



EL SIGNIFICADO PALEOCEANOGRÁFICO DE LOS MORFOGRUPOS DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS EN LA ZONA DE PISCO

THE PALEOCEANOGRAPHIC SIGNIFICANCE OF BENTHIC FORAMINIFERAL MORPHOGROUPS IN THE PISCO AREA

Dennis Romero¹  Federico Velazco¹  Dimitri Gutiérrez¹ 

¹ Instituto del Mar del Perú, Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, Callao, Perú.

*Correspondencia. E-mail: dromero@imarpe.gob.pe

Recibido: 18-01-2023, Aceptado: 24-01-2025, Publicado: 31-01-2025

RESUMEN

El análisis de los morfogrupos de foraminíferos bentónicos se realizó en una secuencia de sedimentos laminada (B1404-11) que abarca los últimos 300 años. El testigo fue colectado en el talud continental (302 m de profundidad) al noroeste de bahía Independencia, Pisco (14°7,755S, 76°30,253W), con influencia de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO). El morfogrupo de testas aplanadas-elongadas fue predominante, muy por encima del resto de morfogrupos identificados (aplanado, cónico, plano-convexo, biconvexo, biumbilicado, lenticular y ovoidal). El análisis de agrupamiento jerárquico mostró dos grandes asociaciones considerando la contribución de los morfogrupos más importantes. La primera asociación representó los intervalos en los cuales el morfogrupo cónico y biumbilicado fueron de mayor significancia mientras que el morfogrupo aplanado y plano convexo conformaron la segunda asociación. Los resultados sugieren que la presencia de los morfogrupos con mayor contribución evidencia las propiedades estructurales de la ZMO en esta región.

PALABRAS CLAVE: foraminíferos calcáreos, microfósiles, Pisco, talud continental

ABSTRACT

The analysis of benthic foraminiferal morphogroups was performed on a laminated sediment sequence (B1404-11) spanning the last 300 years. The core was retrieved from the continental slope (302 m depth) northwest of Independencia Bay, Pisco (14°7.755S, 76°30.253W), within the influence of the Oxygen Minimum Zone (OMZ). Morphogroups with flattened-elongated tests were dominant, significantly outnumbering other forms, including flattened, conical, plano-convex, biconvex, bi-umbilicate, lenticular, and ovoid morphogroups. Hierarchical cluster analysis identified two primary associations based on the contributions of key morphogroups. The first association was characterized by intervals with a higher representation of conical and bi-umbilicate morphogroups, whereas the second association reflected dominance by flattened and plano-convex forms. These findings suggest that the distribution of the predominant morphogroups mirrors the structural characteristics of the OMZ in this region.

KEYWORDS: calcareous foraminifera, microfossils, Pisco, continental slope

1. INTRODUCCIÓN

La fauna moderna y antigua de foraminíferos bentónicos conforman un grupo de microorganismos muy diverso en cuanto a las preferencias de microambientes (micro hábitat) y estrategias alimenticias que exhiben en los distintos dominios sedimentarios que habitan (MURRAY, 2006). La caracterización de los ensambles modernos en ambientes marinos marginales puede integrar parámetros de diversidad y/o el morfotipo de la testa mostrando diferentes patrones en función de fac-

1. INTRODUCTION

The modern and ancient benthic foraminiferal fauna represent a highly diverse group of microorganisms, characterized by their varied microhabitat preferences and feeding strategies across different sedimentary domains (MURRAY, 2006). In marginal marine environments, modern assemblages are often analyzed using diversity indices and test morphotypes, which reveal distinct patterns influenced by factors such as food availability and oxygenation levels

tores como la disponibilidad del alimento y la oxigenación (CORLISS, 1985; JORISSEN *et al.*, 1995; DEN DULK *et al.*, 1998; VAN DER ZWAAN *et al.*, 1999; GOODAY, 2003). Por un lado, los ensambles aportan importante información sobre los cambios ocurridos en ambientes sedimentarios pasados (e.g., JORISSEN, 1999; JORISSEN *et al.*, 2007; VAN DER ZWAAN *et al.*, 1999) en tanto que los morfogrupos constituyen una herramienta complementaria para interpretar paleoambientes debido a que este enfoque pone énfasis en la arquitectura de la testa (dirección del enrollamiento, arreglo de cámaras, entre otros rasgos), lo cual refleja aspectos relacionados al micro hábitat y a las estrategias de alimentación (SEVERIN, 1983; BERNHARD, 1986; CORLISS, 1985, 1991; CORLISS & CHEN, 1988; NAGY, 1992).

De acuerdo con MURRAY (2006) se define como morfogrupo a la agrupación de testas morfológicamente semejantes. Desde el punto de vista operativo, la designación de categorías de morfogrupos en los estudios paleoambientales es ventajosa debido a que 1) no requiere una taxonomía rigurosa, de manera que cada categoría es independiente del criterio de la sistemática clásica y 2) simplifica el análisis reduciendo el número de variables (NAGY, 1992). Asimismo, su uso es viable considerando que la morfología es raramente afectada por procesos diagenéticos (BERNHARD, 1986). A escalas geológicas mayores, permite la comparación de ensambles de diferente edad cronológica, minimizando el efecto de la presión selectiva originada por la divergencia evolutiva (REOLID *et al.*, 2008).

En la literatura existen representaciones idealizadas del patrón de distribución de los morfogrupos en respuesta a las variaciones en la disponibilidad de alimento y a la oxigenación (JORISSEN *et al.*, 1995; KOHO & PIÑA-OCHOA, 2012), en el que concluyen que no todos los tipos de micro hábitat pueden ser inferidos a partir del morfotipo (JORISSEN, 1999; GOODAY, 2003). En general, los taxa que predominan en ambientes pobres en oxígeno con alto aporte de carbono orgánico corresponden a morfologías de testas aplanadas, elongadas y cilíndricas, con paredes delgadas y con muchos poros y desprovistos de ornamentaciones, mientras que los ambientes más oxigenados y con poco aporte de material orgánico, los taxa presentan testas plano-convexas y lenticulares (BERNHARD, 1986; JORISSEN *et al.*, 1995; JORISSEN, 1999; KAIHO, 1999; GOODAY, *et al.*, 2000) y son característicos de cada región (SEN GUPTA & MACHAIN-CASTILLO, 1993).

(CORLISS, 1985; JORISSEN *et al.*, 1995; DEN DULK *et al.*, 1998; VAN DER ZWAAN *et al.*, 1999; GOODAY, 2003). While these assemblages provide valuable insights into past changes in sedimentary environments (e.g., JORISSEN, 1999; JORISSEN *et al.*, 2007; VAN DER ZWAAN *et al.*, 1999), morphogroups offer a complementary tool for reconstructing paleoenvironmental conditions. This approach focuses on the architecture of the test (e.g., chamber arrangement, coiling direction), which reflects adaptations to specific microhabitats and feeding strategies (SEVERIN, 1983; BERNHARD, 1986; CORLISS, 1985, 1991; CORLISS & CHEN, 1988; NAGY, 1992).

MURRAY (2006) defines morphogroups as clusters of morphologically similar tests. From an operational perspective, the use of morphogroups in paleoenvironmental studies offers two key advantages: (1) it does not require detailed taxonomic classification, allowing categories to remain independent of traditional systematic frameworks, and (2) it simplifies analysis by reducing the number of variables (NAGY, 1992). Additionally, morphogroups are reliable indicators because diagenetic processes rarely alter test morphology (BERNHARD, 1986). Over longer geological timescales, this approach enables comparisons among assemblages of different ages, minimizing the impact of selective pressures resulting from evolutionary divergence (REOLID *et al.*, 2008).

Idealized distribution patterns of morphogroups in response to food availability and oxygenation variations have been documented (JORISSEN *et al.*, 1995; KOHO & PIÑA-OCHOA, 2012). These studies indicate that not all microhabitat types can be directly inferred from test morphology (JORISSEN, 1999; GOODAY, 2003). Taxa that dominate low-oxygen environments with high organic carbon input are typically characterized by flattened, elongated, and cylindrical test morphologies, with thin walls, numerous pores, and minimal ornamentation. Conversely, taxa from more oxygenated environments with lower organic input display plano-convex and lenticular tests, which are often region-specific (BERNHARD, 1986; JORISSEN *et al.*, 1995; JORISSEN, 1999; KAIHO, 1999; GOODAY, *et al.*, 2000; SEN GUPTA & MACHAIN-CASTILLO, 1993).

Los sedimentos ubicados dentro de las Zonas de Mínima de Oxígeno (ZMOs) frente a Perú acumulan abundantes testas de foraminíferos calcáreos (CARDICH *et al.*, 2012; CARDICH *et al.*, 2015), las cuales se preservan a lo largo del tiempo. La secuencia de sedimentos laminados en esta zona puede mostrar la variabilidad natural a escalas de tiempo en el orden de decenas a centenas de años (GUTIÉRREZ *et al.*, 2009; CARDICH *et al.*, 2019).

El objetivo del presente estudio fue analizar el patrón de los morfogrupos de foraminíferos bentónicos calcáreos a lo largo de un testigo de sedimento recolectado en el talud continental (302 m de profundidad) al noroeste de bahía Independencia, Pisco (14°7,755S, 76°30,253W), situado dentro del núcleo de la ZMO con un alcance cronológico de al menos 300 años.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Material de estudio

El testigo B1404-11 analizado, corresponde a una secuencia de sedimentos laminados recolectado en el margen continental peruano frente a la localidad de Pisco a una profundidad de 302 m. La edad cronológica total del testigo abarca hasta 1708 AD (ROMERO, 2024). El estudio estuvo enfocado en el grupo funcional calcáreo de foraminíferos bentónicos debido a su presencia mayoritaria en el registro microfósil (ROMERO, 2024) y mejor preservación en testigos recolectados en la región (MORALES *et al.*, 2006).

Foraminíferos bentónicos

Se utilizaron las testas retenidas por encima de la fracción >63 μm . La definición de los morfogrupos usados en este trabajo fueron adaptados a partir de las categorías descritas en BERNHARD (1986), CORLISS y CHEN (1988), PÉREZ y FERNANDES (2006) y ALPERIN *et al.* (2011), de acuerdo con la forma de la testa para foraminíferos bentónicos calcáreos compatibles. Las especies representativas de cada morfotipo se muestran en la Figura 1.

Procesamiento de datos

Se generó una matriz de categorías de morfogrupos considerando los valores relativos de cada especie/taxón determinado sin considerar aquellos niveles con registros equivalentes a cero. Esta matriz fue utilizada para realizar un análisis de agrupamien-

Sediments within the Oxygen Minimum Zones (OMZs) along the Peruvian coast are rich in preserved calcareous foraminiferal tests (CARDICH *et al.*, 2012; CARDICH *et al.*, 2015). Laminated sediment sequences in this region provide records of natural variability on decadal to centennial timescales (GUTIÉRREZ *et al.*, 2009; CARDICH *et al.*, 2019).

This study aims to analyze the distribution of calcareous benthic foraminiferal morphogroups in a sediment core retrieved from the continental slope (302 m depth) northwest of Independencia Bay, Pisco (14°7.755S, 76°30.253W), located within the core of the OMZ. The core encompasses a chronological record spanning at least 300 years.

2. MATERIALS AND METHODS

Study material

The analyzed core, B1404-11, represents a sequence of laminated sediments collected from the Peruvian continental margin off Pisco at a depth of 302 m. The core's chronological range extends back to 1708 AD (ROMERO, 2024). The focus of the study was on the calcareous benthic foraminifera functional group, owing to their dominant presence in the microfossil record (ROMERO, 2024) and superior preservation in cores retrieved from the region (MORALES *et al.*, 2006).

Benthic foraminifera

Only tests retained above the >63 μm fraction were considered for analysis. The morphogroups used in this study were adapted from the classifications outlined by BERNHARD (1986), CORLISS & CHEN (1988), PÉREZ & FERNANDES (2006), and ALPERIN *et al.* (2011), based on the test morphology of calcareous benthic foraminifera. Figure 1 shows the representative species for each morphotype.

Data processing

A matrix of morphogroup categories was created, incorporating the relative abundance of each identified species/taxon while excluding levels with zero occurrences. This matrix was then subjected to hierarchical clustering analysis

to jerárquico aplicando el método de varianza mínima de Ward basado en la distancia euclídeana. Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para evaluar las categorías de mayor contribución a la varianza de todo el testigo.

using Ward’s minimum variance method, based on Euclidean distances. Furthermore, principal component analysis (PCA) was performed to assess the contributions of different categories to the overall variance in the core.

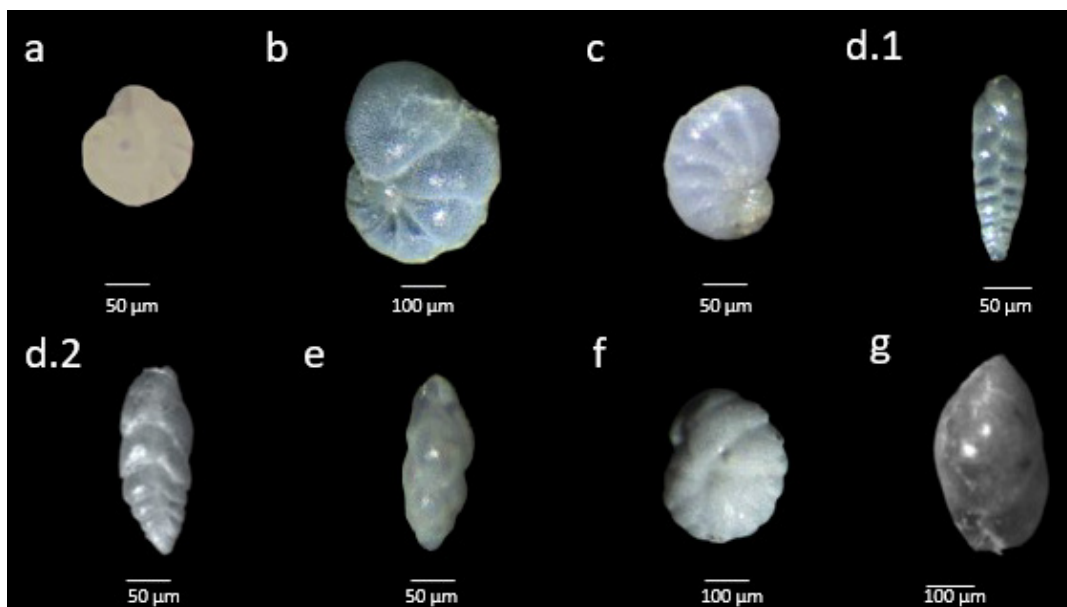


Figura 1.- Representantes de cada categoría de morfogrupo de foraminíferos: a. plano-convexo *Ehilohedra vitrea*; b. bi-convexo, *Valvulineria inflata*; c. bi-umbilicado *Nonionella* sp.; d.1 aplanado, *Bolivina seminuda*, d.2 *Brizalina pseudobeyrichi*; e. cónica, *Buliminella curta*; f. lenticular, *Cassidulina limbata*; g. ovoidal, *Globobulimina auriculata*. Los especímenes corresponden al intervalo 35,5 - 36 cm del testigo

Figure 1. Representatives of each foraminiferal morphogroup category: a. flat-convex *Ehilohedra vitrea*; b. bi-convex, *Valvulineria inflata*; c. bi-umbilicate *Nonionella* sp.; d.1 flattened, *Bolivina seminuda*, d.2 *Brizalina pseudobeyrichi*; e. conical, *Buliminella curta*; f. lenticular, *Cassidulina limbata*; g. ovoid, *Globobulimina auriculata*. The specimens correspond to the 35.5 - 36 cm interval of the control

3. RESULTADOS

Morfogrupos de foraminíferos bentónicos

A partir de 38 especies/taxon calcáreas registradas en este testigo, se reconocieron siete morfogrupos, en los cuales especies como *Bolivina seminuda*, *Buliminella tenuata*, *Pseudoparrella subperuviana*, *Valvulineria inflata*, *Nonionella stella* y *Cassidulina limbata* fueron las de mayor contribución a los morfogrupos aplanado, cónico, plano-convexo, biconvexo, biumbilicado y lenticular, respectivamente (Tabla 1). El morfogrupo aplanado (apl), predominó con más del 40% mostrando una tendencia de ligero aumento a partir de finales del siglo XIX hasta la época moderna (Fig. 1c). El morfogrupo ovoidal de menor representación fue la especie *Globobulimina auriculata* con porcentajes inferiores a 3% (Tabla 1).

3. RESULTS

Benthic foraminiferal morphogroups

A total of 38 calcareous species/taxa were recorded in the core, from which seven distinct morphogroups were identified. Dominant species such as *Bolivina seminuda*, *Buliminella tenuata*, *Pseudoparrella subperuviana*, *Valvulineria inflata*, *Nonionella stella*, and *Cassidulina limbata* made the highest contributions to the flattened, conical, plano-convex, biconvex, bi-umbilicate, and lenticular morphogroups, respectively (Table 1). The flattened morphogroup was the most abundant, accounting for over 40% of the total, with a slight increase from the late 19th century into the modern era (Fig. 1c). The ovoid morphogroup, represented by *Globobulimina auriculata*, had the lowest frequency, remaining under 3% (Table 1).

Tabla 1.- Lista de especies de foraminíferos bentónicos calcáreos en el testigo B1404-11, clasificados según el morfogrupo. Las especies con mayor contribución porcentual promedio en todo el testigo encabezan cada categoría

Table 1.- List of calcareous benthic foraminiferal species in the B1404-11 core, classified according to morphogroup. The species with the highest average percentage contribution in the whole core are at the top of each category

Forma de la testa / Test shape		
Planoconvexo	Bi-convexo	Bi-umbilicado
<i>Pseudoparrella subperuviana</i> CUSHMAN, 1926	<i>Valvulineria inflata</i> D'ORBIGNYI 1839	<i>Nonionella stella</i> CUSHMAN & MOYER 1930
<i>Eilohedra vitrea</i> PARKER, 1953	<i>Cancris carmenensis</i> NATLAND, 1950	<i>Nonionella</i> cf. <i>N. auris</i> D'ORBIGNYI, 1839
<i>Discorbis peruvianus</i> D'ORBIGNYI, 1839	<i>Cancris auriculus</i> FITCHEL & MOLL, 1798	<i>Nonionoides grateloupii</i> D'ORBIGNYI, 1839
<i>Epistominella afueraensis</i> CUSHMAN, 1927		
<i>Gyroidina</i> spp.		
<i>Epistominella</i> sp.		
Aplanado	Cónico	Lenticular
<i>Bolivina seminuda</i> CUSHMAN, 1911	<i>Buliminella tenuata</i> CUSHMAN, 1926	<i>Cassidulina limbata</i> CUSHMAN & HUGHES, 1925
<i>Bolivina plicata</i> D'ORBIGNYI, 1839	<i>Buliminella elegantissima</i> D'ORBIGNYI, 1839	<i>Cassidulina auka</i> BOLTOVSKOY & THEYER, 1970
<i>Bolivina pacifica</i> CUSHMAN & MC CULLOCH, 1942	<i>Buliminella curta</i> CUSHMAN 1925	
<i>Bolivina costata</i> D'ORBIGNYI, 1839	<i>Fursenkoina fusiformis</i> WILLIAMSON, 1858	
<i>Suggrunda eckisi</i> NATLAND, 1950	<i>Virgulinea fragilis</i> GRINDELL & COLLEN, 1976	
<i>Brizalina pseudobeyrichi</i> CUSHMAN, 1926	<i>Uvigerina striata</i> D'ORBIGNYI, 1839	
<i>Bolivina seminuda</i> var. <i>humilis</i> CUSHMAN & MC CULLOCH, 1942	<i>Buliminella</i> sp. 1	Ovoidal <i>Globobulimina auriculata</i> BAILEY, 1894
<i>Bolivina spissa</i> CUSHMAN, 1926	<i>Stainforthia</i> sp.	
<i>Bolivina subadvena</i> CUSHMAN, 1926	<i>Virgulina</i> sp.	
<i>Bolivina minuta</i> NATLAND, 1938		
<i>Bolivina ordinaria</i> PHLEGER & PARKER, 1952		
<i>Bolivina striatula</i> CUSHMAN, 1922		
<i>Bolivina</i> sp. 1		
<i>Suggrunda</i> sp.		

Además, este morfogrupo estuvo constituido por mayor cantidad de taxones, principalmente por bolivinidos (Tabla 1). Las testas cónicas (cnc) fueron el segundo morfogrupo más abundante (hasta 50%) disminuyendo en los primeros centímetros (Fig. 1d). El morfogrupo planoconvexo más bien se mantuvo por debajo del 20% en estos intervalos (Fig. 1a). El morfogrupo biconvexo (bi-cvx) no superó el 3% con picos más conspicuos en los primeros centímetros (Fig. 1b) mientras que los morfogrupos biumbilicado (bi umb) y lenticular (lent) fueron más frecuentes entre los niveles 10 y 40 cm (Fig. 1 e, f).

This morphogroup was also the most taxonomically diverse, largely dominated by bolivinids (Table 1). The conical morphogroup was the second most abundant, reaching up to 50%, but showed a decreasing trend in the uppermost sediment layers (Fig. 1d). The planoconvex morphogroup generally stayed below 20% throughout these intervals (Fig. 1a). The biconvex morphogroup never exceeded 3%, with more pronounced peaks in the upper sediment layers (Fig. 1b). The bi-umbilicate and lenticular morphogroups were most frequent between 10 and 40 cm depths (Fig. 1 e, f).

Ordenamiento y ACP

El dendrograma mostró dos grandes conglomerados de acuerdo a la contribución de los morfogrupos más importantes en los intervalos estudiados (Fig. 2), los cuales a su vez, fueron identificados mediante el ACP determinando que las testas cónicas y bi-umbilicadas estuvieron asociadas al primer componente (CP1), en tanto que las testas plano convexas y las testas aplanadas estuvieron positivamente e inversamente correlacionadas con el segundo componente (CP2), explicando en conjunto el 62% de la varianza total. La variabilidad de cada morfogrupo en términos relativos puede visualizarse en la Figura 3 para todo el testigo.

Sorting and PCA

The hierarchical clustering dendrogram revealed two major groups based on the contribution of the dominant morphogroups across the studied intervals (Fig. 2). These clusters were further examined through principal component analysis (PCA), which showed that conical and bi-umbilicate tests were strongly associated with the first principal component (PC1). In contrast, plano-convex and flattened tests showed positive and negative correlations with the second component (PC2), collectively accounting for 62% of the total variance. Figure 3 illustrates the relative contribution of each morphogrupo to the total variance across the entire core.

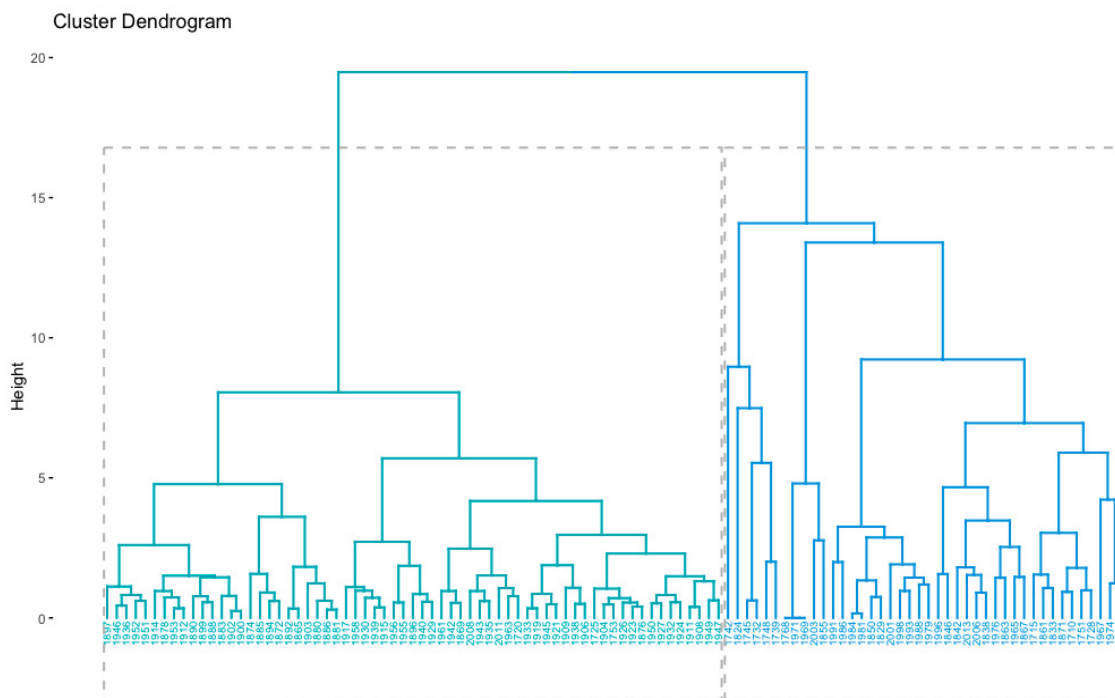


Figura 2.- Análisis de conglomerados de los niveles analizados en el testigo B1404-11. Las agrupaciones corresponden a los morfogrupos de testas cónicas y bi-umbilicadas (verde) y los morfogrupos de testas aplanadas y plano-convexas (azul)

Figure 2. Cluster analysis of the levels analysed in the B1404-11 core. The clusters correspond to the morphogroups of conical and bi-umbilicate tests (green) and the morphogroups of flattened and plano-convex tests (blue)

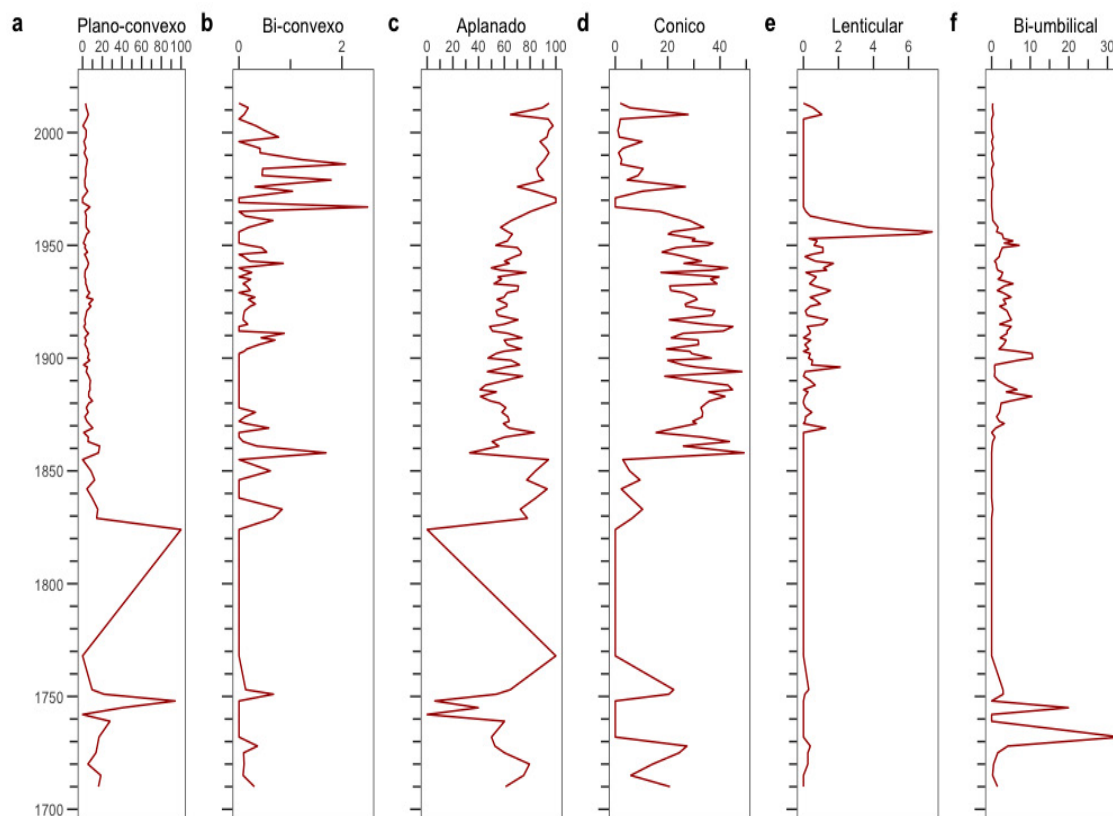


Figura 3.- Variabilidad de las principales categorías de morfogrupos (%) a lo largo de todo el testigo B1404-11. La escala porcentual puede variar en los paneles

Figure 3. Variability of the main morphogroup categories (%) throughout the entire B1404-11 core. The percentage scale may vary across the panels

4. DISCUSIÓN

Las testas aplanadas-elongadas, como el morfogrupo dominante a lo largo de todo el testigo (Fig. 3), estuvieron principalmente representados por bolivinidos (Tabla 1). Este taxa prevalece típicamente en sedimentos influenciados al núcleo de la ZMO frente a Perú (MALLON *et al.*, 2012) con condiciones de bajo contenido de oxígeno disuelto en el fondo y alto flujo orgánico (CARDICH *et al.*, 2012, 2015). Similares observaciones sobre foraminíferos calcáreos de bolivinidos han sido documentadas para el margen de California, en donde dominan en un amplio rango batimétrico excediendo en más del 50% del ensamble total en algunos intervalos (PALMER *et al.*, 2020). En este tipo de ambientes disoxicos, el ensamble asociado al borde de la ZMO comparte rasgos como la forma elongada de la testa y el micro hábitat infaunal.

4. DISCUSSION

Flattened-elongated tests, which were the dominant morphogroup throughout the entire core (Fig. 3), were primarily represented by bolivinids such as *Bolivina seminuda* (Table 1). This taxon is commonly found in sediments influenced by the core of the oxygen minimum zone (OMZ) off the coast of Peru, where low dissolved oxygen levels and high organic flux prevail at the seafloor (MALLON *et al.*, 2012; CARDICH *et al.*, 2012, 2015). Similar patterns have been documented for calcareous foraminifera from bolivinid genera along the California margin, where they dominate across a wide bathymetric range, often comprising over 50% of the assemblage in certain intervals (PALMER *et al.*, 2020). In these dysoxic environments, the OMZ-associated assemblage shares key characteristics, including the elongated test shape and an infaunal microhabitat.

MAZUMDER y NIGAM (2014) encontraron los picos máximos de abundancia de géneros de bolivinidos asociados a los estratos intermedios (150-1500 m) del núcleo de la ZMO en el mar de Arabia, a diferencia del resto de formas rectilíneas dominantes como los géneros *Bulimina*, *Fursenkoina* y *Uvigerina*. En comparación con estos últimos géneros, se ha postulado que la mayoría de bolivinidos poseen características adaptativas como el aumento en la razón superficie-volumen que les otorga mayor ventaja para sobrevivir en ambientes con déficit de oxígeno (KEATING-BITONTI & PAYNE, 2018; GLOCK *et al.*, 2019).

En el registro sedimentario, *Bolivina seminuda* domina plenamente el ensamble de la ZMO en el sistema de afloramiento frente a Perú (HEINZE & WEFER, 1992; CARDICH *et al.*, 2019; ROMERO, 2024) y es considerada un taxón tolerante a sedimentos anóxicos (MORALES *et al.*, 2006; GUTIÉRREZ *et al.*, 2009). En general, varios géneros de bolivinidos son usualmente reportados en el registro microfósil en asociación con otros géneros típicos de ZMO compartiendo micro hábitat con rangos de oxigenación que oscilan entre la suboxia y la disoxia (SHIBAHARA *et al.*, 2007; CARDICH *et al.*, 2019; TETARD *et al.*, 2017; PALMER *et al.*, 2020; ERDEM *et al.*, 2020) perteneciendo en su mayoría a morfogrupos tanto cónicos como aplanados.

Significado paleoceanográfico de los morfogrupos

La edad en la base del testigo corresponde a inicios del Siglo XVIII (1708 AD), lo que significa que el registro microfósil abarca desde las últimas décadas de la Pequeña Edad de Hielo (PEH) hasta la época actual pasando por el *shift* biogeoquímico (ROMERO, 2024). Considerando que durante la PEH las condiciones biogeoquímicas naturales influyeron en la preservación de los carbonatos en las secuencias sedimentarias (MORALES *et al.*, 2006; GUTIÉRREZ *et al.*, 2009), los morfogrupos registrados en este periodo obedecerían a la capacidad de ser resistentes a la disolución como ocurre con las testas plano convexas o algunas testas aplanadas de mayor grosor (Fig. 4, Anexo). En ese sentido, estos morfogrupos mostraron proporciones relativas constantes a lo largo de todo el testigo, siendo de mayor relevancia el morfogrupo aplanado. El registro de esta asociación (CP2) indicaría condiciones estables de la ZMO a lo largo del tiempo, debido a que conforman parte de un ensamble altamente adaptado a condiciones particulares de la ZMO en el Pacífico Oriental (ERDEM *et al.*, 2020).

MAZUMDER & NIGAM (2014) observed peak abundances of bolivinid genera in intermediate depths (150-1500 m) of the OMZ core in the Arabian Sea, contrasting with the dominance of rectilinear forms such as *Bulimina*, *Fursenkoina*, and *Uvigerina*. In comparison, bolivinids are thought to possess adaptive traits, such as increased surface-to-volume ratios, which enhance their survival in oxygen-depleted environments (KEATING-BITONTI & PAYNE, 2018; GLOCK *et al.*, 2019).

In the sedimentary record, *Bolivina seminuda* dominates the OMZ assemblage in the upwelling system off the coast of Peru (HEINZE & WEFER, 1992; CARDICH *et al.*, 2019; ROMERO, 2024), and is considered a taxon tolerant to anoxic sediments (MORALES *et al.*, 2006; GUTIÉRREZ *et al.*, 2009). In general, several bolivinid genera are commonly found in the microfossil record alongside other OMZ taxa, sharing microhabitats with oxygen levels ranging from suboxic to dysoxic (SHIBAHARA *et al.*, 2007; CARDICH *et al.*, 2019; TETARD *et al.*, 2017; PALMER *et al.*, 2020; ERDEM *et al.*, 2020), mostly belonging to both conical and flattened morphogroups.

Paleoceanographic significance of the morphogroups

The base of the core dates to the early 18th century (1708 AD), indicating that the microfossil record spans from the late stages of the Little Ice Age (LIA) to the present, including the biogeochemical shift (ROMERO, 2024). During the LIA, natural biogeochemical conditions likely influenced carbonate preservation in sediment sequences (MORALES *et al.*, 2006; GUTIÉRREZ *et al.*, 2009), and the morphogroups recorded during this period appear to reflect resistance to dissolution, as seen in plano-convex tests or thicker flattened tests (Fig. 4, Annex). These morphogroups maintained relatively stable proportions throughout the core, with the flattened morphogroup being the most prominent. The occurrence of this association (PC2) suggests that OMZ conditions remained stable over time, as it forms part of an assemblage that is highly adapted to the specific conditions of the Eastern Pacific OMZ (ERDEM *et al.*, 2020).

Por el contrario, la asociación (CP1) compuesta por testas cónicas y bi umbilicadas, fueron más importantes entre finales del siglo XIX y mediados del siglo XX (Fig. 4, Anexo), periodo caracterizado por cambios temporales en la productividad exportada, la desnitrificación en columna de agua y la anoxia en el sedimento (CARDICH *et al.*, 2019). Dado que el oxígeno no constituiría un factor limitante para el ensamble, la significativa reducción en el aporte de esta asociación en las décadas modernas estaría modulada por el tipo de productividad exportada. Sin embargo, el registro microfósil de esta asociación, que incluye especies de pequeño tamaño con testas sensibles a la disolución, es consecuencia de la alta variabilidad en las condiciones de óxido reducción en el sedimento (CARDICH *et al.*, 2019; ROMERO, 2024).

5. CONCLUSIONES

Las testas aplanadas-elongadas fueron el morfogrupo predominante en el testigo B1404-11 que comprende los últimos 300 años. Los morfogrupos de mayor variabilidad a lo largo de todo el registro estuvieron representados por testas cónicas y bi umbilicadas además del segundo morfogrupo conformado por testas aplanadas y plano convexas. La presencia de estos morfogrupos está en asociación a la estabilidad en las propiedades estructurales de la ZMO.

In contrast, the association (PC1), consisting of conical and bi-umbilicate tests, became more prominent between the late 19th and mid-20th centuries (Fig. 4, Annex), a period marked by temporal changes in exported productivity, water-column denitrification, and sedimentary anoxia (CARDICH *et al.*, 2019). Since oxygen would not have been a limiting factor for this assemblage, the substantial reduction in its contribution during the modern period is likely influenced by the type of exported productivity. However, the microfossil record of this association, which includes smaller species with dissolution-prone tests, reflects the high variability of redox conditions in the sediment (CARDICH *et al.*, 2019; ROMERO, 2024).

5. CONCLUSIONS

Flattened-elongated tests were the dominant morphogroup throughout the last 300 years in the B1404-11 core. The morphogroups exhibiting the greatest variability across the entire record were those composed of conical and bi-umbilicate tests, along with a second group of flattened and plano-convex tests. The presence of these morphogroups reflects the stability of the structural properties within the oxygen minimum zone (OMZ).

6. REFERENCIAS

- ALPERIN, M.I., CUSMINSKY, G. C. & BERNASCONI, E. (2011). Benthic foraminiferal morphogroup assemblages in recent sediments of the Argentine Continental Shelf. *Journal of Foraminiferal Research*, 41(2), 155-166. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.41.2.155>
- BERNHARD, J. M. (1986). Characteristic assemblages and morphologies of benthic foraminifera from anoxic, organic-rich deposits; Jurassic through Holocene. *Journal of Foraminiferal Research*, 16(3), 207-215. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.16.3.207>
- CARDICH, J., MORALES, M., QUIPÚZCOA, L., SIFEDDINE, A. & GUTIÉRREZ, D. (2012). Benthic foraminiferal communities and microhabitat selection on the continental shelf off central Peru. In: A. V. Altenbach, J. M. Bernhard & J. Seckbach (Eds.), *Anoxia: Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies* (Vol. 21, pp. 323-340). Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1896-8_17
- CARDICH, J., SIFEDDINE, A., SALVATTECI, R., ROMERO, D., BRICEÑO-ZULUAGA, F., GRACO, M., ANCULLE, T., ALMEIDA, C. & GUTIÉRREZ, D. (2019). Multidecadal changes in marine subsurface oxygenation off central Peru during the last ca. 170 years. *Frontiers in Marine Science*, 6, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00270>
- CARDICH, J., GUTIÉRREZ, D., ROMERO, D., PÉREZ, A., QUIPÚZCOA, L., MARQUINA, R., YUPANQUI, W., SOLÍS, J., CARHUAPOMA, W., SIFEDDINE, A. & RATHBURN, A. (2015). Calcareous benthic foraminifera from the upper central Peruvian margin: Control of the assemblage by pore water redox and sedimentary organic matter. *Marine Ecology Progress Series*, 535, 63-87. <https://doi.org/10.3354/meps11409>
- CORLISS, B. H. (1985). Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments. *Nature*, 314, 435-438. <https://doi.org/10.1038/314435a0>
- CORLISS, B. H. (1991). Morphology and microhabitat preferences of benthic foraminifera from the northwest Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology*, 17(3-4), 195-236. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(91\)90014-W](https://doi.org/10.1016/0377-8398(91)90014-W)
- CORLISS, B. H. & CHEN, C. (1988). Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications. *Geology*, 16(8), 716-719. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0716:MPONSD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0716:MPONSD>2.3.CO;2)

- DEN DULK, M., REICHART, G. J., MEMON, G. M., ROELOFS, E.M.P., ZACHARIASSE, W. J. & VAN DER ZWAAN, G. J. (1998). Benthic foraminiferal response to variations in surface water productivity and oxygenation in the northern Arabian Sea. *Marine Micropaleontology*, 35(1-2), 43-66. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(98\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(98)00015-2)
- ERDEM, Z., SCHÖNFELD, J., RATHBURN, A. E., PÉREZ, M.-E., CARDICH, J. & GLOCK, N. (2020). Bottom-water deoxygenation at the Peruvian margin during the last deglaciation recorded by benthic foraminifera. *Biogeosciences*, 17, 3165-3182. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3165-2020>
- GLOCK, N., ROY, A. S., ROMERO, D., WEIN, T., WEISSENBACH, J., REVSBECH, N. P., HOGSLUND, S., CLEMENS, D., SOMMER, S. & DAGAN, T. (2019). Metabolic preference of nitrate over oxygen as an electron acceptor in foraminifera from the Peruvian oxygen minimum zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8), 2860-2865. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813887116>
- GOODAY, A. J., BERNHARD, J. M., LEVIN, L. A. & SUHR, S. B. (2000). Foraminifera in the Arabian Sea oxygen minimum zone and other oxygen-deficient settings: Taxonomic composition, diversity, and relation to metazoan faunas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(1-2), 25-54. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00099-5)
- GOODAY, A. J. (2003). Benthic foraminifera (Protista) as tools in deep-water paleoceanography: environmental influences on faunal characteristics. *Advances in Marine Biology*, 46, 1-90. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(03\)46002-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(03)46002-1)
- GUTIÉRREZ, D., SIFEDDINE, A., FIELD, D. B., ORTLIEB, L., VARGAS, G., CHÁVEZ, F., VELAZCO, F., FERREIRA, V., TAPIA, P., SALVATTECI, R., BOUCHER, H., MORALES, M. C., VALDÉS, J., REYSS, J.-L., CAMPUSANO, A., BOUSSAFIR, M., MANDENG-YOGO, M., GARCÍA, M. & BAUMGARTNER, T. (2009). Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the little ice age. *Biogeosciences*, 6(5), 835-848. <https://doi.org/10.5194/bg-6-835-2009>
- HEINZE, P.-M. & WEFER, G. (1992). The history of coastal upwelling off Peru (11°S, ODP Leg 112, Site 680B) over the past 650 000 years. *Geological Society Special Publications*, 64, 451-462. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.064.01.3>
- JORISSEN, F. J. (1999). Benthic foraminiferal successions across Late Quaternary Mediterranean sapropels. *Marine Geology*, 153, 91-101. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00088-7)
- JORISSEN, F. J., DE STIGTER, H. C. & WIDMARK, J. G. V. (1995). A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Mar. Micropaleontol.*, 26(1-4), 3-15. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0377-8398(95)00047-X)
- JORISSEN, F. J., FONTANIER, C. & THOMAS, E. (2007). Chapter Seven Paleocceanographical Proxies Based on Deep-Sea Benthic Foraminiferal Assemblage Characteristics. In C. Hillaire-Marcel, A. De Vernal (Eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleocceanography* (Developments in Marine Geology, Vol. 1, Cap. 7., pp. 263-325). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01012-3](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01012-3)
- KAIHO, K. (1999). Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI). *Marine Micropaleontology*, 37(1), 67-76. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(99\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(99)00008-0)
- KEATING-BITONTI, C. R. & PAYNE, J. L. (2018). Environmental influence on growth history in marine benthic foraminifera. *Paleobiology*, 44(4), 736-757.
- KOHO, K. & PIÑA-OCHOA, E. (2012). Benthic Foraminifera: Inhabitants of Low-Oxygen Environments. In A. V. Altenbach, J. M. Bernhard, & J. Seckbach (Eds.), *Anoxia Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies* (Anoxia. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, Vol. 21, pp. 249-285). Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1896-8_14
- MALLON, J., GLOCK, N. & SCHÖNFELD, J. (2012). The response of benthic foraminifera to low-oxygen conditions of the Peruvian Oxygen Minimum Zone. In: A. V. Altenbach, J. M. Bernhard & J. Seckbach (Eds.), *Anoxia: Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies* (Anoxia. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, Vol. 21, pp. 305-321). Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1896-8_16
- MAZUMDER, A. & NIGAM, R. (2014). Bathymetric preference of four major genera of rectilinear benthic foraminifera within oxygen minimum zone in Arabian Sea off central west coast of India. *J. Earth Syst. Sci.*, 123(3), 633-639. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0419-y>
- MORALES, M. C., FIELD, D., PASTOR, S. M., GUTIÉRREZ, D., SIFEDDINE, A., ORTLIEB, L., FERREIRA, V., SALVATTECI, R. & VELAZCO, F. (2006). Variaciones de foraminíferos de los últimos 460 años en sedimentos laminados de la plataforma continental peruana. *Bol. Soc. Perú*, 101, 5-18.
- MURRAY, J. W. (2006). *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535529>
- NAGY, J. (1992). Environmental significance of foraminiferal morphogroups in Jurassic North Sea deltas. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 95(1-2), 111-134. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90168-5](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90168-5)
- PALMER, H. M., HILL, T. M., ROOPNARINE, P. D., MYHRE, S. E., REYES, K. R. & DONNENFIELD, J. T. (2020). Southern California margin benthic foraminiferal assemblages record recent centennial-scale changes in oxygen minimum zone. *Biogeosciences*, 17, 2923-2937. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2923-2020>
- PÉREZ, A. & FERNANDES, J. (2006). Patrones de distribución de morfogrupos de foraminíferos bentónicos como discriminadores de biofacies en la Formación Cubagua, Península de Araya, (Venezuela Oriental). *Geología Colombiana*, (31), 3-10. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/42314>
- REOLID, M., RODRÍGUEZ-TOVAR, F. J., NAGY, J. & OLÓRIZ, F. (2008). Benthic foraminiferal morphogroups of mid to outer shelf environments of the Late Jurassic (Prebetic Zone, southern Spain): characterization of biofacies and environmental significance. *Palaeogeography*,

- Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 261(3-4), 280–299. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.01.021>
- ROMERO, D. (2024). *Uso de foraminíferos calcáreos para la reconstrucción de cambios en la acidez y oxigenación del sistema de afloramiento costero frente a Pisco, Perú en los últimos 200 años* [Tesis para optar el Grado de Maestro en Ciencias del Mar, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio UPCH. <https://hdl.handle.net/20.500.12866/16084>
- SEN GUPTA, B. K. & MACHAIN-CASTILLO M. L. (1993). Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology*, 20(3–4), 183–201. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(93\)90032-S](https://doi.org/10.1016/0377-8398(93)90032-S)
- SEVERIN, K. P. (1983). Test morphology of benthic foraminifera as a discriminator of biofacies. *Marine Micropaleontology*, 8(1), 65–76. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(83\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0377-8398(83)90005-1)
- SHIBAHARA, A., OHKUSHI, K., KENNETT, J.P. & IKEHARA, K. (2007). Late Quaternary changes in intermediate water oxygenation and oxygen minimum zone northern Japan: a benthic foraminiferal perspective. *Paleoceanography*, 22, PA3213. <https://doi.org/10.1029/2005PA001234>
- TETARD, M., LICARI, L. & BEAUFORT, L. (2017). Oxygen history off Baja California over the last 80 kyr: a new foraminiferal-based record. *Paleoceanography*, 32(3), 249–264. <https://doi.org/10.1002/2016PA003034>
- VAN DER ZWAAN, G. J., DUIJNSTEE, I. A. P., DEN DULK, M., ERNST, S. R., JANNINK, N. T. & KOUWENHOVEN, T. J. (1999). Benthic foraminifers: proxies or problems? A review of paleoecological concepts. *Earth-Sciences Reviews*, 46(1-4), 213–236. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00011-2)

ANEXO

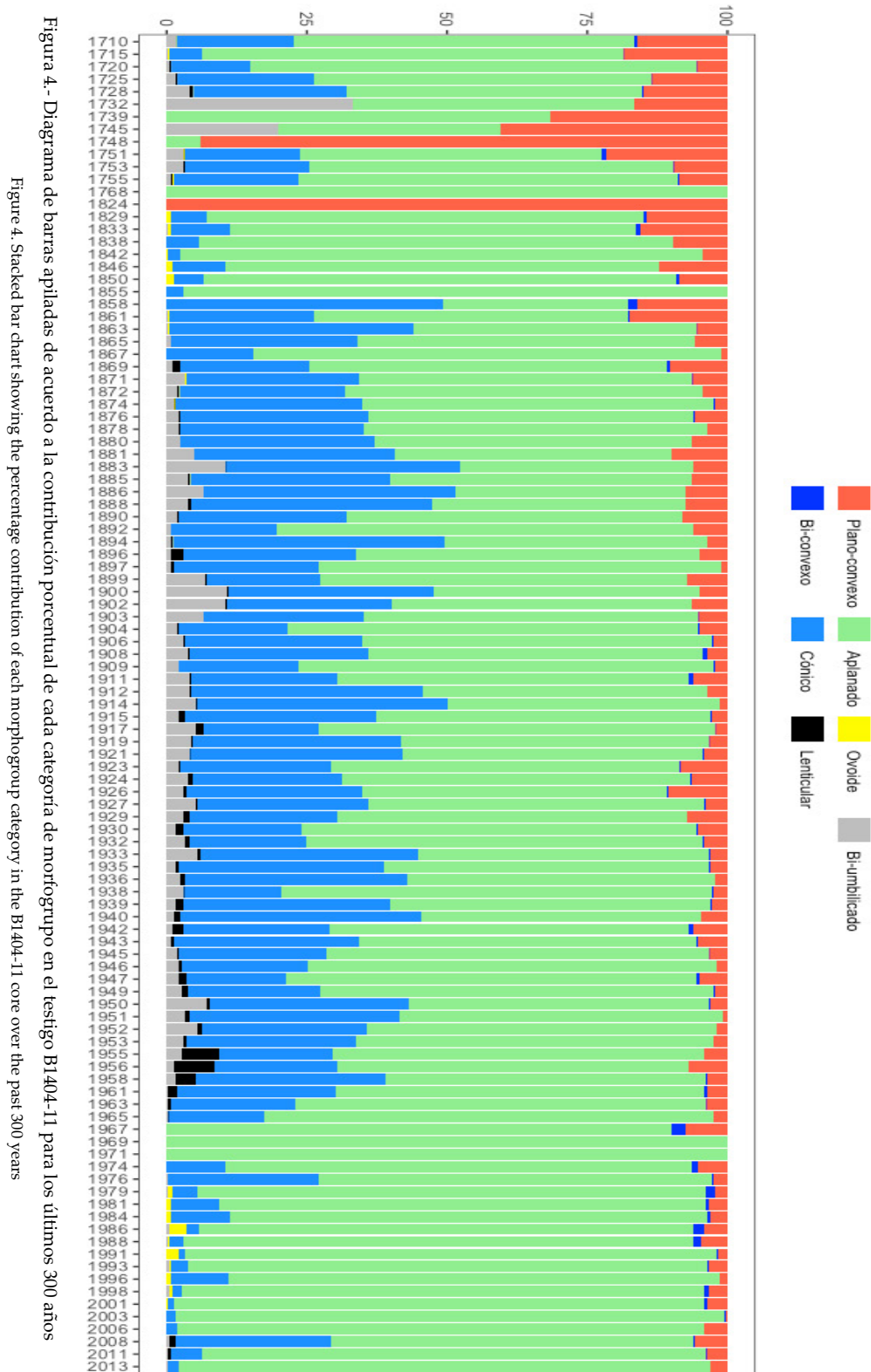


Figura 4.- Diagrama de barras apiladas de acuerdo a la contribución porcentual de cada categoría de morfogrupo en el testigo B1404-11 para los últimos 300 años

Figure 4. Stacked bar chart showing the percentage contribution of each morphogroup category in the B1404-11 core over the past 300 years