



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Variabilidad en la quimio-estratigrafía asociada a los procesos sedimentarios del margen continental peruano (13°-16°s) durante el Plio-Pleistoceno

Kelly Quispe^{1,2}, Diana Ochoa²

¹Programa de Maestría en Ciencias del Mar, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú. kelly.quispe.p@upch.pe.

²Centro de Investigación para el Desarrollo Integral y Sostenible (CIDIS), Facultad de Ciencias y Filosofía, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Av. Honorio Delgado 430, Lima, Perú. diana.ochoa@upch.pe.

RESUMEN

Los sedimentos plio-pleistocénicos (2.7 a 1.4 Ma) marinos de la formación Caracoles han registrado los cambios paleoambientales de una de las zonas donde se desarrolla el actual sistema de afloramiento de Humboldt. El objetivo de este estudio es caracterizar los procesos sedimentarios existentes en el área de Sacaco (12-14°) e inferir las condiciones climático-ambientales para este periodo de tiempo a través del análisis elemental, de la materia orgánica sedimentaria ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, C/N) y de la granulometría en la localidad de Cerro Amarillo (CAM), en el margen sur de la cuenca Pisco Este. El registro sedimentario inicia con una secuencia de condensación estratigráfica, producto de una rápida inundación del nivel marino, seguida por características litológicas casi homogéneas, las condiciones geoquímicas asociadas a los niveles limosos y arenosos muestran un aporte terrígeno y una productividad marina variables, en tanto que la composición geoquímica no está controlada por la granulometría. Temporalmente, la energía asociada a los procesos sedimentarios se mantiene estable, sin embargo, los procesos biogeoquímicos se vuelve más variables durante el Plio-Pleistoceno.

Palabras clave: Plio-Pleistoceno, cuenca Pisco Este, paleoambiente, paleoceanografía.

ABSTRACT

The Plio-Pleistocene (2.7 to 1.4 Ma) marine sed-

iments of the Caracoles Formation have recorded paleoenvironmental changes in one of the areas where the present Humboldt upwelling system is developed. The objective of this study is to characterize the sedimentary processes existing in the Sacaco area (12-14°) and to infer the climatic-environmental conditions for this time period through elemental analysis, sedimentary organic matter ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, C/N) and grain size at the Cerro Amarillo locality (CAM), on the southern margin of the East Pisco basin. The sedimentary record starts with a sequence of stratigraphic condensation, product of a rapid flooding of the marine level, followed by almost homogeneous lithological characteristics, the geochemical conditions associated with the silty and sandy levels show a variable terrigenous input and marine productivity, while the geochemical composition is not controlled by the granulometry. Temporally, the energy associated with sedimentary processes remains stable, however, biogeochemical processes become more variable during the Plio-Pleistocene.

Key words: Plio-Pleistocene, East Pisco Basin, paleoenvironment, paleoceanography.

INTRODUCCIÓN

Durante el Plio-Pleistoceno (5.3-1.4 Ma), diferentes características océano-atmosféricas como un nivel del mar más alto, una temperatura superficial del mar (SST) más cálida que hoy en día, un

débil gradiente zonal y meridional de la SST, la formación de casquetes glaciares en el hemisferio Norte, y eventos tectónicos como el cierre definitivo del istmo de Panamá modificaron los patrones de circulación climático-océanicos (O'Brien et al. 2014, Fedorov et al. 2013, Ravelo et al. 2004, Haug et al. 1999, O'Dea et al. 2016). Durante este intervalo temporal, la evolución faunística asociada al sistema de corrientes de Humboldt (SCH) se desarrolló y estudios recientes muestran que sólo en los últimos 2.7 Ma, la fauna que habitaba las costas peruanas adquirió una composición similar a la de las faunas actuales (Ochoa et al, 2021). Los sedimentos marinos de la formación Caracoles (2.7-1.4 Ma) contienen el primer registro de las nuevas condiciones ambientales después de un largo vacío (4.54-2.7 Ma) en el registro sedimentario (Ochoa et al, 2021, DeVries 2020). Además, este registro permite conocer los procesos sedimentarios y las nuevas condiciones oceanográficas ante la transición climática global que se dio en este periodo temporal. En este trabajo, se estudió la sucesión quimio-estratigráfica de la formación Caracoles, a partir de la variación de la composición elemental, materia orgánica (MO) sedimentaria y granulometría, con el objetivo de caracterizar el aporte, los procesos sedimentarios, el origen y producción de MO preservada en los sedimentos; así como, inferir las condiciones oceanográficas donde existieron faunas similares al actual SCH.

METODOLOGÍA

Los sedimentos de la formación Caracoles afloran en las localidades de CAM y quebrada Caracoles (CAR), se seleccionó CAM como área de estudio

para tener la primera secuencia posterior a la ausencia de registro sedimentario. El área de estudio se ubica en la sub-cuenca de Sacaco (15°33'14"S, 74°43'15"O, Fig. 1), perteneciente al margen sur de la cuenca Pisco Este. Se levantó una columna estratigráfica compuesta de 12.7 m de espesor y se colectaron 140 muestras de roca de manera sistemática cada 10 cm. Todas las muestras fueron estudiadas usando un analizador portátil de fluorescencia de rayos X (modelo S1 TITAN, XRF) para la composición elemental, 10 muestras usando un analizador elemental acoplado a un espectrómetro de masas de relación isotópica para el análisis de MO sedimentaria ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, %C y %N) y 3 muestras usando un analizador de imagen de partículas de flujo (modelo FPIA) para el análisis granulométrico. Asimismo, se seleccionaron 5 muestras al azar para validar los resultados obtenidos del analizador XRF portátil y se analizaron usando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, obteniendo un grado de correspondencia alto ($R^2 > 0.9$) entre ambos valores. Los resultados de todos los análisis fueron estudiados con un enfoque multi-proxy, en combinación con un análisis estadístico de componentes principales (PCA). Se calculó la fracción biogénica de la Si (Si Bio) y del Ca (Ca Bio) usando el Al como elemento normalizador, ya que la concentración en la mayoría de las rocas (sedimentarias, ígneas y metamórficas) es similar (Calvert and Pedersen, 2007). Este cálculo se hizo mediante la fórmula $X_{\text{Bio}} = X_{\text{Total}} - \text{Al}_{\text{Total}} (X/\text{Al})_{\text{cc}}$; donde X representa el elemento por calcular y (X/Al)_{cc}, la relación de ambos elementos en la corteza continental (modificado de Nameroff et al., 2014, Rudnick y Gao, 2013).

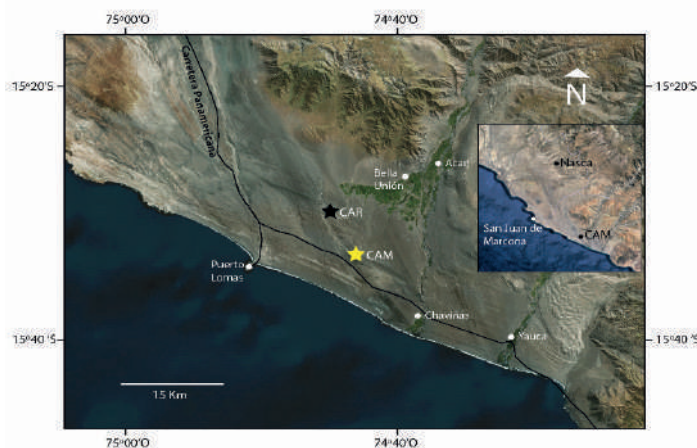


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio y localidades cercanas. Las estrellas amarilla y negra indican la ubicación de CAM y Quebrada Caracoles (CAR), localidades donde aflora la formación Caracoles.

RESULTADOS

La base de la sección estratigráfica de CAM (Fig. 2) comienza después de un hiato sedimentario entre las formaciones Pisco y Caracoles. La sucesión está compuesta por una intercalación de limolitas y areniscas con presencia glauconita (G1) y un nivel de cenizas datado en 2.7 Ma (U/Pb, Ochoa et al., 2021), la parte media está compuesta en su mayoría por areniscas de grano muy fino a fino con algunos niveles de limolitas y el tope de la sección está conformado por la intercalación entre limolitas y areniscas de grano fino.

El registro geoquímico, indica en su mayoría, tres fases sedimentarias: la primera fase (0-1.2 m) con altos contenidos de Ca Bio y Si Bio. La parte media (1.2-7.4 m) es relativamente homogénea en términos geoquímicos, en tanto que la parte alta (7.4-12.7 m) tiene una composición química

con mayor variabilidad. Los niveles limosos están asociados a altos valores de Al, bajos contenidos de K y P y escasas concentraciones de Ca Bio y Si Bio, lo que indica un origen detrítico. Los niveles arenosos tienen un comportamiento químico más heterogéneo, que permitió un aumento en la preservación de Si Bio y Ca Bio. El registro de Zr/Si Bio muestra un aumento hacia el tope de la secuencia, sugiriendo un mayor ingreso de sedimentos terrígenos hacia la cuenca. La granulometría sugiere una variación en la energía del medio de depósito, siendo mayor hacia el tope de la sección (Fig. 2). Las concentraciones de $\delta^{15}\text{N}$, %C y %N muestran un comportamiento similar a diferencia del $\delta^{13}\text{C}$ (Fig. 2). Los valores de %C/%N vs $\delta^{13}\text{C}$ muestran un predominio de algas marinas (Meyers, 1997), lo cual indica que la MO sedimentaria es resultado de productividad exclusivamente marina.

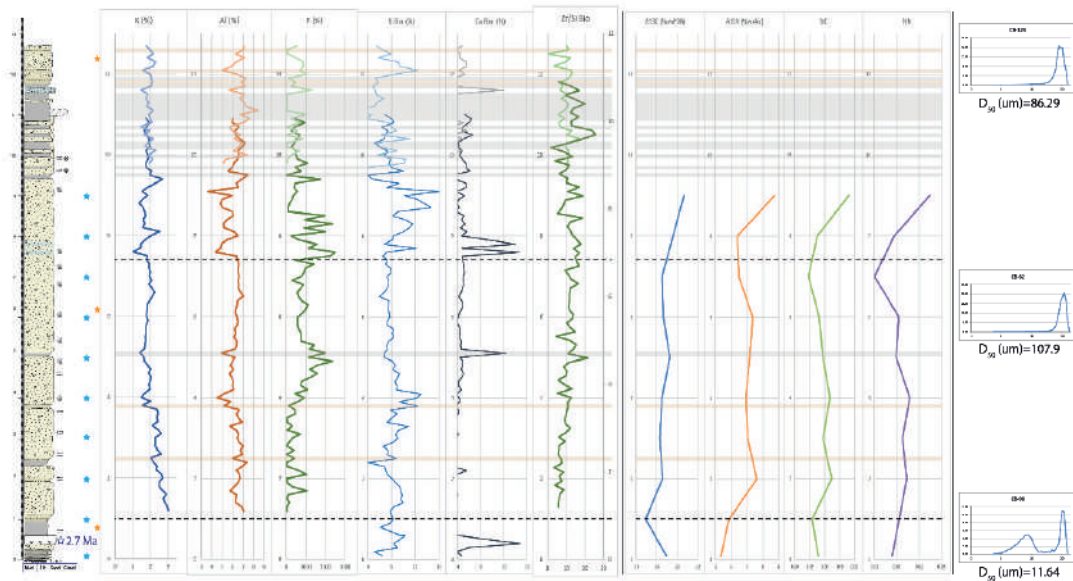


Figura 2. (Izquierda) Columna estratigráfica registrada en CAM, las estrellas azules y anaranjadas indican donde se tomaron muestras para los análisis de MO sedimentaria y granulometría, respectivamente. La estrella blanca indica la edad de la capa de ceniza. (Medio) Patrones de variabilidad geoquímica. (Derecha) Variación en el tamaño medio del grano (D_{50}) en la base, medio y tope de la columna estratigráfica.

En el PCA, los dos primeros componentes principales (PCs) contienen el 49.7% de la varianza total de los datos, por ello, estos fueron seleccionados para el subsecuente análisis de los gráficos de PCA. El análisis de PCA sugiere que el comportamiento geoquímico de los elementos se hace más heterogéneo hacia el tope de la sección

(Fig. 3a), siendo la composición elemental de niveles de limolitas más homogénea (Fig. 3b). Al comparar, el comportamiento geoquímico entre la formación Caracoles y la formación Pisco (unidad estratigráfica subyacente a la formación Caracoles), se observa que esta última es más homogénea sedimentariamente (Fig. 3d).

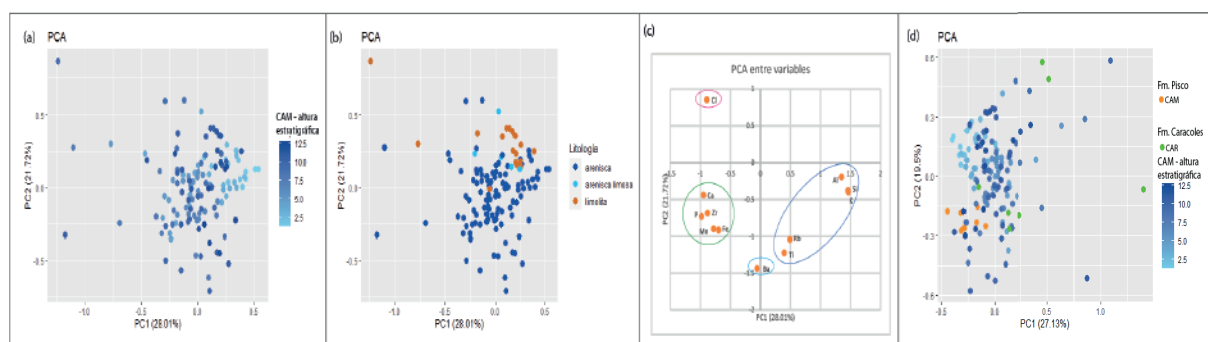


Figura 3. (a) PCA de las muestras de la formación Caracoles que afloran en CAM, el gradiente de color refleja la ubicación estratigráfica (base-celeste a tope-azul) de las muestras. (b) PCA de las muestras de la formación Caracoles, los colores (azul, celeste y anaranjado) están asociados a la litología presente en el registro estratigráfico de CAM. (c) Agrupamiento de los elementos geoquímicos usando un PCA de los autovalores de las variables. (d) PCA que muestra la variación de la composición geoquímica temporal.

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

La base de la sección corresponde a una secuencia de condensación estratigráfica, esto es evidenciado por la presencia del mineral autigénico Gl, la doble moda en granulometría y el intervalo de omisión/erosión sedimentaria ubicado al inicio de la sucesión sedimentaria. Una superficie condensada se forma como consecuencia de una tasa de sedimentación muy escasa o nula; lo cual, aunado a la presencia de Gl indica que la secuencia sedimentaria estudiada representa el reinicio de la sedimentación posterior a una rápida inundación del margen costero y muestra el desarrollo hacia la estabilidad de la cuenca durante el Plioceno (2.7 Ma). Las características litológicas muestran solo un cambio en el 1.2 m posterior al hiato sedimentario, mientras que la cuenca aún no había encontrado la estabilidad química. La tasa de sedimentación ha variado a lo largo de la secuencia, siendo muy escasa al inicio y aumentando posteriormente. Los niveles más finos han preservado bajas concentraciones de Ca Bio y Si Bio, esto podría haberse dado en dos escenarios, una alta productividad en la columna de agua pero el fondo oceánico estuvo oxigenado, lo cual no permitió la preservación de la MO, o una baja productividad con condiciones fluctuantes de oxigenación del suelo marino que permitieron preservar la escasa/nula concentración de MO. Sin embargo, el bajo contenido de P descarta la primera posibilidad, ya que este micronutriente refleja una disminución de la productividad marina. Los niveles arenosos reflejan una mayor productividad marina en la columna de agua evidenciada por el registro de P, o

alternativamente periodos de igual productividad pero con mejor preservación de la MO. El registro de P se encuentra en antifase en relación al contenido de $\delta^{15}\text{N}$ y %C, sugiriendo que a pesar de una mayor productividad, la MO que se depositó en los sedimentos fue biodegradada por posibles variaciones de la oxigenación del fondo marino. Finalmente, con los análisis de PCA, se concluye que la granulometría no controla la composición química de la roca y temporalmente, los procesos bioquímicos del margen costero peruano (13° - 16°S) se volvieron más variables para el Plio-Pleistoceno.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto I+D+i "Efectos del Calentamiento Global sobre el sistema marino-costero del Perú (Ciencia Básica FONDECYT-UPCH N° 105-2018)" financiado por FONDECYT. Este trabajo fue realizado con el apoyo del Laboratorio de Oceanografía y Clima: Experimentaciones y Enfoques Numéricos (LOCEAN), Francia, que proporcionó los resultados de C, N y concentración isotópica de la MO sedimentaria, y de Bizalab (Perú), que colaboró con los datos geoquímicos usados para la validación del análisis elemental.

REFERENCIAS

Calvert S. E., Pedersen T. F. (2007). Chapter Fourteen Elemental Proxies for Palaeoclimatic and Palaeoceanographic Variability in Marine Sediments: Interpretation and Application. *Developments in Marine Geology*, 1(07):567–644.

DeVries T. J. (2020). Lithostratigraphy, Biostratigraphy, and Age of Pliocene and Pleistocene Marine Deposits and the highest Marine Terrace from the Sacaco Basin and its Environs (southern Peru). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 114:20–48.

Fedorov A.V., Brierley C. M., Lawrence K. T., Dekens P. S. and Ravelo A. C. (2013). Patterns and mechanisms of early Pliocene warmth. *Nature*, 496:43-52.

Haug G. H., Sigman D. M., Tiedemann R., Pedersen T. F., Sarnthein M. (1999). Onset of permanent stratification in the subarctic Pacific Ocean. *Nature*, 401:779–82.

Meyers P. A. (1997). Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27(5-6):213-250

Nameroff T. J., Calvert S. E. and Murray J. W. (2004). Glacial-interglacial variability in the eastern tropical North Pacific oxygen minimum zone recorded by redox-sensitive trace metals. *Paleoceanography*, Vol. 19, PA1010

O’Dea A., Lessios H. A., Coates A. G., Eytan R. I., Restrepo-Moreno S. A., Cione A. L., et al. (2016). Formation of the Isthmus of Panama. *Sciences Advances*, 2(8):1–12.

Ochoa D, Salas R, DeVries TJ, Baby P, Altamirano A, Barbosa Á, et al. (2021). Late Neogene evolution of the Peruvian margin and its ecosystems: A synthesis from the Sacaco record. *International Journal of Earth Science*.

Ravelo A. C., Andreasen D. H., Lyle M., Lyle A. O., Wara M. W. (2004). Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch. *Nature*, 429(6989):263–7.

Rudnick, R., & Gao, S. (2013). Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition (2nd ed., Vol. 4, Issue November)*. Elsevier Ltd.