

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“ESTRUCTURA COMUNITARIA DE FORAMINÍFEROS  
BENTÓNICOS EN RELACIÓN A FACTORES AMBIENTALES  
EN SEDIMENTOS MARINOS SOMEROS DE LA COSTA  
CENTRAL DEL PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
BIÓLOGO**

**LANDER MERMA MORA**

**LIMA-PERÚ**

**2020**

---

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“ESTRUCTURA COMUNITARIA DE FORAMINÍFEROS  
BENTÓNICOS EN RELACIÓN A FACTORES  
AMBIENTALES EN SEDIMENTOS MARINOS SOMEROS  
DE LA COSTA CENTRAL DEL PERÚ”**

Presentado por:  
**LANDER MERMA MORA**

Tesis para optar el Título Profesional de:  
**BIÓLOGO**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Sc. Germán Antonio Arellano Cruz  
PRESIDENTE

Dr. Jaime Humberto Mendo Aguilar

MIEMBRO

Blgo. Richar Joel Morales Rodríguez

MIEMBRO

Dra. Patricia Liliana Gil Kodaka

ASESORA

Dr. Dimitri Alexey Gutiérrez Aguilar

CO-ASESOR

*“The case of the three species of protozoan... which apparently select differently sized grains of sand, etc., is almost the most wonderful fact I ever heard of. One cannot believe that they have mental power enough to do so, and how any structure or kind of viscosity can lead to this result passes all understanding”.*

Charles Darwin, en una carta, a W.B. Carpenter.

## **DEDICATORIA**

Dedicado a la comunidad de científicos peruanos y a los jóvenes estudiantes que aspiran a ser parte de ella.

## AGRADECIMIENTOS

A mis asesores. La Dra. Patricia Gil Kodaka, quien confió en mi capacidad para investigar desde mi etapa de estudiante de pregrado. Gracias por aceptar asesorar este trabajo. Y el Dr. Dimitri Gutiérrez Aguilar, quien guía mis investigaciones desde que soy egresado. Gracias por el tiempo dedicado.

Mis más sinceros agradecimientos a las instituciones que me motivaron a realizar esta tesis: la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) por brindarme conocimientos básicos y especializados para desenvolverme en la actividad científica, y al Instituto del Mar del Perú (IMARPE) por acogerme y darme el respaldo logístico y académico para la realización de esta tesis.

A los proyectos Borde Costero y Cambio Climático del IMARPE en cuyo marco se obtuvieron los datos y muestras que fueron insumos para esta investigación. Agradezco especialmente a la MSc. Sonia Sánchez y al Blgo. Luis Quipúzcoa por su constante disposición para colaborar con el acceso a la información.

A todos los integrantes del Laboratorio de Bentos Marino del IMARPE (Luchito, Robert, Vitocho y Dennis) por todo el apoyo, consejos, ambiente acogedor y amistad brindados. Agradezco especialmente a Dennis Romero por su colaboración y enseñanza sobre el estudio de los foraminíferos, y a Jorge Cardich por abrir el camino del estudio de los foraminíferos bentónicos costeros y por resolver mis dudas específicas.

Al equipo de profesionales de los laboratorios de Hidrofísica, Hidroquímica, Fitoplancton y Geología Marina del IMARPE, por su colaboración en los análisis de las muestras y la obtención de los datos.

A todos mis amigos de las ciencias marinas por sus consejos, opiniones y buena compañía.

Gracias Wilson Carhuapoma, Ernesto Pariona, Jorge Flores, Edgart Flores e Isabel Carmona.

Gracias especiales a Kathy Córdova por su compañía y disposición a brindar una opinión sobre estos temas.

Finalmente agradezco sobremanera a mis padres Isaías e Hildaura por haberme brindado las

condiciones adecuadas para estudiar y ser profesional. También agradezco a mis hermanos

Miguel y Paola por su compañía y su constante estímulo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Aspectos generales de los foraminíferos bentónicos .....	3
2.2. Foraminíferos bentónicos en ambientes sedimentarios someros .....	5
2.3. Comunidades de foraminíferos bentónicos y factores ambientales .....	6
2.4. Contexto ambiental de la costa central peruana.....	8
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
3.1. Hipótesis planteadas.....	9
3.2. Zonas de estudio .....	9
3.3. Diseño de la investigación .....	13
3.4. Procedimientos en campo y laboratorio.....	14
3.4.1. Muestreo del sustrato para foraminíferos .....	14
3.4.2. Muestreo del sustrato para propiedades geoquímicas .....	14
3.4.3. Muestreo de agua y determinación de variables.....	15
3.4.4. Determinación de materia orgánica total y textura del sustrato .....	15
3.4.5. Tratamiento y análisis de las muestras biológicas.....	15
3.5. Procesamiento de datos.....	16
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>18</b>
4.1. Características ambientales.....	18
4.1.1. Variables físico químicas de la columna de agua.....	18
4.1.2. Variables geoquímicas del sustrato .....	21
4.1.3. Comparación de los ambientes de fondo.....	22

4.2. La comunidad de foraminíferos bentónicos.....	26
4.2.1. Composición taxonómica .....	26
4.2.2. Parámetros comunitarios y de la tafocenosis.....	29
4.2.3. Clasificación de la estructura comunitaria.....	32
4.3. Influencia de los factores ambientales en los foraminíferos bentónicos.....	34
4.3.1. Influencia en los parámetros comunitarios .....	34
4.3.2. Influencia en la estructura comunitaria .....	38
4.4. El hábitat bentónico de los foraminíferos en la plataforma interna .....	41
4.4.1. Distribución vertical en los sedimentos.....	41
4.4.2. Foraminíferos en ambientes sedimentarios y modelo conceptual .....	43
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Información de las estaciones de muestreo .....	11
<b>Tabla 2:</b> Variables ambientales observadas en el agua superficial.....	20
<b>Tabla 3:</b> Variables ambientales observadas en el agua de fondo .....	20
<b>Tabla 4:</b> Variables geoquímicas del sustrato y la profundidad en cada sitio.....	22
<b>Tabla 5:</b> Resumen de los componentes principales (CP) y criterio de relevancia de Kaiser-Guttman. Prom = promedio de auto-valores de los componentes.....	24
<b>Tabla 6:</b> Correlaciones lineales de Pearson de las variables abióticas del ambiente bentónico. Número de datos: 15, (n.s.: no significativo, p-valor < 0.01).....	24
<b>Tabla 7:</b> Foraminíferos bentónicos identificados. Su orden taxonómico, tipo de testa y aporte numérico de cada grupo ecológico. (* Más de un morfotipo).....	27
<b>Tabla 8:</b> Densidades promedio (n=2) de las especies de foraminíferos bentónicos en 50 cm <sup>2</sup> de sustrato de las estaciones de muestreo .....	28
<b>Tabla 9:</b> Parámetros comunitarios y de la tafocenosis de foraminíferos bentónicos en volúmenes de sustrato de 5 cm de profundidad y 50 cm <sup>2</sup> de superficie (Datos promedio, n=2) .....	31
<b>Tabla 10:</b> Correlaciones de Spearman entre las variables de la comunidad y tafocenosis, y las variables abióticas. Número de datos: 15, (n.s.: no significativo, p-valor < 0.01) .....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> (A) Organización celular de un foraminífero bentónico de una cámara. (B) Ciclo de vida generalizado de los foraminíferos. Modificado de Goldstein (1999).....	4
<b>Figura 2.</b> Rango de profundidades de la ZMO en el Pacífico Este frente a las costas de América. En rojo se señala la costa peruana. Modificado de Helly & Levin (2004).....	8
<b>Figura 3.</b> Zonación de la plataforma continental. Modificado de Hayward <i>et al.</i> (1999)..	11
<b>Figura 4.</b> Zonas de estudio y distribución de las estaciones de muestreo (elaboración propia).....	12
<b>Figura 5.</b> Secuencia de obtención ( <i>HAPS corer</i> ) y seccionamiento de la columna de sedimento.....	14
<b>Figura 6.</b> Biplot del ACP que muestra el ordenamiento de los sitios en un plano de dos dimensiones o componentes, y las variables asociadas representadas como vectores.....	25
<b>Figura 7.</b> Análisis nodal y clústeres en modos Q y R. Nótese el agrupamiento de los sitios en relación a las asociaciones predominantes.....	33
<b>Figura 8.</b> Biplots del CAP. Escalamiento 1 mostrando el ordenamiento de los sitios basado en la influencia ambiental sobre la comunidad de foraminíferos. Escalamiento 2 mostrando la relación entre los taxones y los factores ambientales.....	40
<b>Figura 9.</b> Perfiles verticales de la comunidad de foraminíferos bentónicos del ambiente I (A), ambiente II (B) y ambiente III (C).....	42
<b>Figura 10.</b> Comparación de los parámetros de la comunidad y de la tafocenosis por tipo de ambiente sedimentario.....	45
<b>Figura 11.</b> Modelo conceptual de las condiciones ambientales y las comunidades de la plataforma interna (<50m) de la costa central peruana. Las diferencias en el régimen hidrodinámico representan las diferencias en el tamaño de grano del sustrato. Los colores con puntos negros corresponden a los foraminíferos calcáreos. (+: valores bajos, ++: valores moderados, +++: valores altos).....	46

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Scores de los sitios en el ACP.....	59
Anexo 2. Scores de las variables en el ACP .....	59
Anexo 3. Detalles de los resultados del CAP .....	60
Anexo 4. Varianzas del modelo del CAP explicadas por los factores ambientales .....	60
Anexo 5. Scores de los sitios en el CAP.....	60
Anexo 6. Scores de las variables ambientales explicativas del CAP .....	61
Anexo 7. Scores de las especies o variables respuesta del CAP .....	61

## RESUMEN

La presente investigación evaluó la comunidad de foraminíferos bentónicos y su relación con los factores abióticos en ambientes sedimentarios someros de la costa central peruana. Para ello se realizaron mediciones *in situ* y se tomaron muestras de sedimentos entre octubre y noviembre de 2014 en tres localidades: la zona de Huacho-Salinas, la Bahía de Miraflores y la Bahía de Paracas. La variabilidad espacial de los factores ambientales y los parámetros comunitarios fue evaluada mediante el análisis de Componentes Principales y el análisis Clúster respectivamente, mientras que sus relaciones fueron examinadas mediante correlaciones múltiples y un análisis canónico de Coordenadas Principales. Las propiedades geoquímicas del sustrato variaron ampliamente, mientras que los factores limitantes del agua de fondo variaron moderadamente por estar influenciados por el afloramiento costero. En total se lograron identificar 11 taxones de foraminíferos bentónicos, de los cuales *Bolivina costata* fue largamente superior en abundancia, seguido por *Buliminella elegantissima* y Allogromiidae. Las especies calcáreas y pequeñas del orden Rotaliida dominaron la comunidad, aunque los foraminíferos de testa orgánica del orden Allogromiida tuvieron una importante contribución. La densidad comunitaria estuvo concentrada en los dos centímetros más superficiales de los sedimentos. La diversidad, en términos de equidad, se vio favorecida por el contenido orgánico y la temperatura. La estructura comunitaria varió principalmente en relación a las diferencias en las propiedades geoquímicas del sustrato, asociadas a diferencias en el régimen hidrodinámico de los ambientes sedimentarios, y a la temperatura. La especie *B. elegantissima* adquiere gran relevancia en ambientes someros protegidos que acumulan materia orgánica. La preservación de la tafocenosis calcárea en los sedimentos suele ser mejor bajo regímenes hidrodinámicos moderados e intensos, ya que en regímenes débiles la gran acumulación de materia orgánica hace más probable que se generen condiciones favorables a la disolución de las testas calcáreas en los sedimentos.

Palabras clave: foraminíferos bentónicos, sedimentos, plataforma interna, afloramiento costero, ecología, materia orgánica.

## ABSTRACT

The community of benthic foraminifera and its relationships with environmental factors were studied in shallow sedimentary environments of Peruvian central coast. For this, *in situ* measurements were made and sediment samples were taken between October and November of 2014 in three locations: Huacho-Salinas zone, Miraflores Bay and Paracas Bay. Spatial variability of environmental factors and community parameters was assessed by using Principal Components Analysis and Cluster Analysis respectively, while their relationships were examined by using multiple correlations and a Canonical Analysis of Principal Coordinates. Substrate geochemical properties had great variations while bottom waters limiting factors had moderate variations due to the influence of coastal upwelling. At total in the community, 11 benthic foraminiferal taxa were identified, of which *Bolivina costata* was far superior in abundance, followed by *Buliminella elegantissima* and Allogromiidae. Small calcareous species from Rotaliida order dominated the community, even though organic-shelled foraminifera from Allogromiida order had an important contribution as well. The density of community was concentrated in the two most superficial centimeters of the sediments. Diversity, as species equitability, was favored by organic matter and temperature. Community structure varied mainly due to differences in substrate geochemical properties, associated to differences in hydrodynamic regimes of sedimentary environments, and to differences in temperature. *B. elegantissima* appears more relevant in shallow sheltered environments, which accumulate organic matter. The preservation of calcareous taphocenosis in sediments is usually better under intense or moderate hydrodynamic regimes since organic matter accumulation in weak regimes makes conditions favorable to calcareous tests dissolution more likely.

Keywords: benthic foraminifera, sediments, inner shelf, coastal upwelling, ecology, organic matter.

## I. INTRODUCCIÓN

Las zonas marino-costeras se extienden desde el borde litoral hasta el quiebre de la plataforma continental, que ocurre a una profundidad aproximada de 200m. Ocupan solo el 10 por ciento de la superficie del océano, pero generan el 25 por ciento de la productividad primaria global y suministran hasta 90 por ciento de la pesca global (Field, Hempel, & Summerhayes, 2002). Sin embargo, estas zonas también están muy amenazadas ya que reciben fuertes presiones ambientales por parte de la población en crecimiento y las actividades agrícolas e industriales a través del uso directo de sus espacios y recursos, y la creciente introducción de nutrientes y contaminantes en sus aguas. Uno de los efectos más importantes de esta influencia es la intensificación y expansión de las condiciones hipóxicas originadas por la eutrofización antropogénica (sobre-enriquecimiento de nutrientes por las actividades humanas) en zonas costeras como bahías y estuarios (STAP, 2011).

El suelo marino, conocido también como ambiente bentónico, presenta diversos hábitats que se modifican en relación a la profundidad, disponibilidad de luz, mareas, oleaje, temperatura, tipo de sustrato, etc. (Gray & Elliot, 2009). Los hábitats bentónicos submareales más someros tienen una dinámica más variable que la de los hábitats profundos debido a la mayor influencia de los factores atmosféricos sobre ellos (Haslett, 2008), que se expresa en fuertes fluctuaciones ambientales en estos hábitats. Aun así albergan una importante diversidad de organismos adaptados de entre los cuales destacan los foraminíferos bentónicos por su gran abundancia y diversidad, y porque pueden llegar a representar más de la mitad de la biomasa de todos los organismos bentónicos en ambientes deficientes de oxígeno (Gooday, Levin, Linke, & Heeger, 1992), jugando un rol preponderante en el ciclo del carbono orgánico (Nomaki, Heinz, Nakatsuka, Shimanaga, & Kitazato, 2005).

Los foraminíferos bentónicos tienen una reconocida utilidad en diversos campos de investigación. Son considerados buenos indicadores de las condiciones de su medio en las evaluaciones de la calidad ambiental de los ecosistemas marinos ya que poseen un ciclo de vida corto y un alto grado de especialización (Schönfeld *et al.*, 2012). Debido también a que sus conchillas (testas) pueden preservarse enterradas en el sedimento luego de su muerte, los foraminíferos bentónicos son muy útiles en estudios paleoceanográficos para reconstruir

condiciones pasadas de los ambientes sedimentarios a partir de la composición de especies de los ensambles fósiles (Gooday, 2003). Además, por ser muy diversos y abundantes son también importantes herramientas en estudios que evalúan los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas marinos en general (Bernhard, Mollo-Christensen, Eisenkolb, & Starczak, 2009; Uthicke, Momigliano, & Fabricius, 2013).

Las aplicaciones que queremos darle a los foraminíferos bentónicos en nuestro territorio requieren de estudios previos de las relaciones de estos organismos con su entorno, especialmente en un ambiente tan particular como el ecosistema marino peruano. En ese sentido es necesario realizar más estudios ecológicos de los que existen actualmente, los cuales han estado enfocados en las mayores profundidades de la plataforma continental submarina (Cardich *et al.*, 2015; Cardich, Morales, Quipúzcoa, Sifeddine, & Gutiérrez, 2012; Mayor, 1993; Romero, 2014), e implementar estudios a nivel experimental para alcanzar un entendimiento más claro del rol de estos organismos en el bentos.

Es así que la presente investigación pretende contribuir a la comprensión de la influencia de los factores abióticos sobre la comunidad de foraminíferos bentónicos en la parte más somera de la plataforma continental de la costa central peruana, mediante la evaluación de tres ambientes que difieren en sus características hidrodinámicas y sedimentarias, lo cual permite explorar los principales factores en juego en la ecología de los foraminíferos bentónicos. La pregunta que motivó este estudio es: ¿Qué factores ambientales están asociados a las variaciones de la estructura comunitaria de los foraminíferos bentónicos en los ambientes sedimentarios marinos poco profundos de la costa central del Perú?

La presente investigación tiene como objetivo general determinar la estructura comunitaria de los foraminíferos bentónicos y sus variaciones en relación a los factores ambientales del agua de fondo y del sedimento en tres ambientes someros de la costa central del Perú en un periodo de condiciones oceanográficas neutras<sup>1</sup>: entre octubre y noviembre de 2014. Para ello se plantearon los siguientes objetivos específicos: 1) Describir y comparar las variables ambientales del agua de fondo (salinidad, temperatura, oxígeno y nitratos) y sedimentos (textura y contenido de materia orgánica total) de las tres localidades. 2) Determinar la diversidad, abundancia y distribución vertical de la comunidad de foraminíferos bentónicos y examinar sus variaciones en las tres localidades. 3) Relacionar las variables ambientales con la diversidad y abundancia de la comunidad de foraminíferos bentónicos.

---

<sup>1</sup>Índice Costero El Niño (ICEN): <http://www.met.igp.gob.pe/variabclim/indices.html>

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos generales de los foraminíferos bentónicos

Los foraminíferos bentónicos (phylum Foraminifera) son organismos unicelulares protozoarios que viven principalmente en los sedimentos marinos (Haynes, 1981). Son similares a las amebas pues poseen pseudópodos como proyecciones celulares, pero se diferencian de estas porque sus pseudópodos poseen gránulos y están conectados entre sí formando una red (Jones, 2014).

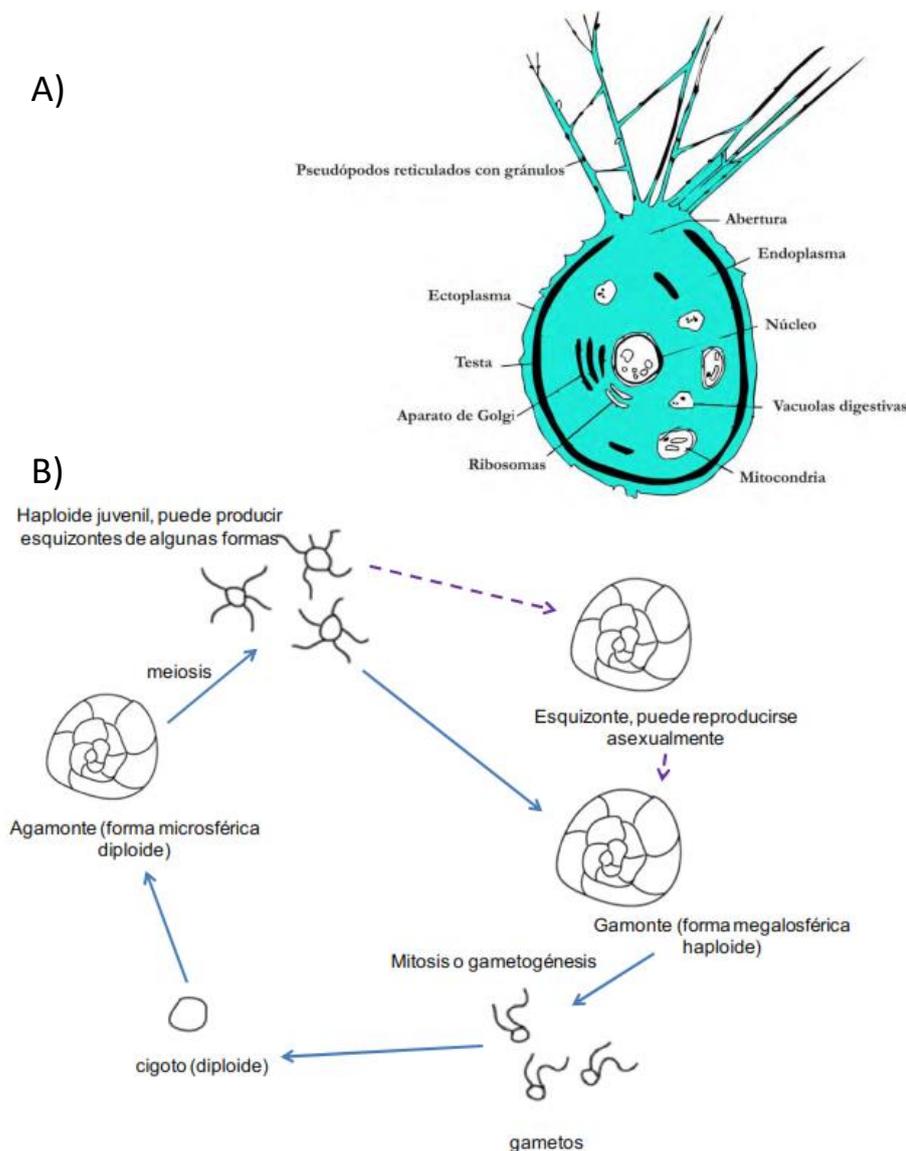
El protoplasma de estos organismos se divide en un endoplasma granular dentro de la testa y un ectoplasma que se proyecta fuera de ella por una abertura y eyecta sus pseudópodos filamentosos (**Figura 1**). Los pseudópodos son la estructura más importante del ectoplasma y consisten en hilos granulares que permiten al organismo realizar varias de sus funciones vitales: nutrición, respiración, locomoción, captura, quiste de nutrición y construcción de nuevas cámaras (Goldstein, 1999).

La mayoría de las especies tienen una conchilla o testa externa de material inorgánico, compuesta de una o varias cámaras comunicadas entre sí, cuya morfología y composición han sido la base para su clasificación taxonómica (Sen Gupta, 1999b). El principal y más diverso grupo de especies de foraminíferos son los foraminíferos calcáreos que secretan minerales de calcita en la construcción de su testa, aunque otros grupos también importantes son los foraminíferos de testa aglutinada que utilizan minerales de su entorno para su construcción, y los tectináceos o foraminíferos que no poseen testa inorgánica sino más bien orgánica compuesta de la proteína tectina (Goldstein, 1999).

El ciclo de vida de los foraminíferos se caracteriza por presentar una alternancia de generaciones sexual y asexual (Goldstein, 1999). Durante el modo sexual, un adulto haploide (n), llamado megalosférico o gamonte, genera gametos haploides los cuales se unen a otras células parentales generando a un individuo diploide (2n) llamado microsférico o agamonte.

El adulto agamonte completa el ciclo reproduciéndose asexualmente por fisión múltiple generando individuos haploides. Alternativamente, el agamonte puede producir una segunda generación asexual llamada esquizonte (**Figura 1**).

Por lo general, los individuos adultos mueren tras la liberación de los gametos o juveniles (Murray, 2006). Se ha reportado que su tiempo de vida puede oscilar desde unas cuantas semanas en especies pequeñas hasta más de un año para especies grandes (Hayward, Figueira, Sabaa, & Buzas, 2014). Debido a su tiempo de vida relativamente corto son capaces de adaptarse y responder rápidamente a los cambios en su entorno. Se ha visto que el rápido aumento en su reproducción puede suceder en cuestión de meses inducido por la alta disponibilidad de materia orgánica (Corliss & Silva, 1993).



**Figura 1. (A) Organización celular de un foraminífero bentónico de una sola cámara. (B) Ciclo de vida generalizado de los foraminíferos. Modificado de Goldstein (1999)**

## 2.2. Foraminíferos bentónicos en ambientes sedimentarios someros

Los ambientes sedimentarios de las zonas marino costeras (que acumulan partículas como gravas, arenas, limos o arcillas) son muy diversos en su geomorfología, hidrodinámica y sedimentología (Haslett, 2008). Entre estos hábitats se encuentran los manglares, marismas, estuarios, fiordos, arrecifes, lagunas, bahías y costas abiertas, y se extienden desde la zona intermareal hasta la zona interna de la plataforma continental (Sen Gupta, 1999a).

En los manglares, marismas, lagunas y estuarios la distribución de los foraminíferos está principalmente relacionada al gradiente salino. Las especies aglutinadas son muy comunes a menores niveles de salinidad y las especies calcáreas son más importantes a niveles normales del agua de mar, e incluso en condiciones de hipersalinidad. En general la diversidad de especies es baja en los extremos del gradiente (Murray, 2006). Por otro lado, en las plataformas internas de costas abiertas o semicerradas como las bahías, de salinidad normal, son usuales grandes números de especies con predominio de las formas calcáreas (Sen Gupta, 1999a).

Para la costa oeste de Sudamérica, específicamente en la provincia peruano-chilena, Boltovskoy y Wright (1976) mencionaron que las especies *Buccella peruviana*, *Cancris inflatus*, *Nonionella auris*, *Bolivina plicata*, *Bolivina costata* y *Discorbis corus* son características, aunque algunas de ellas pueden distribuirse hasta profundidades de talud continental. Además, mencionan que esta zona es particular por albergar algunas especies no registradas en otras partes de Sudamérica y por la presencia muy rara del género *Elphidium*, el cual es muy abundante en el lado del Atlántico.

En Perú, Verano (1974) logró identificar las especies *Bolivina costata*, *Buliminella* sp., *Buccella peruviana*, *Discorbis peruvianus*, *Cibicides* sp., *Nonion* sp., *Quinqueloculina* spp., en el intermareal y submareal somero de varias playas arenosas de la región Lima. Sin embargo, *B. costata* y *Buliminella elegantissima* están presentes también en el submareal profundo alcanzando a vivir en profundidades incluso de talud continental (Cardich *et al.*, 2015, 2012; Mayor, 1993).

### **2.3. Comunidades de foraminíferos bentónicos y factores ambientales**

La distribución ecológica de los foraminíferos bentónicos es influenciada por los factores ambientales que varían cerca de los valores umbrales de su nicho ecológico (Murray, 2001). Algunos de estos pueden incluso co-variar y potenciarse, modificando el efecto individual de cada uno. Entre los factores más ampliamente estudiados en relación a los foraminíferos están la temperatura, salinidad, suministro de alimento y la disponibilidad de oxígeno (Murray, 2006).

La temperatura es el factor principal que controla la distribución de las especies de foraminíferos a escalas globales, de manera que los patrones biogeográficos de los foraminíferos responden a cambios latitudinales de la temperatura (Boltovskoy & Wright, 1976; Culver & Buzas, 1999). Localmente, la temperatura también ejerce control sobre la comunidad de foraminíferos en ambientes costeros de altas latitudes que experimentan fuertes cambios estacionales en este factor (Murray, 2006).

Los efectos de la salinidad sobre la distribución y diversidad de los foraminíferos son visibles en áreas donde ocurre una considerable mezcla con el agua dulce con variaciones estacionales, como en los grandes estuarios (Boltovskoy & Wright, 1976). Sin embargo, se conoce que las mayores diversidades son encontradas en ambientes de salinidad normal, es decir entre 32 y 37 ups (Murray, 2006).

El oxígeno disuelto ha sido considerado uno de los factores más importantes para la distribución de los organismos bentónicos (Diaz & Rosenberg, 1995), y en concentraciones menores a 1 mL/L es también un factor crítico para los foraminíferos (Murray, 2006). Pese a ello, algunas especies no solo viven en condiciones hipóxicas sino que pueden soportar durante semanas la anoxia (Moodley, Schaub, Van der Zwaan, & Herman, 1998), y tolerar la presencia de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), considerado tóxico para los organismos eucariotas (Bagarinao, 1992). Estas especies se ven favorecidas con la carencia de oxígeno ya que elimina tanto a sus depredadores como a sus competidores por el alimento.

Entre los principales factores que regulan la abundancia de los foraminíferos está el flujo de alimento (materia orgánica), aunque los mecanismos de esta regulación aún no se logran entender completamente (Murray, 2006). Para probar esta relación es necesario realizar mediciones del tipo de alimento, cantidad, calidad, variabilidad del suministro y aceptación de una especie dada de foraminífero.

Las variaciones en el flujo orgánico suelen estar asociadas a niveles de oxígeno cambiantes. Por un lado, bajas concentraciones de oxígeno eliminarían varios grupos de metazoarios y algunos grupos de foraminíferos, reduciendo la depredación y la competencia; y por el otro, la alta disponibilidad de la materia orgánica conllevaría a una comunidad poco diversa dominada por algunas especies oportunistas. Jorissen *et al.* (1995) explicaron la relación de estos dos factores en su modelo conceptual 'TROX' aplicado a la distribución vertical en el microhábitat sedimentario. En este modelo se esquematiza los gradientes del oxígeno y del flujo orgánico hacia los sedimentos constituyendo tres escenarios: i) el oligotrófico con bajo flujo orgánico y gran disponibilidad de oxígeno que limita a las especies al sedimento superficial debido a la escasez de alimento, ii) el mesotrófico con un flujo de alimento y niveles de oxígeno regulares que permiten la existencia de especies infaunales que se profundizan en el sedimento; y iii) el eutrófico, que pese a presentar el mayor flujo orgánico limita a cualquier especie (epifaunal o infaunal) a vivir en el sedimento superficial debido a la desaparición del oxígeno (anoxia) en los primeros centímetros o milímetros del sedimento.

El pH en el ambiente bentónico es un factor que ha sido muy poco relacionado al control de la distribución o las abundancias de los foraminíferos bentónicos en la literatura clásica sino más bien a los procesos tafonómicos, los cuales influyen en la generación de los ensambles fósiles a partir de los individuos muertos. Con el aumento reciente del interés por evaluar los efectos de la acidificación sobre los ecosistemas marinos, se han realizado estudios en laboratorio y en campo sobre el posible control de los altos niveles de CO<sub>2</sub>, pH y la subsaturación de los carbonatos sobre los foraminíferos bentónicos a nivel individual, poblacional y comunitario (Green, Aller, & Aller, 1998; Le Cadre, Debenay, & Lesourd, 2003). Algunos estudios que evaluaron el efecto individual de los cambios del pH del agua sobre las comunidades de foraminíferos bentónicos sugieren que ante un gradiente de pH, la comunidad de foraminíferos bentónicos es menos abundante y menos diversa en condiciones más ácidas, debido a la desaparición de especies de testa calcárea en la comunidad (Dias, Hall-Spencer, & Hart, 2010; Uthicke *et al.*, 2013).

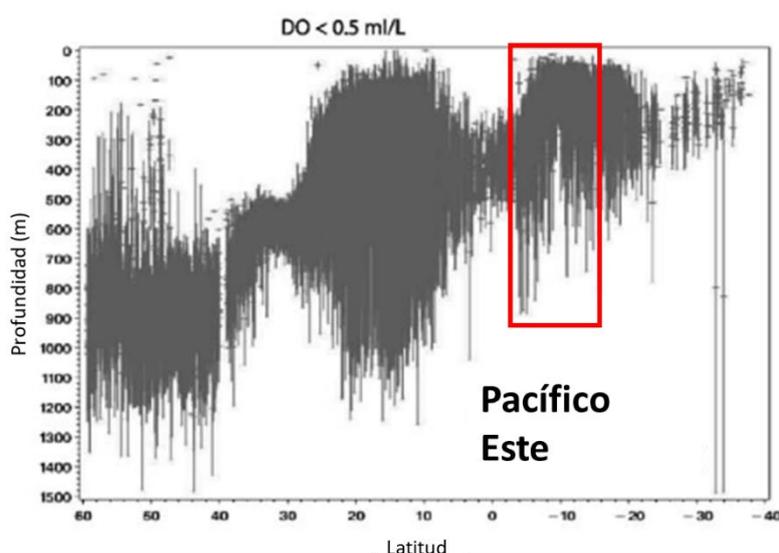
Si bien es cierto que la diversidad de los foraminíferos sigue el patrón latitudinal de la temperatura, es posible que la diversidad también aumente con la profundidad tal como lo sugiere la hipótesis 'estabilidad-tiempo' (Hessler & Sanders, 1967; Sanders, 1968). A mayores profundidades las fluctuaciones ambientales se reducen y aumenta la estabilidad física del medio, lo cual a su vez beneficia las interacciones biológicas y el aumento de la diversidad (Buzas & Gibson, 1969; Gibson & Buzas, 1973; Sen Gupta & Kilbourne, 1974).

## 2.4. Contexto ambiental de la costa central peruana

La zona marino costera de Perú central se encuentra dentro del Sistema de la Corriente Peruana o de Humboldt, cuya productividad biológica es de las más altas del mundo y está asociada a la presencia de celdas de afloramiento costero permanentes que llevan aguas frías cargadas de nutrientes a la superficie del mar (Zuta & Guillén, 1970).

En esta zona se ubica una capa de agua subsuperficial llamada Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) caracterizada por contener concentraciones de oxígeno disuelto menores a 0.5 mL/L y originada por los procesos de circulación de escala global (Helly & Levin, 2004). En la costa central peruana la ZMO es muy superficial pudiendo encontrarse desde los 30-50 metros de profundidad y se extiende hasta aproximadamente 700 metros (**Figura 2**). Esta posición muy somera de la ZMO está relacionada al elevado consumo de oxígeno producto de la degradación de la materia orgánica producida en grandes cantidades en la capa superficial (Fuenzalida, Schneider, Garcés-Vargas, Bravo, & Lange, 2009; Graco *et al.*, 2017; Helly & Levin, 2004).

Por encima de la ZMO, es decir a menores profundidades, el oxígeno se incrementa y puede llegar a la saturación en la franja más somera y turbulenta (Arntz *et al.*, 2006). Los ambientes sedimentarios en estas profundidades pueden por lo tanto exhibir condiciones ambientales relativamente distintas, pero influenciadas por la cercanía de la ZMO y las celdas de afloramiento, y albergan organismos adaptados a fluctuaciones de los factores ambientales.



**Figura 2.** Rango de profundidades de la ZMO en el Pacífico Este frente a las costas de América. En rojo se señala la costa peruana. Modificado de Helly & Levin (2004).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Hipótesis planteadas

Intentando responder a la pregunta que motiva el presente estudio y considerando la relevancia ecológica del oxígeno disuelto del agua y la materia orgánica del sedimento en los ecosistemas costeros (Diaz & Rosenberg, 1995; Murray, 2006) se plantearon las siguientes hipótesis:

H1: La diversidad de los foraminíferos bentónicos aumenta a mayores niveles de oxígeno disuelto del agua de fondo.

H2: La abundancia de los foraminíferos bentónicos aumenta a mayor contenido de materia orgánica en los sedimentos.

#### 3.2. Zonas de estudio

Las muestras provienen de tres ambientes sedimentarios someros: las bahías de Miraflores, Huacho-Salinas y Paracas, ubicadas en la costa central peruana entre los 11.1° y 13.9° latitud sur (**Tabla 1, Figura 4**). Fueron obtenidas en meses de primavera, entre octubre y noviembre de 2014, y a profundidades menores o iguales a 30m. De acuerdo a lo señalado por Hayward *et al.* (1999) y Sen Gupta (1999a) estas profundidades corresponden a la zona submareal más somera de la plataforma continental llamada plataforma interna (**Figura 3**).

La zona entre Huacho y Salinas, al norte de Lima, tiene un borde costero de aproximadamente 21 km de largo y una batimetría de pendiente regularmente pronunciada con la isóbata de 30m a menos de 5 km de la orilla (**Figura 4**). El sustrato dominante es la arena fangosa aunque la arena es mucho más abundante en las zonas más cercanas a la orilla.

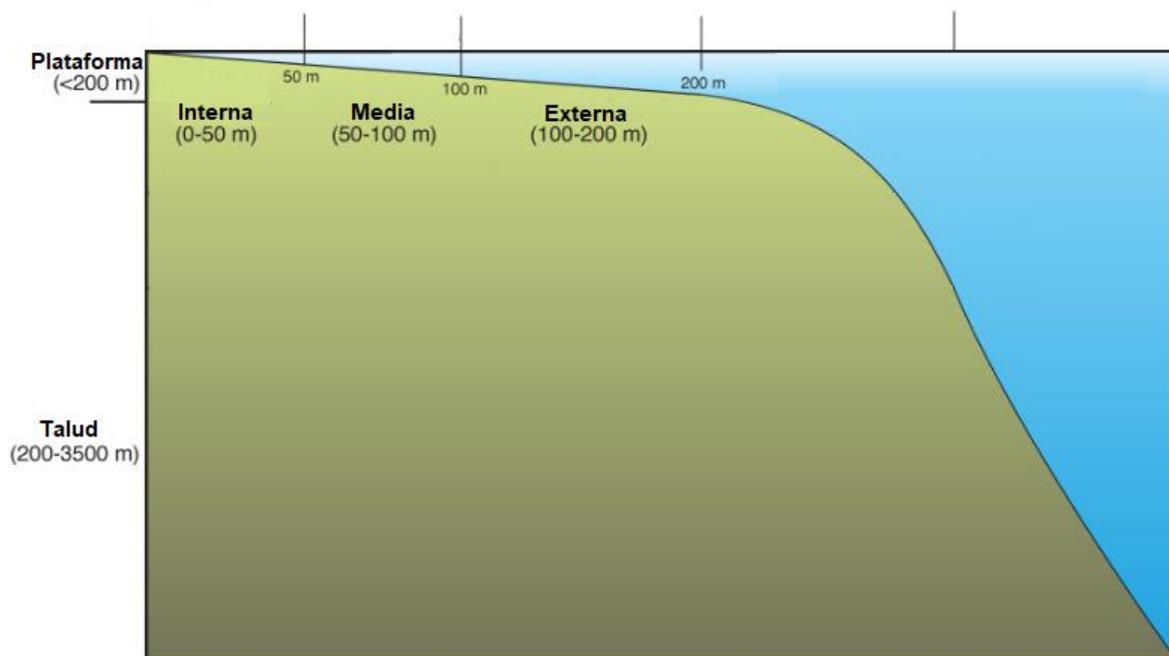
Su circulación predominante, tanto en fondo como en superficie, es de sur a norte, siguiendo la configuración de la línea de costa (Ramírez *et al.*, 2019). En esta zona se obtuvieron muestras de tres estaciones: H7, H11 y H14.

La Bahía de Miraflores, ubicada en Lima, tiene una extensión aproximada de 25 km de borde costero. Su batimetría presenta una pendiente suave ya que la isóbata de 30m se aleja hasta aproximadamente 10 km de la orilla (**Figura 4**). El sustrato dominante es de tipo arenoso, aunque la grava y los cantos rodados abundan cerca a la orilla. Su circulación predominante es de sur a norte, siguiendo la configuración de la línea de costa (Correa, Tam, Pasapera, Saavedra, & Ingunza, 2008). En esta zona se obtuvieron muestras de cinco estaciones: M12, M13, M23, M32 y MS4.

La Bahía de Paracas ubicada en la zona de Pisco, tiene aproximadamente 20 km de borde costero y una batimetría muy somera y de pendiente suave ya que la isóbata de 30m se encuentra muy por fuera de la bahía y alejada hasta aproximadamente 10 km de la orilla de su lado este (**Figura 4**). El sustrato dominante es el fango, con mayor contenido de arena cerca a la orilla. Su circulación presenta flujos de ingreso a la bahía por su borde oeste y flujos de salida por la parte media, aunque en ocasiones puede presentar también flujos de ingreso desde el norte por su borde este debido a cambios en la intensidad y dirección de los vientos (Flores, Gutiérrez, Tam, Sánchez, & Orozco, 2004; Velazco & Solís, 2000). En esta zona se obtuvieron muestras de siete estaciones: P1, P2, P4, P6, P7, P10 y P11.

**Tabla 1: Información de las estaciones de muestreo**

Lugar (Bahía)	Fecha de muestreo	Estación	Prof. (m)	Latitud	Longitud
HUACHO	Octubre 2014	H7	19	-11.108833	-77.640472
HUACHO	Octubre 2014	H11	23	-11.130750	-77.637472
HUACHO	Octubre 2014	H14	30	-11.158806	-77.635556
MIRAFLORES	Octubre 2014	M12	17	-12.115833	-77.138889
MIRAFLORES	Octubre 2014	M13	18	-12.126667	-77.148056
MIRAFLORES	Octubre 2014	MS4	30	-12.180833	-77.090833
MIRAFLORES	Octubre 2014	M23	19.5	-12.151667	-77.102222
MIRAFLORES	Octubre 2014	M32	25	-12.180278	-77.056389
PARACAS	Noviembre 2014	P1	6	-13.847972	-76.272111
PARACAS	Noviembre 2014	P2	8	-13.832944	-76.278694
PARACAS	Noviembre 2014	P4	9.5	-13.813833	-76.287444
PARACAS	Noviembre 2014	P6	10	-13.788583	-76.257083
PARACAS	Noviembre 2014	P7	19	-13.788278	-76.285306
PARACAS	Noviembre 2014	P10	21	-13.761806	-76.289667
PARACAS	Noviembre 2014	P11	13	-13.761472	-76.256139



**Figura 3. Zonación de la plataforma continental. Modificado de Hayward *et al.* (1999)**

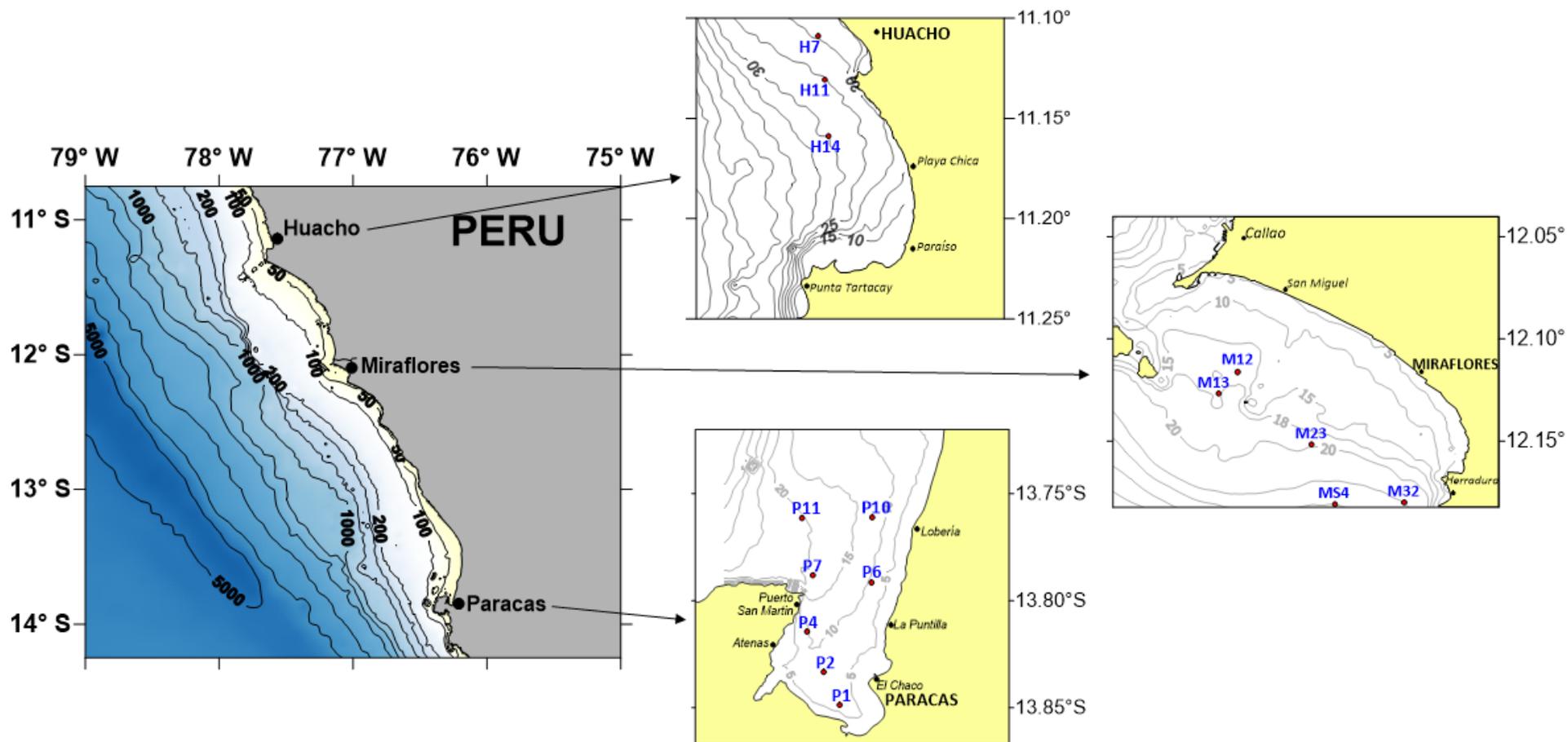


Figura 4. Zonas de estudio y distribución de las estaciones de muestreo (elaboración propia)

### 3.3. Diseño de la investigación

En este estudio observacional los datos de las variables respuesta fueron obtenidos en laboratorio, mientras que los datos de las variables explicativas fueron obtenidos de las bases de datos del IMARPE. Las variables explicativas son los factores abióticos de la columna de agua:

- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Salinidad (ups)
- Oxígeno disuelto ( $\text{mL.L}^{-1}$ )
- Nitratos disueltos ( $\mu\text{M}$ )

Y del sustrato:

- Contenido porcentual de Materia Orgánica Total (MOT)
- Contenido porcentual de gravas
- Contenido porcentual de arenas
- Contenido porcentual de sedimentos finos

Las variables respuesta son los parámetros de la comunidad de foraminíferos bentónicos vivos (al momento de la colecta) y de la tafocenosis (conjunto de testas vacías que corresponden a los foraminíferos muertos al momento de la colecta):

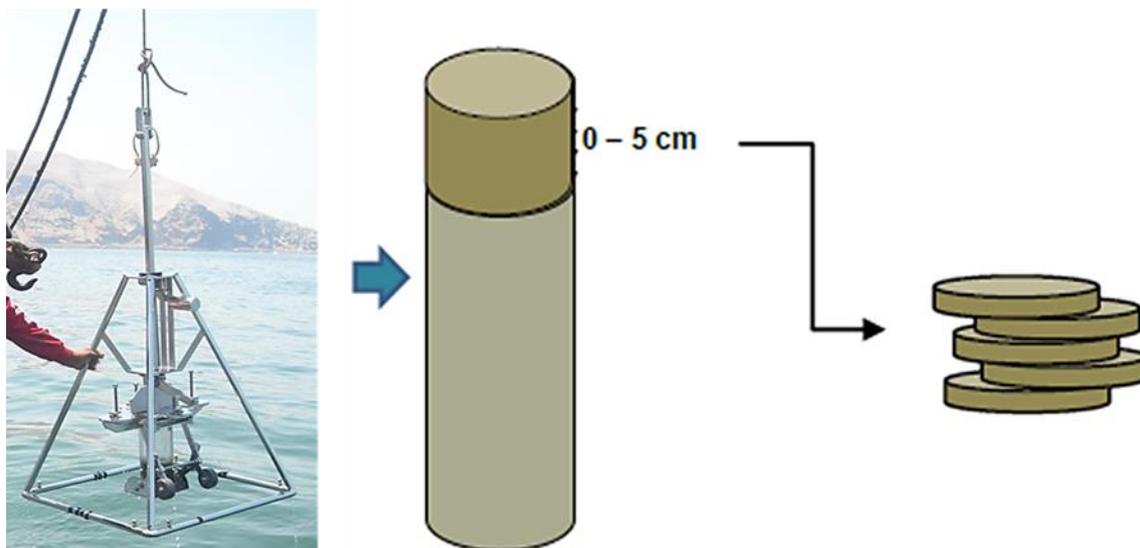
- Abundancia de foraminíferos bentónicos total y por especie ( $\text{ind./50cm}^3$ )
- Abundancia relativa de foraminíferos bentónicos calcáreos y no calcáreos
- Abundancia relativa de foraminíferos por rango de tamaños
- Riqueza o número de especies (S)
- Diversidad de especies (Shannon-Wiener)
- Abundancia porcentual de la tafocenosis calcárea

Además, esta última variable puede indicarnos si las condiciones promedio de preservación de las testas calcáreas en el sedimento, en su proceso de fosilización, son buenas o malas. La información que provee puede resultar relevante en el contexto de los estudios de las condiciones ambientales del pasado (Murray, 2006).

### 3.4. Procedimientos en campo y laboratorio

#### 3.4.1. Muestreo del sustrato para foraminíferos

A bordo de una embarcación se obtuvieron columnas de sedimento superficial con un nucleador ‘*bottom corer*’ modelo HAPS (marca KC Denmark A/S) que introduce un tubo de acrílico de 9.6 cm de diámetro interno en el sustrato manteniendo la estructura vertical del sedimento sin perturbar (**Figura 5**). En cada estación se obtuvieron dos réplicas de las cuales se usaron solo los cinco primeros centímetros ya que son suficientes para observar la comunidad de foraminíferos en los sedimentos costeros del Perú (Cardich *et al.*, 2015). Cada réplica fue seccionada por cada centímetro y las secciones fueron almacenadas en frascos de plástico y luego fueron fijadas con 100 mL de solución de formol al 4 por ciento tamponado con tetraborato de sodio (bórax) para neutralizar la corrosividad del formol.



**Figura 5.** Secuencia de obtención (*HAPS corer*) y seccionamiento de la columna de sedimento

#### 3.4.2. Muestreo del sustrato para propiedades geoquímicas

Las muestras de sustrato para la determinación de la textura del sedimento y la materia orgánica total fueron obtenidas con una draga Van Veen de 500 cm<sup>2</sup> de área de mordida. Se retiraron aproximadamente 500 gramos del sustrato recuperado por la draga y fueron almacenados en bolsas de cierre hermético y finalmente fueron refrigerados.

### **3.4.3. Muestreo de agua y determinación de variables**

Las muestras de agua se obtuvieron por duplicado con una botella Niskin a nivel superficial y sobre el fondo (aproximadamente a 0.5 metros del sustrato). En la primera réplica se midió la temperatura con un termómetro de mercurio y de la segunda se derivaron volúmenes en frascos para las determinaciones de oxígeno disuelto, salinidad y concentración de nitratos. Los frascos de estos dos últimos parámetros fueron refrigerados para su determinación en laboratorio.

El oxígeno disuelto se determinó inmediatamente después de obtener la muestra de agua siguiendo el método de titulación de Winkler modificado por Carrit y Carpenter (Strickland & Parsons, 1972), mientras que la salinidad fue determinada en laboratorio por un salinómetro Portasal Wildline 8410<sup>a</sup> que utiliza un método de inducción. Por último, las concentraciones de nitratos también fueron determinadas en laboratorio por un método de titulación y análisis colorimétrico mediante un espectrofotómetro Perkin Elmer LAMBDA 45.

### **3.4.4. Determinación de materia orgánica total y textura del sustrato**

Se separaron 5 gramos de cada muestra de sustrato refrigerado para determinar el contenido de materia orgánica total (MOT). Se usó la metodología de pérdida por ignición de Dean (1974) que consiste en exponer una muestra molida de sedimento secado (de 1g a 2g) a temperaturas de 100°C y luego 550°C para calcular por diferencia de pesos la cantidad de CO<sub>2</sub> liberado por la ignición de la materia orgánica. El resto de la muestra se usó para el análisis granulométrico mediante el uso de tamices siguiendo la metodología de Ingram (1971) para determinar el contenido porcentual de partículas como gravas, arenas y finos.

### **3.4.5. Tratamiento y análisis de las muestras biológicas**

En el laboratorio se tiñeron las muestras de las secciones de sedimento con una solución de 65 mL de rosa de bengala (1g de rosa de bengala por litro de solución de formol 4 por ciento saturado con bórax) para distinguir los foraminíferos que estuvieron vivos o muertos (testas vacías) al momento de la colecta ya que la tinción es efectiva solo ante la presencia de la célula en la testa.

Las muestras de los frascos fueron lavadas y separadas usando tamices de 63, 150 y 500  $\mu\text{m}$  de abertura de malla para obtener los dos intervalos de tamaño. Las muestras de gran abundancia de foraminíferos fueron sub-muestreadas en un micro-cuarteador 'Folsom' a un volumen que contuvo al menos 300 individuos, como recomiendan Schönfeld *et al.* (2012).

Los sedimentos retenidos por los tamices fueron observados al estereoscopio para reconocer los taxones y grupos ecológicos (tipo de testa) y determinar las abundancias por especie y grupo ecológico. Todos ellos fueron extraídos mediante micro-pipetas y almacenados en micro-viales con alcohol al 96 por ciento. La abundancia se expresó como la densidad de individuos o testas en  $50\text{cm}^2$  de sedimentos superficiales.

### **3.5. Procesamiento de datos**

Se expresaron los estadísticos descriptivos (mínimo, máximo, promedio y desviación estándar) de los datos ambientales de la superficie y fondo de la columna de agua y del sustrato de todas las estaciones de muestreo.

Para cumplir el primer objetivo específico, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con la matriz de datos ambientales estandarizados y se determinó el número de componentes mediante el criterio de Kaiser-Guttman que considera como relevantes los componentes principales cuyo auto-valor es mayor al promedio de auto-valores de todos los componentes (Borcard, Gillet, & Legendre, 2011). El ACP presentó el ordenamiento de las estaciones de muestreo en relación a sus datos ambientales y sugirió la presencia de correlaciones entre variables que fueron corroboradas con un análisis de correlaciones múltiples con el coeficiente de correlación de Pearson que examina las posibles relaciones lineales entre variables.

La consecución del segundo objetivo específico se realizó con los datos biológicos. Con las abundancias de los taxones se calcularon las contribuciones porcentuales de los grupos ecológicos y de los intervalos de tamaño para cada sitio de muestreo. Además se calcularon los índices de diversidad: Riqueza específica (S), como el número de taxones diferentes en la muestra, y el Índice de Shannon (H'), calculado con la siguiente fórmula (Shannon & Weaver, 1963):

$$H' = -\sum P_i * \log P_i$$

Donde  $P_i = n_i / N$   
 $n_i$  = abundancia del taxón  $i$   
 $N$  = abundancia total

Finalmente se calculó la abundancia porcentual de la tafocenosis calcárea mediante:

$$\text{Porcentaje de tafocenosis calcárea} = (\text{Nro. Testas calcáreas no teñidas} / \text{TC}) * 100$$

Donde  $\text{TC} = \text{Nro. Testas calcáreas no teñidas} + \text{Nro. Testas calcáreas teñidas}$

De la matriz de abundancias por taxón y sitio de muestreo se consideraron los taxones más frecuentes, es decir presentes en más de la quinta parte de todas las estaciones de muestreo, para realizar los análisis clúster en modo Q y modo R con el criterio de agrupamiento de Ward, transformando las abundancias previamente mediante raíz cuarta y usando el índice de disimilaridad de Bray Curtis. El modo Q agrupó los sitios basándose en la composición relativa de las especies, mientras que el modo R agrupó a las especies de acuerdo a su participación numérica en los sitios, sugiriendo la distinción de ambientes con el primero y asociaciones con el segundo. Posteriormente se realizó un análisis nodal que combina los dos modos en una presentación de escala de grises proporcionales a las abundancias transformadas para evidenciar el origen de los agrupamientos. La distribución vertical de foraminíferos en los sedimentos fueron determinados gráficamente expresando sus densidades en un área de 50 cm<sup>2</sup> pero para cada uno de los cinco centímetros muestreados.

Las relaciones entre los parámetros comunitarios y las variables ambientales, asociadas al tercer objetivo específico y las hipótesis planteadas en este estudio, se evaluaron mediante los análisis de correlación de rangos de *Spearman* que evalúa relaciones monotónicas, es decir directas o inversas aunque no necesariamente lineales (Huitema, 2011). Adicionalmente, y considerando los resultados del ACP de datos ambientales y del análisis nodal de las abundancias de especies, se realizó el análisis canónico de coordenadas principales (CAP) que relaciona los datos ambientales y bióticos en una presentación similar a la del ACP, pero permitiendo observar la influencia de los factores ambientales sobre los taxones individuales y de ambos sobre el agrupamiento de los sitios (Borcard *et al.*, 2011). Todo el procesamiento y análisis de la data se realizó con el software R versión 3.2.0., y el mapa fue generado con el programa SURFER (Golden software Inc., versión 12.4.784).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Características ambientales

#### 4.1.1. Variables físico químicas de la columna de agua

Los datos registrados de las variables abióticas de la columna de agua en las estaciones de muestreo, así como sus estadísticos descriptivos que se mencionan en esta sección, se presentan en el **Tabla 2** y **Tabla 3**.

La temperatura del agua superficial estuvo entre un mínimo de 14.40 °C y un máximo de 20.40 °C, y en promedio fue 17.15 °C. Los sitios de muestreo de la Bahía de Paracas exhibieron los mayores valores, mientras que los de Huacho exhibieron los valores más bajos (**Tabla 2**). Por su parte, la temperatura del agua de fondo varió en un rango menor (entre 13.60 °C y 16.00 °C), el promedio fue 14.69 °C y la tendencia de los valores fue la misma que en la superficie (**Tabla 3**). Al comparar las desviaciones estándar de la temperatura de superficie y fondo se puede deducir que las diferencias en el fondo fueron más sutiles que en la superficie.

La salinidad en superficie se observó en un rango entre 34.80 ups y 35.02 ups, y en promedio fue 34.92 ups. No se pudo observar diferencias de salinidad en superficie entre las localidades (**Tabla 2**). En el agua de fondo, la salinidad varió entre 34.79 ups y 35.10 ups, el promedio fue 34.96 ups y tampoco se pudo observar diferencias claras entre localidades (**Tabla 3**). Sus desviaciones estándar en superficie y fondo fueron iguales y muy bajas, es decir, los valores de salinidad en superficie y fondo de todos los sitios de muestreo fueron muy similares. Los rangos de salinidad observados en ambos niveles fueron típicos de las aguas costeras frías de afloramiento de la costa central (Zuta & Guillén, 1970).

El oxígeno disuelto en el agua superficial exhibió un rango entre 2.86 mL<sup>-1</sup> y 8.35 mL<sup>-1</sup>, y el promedio fue 5.32 mL<sup>-1</sup>. Los menores valores fueron observados en sitios de la zona de Huacho, mientras que los mayores fueron observados en los de Miraflores (**Tabla 2**).

En el agua de fondo, el oxígeno disuelto exhibió un rango menor entre  $0.24 \text{ mL}^{-1}$  y  $1.52 \text{ mL}^{-1}$ , el promedio fue  $0.69 \text{ mL}^{-1}$  y, a diferencia de la superficie, los valores mayor y menor fueron observados en estaciones de muestreo de Bahía Paracas (**Tabla 3**). Si bien los niveles de oxígeno fueron relativamente diferentes entre los sitios de muestreo, la diferencia más obvia es la que hay entre los rangos de superficie y fondo, ya que los valores de fondo no solo son bastante menores a los de superficie, sino que su variabilidad también es menor según lo muestran sus desviaciones estándar. Es de esperarse que el agua superficial esté saturada o sobresaturada de oxígeno debido a su difusión desde la atmósfera y por su producción a través de la fotosíntesis (Millero, 2013). Por otra parte, salvo en la estación menos profunda de la Bahía de Paracas (P1, 6m), los niveles de oxígeno de agua de fondo de los sitios de muestreo fueron hipóxicos, es decir menores a  $1.43 \text{ mL}^{-1}$  (Rabalais *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010). Si bien estos niveles son muy bajos, son coherentes con las condiciones naturales de las aguas subsuperficiales de la costa central del Perú, en donde la ZMO es más somera y cercana al litoral que en las zonas norte o sur (Helly & Levin, 2004; IMARPE, 2014).

La concentración de nitratos en la superficie exhibió un rango entre  $0.50 \mu\text{M}$  y  $12.88 \mu\text{M}$ , y su promedio fue  $3.76 \mu\text{M}$ . Los mayores niveles fueron observados en Huacho y los menores en Bahía Paracas (**Tabla 2**). En el agua de fondo los nitratos se encontraron en un rango entre  $0.85 \mu\text{M}$  y  $16.30 \mu\text{M}$ , su promedio fue  $9.18 \mu\text{M}$  y la tendencia de los valores fue similar al de la superficie (**Tabla 3**). De acuerdo a las desviaciones estándar las concentraciones en fondo fueron más heterogéneas que en superficie. Además, las concentraciones observadas en este estudio están comprendidas en el rango normal de concentraciones de nitratos de las aguas de profundidades menores a 50 metros de la costa peruana (Calienes, Guillén, & Lostaunau, 1985; Graco, Ledesma, Flores, & Girón, 2007; Zuta & Guillén, 1970).

Los valores de las variables de la columna de agua, especialmente los del agua de fondo, reflejan la influencia del sistema de afloramiento costero y la ZMO en todos los sitios de las tres localidades, aunque quizás en unos más directamente que en otros. Esta influencia es normal en la costa central del Perú ya que en toda esta zona se ubican dos importantes celdas de afloramiento costero: la primera entre las latitudes  $11^{\circ}\text{S}$  y  $12^{\circ}\text{S}$ , y la segunda entre  $14^{\circ}\text{S}$  y  $16^{\circ}\text{S}$  (Guillén & Calienes, 1981; Morón, 2000; Zuta & Guillén, 1970). En ese contexto la Bahía de Huacho está ubicada dentro del dominio de la primera celda de afloramiento y la Bahía de Miraflores se encuentra adyacente a la misma celda, mientras que la Bahía de Paracas se ubica adyacente de la segunda celda de afloramiento.

**Tabla 2: Variables ambientales observadas en el agua superficial**

Estación	Temperatura (°C)	Salinidad (ups)	Oxígeno (mL.L <sup>-1</sup> )	Nitratos (μM)
H7	14.40	34.99	3.38	12.88
H11	14.60	34.91	4.97	9.72
H14	14.40	34.89	4.69	9.24
M12	16.40	34.91	6.73	2.94
M13	16.50	34.96	8.35	0.65
M23	15.90	34.86	5.61	2.31
M32	16.90	34.82	5.37	4.36
MS4	16.50	34.82	7.57	6.20
P1	18.70	35.02	4.00	1.71
P2	19.30	34.95	5.11	0.74
P4	18.80	34.95	5.00	0.50
P6	17.90	34.80	5.71	0.64
P7	17.90	34.96	5.23	1.01
P10	18.70	34.96	5.21	1.80
P11	20.40	34.97	2.86	1.63
Mínimo	14.40	34.80	2.86	0.50
Máximo	20.40	35.02	8.35	12.88
Promedio	17.15	34.92	5.32	3.76
Desviación est.	1.86	0.07	1.43	3.94

**Tabla 3: Variables ambientales observadas en el agua de fondo**

Estación	Temperatura (°C)	Salinidad (ups)	Oxígeno (mL.L <sup>-1</sup> )	Nitratos (μM)
H7	13.80	34.97	0.94	15.41
H11	13.60	34.92	0.89	15.82
H14	13.80	34.92	0.89	16.30
M12	14.30	34.98	0.74	13.66
M13	14.00	34.98	0.54	13.86
M23	13.90	34.99	0.30	12.24
M32	13.80	34.98	0.30	11.69
MS4	13.90	34.98	0.42	13.28
P1	15.90	34.87	1.52	1.77
P2	16.00	35.00	1.05	4.80
P4	15.40	34.98	0.62	2.93
P6	15.60	34.79	0.71	2.07
P7	15.20	34.93	0.50	7.05
P10	15.20	35.10	0.24	5.96
P11	16.00	34.98	0.62	0.85
Mínimo	13.60	34.79	0.24	0.85
Máximo	16.00	35.10	1.52	16.30
Promedio	14.69	34.96	0.69	9.18
Desviación est.	0.93	0.07	0.34	5.71

#### 4.1.2. Variables geoquímicas del sustrato

El contenido porcentual de sedimentos finos en el sustrato tuvo un rango entre 3.82 y 99.61 por ciento, y su promedio fue 68.34 por ciento. Los mayores porcentajes fueron observados en Bahía Paracas y los menores en Bahía Miraflores. Por su parte, el contenido de arenas varió entre 0.34 y 96.18 por ciento, su promedio fue 31.65 por ciento y la tendencia de sus contenidos fue opuesta a la de los sedimentos finos. Estos dos tipos de sedimento fueron prácticamente complementarios en este estudio, conformando juntos el 100 por ciento del sustrato en casi todos los sitios debido a que las partículas de mayor tamaño como las gravas representaron menos del 0.1 por ciento (**Tabla 4**).

El contenido porcentual de materia orgánica total (MOT) en el sustrato fue observado en un rango entre 0.70 y 11.77 por ciento, y su promedio fue 6.33 por ciento. Similar a la tendencia de los sedimentos finos, aunque con algunas excepciones, los mayores contenidos de MOT fueron observados en sitios de muestreo de la Bahía de Paracas mientras que los menores contenidos en los de la Bahía de Miraflores (**Tabla 4**).

La fuerte heterogeneidad observada en las variables geoquímicas del sustrato concuerda con la diversa composición textural y orgánica de los sedimentos de la zona costera peruana descrita por Delgado *et al.*, 1987 y Velazco *et al.*, 2015. Se sabe que la turbulencia y las corrientes de fondo solo permiten el asentamiento de los sedimentos grandes como arenas o gravas, mientras que la estabilidad del agua en el fondo permite además el asentamiento de los sedimentos finos y de las partículas de materia orgánica (Gray & Elliot, 2009). Por lo tanto las diferencias observadas en estas propiedades geoquímicas del sustrato reflejan las diferencias en el régimen hidrodinámico de fondo de los sitios de muestreo, teniendo en el extremo menos hidrodinámico a las estaciones del interior de la Bahía de Paracas (P1, P2 y P4) y en el extremo más hidrodinámico a las estaciones más someras de la Bahía de Miraflores (M12 y M13).

**Tabla 4: Variables geoquímicas del sustrato y la profundidad en cada sitio**

Estación	Finos (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	MOT (%)	Profundidad
H7	76.50	23.50	0.00	2.27	19.0
H11	87.60	12.40	0.00	5.12	23.0
H14	98.71	1.29	0.00	7.97	30.0
M12	3.82	96.18	0.00	0.70	17.0
M13	4.78	95.22	0.00	0.80	18.0
M23	48.14	51.86	0.00	2.40	19.5
M32	11.09	88.91	0.00	3.30	25.0
MS4	53.22	46.78	0.00	3.10	30.0
P1	89.02	10.98	0.00	10.78	6.0
P2	93.13	6.87	0.00	11.77	8.0
P4	94.66	5.34	0.00	11.21	9.5
P6	73.23	26.77	0.00	9.78	10.0
P7	92.77	7.15	0.08	9.12	19.0
P10	98.87	1.12	0.01	8.17	21.0
P11	99.61	0.34	0.05	8.46	13.0
Mínimo	3.82	0.34	0.00	0.70	6.00
Máximo	99.61	96.18	0.08	11.77	30.00
Promedio	68.34	31.65	0.01	6.33	17.80
Desviación est.	35.60	35.61	0.02	3.95	7.48

#### 4.1.3. Comparación de los ambientes de fondo

Los resultados del ACP de las variables ambientales del ambiente bentónico (agua de fondo y sustrato), habiendo incluido en el análisis a la profundidad y excluido a la salinidad por su variación mínima, sugirieron que la mayor parte de la variación ambiental puede expresarse solamente con dos componentes principales de acuerdo con el criterio ‘Kaiser-Guttman’, que considera como relevantes los componentes principales cuyo auto-valor es mayor al promedio de auto-valores de todos los componentes (Borcard *et al.*, 2011). El 83 por ciento de la variabilidad de los datos fue explicada por estos dos componentes, donde el primero explicó el 64 por ciento y el segundo componente explicó el 19 por ciento (**Tabla 5**).

En el ACP los sitios se ordenaron predominantemente a lo largo del primer componente principal horizontal aunque también lo hicieron, pero en menor medida, a lo largo del segundo componente, originando tres extremos en el ordenamiento (**Figura 6**). Hacia la izquierda se ordenaron mayoritariamente los sitios de Paracas y hacia la derecha se ordenaron los sitios de Bahía Miraflores. Los sitios de Huacho se ubicaron en la zona intermedia del primer componente, pero en el extremo opuesto a los de Miraflores en el segundo componente. Las variables ambientales, representadas como vectores, se asociaron

a los sitios de tal modo que se puede afirmar que P1, P2, P4, P6 y P11 están caracterizados por exhibir las mayores cantidades de MOT y sedimentos finos en su sustrato, así como mayores niveles de temperatura y oxígeno del agua de fondo, mientras que los sitios M12, M13, M23 y M32 exhibieron los mayores niveles de arenas en su sustrato y nitratos en el agua de fondo. Por su parte, los sitios H14, H11, exhibieron una clara asociación a altos contenidos de sedimentos finos en el sustrato y mayor profundidad. Se pudo distinguir que los tres extremos corresponden en gran medida a las tres localidades, no obstante algunos sitios se ubicaron en posiciones intermedias (P7, P10, H7 y MS4), es decir asociados a niveles intermedios de las variables, lo cual sugiere que la pertenencia a una localidad u otra no es suficiente información para la caracterización de los ambientes bentónicos.

El ACP también sugirió, en base a los ángulos entre vectores, que algunas variables abióticas están fuertemente relacionadas. Esta apreciación fue confirmada con los resultados de las correlaciones múltiples aplicada a la matriz de variables del ambiente bentónico (**Tabla 6**). Se pudo apreciar la existencia de una fuerte correlación negativa entre la temperatura y la concentración de nitratos ( $p < 0.01$ ,  $R = -0.96$ ), una buena correlación negativa entre la temperatura y la profundidad ( $p < 0.01$ ,  $R = -0.82$ ) y una menor, pero significativa, correlación negativa entre la concentración de nitratos y la profundidad ( $p < 0.01$ ,  $R = -0.79$ ). Estas relaciones estarían reflejando la mayor influencia del afloramiento costero en los sitios más profundos al contener aguas frías y ricas en nitratos, y la influencia de los procesos biológicos que consumen nitrato en las aguas templadas de los sitios más someros. También hubo una muy fuerte correlación negativa entre el contenido de sedimentos finos y arenas ( $p < 0.01$ ,  $R = -0.99$ ) que era de esperarse debido a la complementariedad de estos mencionada en la sección anterior (**4.1.2**). La MOT y el sedimento fino exhibieron también una buena correlación positiva ( $p < 0.01$ ,  $R = 0.83$ ) que es muy común en los ambientes costeros debido a que las partículas de ambas sedimentan y se depositan en el sustrato bajo las mismas condiciones, y debido también al proceso de adhesión de la materia orgánica en las superficies de las partículas del sedimento, llamado adsorción, que se da en mayor medida en sedimentos más finos ya que presentan más superficie disponible que los sedimentos gruesos (Gray & Elliot, 2009).

Además de la profundidad otro factor que modifica la influencia del afloramiento en los ambientes bentónicos es el grado de exposición de estos a la hidrodinámica del mar abierto, donde la turbulencia y las corrientes producto de los vientos y el oleaje establecen un régimen hidrodinámico intenso. En cambio, las proyecciones terrestres en el mar como cabos

o penínsulas albergan cuerpos de agua protegidos de esta. Así, la mayor estabilidad de su columna de agua promueve el aumento de la temperatura, estimulando la fotosíntesis y la respiración microbiana (Graham & Largier, 1997; V. H. Marín, Delgado, & Escribano, 2003). Este es el caso de la Bahía de Paracas, formada por la península del mismo nombre, que tiene una geomorfología semicerrada (Velazco & Solís, 2000) a diferencia de la de Huacho-Salinas y Miraflores que están más abiertas a la dinámica física del ecosistema de afloramiento costero.

**Tabla 5: Resumen de los componentes principales (CP) y criterio de relevancia de Kaiser-Guttman. Prom = promedio de auto-valores de los componentes**

Componente Principal	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	Prom.
Auto-valor	4.48	1.35	0.92	0.15	0.07	0.03	0.00	1.00
Criterio Kaiser-Guttman	>1.00	>1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	-
Variabilidad explicada (%)	64.01	19.22	13.11	2.16	1.04	0.46	0.00	-

**Tabla 6: Correlaciones lineales de Pearson de las variables abióticas del ambiente bentónico. Número de datos: 15, (n.s.: no significativo, p-valor < 0.01)**

	Profundidad	Temperatura	Oxígeno	Nitratos	MOT	Finos	Arena
Profundidad		-0.82	n.s.	0.79	n.s.	n.s.	n.s.
Temperatura			n.s.	-0.96	0.80	n.s.	n.s.
Oxígeno				n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Nitratos					-0.76	n.s.	n.s.
MOT						0.83	-0.83
Finos							-0.99
Arena							

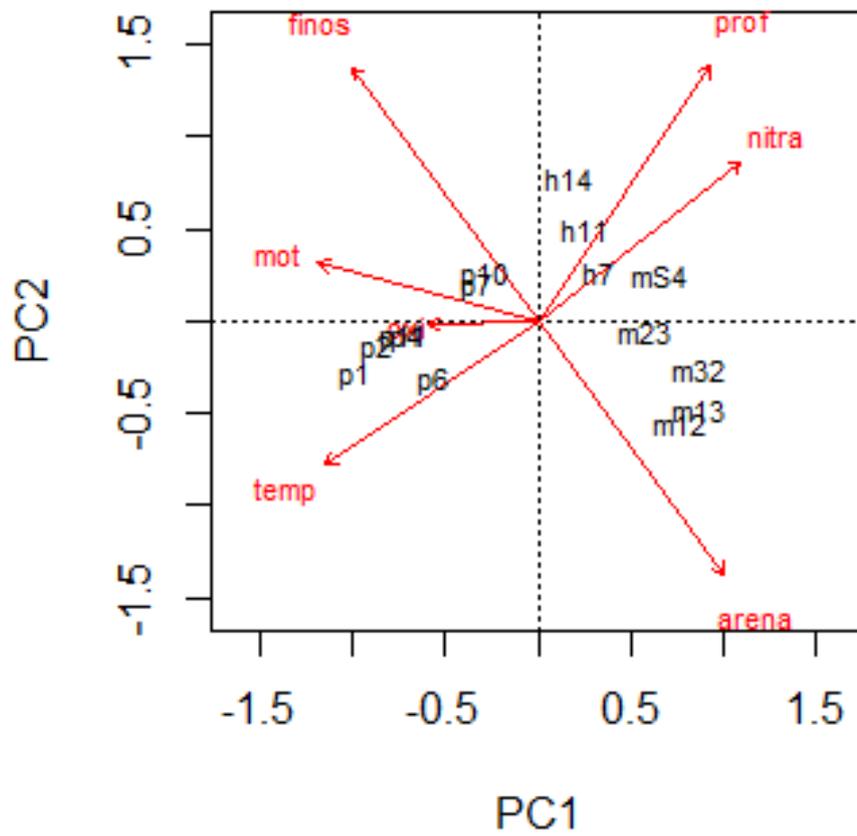


Figura 6. Biplot del ACP que muestra el ordenamiento de los sitios en un plano de dos dimensiones o componentes, y las variables asociadas representadas como vectores

## 4.2. La comunidad de foraminíferos bentónicos

### 4.2.1. Composición taxonómica

Se logró identificar once taxones de foraminíferos bentónicos, siete de los cuales fueron de testa calcárea y del orden Rotaliida, tres fueron de testa aglutinada y correspondieron a los órdenes Lituolida, Textulariida y Astrorhizida, y un taxón de testa tectinácea (proteica) del orden Allogromiida. Además de dominar en número de especies, los foraminíferos calcáreos dominaron en abundancia ya que representaron más del 94 por ciento de la abundancia total de los foraminíferos (**Tabla 7**). Esta dominancia es muy común en las plataformas internas a diferencia de los estuarios o ambientes intermareales en los que las formas aglutinadas pueden llegar a ser más importantes (Sen Gupta, 1999a). Las especies del orden Rotaliida tienen testas calcáreas traslúcidas (hialinas) con pequeñas perforaciones, son diversas en ambientes de salinidad de rango marino normal (34 a 35 ups) y su predominancia en la comunidad es típica de condiciones pobres en oxígeno (Bernhard & Sen Gupta, 1999; Sen Gupta & Machain-Castillo, 1993).

La especie *Bolivina costata* fue la más abundante de este estudio, llegando a encontrarse en promedio 102787 individuos en total en las 15 estaciones de muestreo (50 cm<sup>2</sup> de sustrato en cada sitio), superando en dos órdenes de magnitud a los otros taxones abundantes Allogromiidae, *Buliminella elegantissima*, *Nonionella auris* y *Virgulina fragilis* (**Tabla 8**). Por otro lado, las especies *Buliminella tenuata*, *Textularia* sp., y *Bathysiphon* sp., fueron las más escasas con solo 2 individuos en el total de estaciones (**Tabla 8**).

Las especies *B. costata* y *B. elegantissima*, fueron reportadas anteriormente por Verano (1974) como taxones frecuentes en numerosas playas arenosas del departamento de Lima como Hornillos en Huacho y La Herradura en la ciudad de Lima. Mayor (1993) encontró que estas mismas especies fueron dominantes en profundidades menores a 50 metros frente a Pimentel, Lambayeque (Latitud 7° S). Por su parte, Cardich *et al.* (2012, 2015) encontraron que *B. costata* fue la especie dominante en una estación de muestreo de la plataforma interna frente a Callao (48 metros de profundidad) de sedimentos anóxicos y ricos en materia orgánica, aunque con la importante contribución de otros taxones como *N. auris*, *V. fragilis* y Allogromiidae en la densidad total de la comunidad. Así mismo, Páez *et al.* (2001) reportaron que *B. costata*, *N. auris* y especialmente *B. elegantissima* abundaron en fondos

hipóxicos de 56 metros de profundidad de la Bahía Mejillones en Chile, y que otras especies dominaron la comunidad en mayores profundidades.

Todos estos lugares mencionados, incluyendo la Bahía Mejillones, tienen en común, además de la presencia y dominancia de las especies descritas, su proximidad a celdas de afloramiento costero (Guillén & Calienes, 1981; V. Marín, Rodríguez, Vallejo, Fuenteseca, & Arce, 1993; Morón, 2000; Zuta & Guillén, 1970).

**Tabla 7: Foraminíferos bentónicos identificados. Su orden taxonómico, tipo de testa y aporte numérico de cada grupo ecológico. (\* Más de un morfotipo)**

Orden	Familia	Especie	Tipo de testa	Aporte
	Bolivinitidae	<i>Bolivina costata</i>		
	Buliminellidae	<i>Buliminella elegantissima</i> <i>Buliminella tenuata</i>		
Rotaliida	Virgulinelidae	<i>Virgulinema fragilis</i>	Calcárea (hialina)	94.83%
	Nonionidae	<i>Nonionella auris</i>		
	Discorbidae	<i>Discorbis</i> sp.		
	Trichohyalidae	<i>Buccella peruviana</i> .		
Allogromiida	Allogromiidae	spp*	Tectinácea	5.15%
Lituolida	Reophacidae	<i>Reophax</i> sp.		
Textulariida	Textulariidae	<i>Textularia</i> sp.	Aglutinada	0.01%
Astrorhizida	Rhabdamminidae	<i>Bathysiphon</i> sp.		

**Tabla 8: Densidades promedio (n=2) de las especies de foraminíferos bentónicos en 50 cm<sup>2</sup> de sustrato de las estaciones de muestreo**

Estación	<i>Bolivina costata</i>	<i>Buliminella elegantissima</i>	<i>Nonionella auris</i>	<i>Virgulinitella fragilis</i>	<i>Buccella peruviana</i>	<i>Discorbis</i> sp.	<i>Buliminella tenuata</i>	Allogromiidae	<i>Reophax</i> sp.	<i>Textularia</i> sp.	<i>Bathysiphon</i> sp.
H7	8407	0	9	37	0	1	0	56	0	0	0
H11	10332	36	116	113	6	1	0	712	1	0	0
H14	9938	80	30	1	0	3	0	540	1	0	0
M12	2325	4	5	2	0	2	0	8	0	0	0
M13	206	2	3	0	2	7	0	2	0	0	0
M23	5166	3	3	4	0	57	1	33	0	0	0
M32	20041	0	1	0	0	6	0	65	0	0	0
MS4	34271	20	338	697	0	72	1	641	0	0	2
P1	77	181	0	7	1	0	0	489	0	0	0
P2	879	66	0	9	52	1	0	541	0	0	0
P4	3950	393	0	1	1	0	0	694	0	0	0
P6	663	2464	97	18	19	6	0	977	0	0	0
P7	502	126	36	0	14	4	0	240	0	0	0
P10	3873	643	129	0	0	10	0	563	1	2	0
P11	180	1031	348	388	63	14	0	207	4	0	0
Total	100810	5049	1115	1277	158	184	2	5768	7	2	2

#### 4.2.2. Parámetros comunitarios y de la tafocenosis

La densidad de la comunidad de foraminíferos bentónicos varió en todas las estaciones de muestreo entre 224 y 36042 individuos/ 50cm<sup>2</sup>. La densidad mínima y máxima de este estudio fueron observadas en los sitios M13 y MS4 de Bahía Miraflores (**Tabla 9**), los cuales también fueron muy diferentes en términos de variables geoquímicas de sus sustratos (**Tabla 4**). El rango de abundancias concuerda con las densidades anteriormente reportadas por Cardich *et al.* (2012, 2015) en su estación de muestreo frente a Callao (48m).

La contribución de los foraminíferos calcáreos a la comunidad fue más del 93 por ciento en todos los sitios de Miraflores y Huacho, mientras que en Paracas fue muy heterogénea variando entre 35 a 90 por ciento (**Tabla 9**). Este predominio de los foraminíferos calcáreos es común en los ambientes bentónicos de la plataforma continental (Sen Gupta, 1999a). Los foraminíferos no calcáreos, predominantemente tectináceos, tuvieron un aporte complementario relevante en los sitios de la Bahía de Paracas, aunque también en las estaciones H11 y H14 de Huacho donde lograron ser más del 5 por ciento. Se sabe que estos foraminíferos de testa orgánica pueden representar alrededor del 10 por ciento de la densidad de la comunidad en ambientes bentónicos de bajas concentraciones de oxígeno (Gooday, 1986, 2002), cifra similar a lo reportado por Cardich *et al.* (2012, 2015) frente a Callao y Pisco. Sin embargo, en el presente trabajo los foraminíferos tectináceos tuvieron un amplio rango de contribución: desde menos de 1 hasta más de 64 por ciento. Estos altos porcentajes de contribución son atípicos y más parecidos a los reportados en ambientes polares y estuarios influenciados por grandes descargas de agua dulce (Gooday, 2002).

La contribución porcentual de la fracción de tamaños pequeños (63-150 µm) en la comunidad fue muy alta en todas las estaciones de muestreo. En todos los sitios de Huacho y Miraflores fue más del 97 por ciento, mientras que en P1 y P11 de la Bahía de Paracas fue 82 y 75 por ciento respectivamente, y más del 94 por ciento en el resto de sitios (**Tabla 9**). Este predominio de individuos pequeños se debe a que, salvo *Nonionella auris* y *Buccella peruviana*, las especies encontradas son pequeñas en estado adulto (Cardich *et al.*, 2012; Mallon, 2011; Verano, 1974). Se sabe que la dominancia de especies pequeñas, que se reproducen tempranamente, se da en ambientes hipóxicos y ricos en materia orgánica (Bernhard, 1989; Phleger & Soutar, 1973), y es que ante la abundancia de alimento la mayor razón superficie/volumen de sus cuerpos pequeños les resulta ventajosa para aprovechar el escaso oxígeno disponible (Phleger & Soutar, 1973; Sen Gupta & Machain-Castillo, 1993).

En la plataforma interna frente a Callao, Cardich *et al.* (2012, 2015) encontraron que la fracción de tamaños de 63-150  $\mu\text{m}$  llegó a representar entre 70 y 93 por ciento de toda la comunidad, algo menor a lo observado en el presente estudio ya que fueron en su mayoría más del 94 por ciento. Esta diferencia se debe a que aquellos autores reportaron la presencia de otras especies, aunque no muy abundantes, propias de mayores profundidades como *Bolivina seminuda*, *Bolivina striatula* y *Bolivina plicata* que logran alcanzar tamaños mayores a 150  $\mu\text{m}$  (Mallon, 2011).

En cuanto a los índices de diversidad, la riqueza de especies (S) varió entre 5 y 8 taxones en Huacho, entre 4 y 8 en Miraflores, y entre 5 y 8 en Paracas. Por su parte, el índice de diversidad de Shannon (H') fue claramente mayor en las estaciones de Paracas (entre 0.66 y 1.52) que en las de Huacho (entre 0.08 y 0.37) y Miraflores (entre 0.02 y 0.41) (**Tabla 9**). En la plataforma interna frente a Callao, Cardich *et al.* (2012, 2015) observaron valores de riqueza específica (entre 5 y 10 taxones) comparables con los del presente estudio, mientras que sus valores del índice de diversidad de Shannon (entre 0.93 y 1.49) fueron comparables con la mayoría de estaciones de Paracas pero superiores al resto de estaciones de muestreo en Huacho y Miraflores. Esto revela que en muchos sitios del presente estudio la dominancia de una sola especie (*Bolivina costata*) fue inéditamente muy alta, llegando a exhibir una abundancia de dos o hasta tres órdenes de magnitud superior al resto de taxones (**Tabla 8**). La diversidad expresada con estos índices es baja en comparación con otros ambientes de plataforma interna de latitudes similares, pero similar a lo reportado en ambientes de altas latitudes (Buzas & Gibson, 1969; Cherchi *et al.*, 2009; De Araujo & Machado, 2008; Gibson & Buzas, 1973; Narayan & Pandolfi, 2010; Sen Gupta & Kilbourne, 1974).

La tafocenosis calcárea varió entre 1.4 y 88.0 por ciento. En Paracas, los valores muy bajos en P1, P2, P4 y P10, y altos en P6, P7 y P11 pueden estar reflejando malas y buenas condiciones de preservación de testas calcáreas, respectivamente, en el sedimento. En los tres sitios de Huacho y en MS4 de Miraflores la abundancia porcentual de la tafocenosis fue moderada, es decir regulares condiciones de preservación; mientras que en M13, M23, M32 fueron altas reflejando las mejores condiciones de preservación de testas (**Tabla 9**). Lo observado en las estaciones del interior de la Bahía de Paracas, teniendo en cuenta que ahí la perturbación física es mínima (secciones 4.1.2 y 4.1.3), puede ser explicado por un proceso de intensa disolución de testas. Aunque la disolución es un fenómeno recurrente en los sedimentos costeros, solo en algunas zonas y temporadas puede afectar a casi toda la tafocenosis calcárea (Green, Aller, & Aller, 1993; Murray & Alve, 1999).

**Tabla 9: Parámetros comunitarios y de la tafocenosis de foraminíferos bentónicos en volúmenes de sustrato de 5cm de profundidad y 50cm<sup>2</sup> de superficie (Datos promedio, n=2)**

	HUACHO			MIRAFLORES					PARACAS						
	H7	H11	H14	M12	M13	M23	M32	MS4	P1	P2	P4	P6	P7	P10	P11
Densidad (ind./50cm <sup>2</sup> )	8509	11316	10592	2345	224	5267	20112	36042	756	1549	5039	4245	923	5219	2234
Contribución por tipo (%)															
Calcáreos	99.3	93.7	94.9	99.7	98.1	99.4	99.7	98.2	35.3	65.1	86.2	77.0	74.0	89.2	90.6
No calcáreos	0.7	6.3	5.1	0.3	1.9	0.6	0.3	1.8	64.7	34.9	13.8	23.0	26.0	10.8	9.4
Contribución por tamaño (%)															
63-150 µm	99.8	98.9	98.1	99.7	99.7	99.6	99.7	97.7	82.5	94.3	95.6	97.2	96.6	96.0	75.0
150-500 µm	0.2	1.1	1.9	0.3	0.3	0.4	0.3	2.3	17.5	5.7	4.4	2.8	3.4	4.0	25.0
Índices de Diversidad															
Riqueza específica (S)	5	8	7	6	6	7	4	8	5	6	5	7	6	7	8
Diversidad Shannon (H')	0.08	0.37	0.27	0.06	0.41	0.12	0.02	0.26	0.91	0.98	0.66	1.09	1.17	0.83	1.52
Tafocenosis calcárea (%)	55.4	47.1	45.5	20.6	61.9	88.0	76.8	49.6	3.7	2.1	1.4	78.0	60.8	3.6	78.9

### 4.2.3. Clasificación de la estructura comunitaria

Basado en la composición relativa de las especies más frecuentes, el análisis clúster en modo Q sugirió la existencia de tres grupos de sitios que corresponderían a tres ambientes relativamente distintos: ambiente I (M12, M13, M23, M32 y H7), ambiente II (MS4, P10, H11 y H14) y ambiente III (P1, P2, P4, P6, P7 y P11). El modo R agrupó a las especies, de acuerdo a su participación en los sitios, en las asociaciones: *B. costata* - *Discorbis* sp., *V. fragilis* - *N. auris* - *Reophax* sp., y Allogromiidae - *B. elegantissima* - *B. peruviana*. Finalmente, el análisis nodal de los modos Q y R permitió observar a través de una escala de grises, proporcionales a las abundancias, el origen de los agrupamientos (**Figura 7**).

El ambiente I estuvo caracterizado por la marcada dominancia de *B. costata* y las bajas abundancias del resto de especies de foraminíferos. El ambiente II estuvo caracterizado también por la dominancia de *B. costata*, pero con una importante contribución de las asociaciones de *N. auris* - *V. fragilis* y *B. elegantissima* - Allogromiidae. Finalmente, el grupo III estuvo caracterizado por la co-dominancia de *B. costata* y la asociación de Allogromiidae - *B. elegantissima*, y bajas abundancias del resto de especies.

Además, el ambiente I agrupa los sitios de las mayores dominancias (menores valores de  $H'$ ), mencionados en la sección anterior (4.2.2), que son los mismos de mayor contenido porcentual de arena (**Tabla 4**). Por otro lado, resulta interesante que el ambiente II esté conformado por las estaciones más profundas de las tres localidades (H11, H14, MS4 y P10) y tenga una composición relativa de especies muy similar a la descrita por Cardich *et al.* (2012,2015) en su estación de 48m de profundidad frente a Callao. Finalmente, el ambiente III agrupó los sitios de mayor equidad comunitaria (mayores valores de  $H'$ , **Tabla 9**) y de alto contenido porcentual de sedimentos finos (**Tabla 4**). La gran contribución numérica de *B. elegantissima* en este ambiente es parecida a lo observado por Páez *et al.* (2001) en su estación más somera de la Bahía Mejillones en Chile. Sin embargo, tales autores no reportaron la presencia del taxón Allogromiidae ya que emplearon metodologías de secado de muestras que destruyen a estos organismos de testa orgánica, una práctica muy común en los estudios de la ecología de los foraminíferos bentónicos que puede conducir a la subestimación de su rol en el ecosistema bentónico (Hannah & Rogerson, 1997).

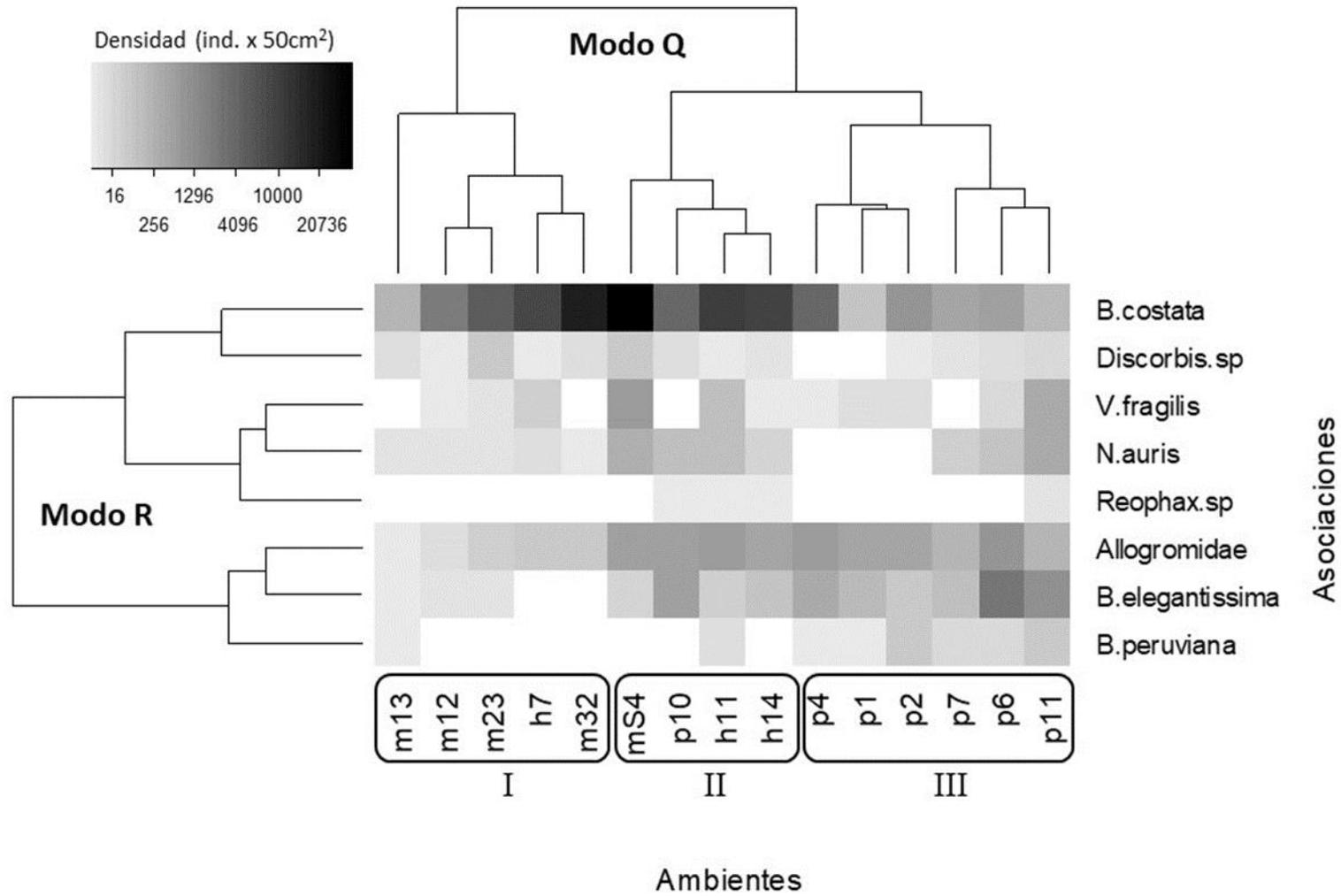


Figura 7. Análisis nodal y clústeres en modos Q y R. Nótese el agrupamiento de los sitios en relación a las asociaciones predominantes

### 4.3. Influencia de los factores ambientales en los foraminíferos bentónicos

#### 4.3.1. Influencia en los parámetros comunitarios

El **Tabla 10** muestra las correlaciones entre las variables abióticas del ambiente bentónico (agua de fondo y sustrato) y las comunitarias. Debido a que las contribuciones porcentuales son complementarias (suman 100%), sus correlaciones con las variables ambientales son opuestas. Por ello la tabla solo muestra la contribución de los foraminíferos calcáreos y la del rango de tamaños pequeños (63 a 150  $\mu\text{m}$ ).

La densidad de la comunidad de foraminíferos aumentó con la profundidad ( $R=0.78$ ,  $p<0.01$ ) y disminuyó con la temperatura ( $R=-0.72$ ,  $p<0.01$ ). La profundidad es un factor espacial que por sí mismo no limita la distribución de los foraminíferos bentónicos, pero que co-varía con otras variables como la temperatura, presión, oxígeno disuelto, disponibilidad de alimento lábil, etc., que teóricamente sí tienen influencia directa sobre ellos (Bradshaw, 1961; Murray, 2006). En estudios experimentales se ha mostrado que la temperatura es un factor limitante para la sobrevivencia, reproducción y crecimiento de los foraminíferos bentónicos (Bradshaw, 1961). Sin embargo, no podemos asegurar que el estrecho rango de variación de la temperatura en el presente estudio (13.6°C a 16.0°C) sea suficiente para explicar las grandes diferencias en la densidad comunitaria (**Tabla 9**). Es probable que la densidad comunitaria en los sedimentos de la plataforma interna esté respondiendo a alguna otra variable limitante relacionada a la profundidad que no ha sido tomada en cuenta en este trabajo.

En este estudio se esperaba que la materia orgánica influya positivamente en la abundancia de foraminíferos de modo que fue planteada como la segunda hipótesis de trabajo en términos de la MOT y la densidad comunitaria, pero no se encontraron evidencias de relación entre estas variables. Otros estudios en que también se midió la MOT tampoco encontraron evidencias de su relación directa con la abundancia de la comunidad de foraminíferos (Angel *et al.*, 2000; Schafer *et al.*, 1995). Es probable que la falta de correlación entre estas variables se deba a que la MOT es una medida muy gruesa del contenido orgánico ya que involucra no solo compuestos lábiles, que son el alimento disponible para los organismos del bentos, sino también aquellos compuestos refractarios que se degradan lentamente y se acumulan en el sedimento (Danovaro, 2009). Es probable también que debido al amplio rango de la MOT, esta tenga un efecto no monotónico sobre la densidad ya que el excesivo incremento de la

materia orgánica se asocia a un aumento del consumo del oxígeno y la disminución del pH que puede conducir a la disolución de los foraminíferos calcáreos (Dijkstra *et al.*, 2017; Green *et al.*, 1993, 1998).

En cuanto a la diversidad, la riqueza de especies no se correlacionó con ninguna variable ambiental, mientras que el índice de Shannon ( $H'$ ) se correlacionó positivamente con la MOT ( $R=0.75$ ,  $p<0.01$ ) y la temperatura ( $R=0.78$ ,  $p<0.01$ ), y negativamente con la concentración de nitratos ( $R=-0.68$ ,  $p<0.01$ ). Puesto que los foraminíferos son organismos heterótrofos la concentración de nitratos tampoco es un factor limitante para ellos, de manera que la asociación negativa de estos nutrientes con la diversidad respondería más bien a que los nitratos co-variaron con la temperatura (**Tabla 6**). Por otro lado, la relación positiva observada entre el índice de Shannon y la MOT contrasta con los resultados de otros estudios donde el incremento antropogénico de la MOT tuvo un efecto negativo sobre la diversidad de foraminíferos al promover en el sedimento las condiciones geoquímicas que permiten solo la proliferación de especies tolerantes y oportunistas (Abu-Zied, Basaham, & El Sayed, 2013; Angel *et al.*, 2000). Las correlaciones observadas aquí podrían deberse a que mayores niveles de MOT y temperatura afectan a la especie calcárea dominante (*Bolivina costata*) y/o promueven que especies no dominantes se desarrollen mejor en la comunidad.

La primera hipótesis planteada tampoco pudo ser apoyada por los resultados debido a que no se encontró evidencia de relación entre los índices de diversidad y el oxígeno de fondo (**Tabla 10**). Las pequeñas diferencias de oxígeno entre los sitios no siguen algún patrón horizontal o batimétrico claro y solo muestran que las localidades, a pesar de que tienen regímenes hidrodinámicos y propiedades geoquímicas en sus sustratos diferentes, están sujetos a la influencia de las aguas de afloramiento y sus bajas concentraciones de oxígeno en mayor o menor grado. A pesar de no existir relación en un contexto espacial, el oxígeno podría tener una influencia importante sobre la diversidad en escalas temporales estacionales o interanuales debido a las amplias fluctuaciones del oxígeno disuelto entre las estaciones del año y entre años de condiciones El Niño o La Niña.

La contribución porcentual de los foraminíferos calcáreos, que fue muy alta en la mayoría de sitios (sección 4.2.2, **Tabla 9**), se correlacionó negativamente con la MOT ( $R=-0.89$ ,  $p<0.01$ ) y la temperatura ( $R=-0.70$ ,  $p<0.01$ ), lo cual significa que a mayores niveles de MOT y temperatura los foraminíferos calcáreos exhibieron sus menores contribuciones a la comunidad total, mientras que los foraminíferos no calcáreos, representados casi totalmente

por el taxón Allogromiidae, exhibieron sus mayores contribuciones. La disminución de las abundancias relativas de las especies calcáreas con el aumento de la MOT fue observado anteriormente por Schafer *et al.* (1995) y además concuerda con lo mencionado dos párrafos antes respecto a que el incremento en la diversidad de Shannon se explicaría en parte por el incremento relativo de los foraminíferos no calcáreos (Allogromiidae) y la disminución relativa de los calcáreos dominantes.

La contribución porcentual del rango de tamaños pequeños (63 a 150  $\mu\text{m}$ ), que fue muy alta en la mayoría de sitios (sección 4.2.2, **Tabla 9**), se correlacionó negativamente con los sedimentos finos ( $R=-0.76$ ,  $p<0.01$ ), la MOT ( $R=-0.87$ ,  $p<0.01$ ) y la temperatura ( $R=-0.78$ ,  $p<0.01$ ), mientras que positivamente con la arena ( $R=0.76$ ,  $p<0.01$ ) y los nitratos ( $R=0.80$ ,  $p<0.01$ ). Esto significa que en sustratos más arenosos y pobres en MOT, y expuestos a la dinámica del afloramiento costero, la comunidad de foraminíferos está compuesta casi exclusivamente por individuos pequeños que, según lo comentado anteriormente (sección 4.2.3), son casi todos del taxón *Bolivina costata*. Por lo tanto, esta especie pequeña sería capaz de prosperar en sustratos de arenas móviles que son un ambiente hostil para la mayoría de especies de foraminíferos (Murray, 2006). En cambio, las especies que alcanzan tallas mayores (150 -500  $\mu\text{m}$ ) como *Nonionella auris*, *V. fragilis* o algunos Allogromiidae requerirían sedimentos más finos, con suficientes materia orgánica y estabilidad para desarrollarse con éxito.

La abundancia porcentual de la tafocenosis calcárea no se correlacionó con ningún factor ambiental. A pesar de no observarse evidencias de la influencia de algún factor, se sabe que en sedimentos costeros ricos en materia orgánica el estado de preservación de las testas calcáreas tienen relación con las variaciones temporales de la temperatura y la productividad primaria en superficie (Green & Aller, 1998). En una zona somera del estrecho de Long Island en EEUU, Green *et al.* (1993) observaron la disolución de casi toda la tafocenosis calcárea en la temporada de invierno cuando la temperatura y la productividad primaria son bajas. Los autores señalan que en este periodo las condiciones oxigenadas degradan la materia orgánica y los compuestos reducidos ( $\text{FeS}$  y  $\text{FeS}_2$ ) acumulados en el sustrato en condiciones hipóxicas previas, conduciendo a la subsaturación de los carbonatos en el medio acuoso y una intensa disolución de las testas calcáreas. Es posible que este mismo fenómeno ocurriera al interior de la Bahía de Paracas y se prolongara hasta mediados de la primavera cuando se obtuvieron las muestras.



### 4.3.2. Influencia en la estructura comunitaria

El análisis canónico de coordenadas principales (CAP), de las especies más frecuentes y los factores ambientales, reveló las relaciones entre estos y el agrupamiento de los sitios formando los ambientes I, II y III (**Figura 8**), los mismos que se habían observado con los análisis de clasificación en la **Figura 7**. Adicionalmente se observó que los factores ambientales explican el 65 por ciento de la varianza de la estructura comunitaria en el modelo del CAP (**Anexo 4**) y que los factores que más aportaron en la explicación de esta varianza fueron la MOT y la temperatura del agua, seguidos por los nitratos y el tamaño de los sedimentos. El oxígeno fue el factor que menos aportó a esta variabilidad (**Anexo 4**).

El escalamiento 1 del CAP permitió observar las características abióticas de los tres ambientes. Por un lado, el ambiente I está caracterizado por tener sustratos muy arenosos, de escaso contenido de MOT, e influenciados por la proximidad de la ZMO y el afloramiento costero (bajos oxígeno y temperatura y altos nitratos en el agua de fondo). En el otro extremo, el ambiente III está caracterizado por tener sedimentos muy finos con altos contenidos de MOT, y menos influenciados por la ZMO y el afloramiento costero (relativamente más oxígeno y temperatura, y bajos nitratos en el agua de fondo). Por su parte el ambiente II se caracterizó por exhibir sedimentos relativamente más finos que arenosos, a mayores profundidades y por lo tanto también influenciados por los factores mencionados.

En el escalamiento 2 del CAP se observó que la especie *Bolivina costata* se correlaciona muy bien con la profundidad, lo cual revela que la relación entre este mismo factor y la densidad de toda la comunidad mencionada en la sección anterior se debió principalmente a la dominancia numérica de este taxón. Algún factor ambiental que co-varía con la profundidad podría ser responsable de las diferencias en la densidad de esta especie. Al respecto, Cardich *et al.* (2015) observaron que *B. costata* abunda en sedimentos costeros ricos en materia orgánica de alta calidad (lábil). La calidad de la materia orgánica suele ser mayor cuando tiene un origen predominantemente fitoplanctónico, y esto puede ocurrir a mayores profundidades en la plataforma interna ya que la materia orgánica de origen terrestre, de menor calidad, se encuentra en menores concentraciones (Igarza, 2012). Por otro lado, dada su relevancia numérica relativa en todos los sitios del presente estudio y su capacidad de sobrevivir en condiciones anóxicas con presencia de sulfuros (Cardich *et al.*, 2015), es muy probable que *B. costata* sea una especie generalista que tolera fuertes gradientes ambientales.

La especie *Buliminella elegantissima* se mostró favorecida con la MOT, lo cual es similar a lo observado por Bandy *et al.* (1964, 1965), Watkins (1961), Burone *et al.* (2007) y Yanko *et al.* (1999) quienes señalan que esta especie cosmopolita prolifera en sedimentos enriquecidos en materia orgánica por de la descarga de aguas residuales al ambiente marino. Independientemente de su origen natural o antrópico la materia orgánica se acumula en el ambiente III, que corresponde a la mayoría de sitios de la Bahía de Paracas, donde *B. elegantissima* fue más abundante. Esto podría deberse a su posible carácter oportunista en condiciones desfavorables para otras especies (Burone *et al.*, 2007).

El taxón Allogromiidae, importante en los ambientes II y III, se correlacionó mejor con los sedimentos finos, de manera que abundaron en los sustratos fangosos. Esto tiene relación con la naturaleza orgánica de su testa que hace que estos foraminíferos sean livianos y por tanto susceptibles de ser resuspendidos por las corrientes de fondo, motivo por el cual son observados mayormente en sustratos suficientemente estables para permitir la acumulación de partículas finas (Gooday, 2002).

Las especies *Virgulina fragilis* y *Nonionella auris* se ubicaron ligeramente abajo del origen, en el segundo eje del CAP, y no se correlacionaron a algún factor ambiental considerado en este trabajo. Sin embargo Cardich *et al.* (2015) mostraron que estas dos especies respondían a variables como el contenido de alimento lábil y la concentración de sulfuros en los sedimentos. Mientras que las especies *Discorbis* sp., y *Reophax* sp., que fueron incluso más escasas que las anteriores, se ubicaron muy cercanas al origen de los ejes del CAP, lo cual significa que no están asociadas a la variabilidad ambiental observada.

Por último, escasa pero casi exclusiva del ambiente III, *Buccella peruviana* se correlacionó positivamente con la temperatura y el oxígeno, y negativamente con la profundidad, revelando su preferencia por las condiciones más templadas y oxigenadas de los sitios más someros. Se sabe que esta especie es muy frecuente y abundante en sedimentos someros de las costas atlánticas de Sudamérica (Calvo-Marcilese & Langer, 2012), pero en la provincia peruano-chilena es una especie menor (Boltovskoy & Wright, 1976), lo cual es confirmado en nuestros resultados de la costa central peruana. Es posible que esto tenga relación con la existencia de la ZMO en la costa sudamericana del Pacífico, restringiendo el hábitat de *Buccella peruviana* a una angosta franja costera muy poco profunda; mientras que el Atlántico, que no exhibe tales condiciones, permite el dominio de esta especie al grado de que esa zona suele conocerse como el ‘Reino de *Buccella*’ (Boltovskoy & Wright, 1976).

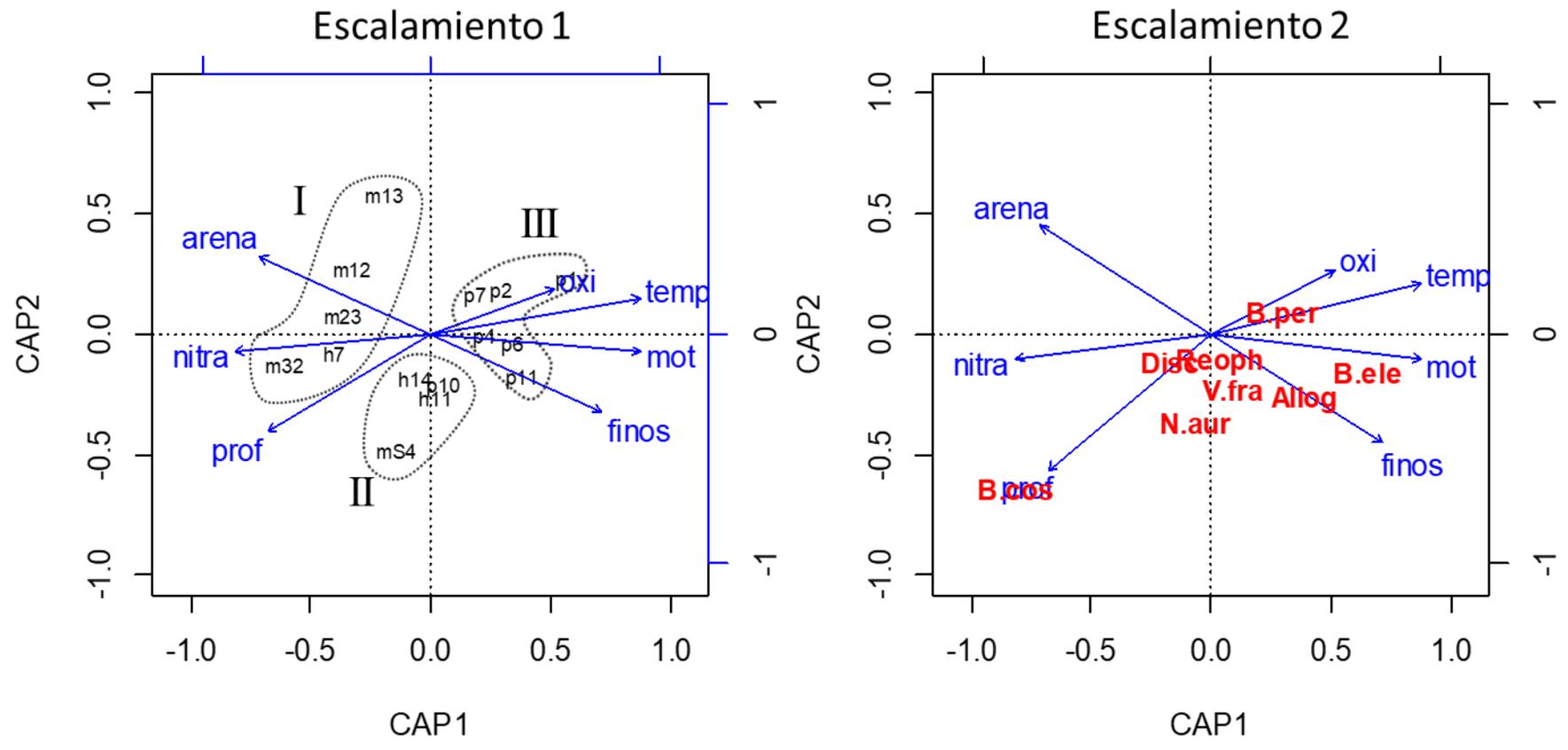


Figura 8. Biplots del CAP. Escalamiento 1 mostrando el ordenamiento de los sitios basado en la influencia ambiental sobre la comunidad de foraminíferos. Escalamiento 2 mostrando la relación entre los taxones y los factores ambientales

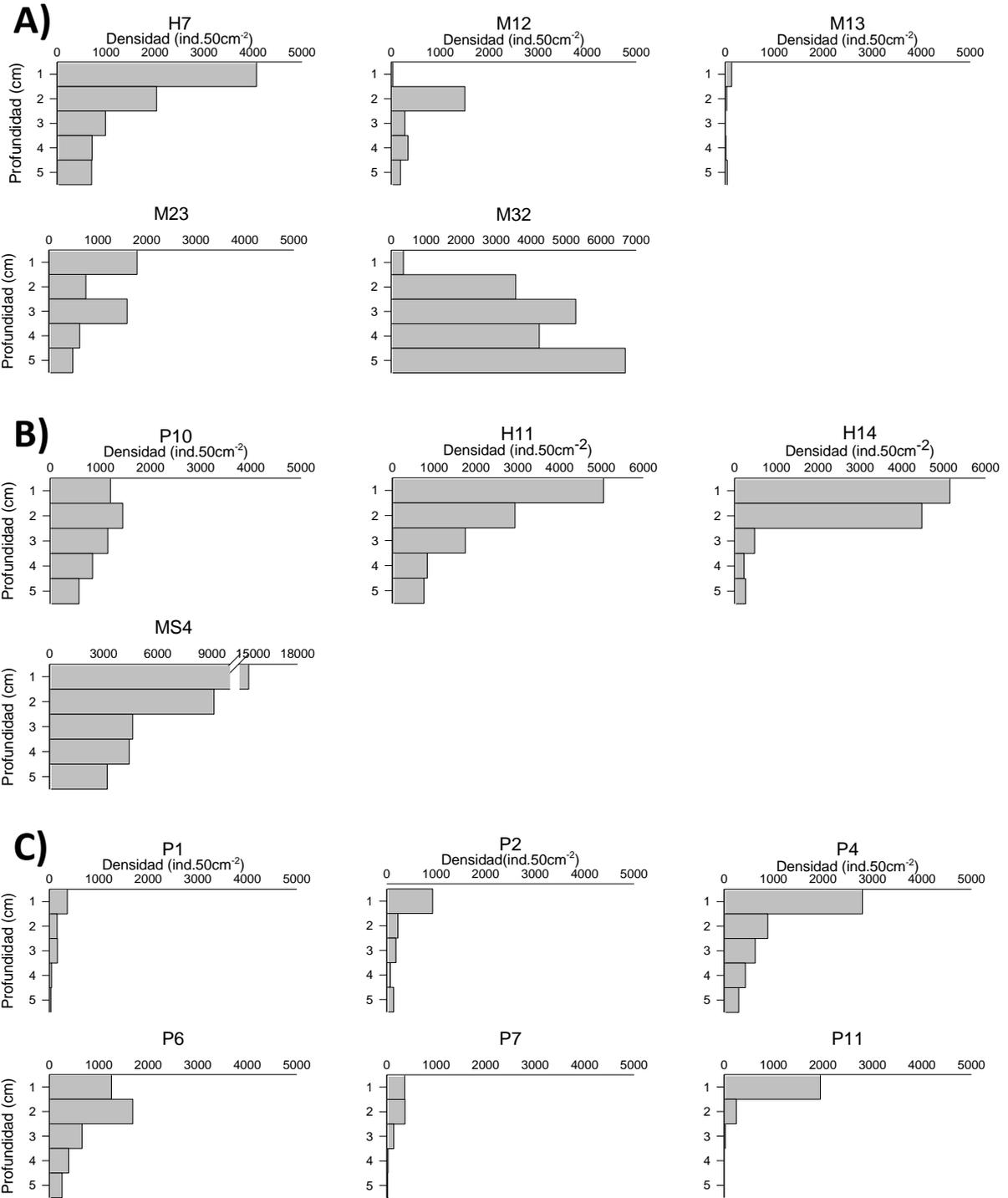
#### **4.4. El hábitat bentónico de los foraminíferos en la plataforma interna**

##### **4.4.1. Distribución vertical en los sedimentos**

Los foraminíferos bentónicos se distribuyen verticalmente en el sedimento con una tendencia a disminuir a mayor profundidad. El máximo superficial es causado por la presencia de alimento lábil, mientras que la desaparición en centímetros profundos puede deberse a la falta de alimento o de oxígeno. Para la mayoría de ambientes someros (menores a 50 m) y/o de sustratos muy arenosos esta disminución es progresiva y suave, mientras que en ambientes más profundos, usualmente de sedimentos finos, el decrecimiento suele ser exponencial (Jorissen, 1999).

En nuestros resultados, considerando la reciente formación de grupos como ambientes distintos, los foraminíferos mayoritariamente se concentraron en los dos centímetros más superficiales del sedimento y disminuyeron progresivamente con la profundidad en la mayoría de los sitios (**Figura 9**). La única excepción se observó en el sitio M32 donde la densidad por el contrario aumentó con la profundidad.

La situación atípica de M32 podría ser resultado de la colonización vertical de nuevo sustrato depositado que haya sepultado al hábitat bentónico original. Se sabe que los cambios estacionales o interanuales en el nivel del mar pueden producir cambios en la circulación de las corrientes en la costa (Gutiérrez, Akester, & Naranjo, 2016). Cambios en las corrientes de fondo, que pueden llegar a transportar partículas de hasta 0.5 mm de diámetro (Bird, 2008), podrían modificar el sustrato como sucede en los eventos de arenamiento natural. Por otro lado, el sitio M32 fue muy arenoso, pero fue más profundo y contuvo más MOT que los otros sitios del ambiente arenoso (**Tabla 4**). En ese sentido, un sustrato más fino con muchos foraminíferos viviendo en su superficie pudo haber sido sepultado por la arena, por cambios en las corrientes de fondo, obligando a que estos fueran colonizando progresivamente el nuevo sustrato hacia arriba. Además, las propiedades comunitarias de alta densidad, baja diversidad y fuerte dominancia de un taxón observadas en M32 (**Tabla 9**) son típicas de sustratos que acumulan materia orgánica pero sujetos a eventos de perturbación de los sedimentos (Hess & Jorissen, 2009; Koho, Kouwenhoven, de Stigter, & Van der Zwaan, 2007).



**Figura 9. Perfiles verticales de la comunidad de foraminíferos bentónicos del ambiente I (A), ambiente II (B) y ambiente III (C)**

#### 4.4.2. Foraminíferos en ambientes sedimentarios y modelo conceptual

Los fondos de la plataforma interna de la costa central del Perú comparten la condición de proximidad a celdas de afloramiento que transportan propiedades de la ZMO a ambientes someros y que generan una gran producción primaria en superficie. Sin embargo, los cambios espaciales de pequeña escala debido a la configuración de la línea costera o la profundidad establecen ciertas diferencias en los factores ambientales que se traducirían en diferencias en la comunidad de foraminíferos, lo cual fue evidenciado por los resultados del análisis CAP (**Figura 8**). De acuerdo a ello, y a las características del sustrato, los tres ambientes sedimentarios de la plataforma interna identificados en este trabajo fueron renombrados de la siguiente manera: ambiente arenoso (I), ambiente fango-arenoso (II) y ambiente fangoso protegido (III).

Al comparar ahora los parámetros comunitarios por ambiente sedimentario se observó que la densidad y la riqueza de especies de la comunidad fueron relativamente mayores en el ambiente fango-arenoso (II) (**Figura 10**). En los otros parámetros comunitarios (diversidad de Shannon, contribución porcentual de los calcáreos y de los pequeños) se pudo observar un mismo patrón en el que el ambiente arenoso (I) y el fangoso protegido (III) exhiben niveles opuestos, mientras que el ambiente fango-arenoso (II), niveles moderados (**Figura 10**). Es así que en el ambiente arenoso la comunidad está muy dominada por una sola especie y está compuesta casi exclusivamente por foraminíferos pequeños y calcáreos, pero también exhibe frecuentes condiciones de preservación de la tafocenosis calcárea. En cambio, en el fangoso protegido la comunidad está mejor repartida entre las especies, con mejores contribuciones de foraminíferos grandes y de no calcáreos, pero propensa a condiciones de disolución de la tafocenosis calcárea. Mientras que en el ambiente fango-arenoso se observaron valores moderados de estos parámetros comunitarios y de la preservación de la tafocenosis calcárea.

La relación entre el régimen hidrodinámico, el tipo de sedimento y su contenido orgánico, las propiedades del agua de fondo y las comunidades de foraminíferos bentónicos en los fondos someros de la costa central del Perú se puede representar en un modelo conceptual (**Figura 11**).

El ambiente arenoso (I) es el de mayor régimen hidrodinámico. La gran dominancia de la especie pequeña *Bolivina costata* (>92%) en este ambiente respondería a su carácter generalista y su corto ciclo de vida que le permite recolonizar constantemente un sustrato

sujeto a continuos eventos de resuspensión y movilización de sedimentos, los cuales impiden el asentamiento y desarrollo de las poblaciones de las otras especies. Debido a su proximidad a celdas de afloramiento costero, el régimen de oxígeno de este ambiente puede alcanzar frecuentemente niveles de hipoxia severa ( $<0.5$  mL/L), probablemente con ello impidiendo también la colonización exitosa de especies grandes que suelen estar adaptadas a ambientes turbulentos (Briguglio & Hohenegger, 2011). Por otro lado, la pequeña carga orgánica que posee el sustrato arenoso permite la frecuente saturación de los carbonatos en el medio acuoso promoviendo la preservación de las testas calcáreas de la tafocenosis, si es que no logran ser movilizadas y transportadas por las corrientes de fondo.

El ambiente fangoso protegido (III) corresponde a un régimen hidrodinámico muy débil por estar protegido de la dinámica del mar abierto. Su sustrato rico en sedimentos finos y materia orgánica favorece a las poblaciones de Allogromiidae y *Buliminella elegantissima*, que alcanzan una relevancia numérica similar o incluso mayor a la de *B. costata*. En las zonas más someras de este ambiente, con menor influencia del afloramiento costero, las condiciones ligeramente más oxigenadas en el sustrato permitirían el desarrollo de la especie costera *Buccella peruviana* que puede alcanzar tamaños mayores a  $150\ \mu\text{m}$ . Además, a partir de los bajos valores de la tafocenosis calcárea y la mayor contribución de foraminíferos no calcáreos en la comunidad, se puede deducir que la alta carga orgánica de su sustrato podría asociarse frecuentemente a una subsaturación local de los carbonatos en el medio acuoso que no solo promueve la intensa disolución de la tafocenosis calcárea, sino que incluso puede afectar a los foraminíferos calcáreos vivos.

Por último, el ambiente fango-arenoso de régimen hidrodinámico moderado permite la acumulación de sedimentos finos y materia orgánica, aunque en menor medida que el ambiente fangoso protegido. Factores como la cantidad y calidad de alimento lábil permitirían un gran crecimiento poblacional de *B. costata* y, gracias a la suficiente estabilidad del sustrato, también de otros taxones como *N. auris*, *V. fragilis* y Allogromiidae. En este ambiente, que abarca las zonas más profundas de la plataforma interna, es posible encontrar especies propias de la plataforma media o profunda, aunque muy escasamente, como *Buliminella tenuata*, *Bathysiphon* sp y *Reophax* sp. Por todos estos motivos este ambiente alberga las mayores densidades y riqueza de especies de foraminíferos. Por otro lado, la cantidad moderada de materia orgánica permitiría una regular preservación de la tafocenosis calcárea.

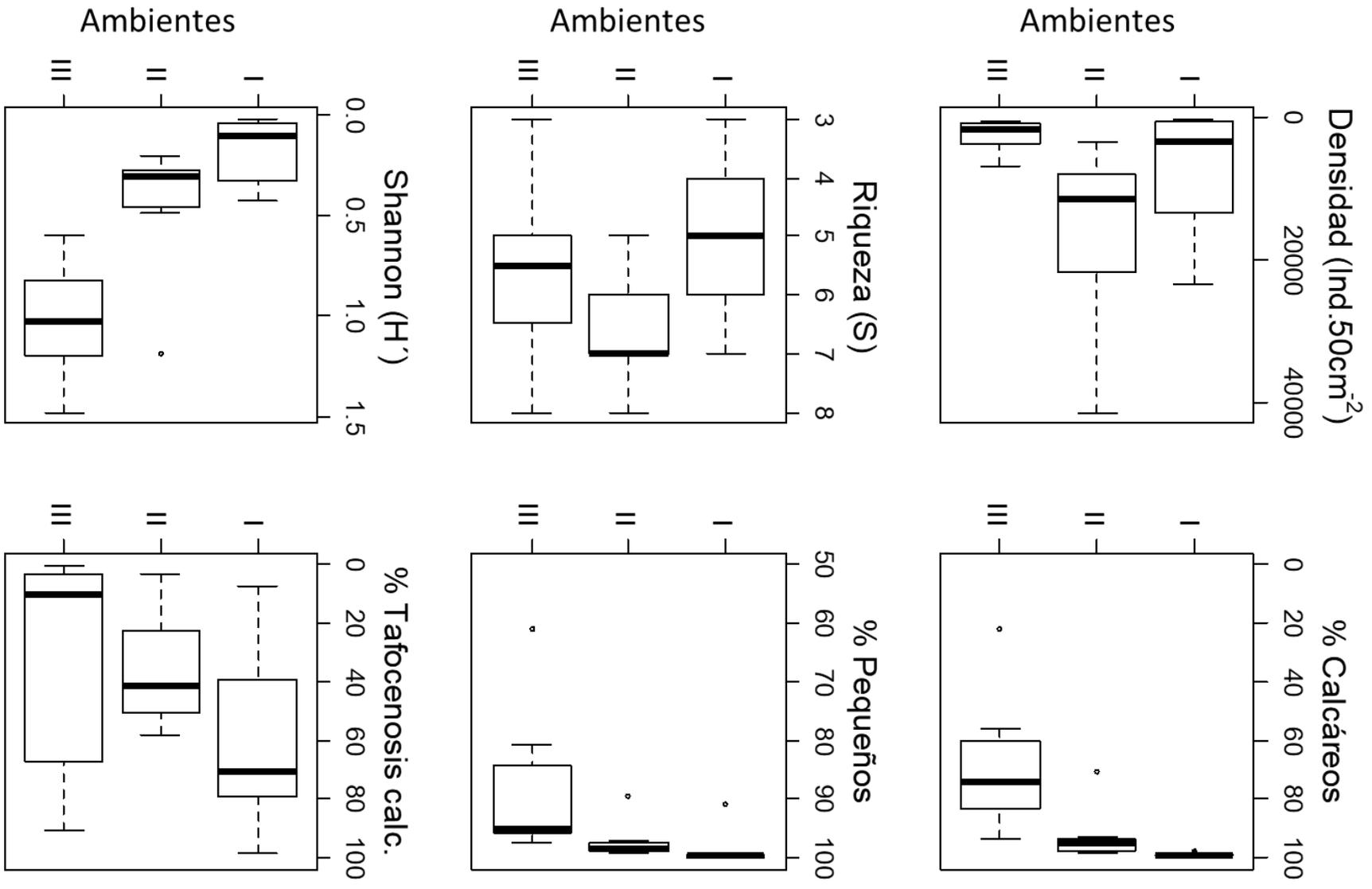


Figura 10. Comparación de los parámetros de la comunidad y de la tafocenos por tipo de ambiente sedimentario

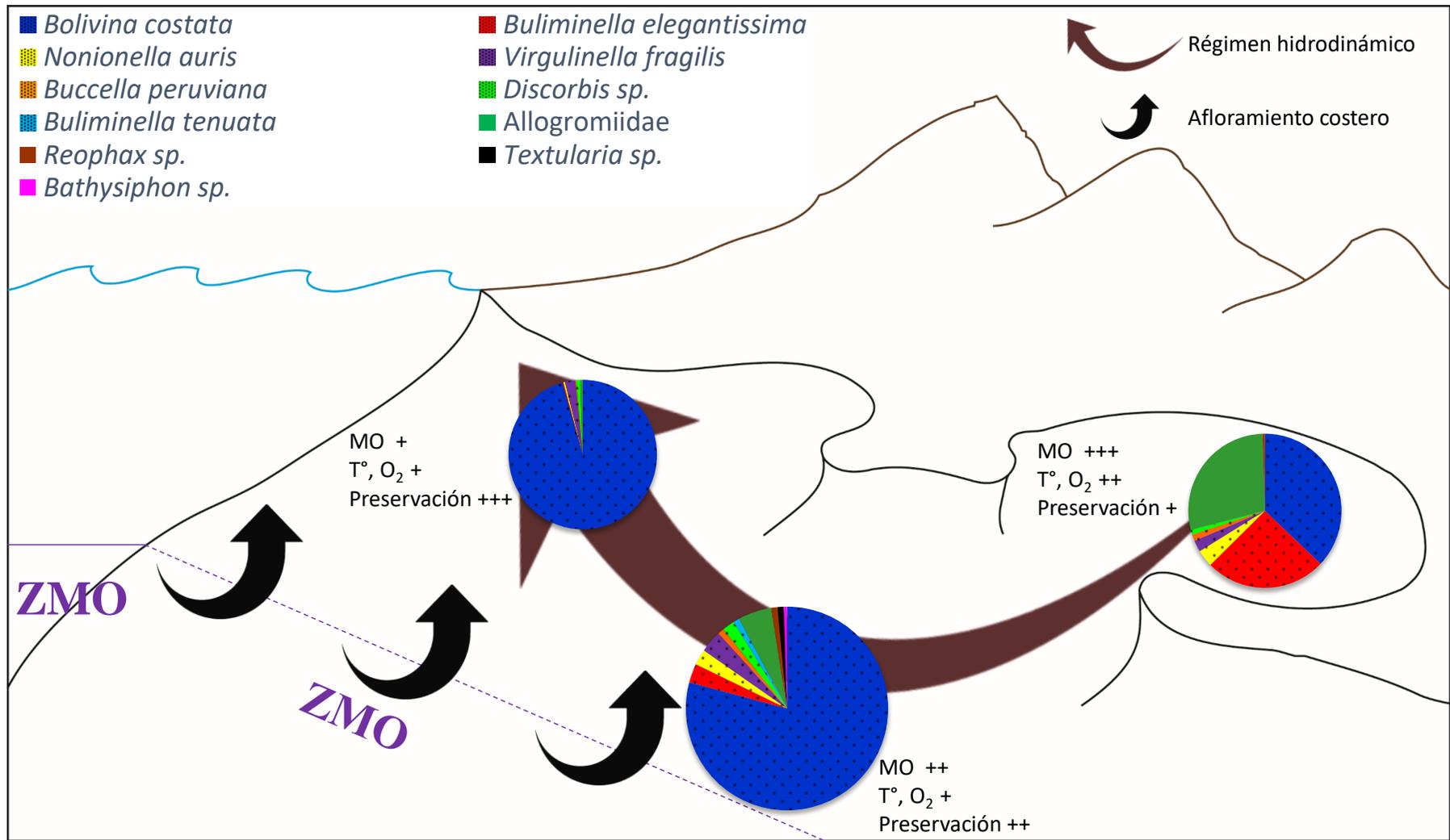


Figura 11. Modelo conceptual de las condiciones ambientales y las comunidades de la plataforma interna (<50m) de la costa central peruana. Las diferencias en el régimen hidrodinámico representan las diferencias en el tamaño de grano del sustrato. Los colores con puntos negros corresponden a los foraminíferos calcáreos. (+: valores bajos, ++: valores moderados, +++: valores altos)

## V. CONCLUSIONES

1. Transversalmente a las localidades estudiadas se identificaron tres ambientes sedimentarios someros: el ambiente arenoso de baja carga orgánica y subyacente a aguas frías y pobres en oxígeno, el ambiente fango-arenoso de moderada carga orgánica y también subyacente a aguas frías y pobres en oxígeno, y el ambiente fangoso protegido de alta carga orgánica y subyacente a aguas relativamente más templadas y oxigenadas.
2. La comunidad de foraminíferos bentónicos de los ambientes sedimentarios someros está dominada por especies calcáreas pequeñas. Su densidad comunitaria aumenta con la profundidad del ambiente en la plataforma interna y suele estar concentrada en los dos centímetros más superficiales. Su diversidad (Shannon) es relativamente baja con mayores valores en sedimentos fangosos protegidos y menores en sedimentos arenosos.
3. Se rechaza la hipótesis de relación positiva entre la diversidad de foraminíferos bentónicos y el oxígeno disuelto en el agua de fondo de los ambientes someros, pues el índice de Shannon se ve favorecido por el contenido orgánico y la temperatura. También se rechaza la hipótesis de relación positiva entre la abundancia de foraminíferos y la materia orgánica del sustrato ya que la abundancia comunitaria (dominada por *Bolivina costata*) responde a otro factor asociado a la profundidad.
4. La estructura comunitaria de los foraminíferos bentónicos varía en relación a las diferencias en la granulometría y el contenido orgánico del sustrato y la temperatura, asociadas a diferencias en el régimen hidrodinámico de los ambientes sedimentarios.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Emplear variables de calidad y cantidad de alimento biodisponible en sedimentos como carbono orgánico total y fitopigmentos, y otras variables relacionadas a la profundidad en la plataforma interna, para esclarecer el control ambiental sobre *Bolivina costata*.
2. Buscar evidencias del papel de *Buliminella elegantissima* como indicador de contaminación orgánica en los ambientes costeros mediante estudios de campo y laboratorio.
3. Evaluar a nivel experimental el crecimiento poblacional de las especies más importantes, para entender mejor su ciclo de vida y su respuesta a factores en condiciones controladas.
4. Analizar la tafocenosis de foraminíferos bentónicos en registros sedimentarios de ambientes marino-costeros para evaluar los cambios ambientales históricos.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Zied, R. H., Basaham, A. S., & El Sayed, M. A. (2013). Effect of municipal wastewaters on bottom sediment geochemistry and benthic foraminifera of two Red Sea coastal inlets, Jeddah, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 451–469.
- Angel, D. L., Verghese, S., Lee, J. J., Saleh, A. M., Zuber, D., Lindell, D., & Symons, A. (2000). Impact of a net cage fish farm on the distribution of benthic foraminifera in the Northern Gulf of Eilat (Aqaba , Red Sea). *Journal of Foraminiferal Research*, 30(1), 54–65.
- Arntz, W. E., Gallardo, V. A., Gutiérrez, D., Isla, E., Levin, L. A., Mendo, J., ... Wolff, M. (2006). El niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt, California and Benguela Current upwelling ecosystems. *Advances in Geosciences*, 6, 243–265.
- Bagarinao, T. (1992). Sulfide as an environmental factor an toxicant: tolerance and adaptations in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, 24, 21–62.
- Bandy, O. L., Ingle, J. C., & Resig, J. M. (1964). Foraminifera, Los Angeles County outfall area, California. *Limnology and Oceanography*, 9(1), 124–137.
- Bandy, O. L., Ingle, J. C., & Resig, J. M. (1965). Foraminiferal Trends, Hyperion Outfall, California. *Limnology and Oceanography*, 10(3), 314–332.
- Bernhard, J. M. (1989). The distribution of benthic foraminifera with respect to oxygen concentration and organic carbon levels in shallow-water Antarctic sediments. *Limnology and Oceanography*, 34(6), 1131–1141.
- Bernhard, J. M., Mollo-Christensen, E., Eisenkolb, N., & Starczak, V. R. (2009). Tolerance of allogromiid Foraminifera to severely elevated carbon dioxide concentrations: Implications to future ecosystem functioning and paleoceanographic interpretations. *Global and Planetary Change*, 65(3–4), 107–114.

- Bernhard, J. M., & Sen Gupta, B. K. (1999). Foraminifera of oxygen-depleted environments. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 201–216). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology. An Introduction* (Second Edi). Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Boltovskoy, E., & Wright, R. (1976). *Recent Foraminifera*. (E. Boltovskoy & R. Wright, Eds.) (second). La Haya, Holanda: Springer Science & Business Media.
- Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2011). *Numerical Ecology with R*. Library. New York, USA: Springer-Verlag New York.
- Bradshaw, J. S. (1961). Laboratory experiments on the ecology of foraminifera. *Contributions from the Cushman Foundation for foraminiferal research*, 12(3), 87–106.
- Briguglio, A., & Hohenegger, J. (2011). How to react to shallow water hydrodynamics: The larger benthic foraminifera solution. *Marine Micropaleontology*, 81(1–2), 63–76.
- Burone, L., Valente, P., Pires-Vanin, A. M. S., De Mello e Sousa, S. H., Mahiques, M. M., & Braga, E. (2007). Benthic foraminiferal variability on a monthly scale in a subtropical bay moderately affected by urban sewage. *Scientia Marina*, 71(4), 775–792.
- Buzas, M. A., & Gibson, T. G. (1969). Species diversity: Benthonic foraminifera in western North Atlantic. *Science*, 163(1686).
- Calienes, R., Guillén, Ó., & Lostaunau, N. (1985). Variabilidad espacio-temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frente a la costa peruana. *Boletín del Instituto del Mar del Peru*, 10(1), 3–44.
- Calvo-Marcilese, L., & Langer, M. R. (2012). Ontogenetic morphogenesis and biogeographic patterns: Resolving taxonomic incongruences within “species” of *Buccella* from South American coastal waters. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 15(1), 23–32.
- Cardich, J., Gutiérrez, D., Romero, D., Pérez, A., Quipúzcoa, L., Marquina, R., ... 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.

- Cardich, J., Morales, M., Quipúzcoa, L., Sifeddine, A., & Gutiérrez, D. (2012). Benthic foraminiferal communities and microhabitat selection on the continental shelf off central Peru. En A. V. Altenbach, J. M. Bernhard, & J. Seckbach (Eds.), *Anoxia. Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies* (Vol. 21, pp. 323–340). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Cherchi, A., Da Pelo, S., Ibba, A., Mana, D., Buosi, C., & Floris, N. (2009). Benthic foraminifera response and geochemical characterization of the coastal environment surrounding the polluted industrial area of Portovesme (South-Western Sardinia, Italy). *Marine Pollution Bulletin*, 59(8–12), 281–296.
- Corliss, B., & Silva, K. A. (1993). Rapid growth of deep-sea benthic foraminifera. *Geology*, 21, 991–994.
- Correa, D., Tam, J., Pasapera, J., Saavedra, M., & Ingunza, A. (2008). Modelling marine circulation and hypothetical discharges in Callao Bay, Peru. *Informe Instituto del Mar del Perú*, 35(3), pp.181-192.
- Culver, S. J., & Buzas, M. A. (1999). Biogeography of Nerithic Benthic Foraminifera. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 93–102). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Danovaro, R. (2009). *Methods for the study of Deep-Sea sediments, their functioning and biodiversity*. (R. Danovaro, Ed.). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- De Araujo, H. A. B., & Machado, A. de J. (2008). Benthic Foraminifera Associated With the South Bahia Coral Reefs, Brazil. *The Journal of Foraminiferal Research*, 38(1), 23–38.
- Dean, W. E. J. (1974). Determination of Carbonate and Organic Matter in Calcareous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison With Other Methods. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1).
- Delgado, C., Gomero, R., Salzwedel, H., Flores, L. A., & Carbajal, G. (1987). Sedimentos superficiales del margen continental peruano: un mapa textural. *Bol. Inst.Mar Perú*, 11(5), 178–190.

- Dias, B. B., Hall-Spencer, J. M., & Hart, M. B. (2010). Modern seawater acidification: the response of foraminifera to high-CO<sub>2</sub> conditions in the Mediterranean Sea. *Journal of the Geology Society*, 167, 843–846.
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 33, 245–303.
- Dijkstra, N., Junttila, J., Skirbekk, K., Carroll, J., Husum, K., & Hald, M. (2017). Benthic foraminifera as bio-indicators of chemical and physical stressors in Hammerfest harbor (Northern Norway). *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 384–396.
- Field, J. G., Hempel, G., & Summerhayes, C. P. (2002). *Oceans 2020: Science, Trends and the Challenge of Sustainability*. (J. G. Field, G. Hempel, & C. P. Summerhayes, Eds.). Washington, DC, USA: Island Press.
- Flores, R., Gutiérrez, D., Tam, J., Sánchez, S., & Orozco, R. (2004). Informe Técnico sobre la Dinámica de la Bahía de Paracas y Recomendaciones para su Manejo. *Informe Interno del Imarpe*.
- Fuenzalida, R., Schneider, W., Garcés-Vargas, J., Bravo, L., & Lange, C. (2009). Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II*, 56, 992–1003.
- Gibson, T. G., & Buzas, M. A. (1973). Species diversity: Patterns in modern and Miocene foraminifera of the eastern margin of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 163, 72–75.
- Goldstein, S. T. (1999). Foraminifera: A Biological Overview. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 37–56). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Gooday, A. J. (1986). Soft-shelled foraminifera in meiofaunal samples from the bathyal Northeast Atlantic. *Sarsia*, 71(3–4), 275–287.
- Gooday, A. J. (2002). Organic-walled allogromiids: Aspects of their occurrence, diversity and ecology in marine habitats. *Journal of Foraminiferal Research*, 32(4), 384–399.
- Gooday, A. J. (2003). Benthic Foraminifera (Protista) as Tools in Deep-water Palaeoceanography: Environmental Influences on Faunal Characteristics. *Advances in Marine Biology*, 46, 3–90.

- Gooday, A. J., Levin, L. A., Linke, P., & Heeger, T. (1992). The Role Of Benthic Foraminifera in Deep-Sea Food Webs and Carbon Cycling. *Deep-Sea Food Chains and the Global Carbon Cycle*.
- Graco, M. I., Ledesma, J., Flores, G., & Girón, M. (2007). Nutrientes , oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú. *Revista Peruana de Biología*, 14(August), 117–128.
- Graco, M. I., Purca, S., Dewitte, B., Castro, C. G., Morón, O., Ledesma, J., ... Gutiérrez, D. (2017). The OMZ and nutrient features as a signature of interannual and low-frequency variability in the Peruvian upwelling system. *Biogeosciences*, 14, 4601–4617.
- Graham, W. M., & Largier, J. L. (1997). Upwelling shadows as nearshore retention sites: the example of northern Monterey Bay. *Continental Shelf Research*, 17(5), 509–532.
- Gray, J. S., & Elliot, M. (2009). *Ecology of marine sediments* (2a ed.). New York, USA: Oxford University Press.
- Green, M. A., & Aller, R. C. (1998). Seasonal patterns of carbonate diagenesis in nearshore terrigenous muds: Relation to spring phytoplankton bloom and temperature. *Journal of Marine Research*, 56, 1097–1123.
- Green, M. A., Aller, R. C., & Aller, J. Y. (1993). Carbonate dissolution and temporal abundances of Foraminifera in Long Island Sound sediments. *Limnology and Oceanography*, 38(2), 331–345.
- Green, M. A., Aller, R. C., & Aller, J. Y. (1998). Influence of carbonate dissolution on survival of shell-bearing meiobenthos in nearshore sediments. *Limnology and Oceanography*, 43, 18–28.
- Guillén, Ó., & Calienes, R. (1981). Productividad y afloramiento frente a las aguas costeras peruanas. *Bol. Inst. Mar Perú*, 130–143.
- Gutiérrez, D., Akester, M., & Naranjo, L. (2016). Productivity and sustainable management of the Humboldt Current Large Marine Ecosystem under climate change. *Environmental Development*, 17, 126–144.
- Hannah, F., & Rogerson, A. (1997). The temporal and spatial distribution of foraminiferans in marine benthic sediments of the Clyde Sea Area, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3), 377–383.

- Haslett, S. K. (2008). *Coastal Systems* (2a ed.). New York, USA: Routledge.
- Haynes, J. R. (1981). Foraminifera. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). Londres: Macmillan Publishers LTD.
- Hayward, B. W., Figueira, B. O., Sabaa, A. T., & Buzas, M. A. (2014). Multi-year life spans of high salt marsh agglutinated foraminifera from New Zealand. *Marine Micropaleontology*, 109, 54–65.
- Hayward, B. W., Grenfell, H. R., Reid, C., & Hayward, K. A. (1999). Recent New Zealand shallow water benthic foraminifera: taxonomy, ecological distribution, biogeography and use in paleoenvironmental assessment. *Institute of Geological and Nuclear Sciences Monograph*, 20, 258.
- Helly, J. J., & Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159–1168.
- Hess, S., & Jorissen, F. J. (2009). Distribution patterns of living benthic foraminifera from Cap Breton canyon, Bay of Biscay: Faunal response to sediment instability. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(9), 1555–1578.
- Hessler, R. R., & Sanders, H. L. (1967). Faunal diversity in the deep-sea. *Deep-Sea Research*, 14, 65–78.
- Huitema, B. E. (2011). *The analysis of Covariance and alternatives: Statistical methods for experiments, quasi-experiments, and single-case studies* (2a ed.). New Jersey, USA: JohnWiley & Sons, Inc.
- Igarza, M. del C. (2012). *Materia orgánica sedimentaria reciente del margen continental peruano: Mecanismos de preservación y aplicaciones paleoceanográficas* (Tesis para optar el grado de Maestro). Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú.
- IMARPE. (2014). *50 años de Mar y Ciencia*. Lima, Perú: Instituto del Mar del Peru.
- Ingram, R. (1971). Sieve analysis. En R. E. Carver (Ed.), *Procedures in sedimentary petrology* (pp. 49–67). New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Jones, R. W. (2014). *Foraminifera and their Applications*. New York, USA: Cambridge University Press.

- Jorissen, F. J. (1999). Benthic foraminiferal microhabitats below the sediment-water interface. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 161–179). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Jorissen, F. J., de Stigter, H. C., & Widmark, J. G. V. (1995). A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, 26(1–4), 3–15.
- Koho, K. A., Kouwenhoven, T. J., de Stigter, H. C., & Van der Zwaan, G. J. (2007). Benthic foraminifera in the Nazaré Canyon, Portuguese continental margin: Sedimentary environments and disturbance. *Marine Micropaleontology*, 66(1), 27–51.
- Le Cadre, V., Debenay, J. P., & Lesourd, M. (2003). Low pH effects on *Ammonia beccarii* test deformation: Implications for using test deformations as a pollution indicator. *Journal of Foraminiferal Research*, 33(1), 1–9.
- Mallon, J. (2011). *Benthic Foraminifera of the Peruvian & Ecuadorian Continental Margin* (Doctoral Thesis). Kiel University, Kiel, Germany.
- Marín, V. H., Delgado, L. E., & Escribano, R. (2003). Upwelling shadows at Mejillones Bay (northern Chilean coast): a remote sensing in situ analysis. *Invest. Mar., Valparaíso*, 31(2), 47–55.
- Marín, V., Rodríguez, L., Vallejo, L., Fuenteseca, J., & Arce, O. Y. (1993). Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 66, 479–491.
- Mayor, S. (1993). *Foraminíferos bentónicos de la plataforma continental peruana entre los 7° y 10° de latitud sur* (Tesis para optar el Título de Biólogo). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Millero, F. J. (2013). *Chemical Oceanography* (4a ed.). Boca Raton, Florida: Taylor & Francis.
- Moodley, L., Schaub, B. E. M., Van der Zwaan, G. J., & Herman, P. M. J. (1998). Tolerance of benthic foraminifera (Protista: Sarcodina) to hydrogen sulphide. *Marine Ecology Progress Series*, 169, 77–86.
- Morón, O. A. (2000). Características del ambiente marino frente a la costa peruana. *Boletín del Instituto del Mar del Perú*, 19(1–2), 179–204.

- Murray, J. W. (2001). The niche of benthic foraminifera, critical thresholds and proxies. *Marine Micropaleontology*, 41, 1–7.
- Murray, J. W. (2006). *Ecology and applications of benthic foraminifera*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Murray, J. W., & Alve, E. (1999). Natural dissolution of modern shallow water benthic foraminifera: taphonomic effects on the palaeoecological record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 146, 195–209.
- Narayan, R. Y., & Pandolfi, J. M. (2010). Benthic foraminiferal assemblages from Moreton Bay, South-East Queensland, Australia: Applications in monitoring water and substrate quality in subtropical estuarine environments. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2062–2078.
- Nomaki, H., Heinz, P., Nakatsuka, T., Shimanaga, M., & Kitazato, H. (2005). Species-specific ingestion of organic carbon by deep-sea benthic foraminifera and meiobenthos: In situ tracer experiments. *Limnology and Oceanography*, 50(1), 134–146.
- Páez, M., Zúñiga, O., Valdés, J., & Ortlieb, L. (2001). Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micrónicos de la bahía Mejillones del Sur ( 23o S ), Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 36(2), 129–139.
- Phleger, F. B., & Soutar, A. (1973). Production of benthic foraminifera in three East Pacific Oxygen Minima. *Micropaleontology*, 19, 110–115.
- Rabalais, N. N., Díaz, R. J., Levin, L. A., Turner, R. E., Gilbert, D., & Zhang, J. (2010). Dynamics and distribution of natural and human-caused coastal hypoxia. *Biogeosciences*, 7, 585–619.
- Ramírez, A., Ganoza, F., Elliott, W., Gonzales, P., Silva, G., Fritz, E., & Ramos, Á. (2019). Bancos naturales de invertebrados y determinación de áreas para maricultura entre Punta Litera y Playa Grande, Región Lima. *Informe Instituto del Mar del Perú*, 46(2), 162–193.
- Romero, D. S. (2014). *Variación de la biomasa de foraminíferos bentónicos en respuesta a gradientes de materia orgánica y de condiciones de óxido-reducción frente a la costa central del Perú* (Tesis para optar el Título de Biólogo). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

- Sanders, H. L. (1968). Marine Benthic Diversity: A Comparative Study. *The American Naturalist*, 102(925), 243–282.
- Schafer, C. T., Winters, G. V., Scott, D. B., Pocklington, P., Cole, F. E., & Honig, C. (1995). Survey of living foraminifera and polychaete populations at some Canadian aquaculture sites: Potential for impact mapping and monitoring. *Journal of Foraminiferal Research*, 25(3), 236–259.
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S., Spezzaferri, S., ... Tsujimoto, A. (2012). The FOBIMO (FORaminiferal BIo-MONitoring) initiative-Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, 94–95, 1–13.
- Sen Gupta, B. K. (1999a). Foraminifera in marginal marine environments. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 141–159). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Sen Gupta, B. K. (1999b). Systematics of modern foraminifera. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 7–36). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Sen Gupta, B. K., & Kilbourne, R. T. (1974). Diversity of benthic foraminifera on the Georgia Continental Shelf. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 969–972.
- Sen Gupta, B. K., & Machain-Castillo, M. L. (1993). Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology*, 20, 183–201.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1963). *The mathematical theory of communication*. Illinois: The University of Illinois Press.
- STAP. (2011). *Hypoxia and Nutrient Reduction in the Coastal Zone. Advice for Prevention, Remediation and Research*. A STAP Advisory Document. Global Environment Facility. Washington, DC.
- Strickland, J. D. H., & Parsons, T. R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis* (Second Edi). Ottawa: Fisheries Research Board of Canada.
- Uthicke, S., Momigliano, P., & Fabricius, K. E. (2013). High risk of extinction of benthic foraminifera in this century due to ocean acidification. *Scientific Reports*, 3, 1769.

- Velazco, F., & Solís, J. (2000). Estudio Sedimentológico de la Bahía de Paracas. *Informe Progresivo Instituto del Mar del Perú*, 133, 3–22.
- Velazco, F., Solís, J., Delgado, C., & Gomero, R. (2015). Sedimentos superficiales y morfología de la plataforma y talud continental superior, entre 3°30'S y 15°30'S, Perú. *Boletín del Instituto del Mar del Perú*, 42(4), 526–537.
- Verano, R. (1974). Foraminíferos del litoral del departamento de Lima. *Revista Peruana de Biología*, 1(1), 63–80.
- Watkins, J. G. (1961). Foraminiferal ecology around the Orange County, California, ocean sewer outfall. *Micropaleontology*, 7(2), 199–206.
- Yanko, V., Arnold, A. J., & Parker, W. C. (1999). Effects of marine pollution on benthic foraminifera. En B. K. Sen Gupta (Ed.), *Modern Foraminifera* (pp. 217–235). New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Zhang, J., Gilbert, D., Gooday, A. J., Levin, L., Naqvi, S. W. A., Middelburg, J. J., ... Van der Plas, A. K. (2010). Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*, 7(5), 1443–1467.
- Zuta, S., & Guillén, Ó. (1970). Oceanografía de las Aguas Costeras del Perú. *Bol. Inst. Mar Perú*, 2(5), 157–320. M. A. (2013). Effect of municipal wastewaters on bottom sediment geochemistry and benthic foraminifera of two Red Sea coastal inlets, Jeddah, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 451–469.

## VIII. ANEXOS

Anexo 1. Scores de los sitios en el ACP

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
h7	-0.3267	0.2621	0.3924	-0.2432	0.0304	0.0117
h11	-0.2589	0.5063	0.3081	-0.0773	-0.0649	0.0324
h14	-0.1680	0.7777	0.2222	0.1897	-0.0220	-0.0271
m12	-0.7685	-0.5448	0.2383	0.0037	0.0529	-0.0753
m13	-0.8637	-0.4783	0.0788	-0.0258	-0.0276	-0.0378
m23	-0.5674	-0.0496	-0.2009	-0.1806	-0.0663	0.0286
m32	-0.8662	-0.2609	-0.2299	0.1981	-0.0466	0.0713
mS4	-0.6619	0.2521	-0.1701	0.1076	0.1294	0.0260
p1	0.9920	-0.2849	0.5593	0.0868	0.0761	0.0808
p2	0.8722	-0.1464	0.1795	0.0575	-0.0644	-0.1223
p4	0.7044	-0.0762	-0.1948	-0.0440	-0.1665	0.0434
p6	0.5704	-0.3116	-0.1230	0.0405	-0.0431	0.0464
p7	0.3288	0.1900	-0.2704	0.0388	-0.0023	-0.0575
p10	0.2834	0.2520	-0.5196	-0.0516	0.0438	-0.0352
p11	0.7301	-0.0874	-0.2700	-0.1002	0.1710	0.0148

Anexo 2. Scores de las variables en el ACP

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Prof.	-0.8757	0.7122	-0.2067	0.2704	0.1554	0.0128
Finos	0.9426	0.7103	-0.0417	-0.1377	0.0204	0.0037
Arena	-0.9426	-0.7102	0.0420	0.1379	-0.0207	-0.0037
MOT	1.1184	0.1620	-0.1086	0.2955	-0.1945	-0.0146
Temp.	1.0813	-0.4015	-0.1876	0.0573	0.1576	-0.1433
Oxi.	0.5657	-0.0093	1.0381	0.0999	0.0748	0.0287
Nitra.	-1.0261	0.4456	0.3559	-0.0465	-0.0996	-0.1553

Anexo 3. Detalles de los resultados del CAP

	CAP1	CAP2	CAP3	CAP4	CAP5	CAP6	CAP7
Auto-valor	0.3487	0.1782	0.0798	0.0423	0.0133	0.0092	0.0057
Proporción explicada	0.5149	0.2631	0.1178	0.0625	0.0197	0.0136	0.0084
Proporción acumulada	0.5149	0.7780	0.8958	0.9583	0.9780	0.9916	1

Anexo 4. Varianzas del modelo del CAP explicadas por los factores ambientales

	Todas las variables	Arena	Finos	Nitra.	MOT	Oxi.	Prof.	Temp.
Varianza	0.64	0.23	0.23	0.26	0.30	0.14	0.23	0.30
Proporción de la varianza (%)	0.65	0.24	0.24	0.26	0.31	0,14	0,24	0.31

Anexo 5. Scores de los sitios en el CAP

	CAP1	CAP2	CAP3	CAP4	CAP5	CAP6
h7	-0.4031	-0.0758	0.1876	-0.2041	-0.0163	0.1031
h11	0.0254	-0.2541	0.0618	-0.1208	0.0494	0.0544
h14	-0.0641	-0.1809	0.1578	0.0444	0.0692	0.0657
m12	-0.3236	0.2803	0.0251	-0.0564	-0.0613	0.1116
m13	-0.1879	0.5870	-0.3494	0.0781	0.0925	-0.1054
m23	-0.3658	0.0841	0.0318	-0.0653	-0.1379	-0.0730
m32	-0.6026	-0.1199	0.1684	0.1790	0.0623	-0.0538
mS4	-0.1431	-0.4731	-0.0535	-0.1380	0.0164	-0.1545
p1	0.5716	0.2310	0.1622	-0.0354	-0.0018	-0.1659
p2	0.2987	0.1858	0.1281	-0.0638	0.0884	-0.0040
p4	0.2244	-0.0066	0.3191	0.1017	-0.1789	-0.0155
p6	0.3434	-0.0373	-0.1715	0.0282	-0.0669	0.1066
p7	0.1878	0.1642	-0.1531	0.2039	0.1656	0.0218
p10	0.0559	-0.2113	-0.0874	0.1995	-0.1305	0.1172
p11	0.3829	-0.1734	-0.4270	-0.1512	0.0500	-0.0084

Anexo 6. Scores de las variables ambientales explicativas del CAP

	CAP1	CAP2	CAP3	CAP4	CAP5	CAP6
Arena	-0.7488	0.4729	-0.1726	0.0727	0.0420	-0.4211
Finos	0.7488	-0.4728	0.1729	-0.0726	-0.0419	0.4211
Nitra.	-0.8568	-0.1043	0.2588	-0.2370	0.3157	0.1761
MOT	0.9191	-0.1100	0.1969	0.2966	-0.0145	0.1126
Oxi.	0.5398	0.2776	0.4681	-0.5094	0.3188	-0.1230
Prof.	-0.7139	-0.5900	0.0229	0.0687	0.3584	0.0714
Temp.	0.9171	0.2176	-0.2668	0.1555	-0.1136	-0.0191

Anexo 7. Scores de las especies o variables respuesta del CAP

	CAP1	CAP2	CAP3	CAP4	CAP5	CAP6
<i>B. costata</i>	-0.8195	-0.6366	0.3302	0.1072	0.1348	-0.0250
<i>B. elegantissima</i>	0.6550	-0.1494	-0.1622	0.1742	-0.1680	0.0243
<i>N. auris</i>	-0.0667	-0.3588	-0.3092	-0.0652	0.0575	0.0660
<i>V. fragilis</i>	0.0963	-0.2222	-0.1138	-0.3263	0.0036	-0.1253
<i>Buccella peruviana</i>	0.2933	0.0927	-0.0448	0.0215	-0.0351	0.0808
<i>Discorbis sp.</i>	-0.1705	-0.1071	-0.1897	0.0153	-0.0015	0.0080
Allogromiidae	0.3875	-0.2626	0.1812	0.1178	0.0345	0.0488
<i>Reophax sp.</i>	0.0410	-0.1055	-0.0377	-0.0227	0.0269	0.0786