatos, fases débilmente adsorbidas y productos de evaporación de agua intersticial, lixiviados con ácido acético al 25%;
- (2) la fase “reducible en ácido”, que incluye (1) mas los óxidos de ferro-manganeso reducibles y sus elementos asociados, lixiviados con hidroxilamina HCl 1M en 25% de ácido acético;
- (3) la fase “soluble en HCl”, que incluye (2) mas los óxidos cristalinos de Fe, arcillas, fases detriticas alteradas y sulfuros parcialmente disueltos, lixiviados con HCl caliente al 50%; y
- (4) la fase “residual”, que incluye las fases detriticas más resistentes, sustrayendo los elementos en las fases (1), (2) y (3) de sus concentraciones totales.

Se determinaron Li, Na, K, Mg, Al, Ti, La, Fe, V, Co, Mn, Ni, Mo, Cu, Zn, Pb, P, Be y Ba. Todos los análisis fueron realizados por medio de espectrometría de emisión atómica por plasma con acoplamiento inductivo (ICP-AES, por sus siglas en inglés). La precisión analítica, mayor a $\pm 10\%$, se estimó mediante el análisis de sub-muestras por duplicado. El sesgo (para el análisis total), menor a $\pm 5\%$, se determinó utilizando material de referencia certificado internacionalmente (*United States Geological Survey*), así como con material de referencia propio. A fin de evaluar en detalle la distribución del componente hidrotermal a lo largo de los núcleos, éstos fueron muestreados adicionalmente a intervalos de 2 cm para su análisis mediante digestión ácida en HCl caliente. El núcleo SO67/175 se muestreó a intervalos de 8 cm. Los resultados de la lixiviación con HCl fueron recalculados tras corrección por detritos (residuo insoluble en HCl) y por CaCO_3

quantitative liquid scintillation counter. The ages reported were calculated as conventional radiocarbon years (before A.D. 1950) and expressed at a level of $\pm 1\sigma$ for overall analytical confidence. The 120-ka datum in the longest core SO67/175 was calculated based on the disappearance level of the planktonic foraminifer *Globigerinoides ruber* (pink) in the South Pacific (Thompson *et al.*, 1979). This datum is absent in all other cores studied here. The surface of the cores was used as a zero-age datum for calculating sediment and metal accumulation rates.

RESULTS AND DISCUSSION

Core lithology

Smear slide observations indicate that the cores from the ELSC are comprised of ash admixed with abundant nannofossil ooze, including distinctive ash beds that vary in thickness from 2 cm to a maximum of ca. 50 cm. The dominant source for the volcanogenic material are the nearby volcanoes on the Tofua Arc (Riech *et al.*, 1990). The dominant hue of the majorly calcareous ooze units is grayish brown to very dark brown (Munsell 10YR). The calcareous sediments are sparsely stained by amorphous Fe-Mn oxides, which are present as coatings of particles and/or as fillings of foraminifer tests (Cronan *et al.*, 1984; Walter *et al.*, 1990). Sediments are oxic throughout and organic-poor (Fowler, 1994). Olive-gray ash beds and ash-enriched sediments (Munsell 5Y4/3) are present in most cores from the area (except CD33/36, CD33/37, CD33/38, CD33/39, and SO67/175). The middle section of core CD33/48 is formed by reddish brown nannofossil ooze and clay; it contains clayey ash layers in its upper and lower sections. Cores CD33/31, CD33/38, CD33/42 and CD33/51 are mainly comprised of volcanoclastic material, and were not analyzed geochemically.

(basado en concentraciones de Ca), a fin de evitar cualquier dilución del componente hidrotermal por los componentes dominantes en el sedimento. Las capas volcanogénicas que se depositan instantáneamente tienen un efecto diluyente sobre la depositación de elementos derivados de fuentes hidrotermales. El espesor de estas capas se sustrajo y las longitudes del núcleo se recalcularon para considerar sólo sus intervalos predominantemente pelágicos para su análisis geoquímico (Hodkinson y Cronan, 1994; 1995; 1998).

Determinación de la edad de los sedimentos

El fechado se realizó utilizando técnicas de ^{14}C en los NERC *Radiocarbon Laboratories* de East Kilbride, Escocia, con un contador de centelleo líquido LKB 1220. Las edades son reportadas como años convencionales de radiocarbono (antes de 1950 D.C.) y expresadas a un nivel de precisión analítica general de $\pm 1\sigma$. El dato de 120 ka en el núcleo más largo fue calculado en base al nivel de desaparición del foraminífero planctónico *Globigerinoides ruber* (rosa) en el Pacífico Sur (Thompson *et al.*, 1979). Este dato está ausente en los núcleos restantes aquí estudiados. La superficie de los núcleos fue utilizada como un dato de edad cero para calcular las tasas de acumulación de sedimentos y metales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Litología de los núcleos

Las observaciones de láminas delgadas con frotis de sedimento indican que los núcleos del CDOL se componen de cenizas mezcladas con abundantes lodos nanofosilíferos, incluyendo lechos de ceniza distintivos que varían en grosor desde 2 cm hasta un máximo de alrededor de 50 cm. Las fuentes dominantes del material volcánico son los volcanes cercanos del Arco

Sediment geochemistry

Twenty seven samples from dominantly hemipelagic-cored units were analyzed in bulk and by detailed partition analysis. The element concentrations and partitioning are summarized in table 2. High Al concentrations (mean Al = 5.6 wt.%) in the ELSC area, compared with other areas adjacent to the spreading centres in the Lau Basin (Daesslé *et al.*, 2000), reflect directly the abundance of detrital material (ash/hyaloclasts). The dominant lithogenic composition is also seen from the average percent of HCl-insoluble residue (65 wt.%; table 2), compared to 45 wt.% adjacent to the CLSC and the VFR (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé and Cronan, in press). On average, only 23 wt.% of the sediments are soluble in acetic acid. This is mainly as calcium carbonate, sea water evaporates and/or loosely adsorbed phases. The percentages of Fe-Mn oxides (4 wt.% acid-reducible) and altered-detrital (7 wt.%) material, however, are only slightly lower than those in other Lau Basin sediments (Daesslé *et al.*, 2000).

Only Mn, Ni, Mo, Pb and P occur majorly in the acid-reducible "hydrothermal oxide" phase (43–89%), with varying, but minor proportions in the other sediment phases (table 2). Approximately 89% of the bulk Mn is present as a Mn-oxide phase. Elements not dominantly present, but still with relatively high percentages in the acid-reducible phase (12–34%) include Co, V, Fe, Zn, Cu and La. These elements, although partially oxide-associated, are significantly enriched in other sediment phases (table 2). Of these, Co and V are similarly partitioned, 34 and 27% respectively, associated with the oxide phase. Cobalt in the oxide phase is likely to be scavenged from seawater by hydrothermal Mn (Lilley *et al.*, 1995). Vanadium however is also scavenged by hydrothermal Fe-oxihydroxides (Feely *et al.*, 1996; Wheat *et al.*, 1996). A relatively minor

de Tofua (Riech *et al.*, 1990). El matiz dominante de la mayoría de las unidades de lodos nanofosilíferos es de grisáceo-café a café muy oscuro (Munsell 10YR). Los sedimentos calcáreos están teñidos parcialmente por óxidos amorfos de Fe-Mn, que se presentan como cubiertas de partículas y/o como relleno de testas de foraminíferos (Cronan *et al.*, 1984; Walter *et al.*, 1990). Los sedimentos son óxicos a todo lo largo de los núcleos y pobres en materia orgánica (Fowler, 1994). En la mayoría de los núcleos del área (a excepción de los núcleos CD33/36, CD33/37, CD33/38, CD33/39 y SO67/175) se presentan lechos de cenizas olivo-grisáceas y sedimentos enriquecidos en cenizas (Munsell 5Y4/3). La sección media del núcleo CD33/48 está formada por lodos nanofosilíferos con arcilla y posee un tono rojizo-café, con capas de cenizas arcillosas en sus secciones superior e inferior. Los núcleos CD33/31, CD33/38, CD33/42 y CD33/51 están constituidos principalmente de material volcánico-clástico y no fueron analizados geoquímicamente.

Geoquímica de sedimentos

Se analizó detalladamente la geoquímica total y de partición de veintisiete muestras de unidades de núcleo predominantemente hemipelágicas. En la tabla 2 se resumen las concentraciones de los elementos y su geoquímica de partición. Las altas concentraciones de Al (Al medio = 5.6 % en peso) en el área del CDOL comparadas con otras zonas adyacentes a los centros de dispersión de la Cuenca Lau (Daesslé *et al.*, 2000) directamente reflejan la abundancia de material detrítico (ceniza/hyaloclastos) en la zona. La composición litogénica dominante también se observa en el porcentaje promedio de residuos insolubles en HCl (65% en peso; tabla 2), comparado con el 45% en peso, adyacente al CDCL y a la DVF (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé y Cronan, en prensa). En promedio, sólo el 23% en peso de los sedimen-

Table 2. Summary of mean bulk element concentrations and average element partitioning of calcareous dominant sediments in cores collected adjacent to the Eastern Lau Spreading Centre ($n = 27$).**Tabla 2.** Resumen de las concentraciones de elementos totales y promedio de la partición de elementos de los sedimentos calcáreos dominantes en núcleos colectados cerca del Centro de Dispersión Oriental de Lau ($n = 27$).

Element	Bulk concentration		% Acetic acid soluble	% Acid reducible	% HCl soluble	% Residue
	Mean	Std. Dev.				
Mn (wt.%)	1.14	0.41	5	89	3	3
Ni (ppm)	47.4	15.2	32	49	7	13
Mo (ppm)	6.7	2.70	0	65	18	17
Pb (ppm)	19.2	6.66	0	65	12	23
P (ppm)	1094	184	16	43	15	26
Co (ppm)	24.13	2.57	0	34	15	51
V (ppm)	257.8	37.8	1	27	21	51
Fe (wt.%)	6.54	0.56	9	15	22	54
Zn (ppm)	115.2	16.3	29	12	17	42
Cu (ppm)	177.7	28.8	43	16	15	27
La (ppm)	8.56	1.42	50	19	15	17
Ca (wt.%)	10.52	1.40	64	1	10	25
Sr (ppm)	564	101	74	3	7	17
Na (wt.%)	2.20	0.15	53	1	7	39
K (wt.%)	0.48	0.03	26	3	9	62
Mg (wt.%)	1.67	0.28	16	1	24	60
Li (ppm)	8.39	1.47	11	5	38	45
Be (ppm)	0.36	0.06	20	3	13	64
Ba (ppm)	355	71	11	10	49	30
Al (wt.%)	5.55	0.52	4	1	30	65
Ti (ppm)	2938	317	0	2	26	73
Wt % Sol.	--	--	23	4	7	65

proportion of Ni (20%) is associated with the detrital/altered-detrital phases. The high percentage of Ni in the acetic-acid-soluble phase (32%) suggests that this element may also occur in a loosely adsorbed form, probably scavenged by the hydrothermal Mn oxides (Lilley *et al.*, 1995). Molybdenum and Pb are absent from the acetic-acid-soluble phase (below the detection limit of 1 ppm and 3 ppm, respectively). Thirty-five percent of the bulk concentrations of Mo and Pb is part of the detrital/altered-detrital phases. Significant percentages of P (41%) are associated both with the less soluble phases (HCl-soluble and residual) and the acetic-acid-soluble phases (16%). Zinc, Cu and La have high proportions (29–50%) in the acetic-acid-soluble phase, probably in loosely adsorbed phases and biogenic carbonates. Only 9% of Fe occurs in the acetic acid soluble phase. The proportions of detrital/ altered-detrital Fe, Co, V, Zn, Cu and La in the ELSC sediments is high compared to the VFR sediments, in which calcareous ooze is the dominant component (Daesslé *et al.*, 2000). Thirty-two to 76% of the concentration of these elements occurs in the detrital plus the altered-detrital phase in the ELSC area, whereas only 19–69% of them occur similarly in the sediments from the VFR, the southern extension of the ELSC (Daesslé *et al.*, 2000). The high abundance of these elements in the less soluble phases is attributed to the higher proportions of volcanoclastic material in the northern ELSC, probably due to the proximity of the volcanic islands of the Tofua volcanic arc (fig. 1a, b).

Calcium, Sr, Na, K, Mg, Li, Be, Ba, Al and Ti are all less than 10% in the acid-reducible phase. Of these elements, Ca and Sr are mainly associated with calcium carbonate and Na with seawater evaporates, both phases being soluble in acetic acid. Except for Ti and Al, the remaining elements occur in both the acetic-acid-soluble and the less soluble phases. Lithium, Al, Ti, Be and Ba are preferentially associated with the

tos es soluble en ácido acético, principalmente como carbonato de calcio, productos de evaporación de agua de mar y/o fases adsorbidas. Sin embargo, los porcentajes de óxidos de Fe-Mn (4% en peso reducibles en ácido) y de material detrítico alterado (7% en peso), son ligeramente menores a los encontrados en otros sedimentos de la Cuenca Lau (Daesslé *et al.*, 2000).

Sólo el Mn, Ni, Mo, Pb y P se presentan mayormente en la fase “óxido hidrotermal” reducible en ácido (43–89%), en proporciones variables pero menores que en las otras fases geoquímicas del sedimento (tabla 2). Aproximadamente el 89% del Mn total se presenta como una fase de óxido de Mn. Los porcentajes relativamente altos en la fase reducible en ácido (12–34%) incluyen Co, V, Fe, Zn, Cu y La. Estos elementos, aunque parcialmente asociados a los óxidos, están significativamente enriquecidos en otras fases del sedimento (tabla 2). De éstos, el Co y el V tienen porcentajes similares, 34 y 27% respectivamente, asociados con la fase de óxidos. El Co en la fase de óxidos posiblemente es secuestrado del agua de mar por el Mn hidrotermal (Lilley *et al.*, 1995). Sin embargo, el V también es secuestrado por oxihidróxidos de Fe hidrotermales (Feely *et al.*, 1996; wheat *et al.*, 1996). Una proporción relativamente menor de Ni (20%) está asociada con las fases de detrititos/detríticos alterados. El alto porcentaje de Ni en la fase soluble en ácido acético (32%) sugiere que este elemento puede también presentarse en una forma débilmente adsorbida, probablemente secuestrada por óxidos de Mn hidrotermales (Lilley *et al.*, 1995). El Mo y el Pb están ausentes de la fase soluble en ácido acético (por debajo del límite de detección de 1 ppm y 3 ppm respectivamente). El 35% de las concentraciones totales de Mo y Pb forman parte de las fases de detrititos/detríticos alterados. Porcentajes significativos de P están asociados tanto con las fases menos solubles (41%, soluble en HCl y residual) como con las fases solubles en ácido acético (16%). El Zn,

HCl-soluble and residual phases, signaling their predominantly detrital/ altered-detrital association. Whereas Be in the acetic-acid-soluble phase may in part be loosely adsorbed, Mg and K are likely to occur preferentially in seawater evaporates. Barium in the (hot) HCl-soluble phase can, at least partially, occur in hydrothermal and/or organic barite (BaSO_4) (Goldberg and Arrhenius, 1958), however, a predominantly hydrothermal source for Ba in the Lau Basin is supported by its relatively high concentrations in the bottom sea water there (Daesslé *et al.*, 2000).

Sedimentation rates

Eight cores were dated by ^{14}C techniques in order to determine sediment and metal accumulation rates, as well as the ages of the most significant Mn-oxide peaks (table 3). In addition, a long core (SO67/175) was dated by determining the 120-ka disappearance level of *Globigerinoides ruber* (pink) in it. Radiocarbon ages determined for all but two cores from the ELSC (CD33/48 and SO67/175) are < 14.1 ka. Except for core SO67/175, no shells of *Globigerinoides ruber* (pink) were observed in any of the cores. Overall, sedimentation rates were calculated based on the intervals dated for each core. Only in core SO67/175 the sedimentation rates were calculated for two separate time intervals: 0–30 ka and 30–120 ka (Daesslé *et al.*, 2000).

Sedimentation rates in the ELSC area range from 1.0 to 6.8 cm ka^{-1} (table 4) and are comparable to the bulk sedimentation rates (volcaniclastic + hemipelagic) determined by Riech *et al.* (1990) in the basin (i.e., around 5 cm ka^{-1}). The lowest sedimentation rates correspond to those cores with less volcanogenic material, such as cores CD33/40 and SO67/175 adjacent to the northern tip of the spreading axis (2.5 and 1.9 cm ka^{-1} , respectively), and

Cu y La tienen elevadas proporciones (29–50%) en la fase soluble en ácido acético, estando probablemente débilmente adsorbidos, o en forma de carbonatos biogénicos. Sólo el 9% del Fe se presenta en la fase soluble en ácido acético. Las proporciones de Fe, Co, V, Zn, Cu y La en las fases de detritos/detritos alterados de los sedimentos del CDOL son altas, comparadas con las de los sedimentos cercanos a la DVF, en los que el lodo calcáreo nanofosilífero es el componente dominante (Daesslé *et al.*, 2000). Del 32% al 76% de la concentración de estos elementos se presenta en la fase de detritos más detritos alterados en el área del CDOL, mientras que sólo del 19% al 69% de ellos se presenta de forma similar en los sedimentos de la DVF, la extensión sureña del CDOL (Daesslé *et al.*, 2000). La gran abundancia de estos elementos en las fases menos solubles se atribuye a las altas proporciones de material volcánico en el norte del CDOL, debido probablemente a la proximidad de las islas volcánicas del arco volcánico de Tofua (fig. 1a, b).

Calcio, Sr, Na, K, Mg, Li, Be, Ba, Al y Ti constituyen menos del 10% de la fase reducible en ácido. De estos elementos, el Ca y el Sr están asociados principalmente con carbonato de calcio y el Na lo está, con evaporados de agua de mar, siendo ambas fases solubles en ácido acético. A excepción del Ti y del Al, los demás elementos ocurren en la fase soluble en ácido acético y en las fases menos solubles. El Li, Al, Ti, Be y Ba, están preferentemente asociados con las fases soluble en HCl y residual, indicando una asociación predominante con la fase de detritos/detritos alterados. Mientras que el Be puede en parte estar débilmente adsorbido en la fase soluble en ácido acético, es posible que el Mg y el K se presenten preferentemente en evaporados de agua de mar. El Ba en la fase soluble en HCl (caliente) puede, al menos parcialmente, presentarse como barita

core CD33/48 to the south-west of the ELSC (1.0 cm ka^{-1}). The highest sedimentation rates (3.3 to 6.8 cm ka^{-1}) are found in cores retrieved in the northern section of the spreading axis (fig. 1b). The sedimentation rate during the 30- to 120-ka period in core SO67/175 (1.6 cm ka^{-1}) is only slightly lower than the sedimentation rate in younger sediments ($< 30 \text{ ka}$) in the same core.

Manganese and iron accumulation rates

Manganese and Fe accumulation rates (AR) have been calculated based on the following equation:

$$AR = M \cdot \rho \cdot S$$

in which AR is the element accumulation rate (expressed as $\text{mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$), M is the mean concentration of the “raw” HCl-soluble element (expressed as wt.%), ρ is the dry bulk density (g cm^{-3}) and S is the sedimentation rate (cm ka^{-1}). Dry bulk densities were not measured *in situ*. Nevertheless, the densities yielded in the present paper are similar to the densities measured *in situ* on other cores from the Lau Basin (Cronan *et al.*, 1986; Riech *et al.*, 1990; Riech written comm., 1997) and the densities determined for pelagic calcareous sediments by several authors (i.e., 0.7 to 1.0 g cm^{-3}) (Bender *et al.*, 1970; Broecker, 1971; Boström *et al.*, 1973).

Manganese AR range between 5.1 and $109.9 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$. Manganese AR are higher in those cores located in the southern section of the northernmost overlapping segment of the ELSC (CD33/28, CD33/30 and CD33/32). By contrast, cores located proximal to the northern section of this ridge segment (SO67/175, CD33/40, CD33/36 and CD33/33) have lower overall Mn AR, averaging $20.7 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ (table 4, fig. 2).

(BaSO_4) hidrotermal y/u orgánica (Goldberg y Arrhenius, 1958), sin embargo, las concentraciones relativamente altas de este elemento en el agua de mar de fondo de la Cuenca Lau sugieren la presencia de una fuente predominantemente hidrotermal de este elemento (Daesslé *et al.*, 2000).

Tasas de sedimentación

Con objeto de determinar las tasas de sedimentación y acumulación de metales, así como la edad de los máximos más significativos en las concentraciones de óxidos de Mn, ocho núcleos fueron fechados mediante técnicas de ^{14}C (tabla 3). Adicionalmente, se fechó un núcleo largo (SO67/175) para determinar el nivel de 120 ka de la desaparición de *Globigerinoides ruber* (rosa). Las edades del carbono radioactivo determinadas para todos los núcleos del CDOL, a excepción de dos (CD33/48 y SO67/175) son $< 14.1 \text{ ka}$. Exceptuando el núcleo SO67/175, no se observaron testas de *Globigerinoides ruber* (rosa) en ninguno de los núcleos. Las tasas de sedimentación se calcularon en base a los intervalos fechados en cada núcleo. Solamente en el núcleo SO67/175 las tasas de sedimentación fueron calculadas para dos intervalos distintos de tiempo: $0\text{--}30 \text{ ka}$ y $30\text{--}120 \text{ ka}$ (Daesslé *et al.*, 2000).

Las tasas de sedimentación en el área del CDOL varían de 1.0 a 6.8 cm ka^{-1} (tabla 4) y son comparables a las tasas de sedimentación total (volcanoclástica + hemipelágica) determinadas por Riech *et al.* (1990) en la cuenca (v.g., cerca de 5 cm ka^{-1}). Las tasas de sedimentación más bajas corresponden a núcleos con menos material volcánico, como los núcleos CD33/40 y SO67/175, adyacentes al extremo norte del eje de dispersión (2.5 y 1.9 cm ka^{-1} , respectivamente), y el núcleo CD33/48, extraído al suroeste del CDOL (1.0 cm ka^{-1}). Las tasas de

Table 3: Ages determined for cores adjacent to the Eastern Lau Spreading Centre with ^{14}C techniques.
Tabla 3. Edades determinadas para los núcleos cercanos al Centro de Dispersión Oriental de Lau con técnicas de ^{14}C .

Sample I.D. Cruise/Core-depth	Laboratory Code	Depth in core (cmbsf*)	Sample age (a \pm 1 σ)
CD33/28-008	SRR-5695	8 (4-12)	3900 \pm 55
CD33/28-069	SRR-5696	36.5 (33-40)	10250 \pm 70
CD33/30-068	SRR-5697	59.5 (56-73)	10905 \pm 70
CD33/30-110	SRR-5698	96.5 (92.5-100.5)	14130 \pm 70
CD33/32-013	SRR-5699	9.5 (5-14)	2975 \pm 50
CD33/32-073	SRR-5700	66 (63-69)	10900 \pm 85
CD33/33-009	SRR-5701	9 (5.5-12.5)	3340 \pm 50
CD33/33-065	SRR-5702	23.5 (19.5-27.5)	5265 \pm 55
CD33/36-025	SRR-5703	25 (20-30)	5725 \pm 55
CD33/36-065	SRR-5704	65 (61-69)	10275 \pm 55
CD33/40-006	SRR-5705	6 (2-11)	3095 \pm 45
CD33/40-059	SRR-5706	36 (33-39)	12830 \pm 70
CD33/48-049	SRR-5707	39 (34.5-43.5)	38915 \pm 995 -885
CD33/48-097	SRR-5708	87 (83-91)	> 44975
SO67/175-045	SRR-5915	45 (42-48)	23815 \pm 105 **(120 ka = 150 cmbsf*)

* Depths after subtraction of ash and hyaloclastite layers.

** Depth within core SO67/175 where the 120 ka disappearance level of *Globigerinoides rubber* (pink) is located.

* Profundidades después de la sustracción de las capas de cenizas y hialoclastos.

**Profundidad en el núcleo SO67/175 en donde se localiza el nivel de 120 ka de la desaparición de *Globigerinoides rubber* (rosa).

The mean Mn AR proximal to the northern half of the northernmost ELSC segment (CD33/40 and SO67/175), fall within the range of those for the sediments adjacent to the CLSC (fig. 2). The Mn AR in cores CD33/33 and CD33/36 from the same area, are only slightly higher than the mean Mn AR in core CD33/7 from the CLSC (table 4, fig. 2). However, the Mn AR in the cores proximal to the southern

sedimentación más elevadas (3.3 a 6.8 cm ka⁻¹) se encuentran en núcleos recuperados en la sección norte del eje de dispersión (fig. 1b). La tasa de sedimentación durante el período de 30 a 120 ka, en el núcleo SO67/175 (1.6 cm ka⁻¹) es sólo ligeramente menor que la tasa de sedimentación en sedimentos más jóvenes (< 30 ka) del mismo núcleo.

half of the northernmost overlapping spreading section of the ELSC, are higher than those in most cores adjacent to the other spreading centres of the Lau Basin, except for those cores immediately adjacent to the most active hydrothermal field (Vai Lili) at the VFR (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé and Cronan, in press).

Mean Mn AR in core SO67/175 was slightly lower ($6.1 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$) during the 30- to 120-ka period than during the 0- to 30-ka period ($9.5 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$), suggesting a slightly higher input of hydrothermal Mn-oxides during recent times at the site where this core was collected (table 4).

Cores CD33/30 and CD33/32 have the highest Fe AR. Unlike Mn AR, the enhanced Fe AR are attributable to the higher abundance of altered detritus in the sediments and not just to an enhanced hydrothermal input to them. This is deduced from the low proportion of Fe in the acid-reducing soluble “hydrothermal oxide” phase compared to Mn, and from the relatively high volcanoclastic sedimentation rates in the area, due to the proximity of the active volcanoes on the Tofua volcanic arc. However a partial association of Fe with other non-oxide hydrothermal Fe-bearing minerals (nontronite, sulphide) cannot be disregarded. Overall, the AR of Fe in the remaining cores of the ELSC, are similar or slightly higher than those in the CLSC and VFR areas.

Downcore variation in Mn

In most of the cores from the ELSC area, the downcore variation in Mn concentrations calculated on a detrital-free, CaCO_3 -free basis (except SO67/175) appears to be, at least in part, a function of the dilution by altered (HCl-soluble) admixed volcanic ash in them (fig. 3). Thus, low Mn concentrations correlate with those core sections with abundant ash. Nevertheless, it is possible to identify some

Tasas de acumulación de Mn y Fe

Las tasas de acumulación (TA) de Mn y Fe han sido calculadas en base a la siguiente ecuación:

$$TA = M \cdot \rho \cdot S$$

en donde TA es la tasa de acumulación del elemento (expresado en $\text{mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$), M es la concentración media del elemento (sin corregir) soluble en HCl (expresado en % del peso), ρ es la densidad en masa seca (g cm^{-3}) y S es la tasa de sedimentación (cm ka^{-1}). Las densidades en masa seca no fueron medidas *in situ*, sin embargo, en este trabajo las densidades encontradas son similares a las medidas *in situ* en otros núcleos de la Cuenca Lau (Cronan *et al.*, 1986; Riech *et al.*, 1990; Riech, com. escrita, 1997) y a las densidades determinadas para sedimentos pelágicos calcáreos por diversos autores (v.g. 0.7 a 1.0 g cm^{-3}) (Bender *et al.*, 1970; Broecker, 1971; Boström *et al.*, 1973).

La TA del manganeso varió entre 5.1 y $109.9 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ y ésta es más alta en los núcleos localizados en la sección sur del segmento superpuesto más noroeste del CDOL (CD33/28, CD33/30 y CD33/32). En contraste, los núcleos localizados cerca de la sección norte de este segmento (SO67/175, CD33/40, CD33/36 y CD33/33) tienen bajas TA de Mn, promediando $20.7 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ (tabla 4, fig. 2).

La TA media del Mn cerca de la porción norte del segmento más noroeste del CDOL (CD33/40 y SO67/175), cae dentro del rango de las TAs de los sedimentos adyacentes al CDCL (fig. 2). Las TAs de Mn en los núcleos CD33/33 y CD33/36 de la misma área, son sólo un poco más altas que el promedio de las TAs de Mn en el núcleo CD33/7 del CDCL (tabla 4, fig. 2). Sin embargo, la TA de Mn en los núcleos próximos a la mitad del sur de la sección superpuesta más noroeste del CDOL, son

Table 4. Sedimentation rates, sediment density and summary statistics for accumulation rates in HCl-soluble phases in sediments adjacent to the ELSC for the 0 < 14.1 ka time interval (0–38.9 ka for core CD33/48 and 0–23.8 ka for core SO67/175), calculated from ¹⁴C dates and a surface datum point of age zero.

Tabla 4. Tasas de sedimentación, densidad de sedimentos y resumen estadístico de las tasas de acumulación de las fases solubles en HCl de sedimentos cercanos al Centro de Dispersión Oriental de Lau, para el intervalo de tiempo 0 < 14.1 ka (0–38.9 ka para el núcleo CD33/48 y 0–23.8 para el núcleo SO67/175), calculadas a partir de datos de ¹⁴C y un dato superficial del punto a la edad cero.

Core	Inferred sedimentation rate (cm ka ⁻¹)	Bulk dry density (g cm ⁻³)	Element accumulation rates					
			Mn (mg cm ⁻² ka ⁻¹)			Fe (mg cm ⁻² ka ⁻¹)		
			Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
CD33/28	3.27	0.89	35.8	15.0	62.4	92.2	44.1	147.7
CD33/30	6.80	0.91	39.1	11.9	109.9	151.0	58.3	258.4
CD33/32	5.16	0.98	39.6	7.9	82.4	144.1	54.5	228.5
CD33/33	5.11	1.02	30.1	17.0	64.2	113.5	65.1	232.8
CD33/36	6.58	0.94	29.3	7.2	69.7	139.8	67.7	257.0
CD33/40	2.51	1.03	14.0	6.4	21.8	69.9	43.9	90.0
CD33/48	1.00	0.81	10.1	5.1	14.7	25.3	15.2	30.7
SO67/175**	1.89 (1.57)	1.00 (1.03)	9.5 (6.1)	8.3 (2.9)	12.2 (10.3)	43.6 (28.1)	41.0 (22.2)	45.2 (38.3)
CD33/28	3.27	0.89	35.8	15.0	62.4	92.2	44.1	147.7

*Density not *in situ*. ** Values in brackets represent the 30–120 ka data for core SO67/175.

*Densidad no *in situ*. ** Los valores en paréntesis representan los datos de 30–120 ka para el núcleo SO67/175.

peaks that may reflect temporal variations in the hydrothermal input that are interpreted to be contemporaneous between cores (fig. 3). Downcore concentrations of Fe and other lithogenic elements remain overall constant.

Most of the cores have a peak in Mn at or near the surface, suggesting a recent enhancement of hydrothermal input to the sediments in the area. In young sediments (< 14.1 ka) it is seen that high Mn concentrations occurred at around 3 to 4 ka and around 10 to 11 ka. Other peaks in Mn that may correlate between cores occur at ca. 5.5 ka in cores CD33/30, CD33/33

más altas que en la mayoría de los núcleos adyacentes a los otros centros de dispersión de la Cuenca Lau, a excepción de los núcleos inmediatamente adyacentes al campo hidrotermal más activo (Vail Lili) en la DVF (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé y Cronan, en prensa).

La TA media del Mn en el núcleo SO67/175 fue ligeramente menor (6.1 mg cm⁻² ka⁻¹) durante el periodo de 30 a 120 ka que durante el periodo de 0 a 30 ka (9.5 mg cm⁻² ka⁻¹), lo que sugiere un aporte reciente de óxidos de Mn hidrotermales ligeramente mayor en el sitio donde este núcleo fue recolectado (tabla 4).

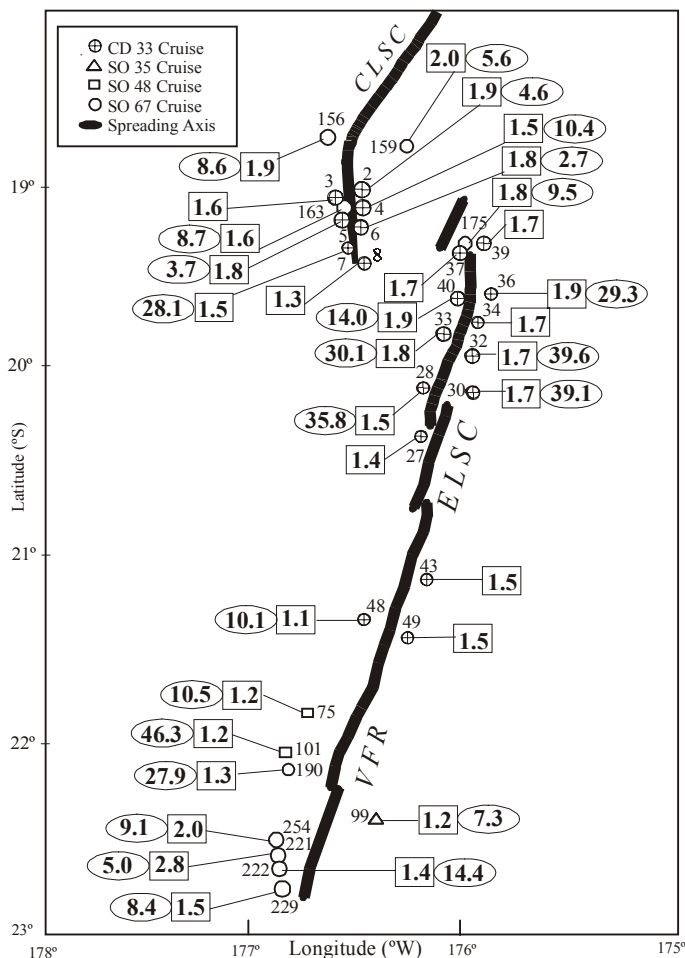


Figure 2. Data on cores from the Eastern Lau Spreading Centre. In rectangles: Fe/Mn ratios in the oxide phase (acid-reducing plus acetic-acid-soluble) of surficial sediments. In circles: mean HCl-soluble Mn accumulation rates during a 0- to 30-ka period. Data from the Central Lau Spreading Centre and the Valu Fa Ridge from Daesslé *et al.*, (2000); and Daesslé and Cronan, in press.

Figura 2. Datos en los núcleos del Centro de Dispersión Oriental de la Cuenca de Lau (ELSC). En rectángulos: tasas de Fe/Mn en la fase de óxidos (reducibles en ácido y solubles en ácido acético) de sedimentos superficiales. En círculos: Tasas promedio de acumulación de Mn soluble en HCl, durante un período de 0 a 30 ka. Datos del Centro de Dispersión Central de la Cuenca Lau (CLSC) y de la Dorsal de Valu Fa (VFR) tomados de Daesslé *et al.* (2000); Daesslé y Cronan, en prensa.

and CD33/36. In these relatively young sediments, no clear downcore trends (i.e., gradual increases or decreases in Mn) can be seen. The Mn concentrations in sediments older than

Los núcleos CD33/30 y CD33/32 tienen la TA de Fe más alta. A diferencia de las TAs de Mn, éstas son atribuibles a la gran abundancia de detritos alterados en los sedimentos y no

39 ka in the southernmost core CD33/48, remain relatively high and without significant peaks downcore. However in the near-bottom section of core CD33/48 Mn concentrations decrease abruptly.

The hydrothermal record in core SO67/175 is the longest in the ELSC area, extending to an age of ca. 143 ka, at which the core reached the basement. Due to a low content of admixed ash, it is considered to be the most representative core for assessing the hydrothermal discharges that may have occurred from the northern ELSC. The relatively high Mn concentrations in its bottom section, between 106 and ca. 140 ka, are likely to represent the record of hydrothermal activity that took place at or near the spreading axis. Such a near-basement enrichment in hydrothermal precipitates is in accordance with previous observations by Cronan (1976), Lyle *et al.* (1986) and many other authors, on sediments above MOR-generated crust. However, the concentrations of Mn in this core do not decrease consistently upcore with an increasing distance of the site from the ELSC as sea floor spreading continues, as it has been found on MOR. By contrast, after Mn decreases sharply at ca. 106 ka it increases very gradually upcore. The age at which Mn concentrations decrease sharply (106 ka) appears to be contemporaneous with the sharp decrease in Mn seen in some cores from the VFR and some cores from the CLSC area (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé and Cronan, in press). This suggests that similar processes may affect the variation in hydrothermal activity in these areas. Furthermore, a minor enrichment of Mn at ca. 89 ka in core SO67/175 is time-equivalent to a significant Mn peak in cores from the VFR and also in some cores from the CLSC area (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé and Cronan, in press). However, Mn concentrations during this enrichment period are well below those at the VFR. The semi-enclosed nature of the Lau

sólo a un aporte hidrotermal de Fe. Esto se deduce en base a las bajas proporciones de Fe en la fase reducible en ácido de “óxidos hidrotermales”, comparadas con las de Mn, y de las relativamente altas tasas de sedimentación volcánica del área, debido a la proximidad de volcanes activos en el arco volcánico de Tofua. Sin embargo, es posible que exista una asociación parcial de Fe con otros minerales hidrotermales como la nontronita o los sulfuros. En general, las TAs de Fe en los núcleos restantes del CDOL, son similares o ligeramente más altas que las de las áreas del CDCL y la DVF.

Variación del Mn a lo largo de los núcleos

En la mayoría de los núcleos del área del CDOL (excepto en el núcleo SO67/175), la variación de las concentraciones de Mn con la profundidad calculadas en una base libre de detritos y de CaCO₃ parece estar, al menos parcialmente, en función de su dilución por ceniza volcánica alterada (soluble en HCl) y mezclada dentro de ellos (fig. 3). Por esta razón, las bajas concentraciones de Mn se correlacionan con las secciones del núcleo que contienen abundante ceniza. Sin embargo, es posible identificar algunos máximos que pueden reflejar variaciones temporales en el aporte hidrotermal, los cuales son interpretados como contemporáneos entre los diversos núcleos (fig. 3). Las concentraciones de Fe y otros elementos litogénicos permanecen generalmente constantes a lo largo de los núcleos.

La mayoría de los núcleos estudiados tienen un máximo de Mn en o cerca de la superficie, sugiriendo un enriquecimiento reciente por aporte hidrotermal a los sedimentos en el área. En sedimentos jóvenes (< 14.1 ka), se ha observado que las concentraciones altas de Mn ocurren alrededor de 3 a 4 ka y cerca de 10 a 11 ka. Otros máximos de Mn que se pueden correlacionar entre núcleos, ocurren cerca de 5.5 ka en

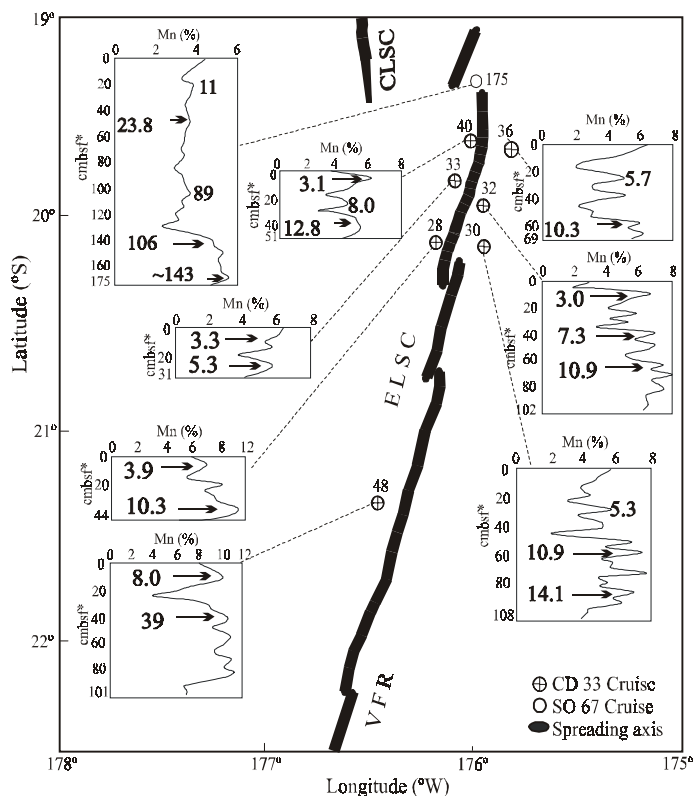


Figure 3. Downcore plots of the distribution of Mn concentrations (%), on a detrital-free CaCO_3 -free basis in sediment cores collected adjacent to the Eastern Lau Spreading Centre, indicating the inferred ages (in ka) of Mn peaks in each core.

Figura 3. Gráficas de la distribución de las concentraciones, núcleo abajo, de Mn (%) en una base libre de detritos y de CaCO_3 , en núcleos de sedimento recolectados cerca del Centro de Dispersión Oriental de la Cuenca Lau, indicando las edades inferidas (en ka) de los máximos de Mn en cada núcleo.

Basin is not only thought to contain hydrothermal plume fallout (Cronan and Hodkinson, 1997), but also to generate a Mn enrichment in the entire water mass of the basin (Daesslé *et al.*, 2000). Thus, it is possible that distal precipitation of Mn from the VFR could have been responsible for the Mn enrichment and Mn AR values recorded in the sediments of SO 67/175 at ca. 89 ka. The more recent gradual upcore increase in Mn towards the surface seen in this

los núcleos CD33/30, CD33/33 y CD33/36. En estos sedimentos relativamente jóvenes, no se observan tendencias claras a lo largo de los núcleos (v.g. incrementos o disminuciones graduales de Mn). Las concentraciones de Mn en sedimentos de más de 39 ka en el núcleo más sureño CD33/48, permanecen relativamente altas y sin máximos significativos con la profundidad del núcleo. Sin embargo, las concentraciones de Mn en la sección cercana al

core, might be attributable to hydrothermal sources other than those at the northern ELSC. The southward propagation of the CLSC nearing the latitude of site SO67/175, and the hydrothermal discharges behind its tip (Daesslé and Cronan, in press) would be good candidates to account for the gradual upcore enrichment in Mn seen in the upper part of this core.

Hydrothermal mineralisation and sedimentation and the evolution of the ELSC

From the mean Mn AR, it can be seen that hydrothermal fluxes to the southern half of the northernmost overlapping ELSC segment (between 19°53'S and 20°07'S) were higher than in the northern half of the same segment, between 19°20'S and 19°45'S. South of core CD33/28, a distance around 150 km exists to the site where core SO48/75 was retrieved proximal to the VFR (Daesslé *et al.*, 2000). Between the sites of these two cores, only one core has been dated (CD33/48), for which mean Mn AR are $10.1 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$. This value is below most of those towards the north along the ELSC but similar to that in the nearest core to the south (SO48/75) (fig. 2). Thus, it is likely that hydrothermal activity decreased south of the northernmost overlapping section of the ELSC, at latitude 20°21'S. However, it is also low at the very northernmost tip of the ELSC (SO67/175), which may indicate a decrease in hydrothermal activity in the oldest section of the ELSC.

In the surficial sediments adjacent to both, the northern ELSC and the CLSC, similar Fe/Mn oxide ratios (1.4–1.9) are seen, being only slightly higher than the ca. 1.2-ratio found in most surficial sediments proximal to the VFR (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé and Cronan, in press) (fig. 2). The slightly lower Fe/Mn ratios in most of the samples nearby the VFR compared to those in CLSC and ELSC samples, may in part reflect the differences in

fondo del núcleo CD33/48 disminuyen abruptamente.

El registro hidrotermal en el núcleo SO67/175 es el más largo en el área del CDOL, alcanzando una edad de cerca de 143 ka, profundidad en la que el núcleo alcanzó el basamento. Debido a un bajo contenido de cenizas, éste núcleo se considera como el más representativo para evaluar las descargas hidrotermales que pudieron ocurrir desde el norte del CDOL. Las concentraciones relativamente altas de Mn en su sección inferior, entre los 106 ka y 140 ka, son probablemente representativas del registro de actividad hidrotermal que tuvo lugar en o cerca del eje de dispersión. Tal enriquecimiento de precipitados hidrotermales cerca de la base del núcleo concuerda con observaciones previas de Cronan (1976), Lyle *et al.* (1986) y muchos otros autores, en sedimentos sobre la corteza generada en las DMO. Sin embargo, las concentraciones de Mn en este núcleo no disminuyen de forma consistente núcleo arriba con un incremento en la distancia del sitio al CDOL al continuar la dispersión del piso oceánico como ha sido encontrado en las DMO. En contraste, después de que el Mn disminuye abruptamente a la altura de los 106 ka, éste aumenta de forma muy gradual núcleo arriba. La edad a la que las concentraciones de Mn disminuyeron drásticamente (106 ka) parece ser contemporánea de la disminución significativa de Mn encontrada en algunos núcleos de las áreas de la DVF y del CLSC (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé y Cronan, en prensa). Esto sugiere que la variación en la actividad hidrotermal en estas áreas puede verse afectada por procesos similares. Adicionalmente se encuentra un enriquecimiento menos significativo de Mn aproximadamente a 89 ka en el núcleo SO67/175, el cual es contemporáneo a un máximo significativo de Mn en núcleos de la DVF, así como en algunos núcleos del área del CDCL (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé y Cronan, en prensa). Sin embargo, las concentraciones

basement and hydrothermal fluid composition between these areas: basalts in the north and andesitic lavas in the south (Riech *et al.*, 1990; Sunkel, 1990). The Fe/Mn oxide ratios in the Lau Basin are low compared to MOR systems like the East Pacific Ridge (Fe/Mn > 3) (Marchig and Gundlach, 1982). No evidence is found for a significant fractionation between Fe/Mn in plume fallout with increasing distance away from the spreading centres or from the hydrothermally active areas known. It is likely that the highest hydrothermal input to the sediments adjacent to the ELSC is associated with a more vigorous volcanic activity at its tectonically fully-evolved parts. This area, other than its northernmost tip, thus offers the highest potential on the ELSC for hosting hydrothermal mineral deposits.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

The hydrothermal sediment component adjacent to the ELSC is mainly formed of Mn oxides, containing hydrothermal-oxide associated elements, mainly Ni, Mo, Pb, Co, V and possibly P. Elements such as Fe, Zn, Cu and La, with low proportions in the oxide-fraction, are preferentially associated with the detrital/ altered-detrital phases. The Mn oxides in the surficial sediments probably represent a distal plume fall-out product derived from hydrothermal vents at the ELSC and possibly from the southern CLSC.

Peaks of hydrothermal Mn suggest episodic increases of hydrothermal discharge on nearby vents. Some peaks correlate in time among the various cores and may be contemporaneous.

Mean Mn accumulation rates for the different cores adjacent to the ELSC average 26 mg cm⁻² ka⁻¹. Compared to the northern section, relatively higher Mn accumulation at the central section (between 19°45'S and 20°07'S) of the northern overlapping segment of the ELSC may indicate an increase in hydrothermal

de Mn durante este período de enriquecimiento se encuentran bastante por debajo de las de la DVF. La Cuenca Lau es de naturaleza semi-cerrada y en ella no sólo ocurre la acumulación de material precipitado de las fumarolas hidrotermales (Cronan y Hodkinson, 1997), sino que también se genera un enriquecimiento de Mn en toda la masa de agua de la cuenca (Daesslé *et al.*, 2000). Por lo anterior, es posible que la precipitación lejana de Mn, proveniente desde la DVF, haya sido la responsable del enriquecimiento de Mn y de los valores de las TAs de Mn registrados en los sedimentos del núcleo SO67/175, hace aproximadamente 89 ka. El incremento gradual más reciente de Mn registrado núcleo arriba y cerca de su superficie, puede ser atribuible a las fuentes hidrotermales de la región norte del CDOL. La propagación hacia el sur del CDOL, cercana a la latitud del sitio SO67/175, y la descarga hidrotermal por detrás de su propagador (Daesslé y Cronan, en prensa), podrían ser las fuentes responsables del enriquecimiento gradual de Mn hacia la superficie de este núcleo.

Mineralización y sedimentación hidrotermal y evolución del CDOL

De las TAs medias de Mn, se puede observar que los flujos hidrotermales hacia la mitad sureña del segmento superpuesto al norte del CDOL (entre 19°53'S y 20°07'S) fueron más altos que en la mitad norteña del mismo segmento, entre los 19°20'S y 19°45'S. A partir de la ubicación del núcleo CD33/28 hacia el sur, existe una distancia cercana a los 150 km del sitio en donde se recuperó el núcleo SO48/75, cerca de la DVF (Daesslé *et al.*, 2000). Entre estas dos localidades, sólo ha sido fechado un núcleo (CD33/48) cuya TA media de Mn es de 10.1 mg cm⁻² ka⁻¹. Este valor se encuentra por debajo de la mayoría de los valores de los núcleos localizados al norte a lo largo del CDOL, pero es similar al del núcleo más

venting in its younger part, and thus there is where hydrothermal mineral deposits are most likely to be located.

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge U. von Stackelberg and V. Riech for allowing the study of R/V Sonne core SO67/175 kept at the BGR-Hannover. Also D. Harkness and B. Miller (NERC-14C Laboratory), for radiocarbon dating. Thanks are due to the reviewers of the present work for helping us to improve it and to the Ciencias Marinas staff. Major support for this research was received from CONACYT and NERC.

REFERENCES

- Bender, M.L., Ku, Teh-Lung, and Broecker, W.S. (1970). Accumulation rates of manganese in pelagic sediments and nodules. *Earth and Planetary Science Letters*, 8: 143–148.
- Bignell, R., Cronan, D.S. and Tooms, J.S. (1976). Metal dispersion in the Red Sea as an aid to marine geochemical exploration. *Transactions Institution of Mining and Metallurgy Applied Earth Science Series B*, 85: 274–278.
- Boström, K., Kraemer, T. and Gartner, S. (1973). Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni, and Co in Pacific pelagic sediments. *Chemical Geology*, 11: 123–148.
- Broecker, W.S. (1971). Calcite accumulation rates and glacial to interglacial changes in oceanic mixing. In: K.K. Turekian, (ed.), *The Late Cenozoic Glacial Ages*. New Haven, Conn: Yale University.
- Chester, R. and Hughes, M.J. (1967). A chemical technique for the separation of ferromanganese minerals, carbonate minerals and adsorbed trace elements from pelagic sediments. *Chemical Geology*, 2: 249–262.
- Cronan, D.S. (1976). Basal metalliferous sediments from the Eastern Pacific. *Geological Society of America*, 87: 928–934.
- cercano hacia el sur (SO48/75) (fig. 2), por lo que es probable que la actividad hidrotermal disminuyera al sur de la sección superpuesta más norteña, a los 20°21'S de latitud. Sin embargo, ésta también es baja en el extremo norte del CDOL (SO67/175), lo que puede indicar una disminución en la actividad hidrotermal en la sección más vieja del mismo.
- En los sedimentos superficiales adyacentes tanto a la parte norte del CDOL como al CDCL, se observan valores similares de la relación de óxidos de Fe/Mn (1.4–1.9), siendo sólo ligeramente mayores que la relación aproximada de 1.2, encontrada en la mayoría de sedimentos superficiales cercanos a la DVF (Daesslé *et al.*, 2000; Daesslé y Cronan, en prensa) (fig. 2). Comparadas con las muestras del CDCL y el CDOL, las relaciones de Fe/Mn ligeramente menores en la mayoría de las muestras cercanas a la DVF, pueden en parte reflejar las diferencias en las composiciones de los basamentos y los fluidos hidrotermales entre estas dos áreas: basaltos en el norte y lavas andesíticas en el sur (Riech *et al.*, 1990; Sunkel, 1990). Las relaciones de óxidos de Fe/Mn en la Cuenca Lau son bajas en comparación con las de las DMO como, por ejemplo, la relación que se da en la Dorsal del Pacífico Oriental (Fe/Mn > 3) (Marchig y Gundlach, 1982). En el material precipitado a partir de las fumarolas no existe evidencia de una fraccionación significativa entre Fe/Mn con el incremento de la distancia a los centros de dispersión o las áreas hidrotermales activas conocidas. Es posible que el aporte hidrotermal más alto a los sedimentos adyacentes al CDOL se encuentre asociado con una actividad volcánica más vigorosa en las partes tectónicamente más evolucionadas del mismo. Por lo tanto esta área, más que el extremo norte del CDOL, ofrece el mayor potencial para albergar depósitos minerales hidrotermales.

- Cronan, D.S., and Hodkinson, R.A. (1997). Geochemistry of hydrothermal sediments from ODP Sites 834 and 835 in the Lau Basin, South West Pacific. *Marine Geology*, 141: 237-268.
- Cronan, D.S., Hodkinson, R., Harkness, D.D., Moorby, S.A. and Glasby, G.P. (1986). Accumulation rates of hydrothermal metalliferous sediments in the Lau Basin, S.W. Pacific. *Geo-Marine Letters*, 6: 51-56.
- Cronan, D.S., Moorby, S.A., Glasby, G.P., Knedler, K., Thompson, J. and Hodkinson, R. (1984). Hydrothermal and volcanoclastic sedimentation on the Tonga-Kermadec ridge and its adjacent marginal basins. In: P. Kokelaar and M.F. Howells (eds.), *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London Special Publication, 16: 137-149.
- Daesslé, L.W. and Cronan, D.S. (in press). Late Quaternary hydrothermal sedimentation adjacent to the Central Lau Spreading Centre. *Marine Geology*.
- Daesslé, L.W., Cronan, D.S. Marchig, V. and Wiedicke, M. (2000). Hydrothermal sedimentation adjacent to the propagating Valu Fa Ridge, Lau Basin, SW Pacific. *Marine Geology*, 162: 479-500.
- Edmond, J.M., Measures, Mangum, B., Grant, B., Sclater, F.R., Collier, R. Hudson, A., Gordon, L.I. and Corliss, J.B. (1979). On the formation of metal-rich deposits at ridge crests. *Earth Planetary Science Letters*, 46: 19-30.
- Edmond, J.M., von Damm, K.L., McDuff, R.E. and Measures, C.I. (1982). Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal. *Nature*, 297: 187-191.
- Feely, R.A., Baker E.T., Marumo, Urabe, T., Ishibashi, J., Gendron, J., Lebon, G.T. and Okamura, K. (1996). Hydrothermal plume particles and dissolved phosphate over the super fast spreading southern East Pacific Rise. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 2297-2323.
- Feely, R.A., Massoth, G.J., Trefry, J.H., Baker, E.T., Paulo, A.J. and Lebon, G.T. (1994). Composition and sedimentation of hydrothermal plume particles from North Cleft Segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 99: 4985-5006.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El componente hidrotermal de los sedimentos, adyacente al CDOL, está formado principalmente por óxidos de Mn y elementos asociados a los óxidos hidrotermales, en especial Ni, Mo, Pb, Co, V y posiblemente P. Con proporciones bajas en la fracción de óxidos, elementos como el Fe, Zn, Cu y La se encuentran asociados preferentemente con las fases de detritos y detritos alterados. Los óxidos de Mn en los sedimentos superficiales probablemente representan productos de la precipitación a partir de fumarolas lejanas derivadas de ventilas hidrotermales del CDOL y posiblemente de la porción sur de CDOL.

Los máximos en las concentraciones de Mn hidrotermal de los núcleos sugieren incrementos episódicos en la descarga hidrotermal de las ventilas cercanas. Algunos máximos se correlacionan temporalmente entre varios núcleos y podrían ser contemporáneos.

Las tasas medias de acumulación de Mn de los diferentes núcleos adyacentes al CDOL promedian $26 \text{ mg cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$. En comparación con la sección norte, una acumulación relativamente mayor de Mn en la sección central (entre los $19^{\circ}45'S$ y $20^{\circ}07'S$) del segmento superpuesto norteño del CDOL puede indicar un incremento en la actividad de las ventilas hidrotermales en su parte más joven y, por ende, es ahí donde podrían localizarse los depósitos de minerales hidrotermales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos encarecidamente a U. von Stackelberg y V. Riech por permitir el estudio del núcleo SO67/175 del B/I Sonne archivado en el *BGR-Hannover*. También agradecemos a D. Harkness y B. Miller (NERC-14C *Laboratory*), por el fechado de radiocarbono. Gracias a los revisores del presente trabajo por su ayuda

- Fouquet, Y., von Stackelberg, U., Charlou, J.L., Erzinger, J., Herzig, P.M., Mühe, R. and Wiedicke, M. (1993). Metallogenesis in back-arc environments: The Lau Basin example. *Economic Geology*, 88: 2154–2181.
- Fowler, M.G. (1994). Organic geochemistry of sediments from Leg 135 and of an oil seep (TONGA). *Proceedings of the Ocean Drilling Project, Scientific Results*, 135: 667–676.
- Froehlich, P.N., Bender, M.L., Luedtke, N.A., Heath, G.R. and DeVries, T. (1982). The marine phosphorus cycle. *American Journal of Science*, 282: 474–511.
- German, C.R., Campbell, A.C. and Edmond, J.M. (1991). Hydrothermal scavenging at the Mid-Atlantic Ridge: Modification of trace element dissolved fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, 107: 101–114.
- German, C.R., Parson, L.M. and Mills, R.A. (1996). Mid-Ocean Ridges and Hydrothermal Activity. In: C.P. Summerhayes and S.A. Thorpe (eds.), *Oceanography an Illustrated Guide*, Manson Publishing, London, United Kingdom, pp. 152–164.
- Goldberg, E.D. and Arrhenius, G.O.S. (1958). Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 13: 153–212.
- Hodkinson, R.A. and Cronan, D.S. (1994). Variability in the hydrothermal component of the sedimentary sequence in the Lau Backarc Basin (sites 834–839). *Proceedings of the Ocean Drilling Project Scientific Results*, 135: 75–86.
- Hodkinson, R.A. and Cronan, D.S. (1995). Hydrothermal Sedimentation at ODP Sites 834 and 835 in Relation to Crustal Evolution of the Lau Backarc Basin. In: L. Parson, C.L. Walker and D.R. Dixon (eds.), *Hydrothermal vents and processes*. Geological Society of London Special Publication, 87: 231–248.
- Hodkinson, R.A. and Cronan, D.S. (1998). Hydrothermal inputs at ODP sites 836, 837, 838 and 839 in relation to Eastern Lau Spreading Centre propagation in the Lau Basin, Southwest Pacific. In: A. Cramp, C.J. MacLeod, S.V. Lee, and E.J.W. Jones (eds.), *Geological Evolution of Ocean Basins: Results from the Ocean Drilling Program*. Geological Society of London Special Publication, 131: 231–242.
- para mejorarlo y al personal de la Revista *Ciencias Marinas*. El principal apoyo para esta investigación se recibió del CONACYT y de NERC (RU).
- Traducido al español por Adrián R. López.
-
- Lilley, M.D., Feely, R.A. and Trefry, J.H. (1995). Chemical and biochemical transformations in hydrothermal plumes. In: S.E. Humphris, R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux, and R.E. Thompson (eds.), *Seafloor Hydrothermal Systems*. American Geophysical Union Monograph, 91: 369–391.
- Lisitsyn, A.P., Malahoff, A.R., Bogdanov, Yu.A., Soakai, S., Zonenshayn, L.P., Gurvich, Ye.G., Murav'yev, K.G. and Ivanov, G.V. (1992). Hydrothermal formations in the northern part of the Lau Basin, Pacific Ocean. *International Geology Review*, 34: 828–847.
- Lyle, M.W., Owen, R.M. and Leinen, M. (1986). History of hydrothermal sedimentation at the EPR, 19°S. *Deep Sea Drilling Project Initial Reports*, 92: 585–596.
- Marchig, V. and Gundlach, H. (1982). Iron-rich metalliferous sediments on the East Pacific Rise-prototype of undifferentiated metalliferous sediments on divergent plate boundaries. *Earth Planetary Science Letters* 50: 361–382.
- Marchig, V., Wiedicke, M. and Riech, V. (1992). Hydrothermal anomaly in the sea water of the Lau Basin. Final Report SONNE Cruise 67–2, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Germany, pp. 75–96
- Parson, L.M. and Hawkins, J.W. (1994). Two Stage Ridge Propagation and the Geological History of the Lau Backarc Basin. *Proceedings of the Ocean Drilling Project Scientific Results*, 135: 819–828.
- Parson, L.M., Pearce, J.A., Murton, B.J. and Hodkinson, R.A. (1990a). Role of ridge jumps and ridge propagation in the tectonic evolution of the Lau back-arc basin, S.W. Pacific. *Geology*, 18: 470–473.
- Parson, L.M. and Shipboard Party. (1990b). RRS Charles Darwin Cruise 33/88, 5 May–1 June 1988, Geophysical and Geological investigations

- of the Lau back arc Basin, SW Pacific, Institute of Oceanographic Science Deacon Laboratory Cruise Report.
- Riech, V. and Gehrke, B. (1992). Sedimente der SONNE-Fahrt 67: Fazies, regionale Verbreitung und Hinweise auf das Krustenalter. Final Report SONNE Cruise 67-2, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Germany pp. 147-160.
- Riech, V., Marchig, V., Sunkel, G. and Weiss, W. (1990). Hydrothermal and volcanic input in sediments of the Lau back-arc Basin, S.W. Pacific. *Marine Mining*, 9: 183-203.
- Sunkel, G. (1990) Origin of petrological and geochemical variations of the Lau Basin lavas (SW Pacific). *Marine Mining*, 9: 205-234.
- Taylor, B., Zellmer, K., Martinez, F. and Goodliffe, A. (1996). Sea-floor spreading in the Lau back-arc basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 144: 35-40.
- Thompson, M. and J.N. Walsh. 1989. *The Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry*, 2d Ed., Blackie, Glasgow, United Kingdom, pp. 83-115.
- Thompson, P.R., Be, A.W.H., Duplessy, J.C. and Shackleton, N.J. (1979). Disappearance of pink-pigmented *Globigerinoides ruber* at 120,000 yr BP in the Indian and Pacific Oceans. *Nature*, 280: 554-558.
- Trocine, R.P. and Trefry, J.H. (1988). Distribution and chemistry of suspended particles from an active hydrothermal vent site on Mid-Atlantic Ridge at 26°N. *Earth and Planetary Science Letters*, 88: 1-15.
- Walter, P., Stoffers, P., Glasby, G.P. and Marchig, V. (1990). Major and trace element geochemistry of Lau Basin sediments. *Geologisches Jahrbuch Reihe D*, 92: 163-188.
- Wheat, C.G., Feely, R.A. and Mottl, M.J. (1996). Phosphate removal by oceanic hydrothermal processes: an update of the phosphorus budget in the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 3593-3608.
- Wiedicke, M. and Collier, J. (1993). Morphology of the Valu Fa spreading ridge in the southern Lau Basin. *Journal of Geophysical Research*, 98: 1769-11782.