



**GRADO EN BIOLOGÍA**  
**Curso Académico 2023/24**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**Asociaciones de foraminíferos bentónicos en sedimentos  
actuales del litoral del Desierto de Atacama Meridional  
(Norte de Chile)**

**Autora: Cristina Gómez Martín**

**Tutor URJC: Manuel Abad de los Santos**

**Cotutoras: Estefanía Bonnail Miguel y Tatiana Izquierdo Labraca**

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	i
<b>RESUMEN</b> .....	ii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	3
<b>Área de estudio</b> .....	3
<b>Muestreo</b> .....	5
<b>Conservación y preparación de muestras</b> .....	6
<b>Contenido en materia orgánica</b> .....	6
<b>Análisis granulométrico</b> .....	7
<b>Análisis microfaunístico</b> .....	7
<b>Separación, identificación de especies y cuantificación</b> .....	7
<b>Sistemática</b> .....	8
<b>Índices de diversidad y abundancia</b> .....	8
<b>RESULTADOS</b> .....	9
<b>Descripción de las muestras y contexto ambiental</b> .....	9
<b>Sistemática</b> .....	14
<b>Distribución y abundancia de especies</b> .....	20
<b>DISCUSIÓN</b> .....	23
<b>CONCLUSIONES</b> .....	25
<b>LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	26
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	26

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto al proyecto CONICYT FONDECYT (11180015), titulado *Marine Sediment Quality in Atacama* (MASEQATA project)

## RESUMEN

La costa de naturaleza árida de la región de Atacama, situada en el Norte de Chile, representa un área con alto valor para la biodiversidad que se encuentra fuertemente influenciada por los fenómenos de surgencia asociados a la corriente de Humboldt, además de por un clima hiperárido y una geomorfología abrupta e irregular controlada por el levantamiento de la Cordillera de Los Andes a lo largo del Cuaternario. A lo largo de este litoral chileno se suceden una serie de localizaciones que presentan escenarios muy diferentes en lo que se refiere a su degradación ambiental, desde zonas no contaminadas alejadas de cualquier foco que podría suponer un impacto sobre las comunidades marinas someras, hasta puntos de vertidos de lodos mineros, aguas residuales, salmuera de desalinizadoras o afectadas por el derrame de hidrocarburos en puertos y poblados pesqueros. Sin embargo, a pesar de tratarse de un área con un gran interés para la investigación desde un punto de vista de la biodiversidad y abundancia de la microfauna son muy escasos los trabajos destinados a la caracterización de la microfauna actual. En este trabajo se estudian los taxones más dominantes de foraminíferos bentónicos de la zona submareal somera de la región de Atacama, en las estribaciones meridionales del Desierto de Atacama. En total se lleva a cabo el análisis de 8 muestras, donde se han identificado 25 especies de este grupo y contabilizado casi 38.000 especímenes. Algunas de estas especies es la primera vez que se citan en Chile. Se discute también la posible respuesta de estos taxones a los distintos factores que controlan su distribución y abundancia, ya sea relacionada con la propia dinámica del medio litoral (granulometría del sustrato, hidrodinámica) o con la intervención de procesos antrópicos. Finalmente, este estudio establece una base sólida de carácter mayoritariamente taxonómico sobre la que llevar a cabo futuras líneas de investigación, enfocada principalmente a establecer asociaciones típicas de foraminíferos en sistemas costeros, no degradados, poniendo en valor su utilidad como bioindicadores ambientales en esta zona escasamente estudiada. Sus resultados podrán ser utilizados como referencia para reconocer y evaluar el grado de estrés ambiental en zonas afectadas por contaminación en otras investigaciones similares.

## INTRODUCCIÓN

En muchas zonas marinas costeras y cercanas al litoral las actividades humanas introducen contaminantes en el medio natural que pueden producir graves alteraciones en los diferentes niveles tróficos de los ecosistemas. En concreto, la costa de la región de Atacama, en el norte de Chile, presenta zonas con distintos niveles de degradación ambiental. Por un lado, existen áreas protegidas bajo diferentes figuras ambientales que albergan ecosistemas costeros y marinos en buen estado de conservación. Sin embargo, por otro, encontramos zonas considerablemente degradadas. Entre las causas más comunes de esta degradación se incluyen vertidos mineros y el desarrollo de actividades portuarias, además del impacto generado por la emisión de salmueras derivadas de desalinizadoras en zonas marinas someras, o de aguas residuales desde diferentes puntos de asentamientos irregulares distribuidos a lo largo de toda esta costa (Navarro *et al.*, 2021). Estas áreas degradadas deberían presentar una marcada pérdida de biodiversidad y la contaminación en agua y suelos, alterando el funcionamiento natural de los ecosistemas y del medio físico en que se instalan. Lamentablemente, los trabajos destinados a evaluar el impacto de estos procesos son todavía muy escasos en la zona (Valdés & Castillo, 2014; Bonnail *et al.*, 2023; Tovar-Salvador *et al.*, 2023).

En las últimas décadas un número creciente de investigaciones se han centrado en la búsqueda de organismos que sirvan como herramienta para hacer un seguimiento biológico del impacto de los cambios antropogénicos en el medio ambiente (p. ej., Holt & Miller, 2011). La evaluación de la presencia y/o ausencia de estos organismos, utilizados como biomonitores, permite evaluar los cambios ambientales que experimentan estos sistemas degradados, como los cambios en la temperatura (Latumahina & Mardiatmoko, 2019), en la calidad del aire (Conti & Cecchetti, 2001) o en la composición de los ecosistemas marinos (Desrosiers *et al.*, 2013). En este Trabajo Fin de Grado se estudian las asociaciones de foraminíferos en el litoral del Desierto Meridional de Atacama como un primer paso para su uso como bioindicadores de los ecosistemas costeros y marinos someros de la región.

Este grupo de microorganismos ha sido ampliamente utilizado en la bibliografía como bioindicadores, ya que la aparición, sustitución o desaparición de especies específicas es el reflejo de estos cambios ambientales (p. ej., Ruiz *et al.*, 2006). Los foraminíferos son protozoos de hábito acuático que se pueden encontrar en ambientes marinos o salobres generalmente en el fondo de mares con poca profundidad (bentónicos) o formando parte del plancton en suspensión de las zonas altas de los océanos (planctónicos). Su tamaño puede variar entre 0,1 y 3 mm. Están recubiertos por un caparazón de material calcáreo que se encuentra en la mayoría de las especies perforado por varios forámenes

(Fig. 1). La morfología de las conchas varía entre especies y entre sexos, y pueden llegar a ser muy diferentes. Emiten prolongaciones del citoplasma para la locomoción y la captura de alimento (pseudópodos). Los foraminíferos llegan a ser fundamentales en las redes tróficas de los océanos ya que procesan la mayor parte de la materia vegetal que se produce en la zona fótica, permitiendo así que esta se encuentre disponible para otros organismos. Otro papel fundamental de estos organismos tiene que ver con su capacidad de fijar en sus conchas grandes cantidades de dióxido de carbono en forma de carbonato cálcico.

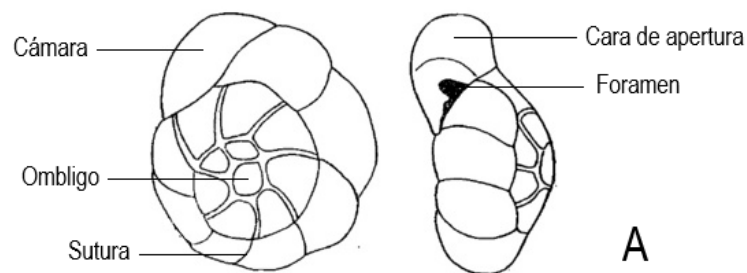


Figura 1. Partes de la concha de un foraminífero (Camacho y Longobucco, 2008).

Estas conchas y sus diferentes características (ornamentación, tipo de relleno, geometría, impresiones musculares, tipos de charnela, etc.) serán las que se utilicen para la identificación de la especie en este trabajo, ya que los especímenes no conservan las partes blandas debido a la metodología del muestreo, siendo imposible diferenciar los especímenes que habitan el sistema en el momento de la toma de la muestra (biocenosis) de otros restos que ya forman parte del sedimento (tafocenosis y tanatocenosis).

Los trabajos destinados al estudio de asociaciones de foraminíferos en ambientes marinos y costeros actuales en Chile son cuantitativa y cualitativamente escasos en relación con los llevados a cabo en otras regiones del Pacífico (Estados Unidos, Japón, Australia y nueva Zelanda), Europa, Norte de África, o incluso en la costa de Argentina y Brasil. La mayor parte de esos trabajos se desarrollan en la zona sur del país, principalmente en zonas marinas someras (Zapata *et al.*, 1995; Hromic 1999; 2009, 2011; Arellano *et al.*, 2011), marina profunda (Figueroa *et al.*, 2005) y costera actual (Fernández, 2010; Fernández y c, 2010). Son mucho más escasos los llevados a cabo en el norte árido de Chile (Tavera *et al.*, 2022) o en la zona Antártica (Kornicker, 1975). En conjunto, estas investigaciones son de índole sistemático, en su mayor parte, y sólo una pequeña parte está destinada a describir las características autoecológicas, o utilizan este grupo como un bioindicador ambiental.

Considerando lo anterior, el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es describir la abundancia y diversidad de foraminíferos bentónicos en sedimentos litorales actuales de la costa meridional del Desierto meridional de Atacama.

Se plantean, además, los siguientes objetivos específicos:

- Establecer las variaciones de su abundancia y diversidad a lo largo de la zona de estudio.
- Establecer los factores que controlan su presencia y distribución.
- Proponer asociaciones indicativas de sistemas costeros no contaminados.
- Evaluar su utilidad como biomonitores ambientales mediante comparaciones de zonas no degradadas con otras de las que se tiene constancia de contaminación, estableciendo asociaciones típicas de cada escenario.

El estudio está muy relacionado con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En concreto, el ODS 13 (Acción por el clima) que se centra en encontrar medidas para combatir el cambio climático y sus posibles efectos, está directamente relacionado con el tipo de datos e información que se plantea obtener, ya que las especies contempladas en el estudio tienen un fuerte papel en los ecosistemas como bioindicadores de la calidad ambiental. La zona se encuentra expuesta a modificaciones oceanográficas periódicas relacionadas con la surgencia de aguas frías y ricas en nutrientes protagonizada por la corriente de Humboldt, o el calentamiento de las aguas originado por el ENSO. Por otro lado, en esta investigación tiene también una evidente importancia el ODS 14, que hace referencia a la conservación y el uso sostenible de los recursos marinos dentro de los cuales encontramos estos foraminíferos, que ejercen un rol fundamental dentro de las cadenas tróficas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Área de estudio**

El área de estudio engloba el litoral de la región de Atacama, ubicada en el norte de Chile (Figura 2). Esta región tiene una extensión de 75.000 km<sup>2</sup> y cuenta con 307 mil habitantes (3.78 hab/km<sup>2</sup>, INE, 2019), de los cuales aproximadamente 42.400 (13.8%) habitan la zona costera (528 km de litoral) concentrados en tres áreas urbanas principales; Chañaral (12.219 hab), Caldera (17.662 hab) y Huasco (10.149 hab, INE, 2019). Los cuatro principales sectores económicos de la región son: i) la minería de cobre, hierro y otros materiales no metálicos; ii) la agricultura de vides y olivos; iii) la pesca para la elaboración de harina y aceite de pescado, la acuicultura de vieiras, abulones, etc., y la recolección de algas; y (iv) el turismo basado en la costa, el desierto, los paisajes o el salar andino. La región recibe

aproximadamente 28 mil visitantes anuales (SERNATUR, 2018), registrando picos en enero y febrero (periodo estival).

Asociados a las principales ciudades costeras existen tres grandes zonas portuarias que se limitan a las importaciones y exportaciones agrícolas y a las actividades de dragado. Además, existen 21 calas clasificadas como apoyo portuario para la extracción de recursos tanto en zonas urbanas como en zonas de difícil acceso. Por otro lado, la zona de pesca, que se extiende a 5 millas náuticas mar adentro, está reservada para la pesca artesanal (Ley N°18.892). Otras 46 áreas están destinadas a áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (MAERBR) con derechos de pesca de algas, peces, crustáceos y moluscos (*Conchalepas conchalepas*, *Fissurella latimarginata*, *F. cumingi*). Existen asentamientos acuícolas de vieiras (*Argopecten purpuratus*), algas (*Lessonia* sp., *Macrocytis* sp., *Chondracanthus chamissoi*), abulón, ostras, mejillones y peces en un área marina de 17,74 km<sup>2</sup> (SERNAPESCA, 2012; SUBPESCA, 2013; GORE, 2015). Finalmente, en la región hay 66 playas que son aptas para actividades acuáticas recreativas.

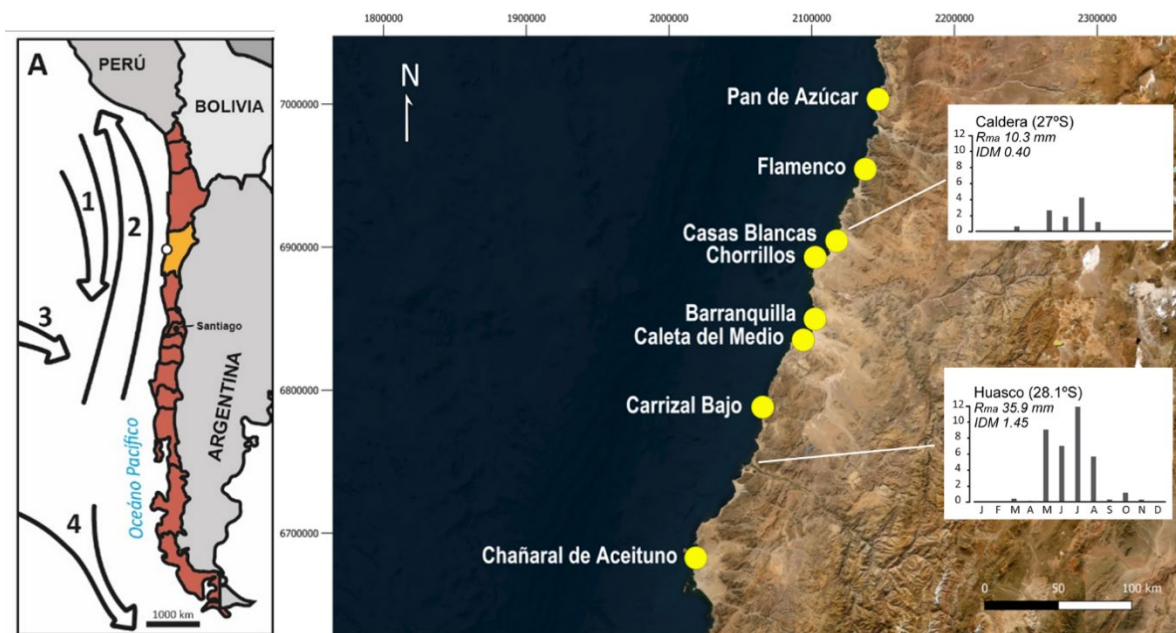


Figura 2. Izquierda, localización del área de estudio (naranja) y corrientes oceánicas que afectan a las costas chilenas: Contracorriente cálida (1); Corriente Humboldt (2); Corriente de deriva del Oeste (3); Corriente Cabo de Hornos (4). Derecha, localización de las muestras estudiadas en el segmento costero de la región de Atacama. Se incluyen los registros de precipitación media mensual de las estaciones de Caldera y Huasco (Navarro et al., 2021).

Desde un punto de vista climático, la región se localiza en el sector meridional del desierto de Atacama, presentando de acuerdo con la clasificación de Köppen un gradiente climático latitudinal desde un clima BSk'(s) (frío semiárido con veranos secos e influencia climática) en la costa sur, hasta un clima BWk (desierto frío) al norte (Sarricolea et al., 2017). La precipitación media anual varía desde los 36



mm en Huasco hasta los <10 mm en Chañaral (Navarro *et al.*, 2021). Esta precipitación puede verse duplicada o incluso triplicada durante eventos hidrometeorológicos extraordinarios asociados al El Niño Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) (Izquierdo *et al.*, 2021; 2024). Durante estos episodios de precipitación, los caudales de los tres sistemas fluviales principales (ríos Huasco, Copiapó y Salado de sur a norte) que circulan de la cordillera de los Andes hasta el océano Pacífico aumentan varios ordenes de magnitud sus caudales, arrastrando una gran cantidad de sedimento hasta la zona submareal (Abad *et al.*, 2017; Izquierdo *et al.*, 2021).

Las bajas precipitaciones están controladas por la ubicación latitudinal de la zona de estudio frente al anticiclón del Pacífico Sur con un régimen de vientos predominante del sur. La circulación oceánica superficial muestra el flujo costero de sur a norte como parte del Sistema de Surgencia de la Corriente de Humboldt (SSCH), considerado uno de los sistemas de surgencia que más productividad generan del planeta (Thiel *et al.*, 2007). Esta corriente tiene su origen en las aguas frías de la Antártida y desde ahí se desplaza en dirección norte, aunque temperatura de las aguas de la corriente se mantiene significativamente más fría que el resto del océano Pacífico. La productividad asociada al SSCH se debe principalmente a los fenómenos de surgencia costera que acompañan la corriente (Graco *et al.*, 2007). De esta manera, la afluencia de nutrientes a capas más superficiales es aprovechada por los organismos que forman parte de la base de las cadenas alimentarias, lo que se traduce en una alta productividad primaria que trae asociada un aumento de la biodiversidad. (Thiel *et al.*, 2007).

Haciendo referencia al sistema de mareas de la zona, la costa tiene características referentes a una clasificación mixta semidiurna de tipo micromareal. El rango promedio de marea alcanza los 0,9 metros y la altura significativa de la ola toma valores de entre 1,79 y 2,04 m. La fuente de oleaje de tormenta principal y, a la vez, la más frecuente, proviene del suroeste, con una altura de ola promedio se acerca a los 3 m y máximos de 5 m. Estos valores, comparados con otros de otras zonas litorales chilenas, son considerablemente más pequeños (Navarro *et al.*, 2021).

### **Muestreo**

Para el análisis de microfauna se seleccionaron diferentes estaciones donde se recogieron muestras de sedimento en la zona submareal somera, principalmente ensenadas y bahías, distribuidas a lo largo de casi 400 km de costa. Se selecciona un total de 8 estaciones de muestreo etiquetadas con los siguientes nombres (de norte a sur): Pan de Azúcar (S13), Flamenco (S22), Casas Blancas (S15), Chorrillos (S24), Barranquilla (S23), Caleta del Medio (S18), Carrizal bajo (S17) y Chañaral de Aceituno

(S16) (Fig. 2). El muestreo se realizó en el verano de 2018 (enero-febrero) y las muestras fueron recolectadas por triplicado por buzos profesionales en el marco del proyecto MASEQATA (FONDECYT-11180015) de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile. La profundidad de las muestras siempre fue de aproximadamente 10 m y la distancia a línea de costa fue variable dependiendo del gradiente del fondo marino, variando entre los 50 m y los 450 m.

Estas estaciones fueron seleccionadas porque proporcionan una representación geográficamente amplia de las condiciones que encontramos en la costa de Atacama, pero siempre en sectores inicialmente con pocos o ningún foco de contaminación ambiental. Esta circunstancia permitirá hacer una adecuada evaluación y análisis de estos sedimentos y su microfauna asociada, lo que podría utilizarse posteriormente en zonas contaminadas para estimar su grado de degradación en relación a zonas no afectadas por la actividad antrópica. En cualquier caso, las estaciones contemplan cierta diversidad de escenarios, como áreas protegidas bajo figuras ambientales muy sólidas, como Parque Nacionales, zonas remotas en las que no existen ningún tipo de foco de contaminación, y otras próximas a localidades costeras y zonas portuarias, poblados de pescadores o áreas turísticas que podrían estar ligeramente afectadas.

### **Conservación y preparación de muestras**

Las muestras fueron almacenadas en cajas de aluminio en condiciones de oscuridad y a 4 °C hasta llegar al laboratorio del INCT de la Universidad de Atacama. Posteriormente, las muestras fueron secadas al aire. Se separaron 50 g para su análisis granulométrico, 50 g para estimación de contenido en materia orgánica y 100 g para su análisis microfaunístico. Los 100 g de muestra destinados a análisis microfaunísticos fueron pretratados en el laboratorio de investigación del área de Geología de la Universidad Rey Juan Carlos para facilitar su disgregación, tamizado y levigado posterior. Los sedimentos fueron sumergidos en 500 cl de agua destilada para tratarlos con 100 cl de agua oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 5 gr de pirofosfato sódico (NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O) y 5 gr de CALGON<sup>tm</sup> durante 48 horas para eliminación de materia orgánica, arcillas y carbonatos y facilitar su disgregación.

### **Contenido en materia orgánica**

El porcentaje de materia orgánica (%MO) se determinó por la pérdida de peso después de ignición (LOI) a 500°C en una mufla durante 4 h en los laboratorios de Metalurgia de la Universidad de Atacama.

### **Análisis granulométrico**

Los sedimentos secos fueron separados haciéndolos pasar por tamices con diferente luz de malla, mediante agitación manual y sin necesidad de aportar agua. Se utilizaron los tamices correspondientes a 2 mm (gravas), 1 mm (arenas muy gruesas), 500 micras (arenas gruesas), 250 micras (arenas medias), 125 micras (arenas finas), 63 micras (arenas muy finas) y el fondo, donde quedan retenidos las partículas inferiores a 63 micras (arcillas y limos, o fango), siguiendo la escala granulométrica de Wentworth (1922). Posteriormente, las cantidades en peso de cada fracción granulométrica fueron recalculadas para estimar su porcentaje y graficadas en el programa *Excel de Microsoft Office*.

### **Análisis microfaunístico**

Una vez disgregado el sedimento se procedió a realizar el levigado de las muestras en húmedo a través de las fracciones de 500 micras, 250 micras y 125 micras. La separación de la fracción granulométrica de 500 micras fue llevada a cabo para eliminar la fracción gruesa, donde no se suele encontrar microfauna, pero dificulta la observación bajo lupa binocular. De la misma forma, la fracción inferior a 125 micras fue despreciada, al dificultarse en gran medida la identificación y clasificación de especímenes de dimensiones tan pequeña. Una vez levigadas, las fracciones fueron extraídas de los tamices y secadas en una estufa térmica en recipientes cerámicos y a temperatura constante de 40°C para evitar la precipitación de sales. El proceso de secado duró entre 24h y 48h y finalizó una vez toda el agua se hubiera evaporado. Finalmente, la fracción granulométrica de cada muestra y fracción levigada fue embolsada y etiquetada en bolsas de plástico con autocierre para su posterior análisis.

### **Separación, identificación de especies y cuantificación**

Los sedimentos correspondientes a las fracciones de 125 y 250 micras fueron analizados para la identificación de los especímenes de foraminíferos con ayuda de una celdilla de contaje y un microscopio binocular Leica SAPO (Fig. 3). Se contó cada ejemplar y se identificó cada taxón hasta llegar a los 5 gr de muestra revisados, o a un número de 300 ejemplares. La mayor parte de los trabajos indican que esta cantidad de especímenes y gramos de muestras son representativas de la comunidad existente (p. ej., Laprida, 1997). Posteriormente, se procedió a recalcular el número total de ejemplares por muestra y especie considerando el peso total de la fracción de muestra analizado y del resto para cuantificarlos en su totalidad. Al mismo tiempo que se realizaba el contaje y clasificación de los ejemplares se procedió a la extracción de los taxones más significativos en celdillas y el fotografiado de todos ellos mediante una cámara acoplada a la lupa modelo Flexacam C3 Leica, incluyendo otros grupos faunísticos, como ostrácodos, briozoos, equinodermos o esponjas.



Figura 3. Fotografías de la lupa binocular, bandeja de conteo y celdillas durante el proceso de identificación, fotografiado y extracción de ejemplares de microfauna.

### Sistemática

Para llevar a cabo esta tarea se realizó una búsqueda bibliográfica previa destinada a identificar las claves y aspectos morfológicos de estos grupos. Se utilizaron como trabajos de referencia los realizados en la zona de Perú y Chile por Ingle *et al.* (1980), Zapata *et al.* (1995), Paéz *et al.* (2001), Figueroa *et al.* (2005), Erdem y Schönfeld (2017), Finger *et al.* (2013) y Tavera *et al.* (2022), aunque fue necesario revisar publicaciones de Argentina y todo el Pacífico para identificar algunos taxones no descritos en la zona de estudio. Finalmente, la consulta de la base de datos de “*Word Register of Marine Species*” (WORMS; Ah Yong *et al.*, 2024) fue muy útil a la hora de comprobar la identificación y la sistemática de las especies, así como para solucionar problemas derivados de la redefinición de taxones y sinonimia. El número total de ejemplares por especie identificada fue trasladada a una tabla *Excel* para facilitar el uso ordenado y sistemático de los datos.

### Índices de diversidad y abundancia

Los datos de abundancia del número de individuos fueron utilizados para calcular dos índices. Por un lado, el índice de Diversidad de Simpson es una herramienta que se emplea para evaluar o medir la diversidad de especies presentes en un área determinada. Utiliza datos de abundancia relativa para su cálculo.

Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$D = \sum (P_i)^2$$

$$\lambda = 1 - D$$

Donde:

$\lambda$  = Índice de Simpson inverso.

D = Índice de dominancia de Simpson.

Pi = Abundancia relativa.

El índice de dominancia de Simpson (D) hace referencia a un índice de diversidad alfa utilizado para calcular la probabilidad de que dos individuos que se seleccionen al azar dentro de una muestra pertenezcan a la misma especie. Sin embargo, la interpretación de los resultados es más sencilla si se utiliza para ello el inverso del índice de Simpson ( $\lambda$ ).

La significancia de los valores del índice de Simpson inverso se recoge en la siguiente tabla:

*Tabla 1. Significancia de los valores del índice de Simpson ( $\lambda$ ).*

<b>Valores</b>	<b>Significancia</b>
<b>0 – 0,33</b>	Diversidad baja
<b>0,34 – 0,66</b>	Diversidad media
<b>&gt;0,67</b>	Diversidad alta

## **RESULTADOS**

### **Descripción de las muestras y contexto ambiental**

Como ya se ha mencionado en la sección de metodología, las muestras se han tomado a lo largo de un segmento costero del Desierto de Atacama meridional de 400 km de longitud. Aunque la proximidad la costa y el contexto ambiental es parecido, es normal que posean diferencias importantes en aspectos como tamaño de grano, contenido en materia orgánica, o en la presencia de malacofauna y de otros grupos faunísticos con caparazón calcáreo que hayan quedado conservados en los sedimentos.

A continuación, se procede a describir las principales características de las muestras y localización en que se recolectaron, de norte a sur (Fig. 4).

- **Pan de Azúcar (Estación S13)**: la muestra fue tomada a 10 m de profundidad en una pequeña bahía, donde desemboca la Quebrada de Pan de Azúcar. Muy cerca se encuentra un poblado de pescadores y la zona de zarpado de botes, aunque la estación se localiza en plena zona protegida del P.N. Pan de Azúcar. La estación se encuentra en la salida de la bahía, junto a un acantilado bastante escarpado. Por lo tanto, se trata de una zona de hidrodinámica moderada, o incluso alta, y expuesta al oleaje del SO, que transporta por carga de fondo hacia la costa el material sedimentario disponible.

La muestra se puede clasificar como una arena muy gruesa y gravosa desde un punto de vista textural. Su distribución granulométrica es unimodal, con una tenue asimetría hacia tamaños de granos más

finos. Predominan las arenas muy gruesas y gruesas (80%), con porcentajes importantes de gravas (> 15%), que están formada por fragmentos de roca. Las cantidades de fangos y arenas medias a muy finas son pequeñas (<5%). El contenido en materia orgánica es moderado, aunque superior a la media de las muestras (3,4%).

- **Flamenco (Estación S22):** la muestra fue tomada a 7 m de profundidad en la zona centro-sur de una pequeña bahía denominada Puerto Flamenco. En su zona central desemboca una gran quebrada, que permanece inactiva la mayor parte del tiempo por la extrema aridez de la zona. Se localiza cerca un asentamiento irregular de viviendas de baja calidad estructural y arquitectónica, donde los habitantes de la región se concentran en verano. La zona no dispone de alcantarillado ni ninguna estación depuradora de aguas servidas, utilizándose pozos negros de forma generalizada. Al igual que en el caso anterior, la zona se encuentra en el extremo sur de la ensenada, esta vez alcanzando el oleaje del SO muy refractado este sector y predominando condiciones de hidrodinámica de moderadas a baja.

La muestra se puede clasificar como una arena fina desde un punto de vista textural. Presenta una distribución unimodal y bastante simétrica, con predominio de las arenas finas (63%) y cantidades importantes de arenas muy finas (~20%) y medias (12%). El resto de los tamaños de grano no alcanzan porcentajes significativos. Su contenido en materia orgánica es moderado (2,4%), ligeramente inferior a la media de las muestras.

- **Casas Blancas (Estación S15):** la muestra fue tomada a 9,3 m de profundidad en el centro de una pequeña y estrecha ensenada delimitada por espolones, sin formación de playas arenosas en la barrera litoral, donde predomina el afloramiento del sustrato rocoso. Es una zona de hidrodinámica de moderada a baja, relativamente protegida del oleaje dominante. No está ocupada por instalaciones industriales ni poblaciones cercana, pero sí se encuentra próxima (a menos de 2 km) del Puerto de Caldera, el más importante de la región, del gran asentamiento irregular de Ramada y algunas plantas de almacenamiento de combustible. Se trata, por tanto, de una de las áreas con mayor probabilidad de encontrarse degradada desde un punto de vista ambiental de todas las estudiadas en este trabajo.

La muestra presenta características muy similares a la anterior, como distribución unimodal y bastante simétrica, con un claro predominio de las arenas finas (63%) y cantidades importantes de arenas muy finas (~11%). El resto de los tamaños de grano no alcanzan porcentajes significativos. Su contenido en materia orgánica es moderado (2,3%), es decir, por debajo de la media. Las características

sedimentológicas reflejan una vez más condiciones de hidrodinámica moderada a baja, pero suficientes para movilizar las arenas que alcanzan la bahía procedente del S y SO.

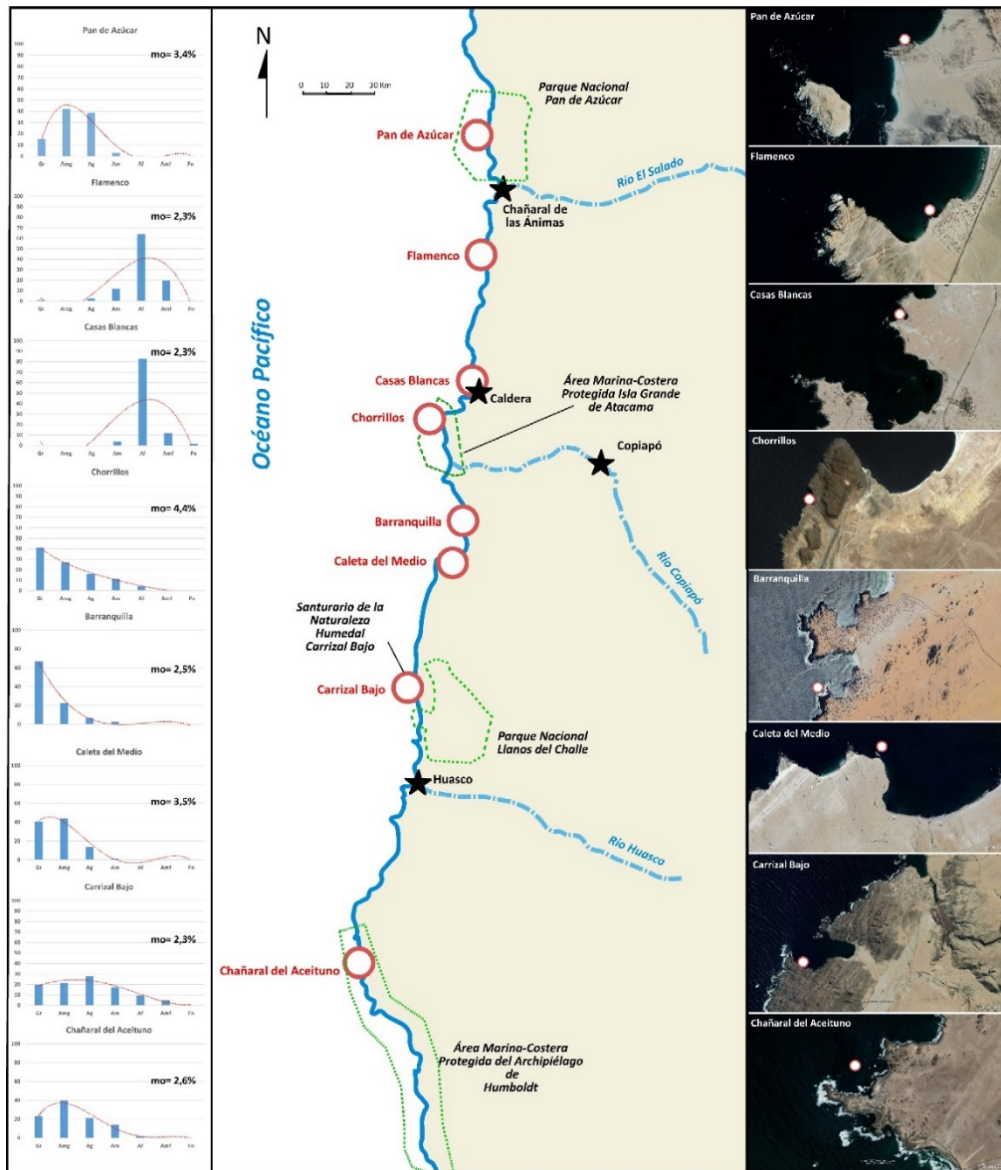


Figura 4. Localización de las muestras a lo largo de la zona de estudio (círculo rojo), con gráficos de distribución granulométrica con curva de tendencia polinomial (izquierda) y fotografía aérea a color del área de detalle de la zona de muestreo (derecha) (fuente Google Earth). Se indica el contenido de materia orgánica de cada muestra, las poblaciones más relevantes (estrellas) y la delimitación aproximada de las diferentes figuras de protección ambiental establecidas en este segmento costero (línea verde punteada).

- **Chorrillos (Estación S24):** la muestra fue tomada a 9,5 m de profundidad en el centro de una pequeña y estrecha ensenada, que se forma en la desembocadura de la Quebrada El Chango. Como en los casos anteriores, presenta morfología estrecha y alargada y se encuentra protegida de oleaje por salientes rocosos de cierta altura. Todo el sector se encuentra dominado por grandes acantilados, sin apenas sistemas fluviales de importancia que aporten agua dulce o sedimento a la zona costera.

Los trenes de oleaje entran desde el SO y se refractan en el interior de la bahía, aunque la situación de la estación, en la zona externa de la bahía permite condiciones de hidrodinámica muy intensa. La zona se encuentra en plena Área Marina Costera de Usos Múltiples de Isla Grande de Atacama y goza de protección ambiental. No existen asentamientos humanos ni infraestructuras cercanos.

La muestra puede clasificarse texturalmente como arenas gravosas y presenta una marcada distribución unimodal, pero asimétrica hacia tamaños de grano más finos disminuyendo el porcentaje de cada fracción a medida que se hace más pequeño el tamaño de grano. Predominan las gravas (40%) y las arenas muy gruesas y gruesas (~42%), con cantidades significativas de arenas medias (11%). Dentro del tamaño gravas, un porcentaje importante se corresponden con restos de gasterópodos bien conservados (turritélidos). Su contenido en materia orgánica es más elevado que en resto de las muestras (4,4%).

- **Barranquilla (Estación S23):** la muestra fue tomada a 9,9 m de profundidad en el borde meridional y externo de una ensenada de costas acantiladas y rocosas, con formación de playas de arenas y bolos en el litoral. La zona se encuentra muy expuesta al oleaje dominante del SO, que entra en la bahía justo en la zona de la estación de muestreo. El área está muy próxima al asentamiento irregular de Barranquilla, uno de los más antiguos y grandes de la región. El vertido de aguas residuales al mar es frecuente en este sector, así como la actividad de pescadores artesanales.

La muestra puede clasificarse texturalmente como una grava arenosa, con una distribución unimodal y fuertemente asimétrica dominada por las partículas de gravas (>65%), formadas predominantemente fragmentos de rocas. Excepto las arenas muy gruesas (>20%), el resto de tamaño de granos poseen porcentajes muy bajo. Los fangos y las arenas finas están prácticamente ausentes. El contenido en materia orgánica es moderado (2,5%) e inferior a la media. Como en casos anteriores, las características sedimentológicas de la muestra indican condiciones de hidrodinámica intensa, donde se acumulan las partículas y en el que el régimen de corrientes y oleaje evita la acumulación de sedimentos arenosos y finos.

- **Caleta del Medio (Estación S18):** la muestra fue tomada a 11 m de profundidad en el extremo sur de una gran bahía, en las proximidades de un acantilado rocoso y expuesta a la acción directa del oleaje dominante del SO. En la zona se localizan algunos pequeños hoteles localizados directamente en la costa y casas de pescadores, pero, en general se encuentra escasamente ocupada. Existen también en la zona varios puntos de cultivo del ostión (*Argopecten purpuratus*). Destaca su proximidad a Bahía



Salada, tan sólo 5 Km al NO, área de gran valor ecológico por la presencia de la tortuga negra (*Chelonia midas*) y pastos marinos, si bien no goza en la actualidad de ninguna figura de protección ambiental.

Desde un punto de vista textural, la muestra puede clasificarse como una arena gravosa. Presenta distribución unimodal, fuertemente asimétrica, con predominio de tamaño de grano arena muy gruesa (44%) y grava (41%), con contenidos significativos de arenas gruesas (13%). Las partículas más gruesas son fragmentos líticos. El resto de los tamaños de granos apenas tienen presencia en la muestra. El contenido en materia orgánica es elevado y superior a la media del resto de muestras (3,5%).

- **Carrizal Bajo (Estación S17):** La muestra fue tomada a 12 m de profundidad en el sector meridional y externo de una bahía estrecha y alargada con costas acantiladas y rocosas. En la zona central se forma una palaya de bolos. Esta zona está localizada a tan sólo 2,5 km al SO de la desembocadura de la Quebrada de Carrizal, donde se forma un sistema de humedal costero y una laguna de importante biodiversidad que está protegida bajo la figura de Santuario de la Naturaleza. Además, se encuentra muy próxima al límite norte del P.N. de Llanos del Challe. Por otro lado, la localidad de Carrizal bajo, de cierta importancia pesquera y turística, y antigua zona minera, se ubica a muy corta distancia.

La muestra se clasifica como una arena gravosa, con contenidos >20% de gravas, arenas muy gruesas y gruesas. Los porcentajes de arenas medias (17%) y finas (9%) también son significativos. Las arenas muy finas y fangos están casi ausentes. La curva granulométrica muestra una distribución unimodal y geometría muy plana, pero ligeramente asimétrica hacia tamaños más finos. El contenido en materia orgánica es moderado e inferior a la media del resto de muestras (2,3%). La localización de la muestra y su granulometría indican una situación en una zona de hidrodinámica de moderada a baja, con transporte activo de sedimentos y escasa sedimentación de partículas más finas, aunque con presencia de todas las poblaciones granulométricas.

- **Chañaral del Aceituno (Estación S16):** La muestra fue tomada a 11 m de profundidad en el sector central de la Caleta de Chañaral, en una zona expuesta al oleaje del SO y relativamente alejada de la costa. Como en otros casos, predominan los acantilados rocosos y el segmento costero no desarrolla playas arenosas importantes, Se encuentra muy cerca de la localidad del mismo nombre, zona de interés turístico por el avistamiento de cetáceos y pesca artesanal, con intenso movimiento de embarcaciones durante todo el año. La zona se encuentra protegida bajo la figura de Área Marina Costera del Archipiélago de Humboldt desde hace 4 años.

La muestra se clasifica como una arena gravosa, con predominio de los tamaños de granos de arena muy gruesa (~40%), gravas formadas por fragmentos líticos (23%) y arenas gruesas (21%). Aunque las arenas medias alcanzan el 13% de total, el resto de las poblaciones granulométricas, incluido los fangos, son casi inexistentes. La curva es unimodal y simétrica, mientras que el contenido en materia orgánica es moderado e inferior a la media del resto de muestras (2,6%). Las características de la zona de muestreo y la granulometría reflejan condiciones de hidrodinámica moderada y activa, con transporte y acumulación de arenas gruesas y gravas, y continua movilización de arenas y material sedimentario más fino.

### **Sistemática**

En la clasificación de los diferentes taxones identificados en las muestras, atendiendo a la limitada extensión de la memoria, sólo se incluye las especies mejor representadas en las estaciones de muestreo (en negrita). El resto sólo serán mencionadas y figuradas en las láminas (Fig. 5 y 6).

Reino: Chromista

Subreino: Harosa

Infrareino: Rhizaria

Filo: Foraminifera

Clase: Globothalamea Pawlowski, Holzmann & Tyszka, 2013

Subclase: Rotaliana Mikhalevich, 1980

Orden: Rotaliida Lankester, 1885

Familia: Ammoniidae Saidova, 1981

Género: *Ammonia* Brünnich, 1771

***Ammonia becarii*** (Linnaeus, 1785) (Fig. 5.1)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla, Carrizal, y Chañaral.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera trocoespiral con la última cámara evoluta. Su ornamentación se caracteriza por costillas radiales muy marcadas que nacen de un punto central compacto.

Género: *Anomalinoidea*

***Anomalinoidea incrassatus*** (Fichtel & Moll, 1798)  
(Fig. 5.2)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla, Caleta del Medio, Carrizal y Chañaral.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera planoespiral con la última cámara evoluta. Las cámaras son infladas en la parte superior pero planas en la parte dorsal y las suturas son muy marcadas. Su ornamentación se caracteriza por porosidad marcada en la superficie. La mayoría presenta una especie de burbuja blanca en la superficie.

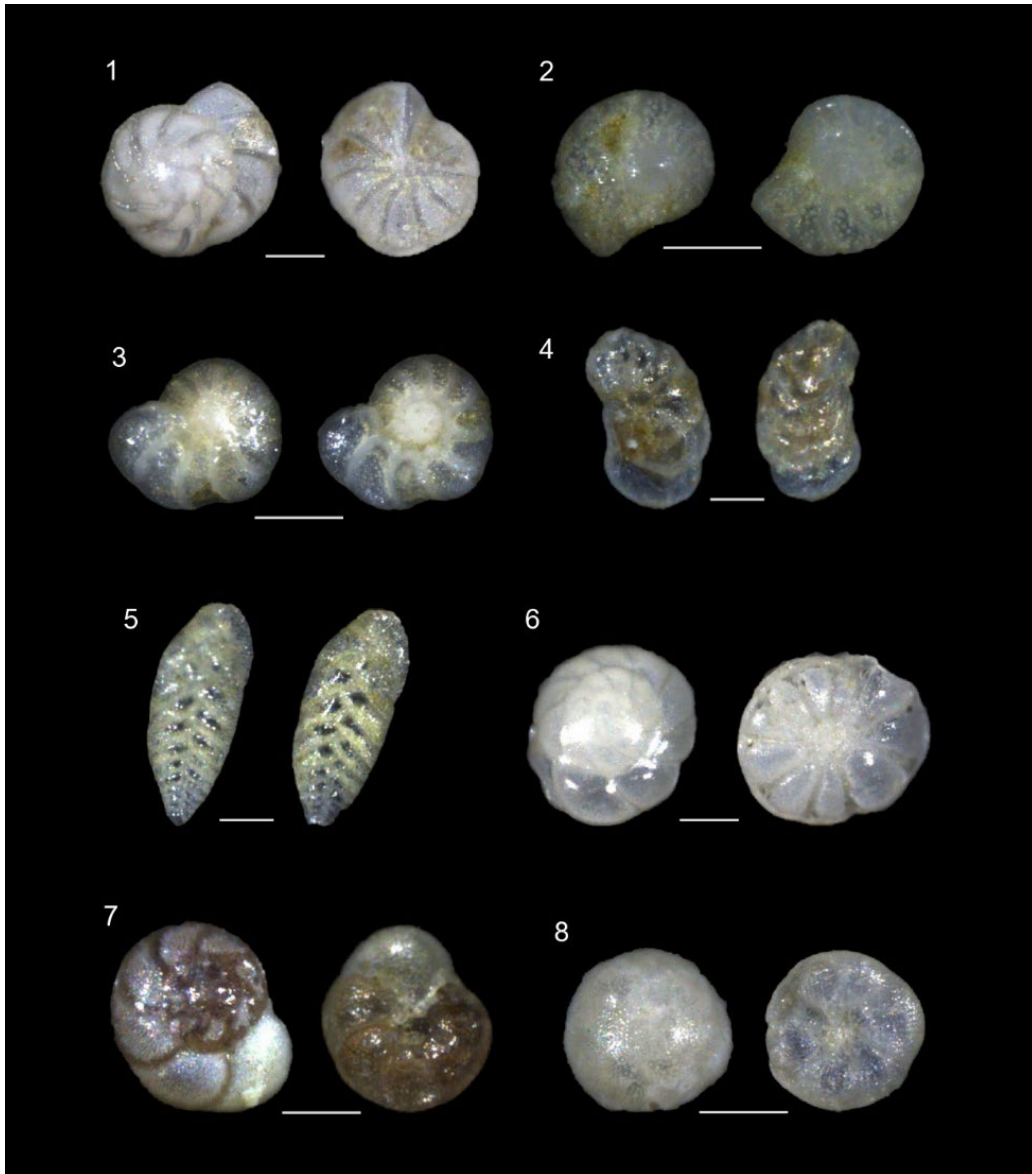


Figura 5. Lámina con imágenes con la vista dorsal y umbilical de especies de foraminíferos: 1) *Ammonia becarii*; 2) *Anomalinoidea incrassatus*; 3) *Anomalinoidea io*; 4) *Astacolus sp.*; 5) *Bolivina sp.*; 6) *Buccella peruviana*; 7) *Cibicides aknerianus*; 8) *Cibicides moyanoi*. La escala gráfica representa 100  $\mu\text{m}$ .

*Anomalinoidea io* (Cushman, 1931) (Fig. 5.3)

Muestras: Pan de Azúcar, Casas Blancas, Chorrillos, Carrizal bajo y Chañaral del Aceituno.

*Anomalinoidea praeacutus* (Vasilenko, 1950)

Muestras: Pan de Azúcar, Chorrillos y Chañaral del Aceituno.

Familia: Bolivinitinae Cushman, 1927  
Género: *Bolivina* d'Orbigny, 1839  
*Bolivina* sp. (Fig. 5.5)

Muestras: Pan de Azúcar, Chorrillos y Chañaral del Aceituno.

Familia: Cancrisidae Chapman, Parr & Collins, 1934  
Género: *Valvulineria* Cushman, 1926  
*Valvulineria inflata* (d'Orbigny, 1839)

Muestras: Chorrillos y Carrizal bajo.

Familia: Cibicididae Cushman, 1927  
Género: *Cibicides* Montfort, 1808  
*Cibicides aknerianus* (d'Orbigny, 1846) (Fig. 5.7)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla, Caleta del Medio, Carrizal, y Chañaral de Aceituno.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera trocoespiral con la última cámara evoluta. Las cámaras son infladas en la región posterior. Su ornamentación se caracteriza por porosidad en la superficie y un hueco muy marcado en el plano umbilical.

*Cibicides moyanoi* Figueroa, Marchant, Giglio & Ramírez, 2005 (Fig. 5.8)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla, Carrizal, y Chañaral de Aceituno.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera trocoespiral con la última cámara involuta. Tiene una forma bastante esférica y un gran hueco en el plano umbilical. Su ornamentación se caracteriza por porosidad en la superficie.

Género: *Cibicoides* Thalmann, 1939  
*Cibicoides variabilis* (d'Orbigny, 1826)

Muestras: Chorrillos y Chañaral del Aceituno.

*Cibicoides wuellerstorfi* (Schwager, 1866)

Muestras: Chorrillos.

Género: *Heterolepa* Franzenau, 1884

*Heterolepa ornata* (Cushman, 1921)

Muestras: Carrizal bajo.

Género: *Lobatula* Fleming, 1828

***Lobatula lobatula*** (Walker & Jacob, 1798)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla, Chañaral de Aceituno.

*Descripción:* Se trata de una especie con concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera planoespiral con la última cámara involuta. Sus cámaras son amplias y abultadas y parten de un punto que se sitúa en el centro de la concha. Las suturas son evidentes y la última cámara presenta una forma redondeada. Su ornamentación se caracteriza por marcadas porosidad.

Familia: Discorbidae Ehrenberg, 1838

Género: *Discorbis* Lamarck, 1804

*Discorbis vilardeboanus* (d'Orbigny, 1839) (Fig. 6.1)

Muestras: Carrizal, Chañaral de Aceituno.

*Hanzawaia boueana* (d'Orbigny, 1846)

Muestras: Pan de Azúcar.

Familia: Melonidae Holzmann & Pawlowski, 2017

Género: *Melonis* Montfort, 1808

*Melonis affinis* (Reuss, 1851) (Fig. 6.3)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Carrizal bajo y Chañaral del Aceituno.

Familia: Notorotalidae

Género: *Buccella*

***Buccella peruviana*** (D'Orbigny, 1839) (Fig. 5.1)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla, Caleta del Medio, Chañaral de Aceituno.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera trocoespiral con la última cámara evoluta. Su ornamentación se caracteriza por cámaras globosas dispuestas alrededor de un ombligo muy marcado y un margen periférico muy marcado.

Familia: Planulinidae Bermúdez, 1952

Género: *Planulina* d'Orbigny, 1826

***Planulina ariminensis*** d'Orbigny, 1826 (Fig. 6.2)

Muestras: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Barranquilla y Chañaral del Aceituno.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera trocoespiral con la última cámara involuta. Es una concha con cámaras muy planas por ambos lados, las cuales están muy bien delimitadas por septos. La ornamentación se caracteriza por una alta porosidad.



Figura 6. Lámina con imágenes con vista dorsal y umbilical de especies de foraminíferos: 1) *Discorbis vilardeboanus*; 2) *Planulina ariminensis*; 3) *Melonis affinis*; 4) *Rosalina globularis*; 5) *Valvulineria inflata*; 6) *Triloculina trigonula*; 7) *Quinqueloculina seminulum*; 8) *Lepidodeuterammina ochracea*. La escala gráfica representa 100  $\mu\text{m}$ .

*Planulina wheeleri* Stainforth & Stevenson, 1946

Muestras: Chorrillos.

Familia: Rosalinidae  
Género: *Rosalina* d'Orbigny, 1826  
*Rosalina* sp.

Muestras: Pan de Azúcar.

***Rosalina globularis*** d'Orbigny, 1826 (Fig. 6.4)

Muestras: Flamenco, Casas Blancas, Chorrillos, Carrizal bajo y Chañaral del Aceituno.

*Descripción:* Esta especie presenta una concha multilocular cuyas cámaras están dispuestas de manera trocoespiral con la última cámara evoluta. Su ornamentación se caracteriza por porosidad en la superficie y suturas muy marcadas en la zona umbilical que generan leve separación entre las cámaras.

Subclase: Textulariana Mikhalevich, 1980  
Orden: Lituolida Lankester, 1885  
Familia: Trochamminidae Schwager, 1877  
Género: *Lepidodeuteramma* Brönnimann & Whittaker, 1983  
*Lepidodeuteramma ochracea* (Williamson, 1858)  
(Fig. 6.8)

Muestras: Chorrillos, Barranquilla y Chañaral del Aceituno.

Subclase: Nodosariana Mikhalevich, 1993  
Orden: Vaginulinida Mikhalevich, 1993  
Familia: Vaginulinidae Reuss, 1860  
Género: *Astacolus* Montfort, 1808  
*Astacolus* sp. (Fig. 5.4)

Muestras: Pan de Azúcar.

Clase: Tubothalamea Pawlowski, Holzmann & Tyszka, 2013  
Orden: Miliolida Delage & Hérouard, 1896  
Suborden: Miliolina -  
Familia: Hauerinidae Schwager, 1876  
Género: *Quinqueloculina*  
*Quinqueloculina* d'Orbigny, 1826

Muestra: Casas Blancas, Chorrillos, Caleta del Medio, Carrizal bajo y Chañaral del Aceituno.

*Descripción:* Las conchas presentan un crecimiento con una especial disposición denominada espiroloculinoide o agatistega. Tienen una única apertura y presentan un aspecto porcelanáceo. El aspecto general de la concha es alargado.

***Quinqueloculina seminulum*** (Linnaeus, 1758) (Fig. 6.7)

Muestra: Pan de Azúcar, Flamenco, Casas Blancas, Barranquilla, Caleta del Medio, Carrizal bajo y Chañaral del Aceituno.

*Descripción:* Las conchas presentan un crecimiento con una especial disposición denominada espiroloculinoide o agatistega. Tienen una única apertura y presentan un aspecto porcelanáceo. El aspecto general de la concha es alargado con la superficie lisa.

Familia: Hauerinidae Hauerinidae Schwager, 1876

Género: *Triloculina* d'Orbigny, 1826

***Triloculina trigonula*** (Lamarck, 1804) (Fig. 6.6)

Muestra: Pan de Azúcar y Caleta del Medio.

*Triloculina planciana* d'Orbigny, 1839

Muestra: Carrizal Bajo.

### Distribución y abundancia de especies

Se procede a continuación a describir la abundancia de especímenes, números de especies y asociaciones dominantes en cada muestra (Tabla 2).

Tabla 2. Especies y número de individuos en cada estación de muestreo.

	Especie	Pan de Azúcar	Flamenco	Casas Blancas	Chorrillos	Barranquilla	Caleta del Medio	Carrizal Bajo	Chañaral del Aceituno
Foraminíferos	<i>Ammonia beccarii</i>	22	790	2585	763	217	-	278	81
	<i>Anomalinooides incrassatus</i>	5	3160	2046	294	27	14	959	67
	<i>Anomalinooides io</i>	2	-	682	35	-	-	360	22
	<i>Anomalinooides praeacutus</i>	2	-	-	165	-	-	-	11
	<i>Astacolus</i> sp.	1	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Bolivina</i> sp.	1	-	-	69	-	-	-	11
	<i>Buccella peruviana</i>	11	4151	2154	459	106	-	278	104
	<i>Cibicides aknerianus</i>	2	790	1364	130	18	14	479	33
	<i>Cibicides moyanoi</i>	2	1580	4145	791	53	-	240	45
	<i>Cibicoides variabilis</i>	-	-	-	35	-	-	-	32
	<i>Cibicoides wuellerstorfi</i>	-	-	-	35	-	-	-	-
	<i>Discorbis vilardeboanus</i>	-	-	-	-	-	-	120	11
	<i>Hanzawaia boueana</i>	2	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Heterolepa ornata</i>	-	-	-	-	-	-	120	-
	<i>Lepidodeuterammina ochracea</i>	-	-	-	22	9	-	-	111
	<i>Lobatula lobatula</i>	2	790	341	22	9	-	-	27
	<i>Melonis affinis</i>	1	790	-	-	-	-	480	22
	<i>Planulina ariminensis</i>	3	790	709	186	11	-	-	83
	<i>Planulina wheeleri</i>	-	-	-	35	-	-	-	-
	<i>Quinqueloculina seminulum</i>	2	402	81	-	9	14	120	22
	<i>Quinqueloculina</i> sp.	-	-	395	263	-	28	57	83
	<i>Rosalina</i> sp.	1	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Rosalina globularis</i>	-	790	368	143	-	-	240	56
	<i>Triloculina planciana</i>	-	-	-	-	-	-	120	-
	<i>Triloculina trigonula</i>	2	-	-	-	-	4	-	-
	<i>Valvulineria inflata</i>	-	-	-	22	-	-	120	-
<b>Total especies (media 13)</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	
<b>Total Individuos (media 4720)</b>	<b>57</b>	<b>14032</b>	<b>14869</b>	<b>3466</b>	<b>457</b>	<b>74</b>	<b>3970</b>	<b>822</b>	



- *Estación S13 (Pan de Azúcar)*: Se caracteriza por la baja abundancia de especímenes de foraminíferos, muy por debajo de la media. La diversidad de los foraminíferos, sin embargo, es ligeramente superior a la media (16 especies), con una asociación dominada por *A. beccarii* y *B. peruviana*, con aparición común de otros taxones secundarios como *A. incrassatus* y *P. ariminensis* (Tabla 2 y Fig. 7 izq.).

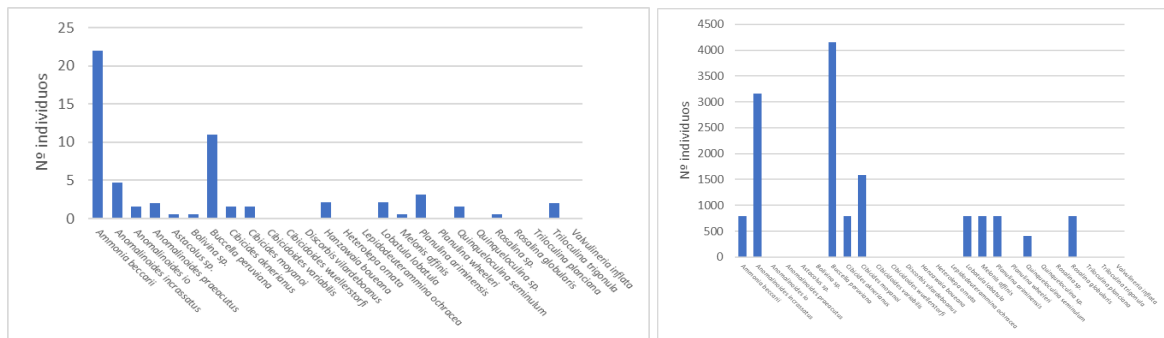


Figura 7. Especies y número de individuos de foraminíferos en Pan de Azúcar (izquierda) y Flamenco (derecha)

- *Estación S22 (Flamenco)*: La muestra presenta una gran abundancia de especímenes de foraminíferos, muy por encima de la media. El número de especies es ligeramente inferior respecto a la media. La asociación está dominada por *B. peruviana* y *Cibicides* spp., con presencia común de *A. beccarii*, *L. lobatula*, *M. affinis*, *P. ariminensis* y *R. globularis* (Tabla 2 y Fig. 7 der.).

- *Estación S15 (Casas Blancas)*: Presenta una gran abundancia de especímenes de foraminíferos, muy por encima de la media. El número de especies es ligeramente inferior en foraminíferos en comparación a la media. Los taxones dominantes son *Cibicides* spp., *A. beccarii* y *B. peruviana*, con presencia secundaria de *A. io* y *P. ariminensis* (Tabla 2 y Fig. 8 izq.).

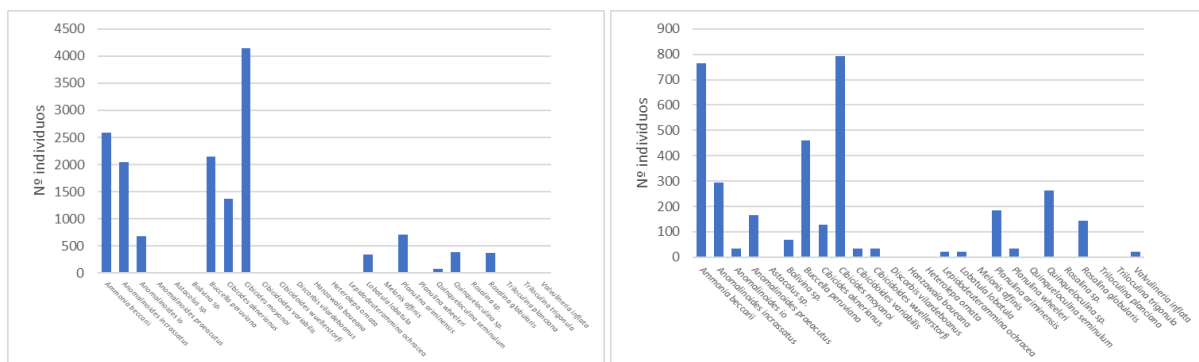


Figura 8. Especies y número de individuos de foraminíferos en Casas Blancas (izquierda) y Chorrillos (derecha).

- *Estación S24 (Chorrillos)*: La muestra presenta abundancia de individuos de foraminíferos ligeramente menor a la media. La asociación está dominada por *Cibicides* spp., *A. beccarii* y *B. peruviana*, con presencia común de *Q. seminulum* y *Anomalinoidea* spp. (Tabla 2 y Fig. 8 der.).

- *Estación S23 (Barranquilla)*: La muestra se caracteriza por un menor número de especies e individuos de foraminíferos respecto a la media de todas las muestras. En la asociación de foraminíferos destacan por su abundancia *A. beccarii*, *B. peruviana* y *Cibicides* spp. (Tabla 2 y Fig. 9 izq).

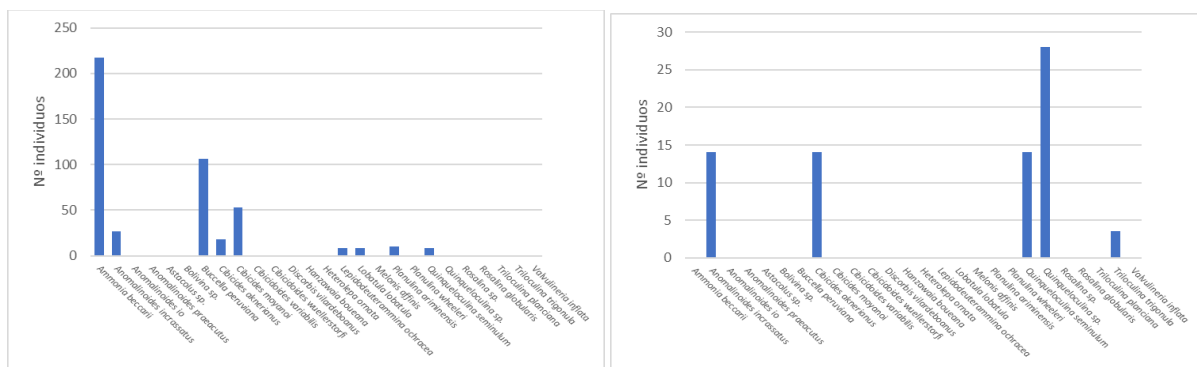


Figura 9. Especies y número de individuos de foraminíferos en Barranquilla (izquierda) y Caleta del Medio (derecha).

- *Estación S18 (Caleta del Medio)*: Como en el caso anterior, la muestra se caracteriza por un menor número de especies y un mucho menor número de individuos de foraminíferos respecto al resto de las muestras. Los taxones dominantes son *Quinqueloculina* spp., acompañada de *Cibicides* spp. (Tabla 2 y Fig. 9 der.).

- *Estación S17 (Carrizal Bajo)*: la muestra de Carrizal es una de las que muestra mayor abundancia y diversidad entre los foraminíferos. La asociación de foraminíferos está dominada con claridad por *Anomalinoidea* spp., con aparición muy común de *M. affinis* y *C. aknerianus* (Tabla 2 y Fig. 10 izq.).

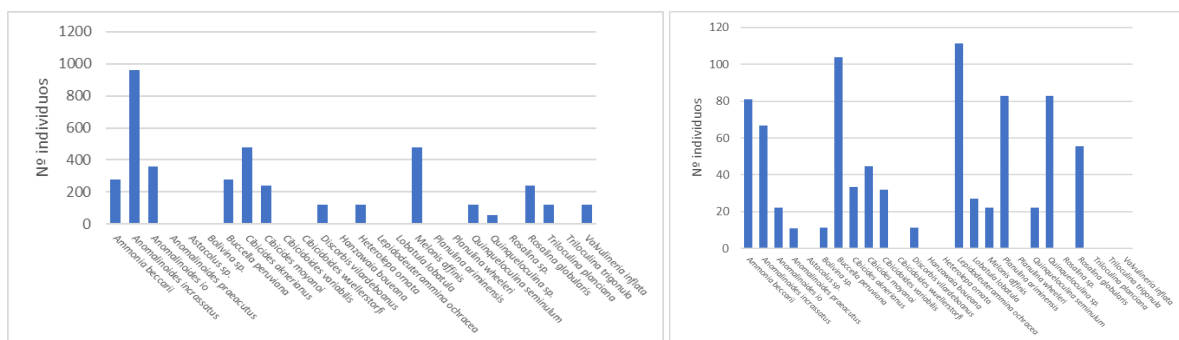


Figura 10. Especies y número de individuos de foraminíferos en Carrizal Bajo (izquierda) y Chañaral del Aceituno (derecha).

- Estación S16 (Chañaral de Aceituno): Esta muestra presenta número de especies de foraminíferos muy superior a la media y abundancias considerablemente más bajas. No existen un taxón dominante, aunque destaca *L. ochracea*, *B. peruviana*, *P. ariminensis* y *Quinqueloculina* sp. (Tabla 2 y Fig. 10 der.).

## DISCUSIÓN

Se han calculado los índices de diversidad de Simpson y dominancia de todas las muestras (Tabla 3). En general se observan valores que reflejan la presencia de comunidades diversas y escenarios en los que no existen taxones con alta dominancia en estas comunidades lo que podría permitir inferir condiciones de bajo estrés ambiental. Tan sólo la estación de muestreo de Caleta del Medio arroja valores anómalos, que serán analizados con detalle más tarde.

Tabla 3. Valores de dominancia y del índice de Simpson inverso para cada estación de muestreo.

Muestra	D	Índice de Simpson
Chorrillos	0,14	0,86
Pan de Azúcar	0,12	0,88
Chañaral de Aceituno	0,09	0,91
Caleta del Medio	0,44	0,56
Carrizal	0,10	0,90
Casas Blancas	0,21	0,79
Barranquilla	0,28	0,72
Flamenco	0,20	0,80

Existe una amplia heterogeneidad en las asociaciones de foraminíferos, diversidad y abundancia en cada estación de muestreo. La abundancia de individuos por gramo de foraminíferos varía entre 150 ind/g y 0,6 gr/ind. No existen trabajos en el norte Chile donde comparar estos valores con otros casos de estudio, aunque son claramente inferiores a los referidos para la fauna de foraminíferos en el área marina somera de Mejillones (norte de Chile) por Páez *et al.* (2001), que indican 750 ind/g a 56 m de profundidad. Esta circunstancia puede deberse a la profundidad del ambiente y las condiciones de hidrodinámica y sustrato grueso de las estaciones de muestreo, más inadecuadas para la proliferación de foraminíferos que la del estudio antes mencionado (Hromic, 2007).

Entre los foraminíferos se produce un claro predominio de *Cibicides* spp. *B. peruviana*, *A. incrassatus* y *A. beccarii* en casi todas las muestras, con presencia común, o incluso especímenes abundantes, de *L. lobatula*, *P. ariminensis*, *Quinqueloculina* spp. y *R. globularis*. Finger (2013) estudia la abundancia de

los principales géneros de foraminíferos bentónicos marinos de la zona centro-sur de Chile, indicando que varios de los géneros descritos como *Buccella*, *Cibicides* y *Quinqueloculina* son abundantes en zonas de plataforma marina interna. Según este autor, *Anomalinoidea* abunda en la zona de plataforma marina externa de Chile, en general a profundidades superiores a los 100 m, aunque puede aparecer en zonas someras. Su presencia conspicua en el borde costero del Desierto de Atacama debe ser revisada y analizada con más detalle en futuros trabajos. *B. peruviana*, *Q. seminula* y *Cibicides* spp., en ocasiones acompañado de *A. beccarii*, se describen de forma conjunta en bahías y estuarios de la costa atlántica de Argentina (Laprida, 1997; Laprida & Bertels-Psotka, 2003), así como en la plataforma marina somera del sur (Zapata *et al.*, 1995) y norte de Chile (Zapata & Gutiérrez, 1995) a profundidades comprendidas entre los 0 y 150 m. A su vez, el género *Buccella* está ampliamente distribuido a lo largo de la plataforma continental argentina (0-50 m) (Boltovskoy, 1980; Murray, 1991) y chilena (Romero *et al.*, 2023). La abundancia y amplia distribución de *Cibicides* spp se ha destacado en la zona marina centro-sur de Chile, especialmente a profundidades inferiores a 500 m (Figuroa *et al.*, 2005), y es considerado un buen indicador de altos niveles de oxígeno y sustratos móviles (Kaiho, 1994). La aparición de *Cibicides aknerianus* (D'Orbigny, 1846) ha sido descrita próxima a los 10 m de la Bahía de Mejillones (Páez *et al.*, 2001; Tavera *et al.*, 2022). Finalmente, *Q. seminulum* es una especie abundante en los fiordos patagónicos del sur de Chile a profundidades comprendidas entre 50 y 100 m (Hromic, 2011), pero su aparición común ha sido informada en zonas marinas someras (<50 m) del Desierto de Atacama meridional (Tavera *et al.*, 2022).

Aunque la asociación dominante de microfauna refleja condiciones marinas someras, con cierta agitación del medio y relativamente buenas condiciones de oxigenación del fondo, es evidente que existe una cierta variabilidad de la abundancia de especímenes y número de especies por muestra que podría considerarse debida a procesos de estrés ambiental u otro tipo de factores que no se están considerando en este trabajo. En los casos de la estación de Pan de Azúcar y Barranquilla la baja abundancia de individuos podría explicarse por la presencia de sustratos gruesos (gravas y arenas muy gruesas) de alta movilidad que dificulta la proliferación de la comunidad microbentónica. Un escenario opuesto se daría en las estaciones de Flamenco y Casas Blancas, de sustrato arenoso e hidrodinámica más baja, donde se superan ampliamente los 14.000 ejemplares.

De hecho, aunque los Índices de Simpson y de dominancia reflejan una relativa diversidad en todas las muestras y valores relativamente homogéneos, el caso de Caleta del Medio merece una atención especial. En esta estación el número de individuos de foraminífero no alcanza los 70 ejemplares y el número de especies es tan sólo de 5, con un claro predominio de *Quinqueloculina* spp. La abundancia

relativa de *Q. seminulum* ha sido mencionada por algunos autores como un taxón tolerante a las altas concentraciones biodisponibles de metales pesados en el norte de Portugal (Martins *et al.*, 2013). En este sentido, Valdés y Castillo (2014) llevan a cabo un análisis ambiental de la cercana Bahía Salada, deduciendo condiciones de contaminación incipiente, principalmente por zinc, asociada al cultivo del ostión, aunque destacan que no existe un nivel de stress ambiental en esta zona que revista un peligro de daño permanente para las comunidades de organismos bentónicos. Es probable que se haya experimentado un agravamiento de la contaminación de la zona en estos últimos años y que la asociación de foraminíferos la haya registrado.

## CONCLUSIONES

Se procede a enumerar las principales conclusiones del trabajo:

- Se ha realizado el análisis microfaunístico de 8 muestras de bahías y ensenadas marinas someras en la costa del Desierto de Atacama meridional en las que se han descrito 26 especies de foraminíferos bentónicos y contabilizado casi 38.000 especímenes.
- Algunas de estos taxones no han sido descritos antes en Chile, como *Anomalinoidea incrassatus* y *Astacolus* sp.
- La asociación típica de estas muestras, recolectadas en ambientes marinos someros, de sustratos de granulometría variable e hidrodinámica activa, está definido por *Cibicides* spp. *B. peruviana*, *A. incrassatus* y *A. beccarii* en casi todas las muestras, con presencia común de *L. lobatula*, *P. ariminensis*, *Quinqueloculina* spp. y *R. globularis*.
- Estas asociaciones pueden ser consideradas típicas de estos contextos ambientales, en general sin ningún tipo de evidencia de stress ambiental generada por contaminación antrópica. Las asociaciones de foraminíferos son heterogéneas en abundancia y diversidad, lo que parece principalmente controlado por el tamaño de grano del sustrato.
- Se propone que los foraminíferos son sensibles ante posibles cambios ambientales de origen antrópico. Los valores de los índices de diversidad de Simpson y Dominancia de todas las muestras denotan condiciones de diversidad normal y escasa dominancia a excepción de la muestra de Caleta del Medio. En ella la dominancia de *Quinqueloculina* y la baja abundancia de especímenes podría indicar stress ambiental y contaminación por metales pesados de las aguas, problema que puede estar agravándose en los últimos 5 años como consecuencia de la intensificación de la actividad del cultivo del ostión.

## LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Con este trabajo se pretende establecer una base con un fuerte componente taxonómico que pueda ser utilizado como una referencia para investigaciones futuras a la hora de identificar estos taxones y las condiciones ambientales de las zonas de muestreo, especialmente en lo que se refiere al uso de estas asociaciones como una referencia, o *background*, para identificar zonas no contaminadas en las costas del Desierto de Atacama. Este trabajo supone una contribución sustancial a la información existente sobre foraminíferos en el Norte de Chile ya que, a pesar de tratarse de una zona de elevada producción biológica y con características interesantes para la realización de estudios comparativos, existen escasas referencias bibliográficas en el área.

Investigaciones futuras pueden orientarse a la relación de factores que no se han discutido en este trabajo para tratar de explicar los patrones de distribución, diversidad y abundancia de especies en esta región (geoquímica, salinidad, temperatura de las aguas, pH, condiciones redox, etc.).

Haciendo referencia al estudio de un contexto más ambiental, se puede tratar de investigar de forma más específica cómo afectan las actividades de origen antrópico localizadas cerca de las ciudades principales de la zona a la diversidad de la microfauna con el objetivo de proponer, en caso de que fuera necesario, medidas adicionales de conservación y gestión de tales zonas. Un estudio que relacione la respuesta de los organismos citados en el trabajo con la presencia de diferentes contaminantes, principalmente hidrocarburos y metales pesados, podría ser una línea de investigación prometedora y con amplio margen de crecimiento e impacto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad, M.; Fernández, R.; Izquierdo, T. (2017). Geomorphic effects and sedimentological record of flash floods in the Copiapó River salt marsh (Atacama coast, Northern Chile). En: *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 10191).
- Ahyong, S.; Boyko, C.B.; Bailly, N.; et al. (2024). World Register of Marine Species. Available from <https://www.marinespecies.org> at VLIZ. doi:10.14284/170
- Arellano, F.; Quezada, L.; Olave, C. (2011). Familia Cassidulinidae (Protozoa: Foraminiferida) en canales y fiordos patagónicos chilenos. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 39(2), 47-65.
- Boltovskoy, E.; Giussani, G.; Watanabe, S.; Wright, R. (1980). Principal Factors Influencing the Benthic Foraminiferal Distribution. En: Boltovskoy, E.; Giussani, G.; Watanabe, S.; Wright, R. (eds.). *Atlas of Benthic Shelf Foraminifera of the Southwest Atlantic*, 10-11. Springer, Dordrecht.
- Bonnail, E.; Cruces, E.; Rothäusler, E.; Oses, R.; García, A.; Ulloa, C.; Navarro, N.; Rojas-Lillo, Y.; Parra Valdivia, A.; Catalán Garrido, R.; Abad, M. (2023). An Integrated Approach for the Environmental

- Characterization of a Coastal Area in the Southern Atacama Desert. *Applied Sciences*, 13(11), 6360.
- Camacho, H.H.; Longobucco, M. (2008). *Los invertebrados fósiles*. Fundación Historia Natural Félix de Azara, Buenos Aires
- Conti, M. E.; Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review. *Environmental pollution*, 114(3), 471-492.
- Davis, M.; Matmon, A.; Fink, D.; Ron, H.; Niedermann, S. (2011). Dating Pliocene lacustrine sediments in the central Jordan Valley, Israel: implications for cosmogenic burial dating. *Earth and Planetary Science Letters*, 305, 317e327.
- Desrosiers, C.; Leflaive, J.; Eulin, A.; Ten-Hage, L. (2013). Bioindicators in marine waters: Benthic diatoms as a tool to assess water quality from eutrophic to oligotrophic coastal ecosystems. *Ecological indicators*, 32, 25-34.
- D'Orbigny, A.D. (1846). *Die fossilen Foraminiferen des tertiären Beckens von Wien. Foraminifères fossiles du bassin tertiaire de Vienne*. Disponible online en: [https://archive.org/details/bub\\_gb\\_JKpAAAAAcAAJ](https://archive.org/details/bub_gb_JKpAAAAAcAAJ)
- Encinas, A.; Le Roux, J.P.; Buatois, L.A.; Nielsen, S.N.; Finger, K.L.; Fourtanier, E.; Lavenu, A. (2006). Nuevo esquema estratigráfico para los depósitos marinos mio-pliocenos del área de Navidad (33°00'-34°30'S), Chile central. *Revista geológica de Chile*, 33(2), 221-246.
- Erdem, Z.; Schönfeld, J. (2017). Pleistocene to Holocene benthic foraminiferal assemblages from the Peruvian continental margin. *Palaeontologia Electronica*, 20(2), 1-32.
- Fernández, L. (2010). Foraminíferos (Protozoa: Foraminiferida) del estuario del río Contaco (40° 33'S; 73° 43'O), Chile. *Boletín de Biodiversidad de Chile*, (4), 18-62.
- Fernández, L.D.; Zapata, J.A. (2010). Distribución de foraminíferos bentónicos (Protozoa: Foraminiferida) en la ensenada Quillaípe (41° 32'S; 72° 44'O), Chile: Implicaciones para el estudio del nivel del mar. *Revista chilena de historia natural*, 83(4), 567-583.
- Figueroa, S.; Marchant, M.; Giglio, S.; Ramírez, M. (2005). Foraminíferos bentónicos rotalínidos del centro sur de Chile (36 S-44 S). *Gayana (Concepción)*, 69(2), 329-363.
- Finger, K.L. (2013). Miocene foraminifera from the south-central coast of Chile. *Micropaleontology*, 59.
- Finger, K.L., Encinas, A., Nielsen, S.N. (2013). Comentario a 'Evidence for an Early-Middle Miocene age of the Navidad Formation (central Chile): Paleontological, paleoclimatic and tectonic implications' de Gutiérrez et al. (2013, *Andean Geology* 40 (1): 66-78). *Andean geology*, 40(3), 571-579.
- GORE (Gobierno Regional de Atacama) (2015). Fomento de la productividad del sector pesquero artesanal y acuícola de pequeña escala de la región de Atacama: Un incentivo a la diversificación acuícola. Informe final. Universidad de Atacama. Centro Regional de Investigación y Desarrollo

- Sustentable de Atacama (CRIDESAT), Copiapó. <https://goreatacama.gob.cl/wp-content/uploads/INFORME-FINAL-Fomento-de-la-productividad-del-sector-pesquero-artesanal-I-UDA.pdf>.
- 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(1), 117-128.
- Holt, E.A.; Miller, S.W. (2011). Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts. *Nature Education Knowledge*, 2(2), 8.
- Hromic, T. (1999) Foraminíferos bentónicos de canales australes de Kirke: canal Kirke, golfo Alnte. Montt y seno Última Esperanza, XIIª Región, Magallanes y Antártica chilena. *Anales Instituto Patagonia*, 91-104.
- Hromic, T. (2009). Distribución batimétrica de foraminíferos bentónicos (Protozoa: Foraminiferida) al sur del estrecho de Magallanes (52-56 S), Chile. *Anales Instituto Patagonia*, 37(1), 23-38.
- Hromic, T. (2011). Foraminíferos Bentónicos recolectados durante la expedición CIMAR 14 Fiordos, Patagonia Chilena. *Anales Instituto Patagonia*, 39(1), 75-89.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas – Chile), 2019. <https://regiones.ine.cl/atacama/sistema-estadistico-regional/atacama>.
- Ingle Jr, J.C.; Keller, G.; Kolpack, R.L. (1980). Benthic foraminiferal biofacies, sediments and water masses of the southern Peru-Chile Trench area, southeastern Pacific Ocean. *Micropaleontology*, 113-150.
- Izquierdo, T.; Abad, M.; Gómez, Y.; Gallardo, D.; Rodríguez-Vidal, J. (2021). The March 2015 catastrophic flood event and its impacts in the city of Copiapó (southern Atacama Desert). An integrated analysis to mitigate future mudflow derived damages. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102975.
- Izquierdo, T.; Rivera, A.L.; Galeano, A.; Gallardo, D.; Salas, V.; Aparicio, O.; Buylaert, J.P.; Ruiz, F.; Abad, M. (2024). Historical catastrophic floods at the southern edge of the Atacama Desert: A multi-archive reconstruction of the Copiapó river extreme events. *Global and Planetary Change*, 236, 104411.
- Kaiho, K. (1994). Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology*, 22(8), 719-722.
- Kornicker, L.S. (1975). *Antartic ostracoda (Myodocopina)*. Smithsonian contributions to zoology, 163.
- Laprida, C. (1997). Micropaleontología (Ostracodos y foraminíferos) y paleoecología del Cuaternario Tardío del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, República Argentina. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires.



- Laprida, C.; Bertels-Psotka, A. (2003). Benthic foraminifers and paleoecology of a Holocene shelly concentration, Salado Basin, Argentina. *Geobios*, 36: 559-572
- Latumahina, F.; Mardiatmoko, G. (2019). The sensitivity of ants on soil and air temperature as bioindicators of climate change in small Islands of Indonesia. *Ecology, Environment and Conservation*, 25(2), 978-984.
- Martins, V.; Yamashita, C.; Sousa, S.H.D.M.; Martins, P.; Laut, L.L.M.; Figueira, R.C.; Mahiques, M.M.; Ferreira, E.A.; Alveirinho, J.M.; Rocha, F. (2011). The response of benthic foraminifera to pollution and environmental stress in Ria de Aveiro (N Portugal). *Journal of Iberian Geology*, 37(2), 231-246.
- Murray, J.W. (2014). *Ecology and palaeoecology of benthic foraminifera*. Routledge, Londres.
- Navarro, N.; Abad, M.; Bonnail, E.; Izquierdo, T. (2021). The arid coastal wetlands of northern Chile: Towards an integrated management of highly threatened systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 948.
- Páez, M.; Zúñiga, O.; Valdés, J.; Ortlieb, L. (2001). Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micróxicos de la bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 36(2), 129-139.
- Rachal, D.M.; Zeigler, K., Dello-Russo, R., Solfisburg, C. (2021). Lake levels and trackways: an alternative model to explain the timing of human-megafauna trackway intersections, Tularosa Basin, New Mexico. *Quaternary Science Advances*, 3, 100024.
- Romero, D.; Merma-Mora, L.; Marquina, R.; Flores, G.; Quipúzcoa, L.; Solís, J.; Cardich, J. (2023). Foraminíferos bentónicos vivos de la bahía El Ferrol: un área crítica de contaminación en el centro-norte de Perú. *Revista Peruana de Biología*, 30(2), e24425.
- Ruiz, F.; Abad, M.; Galán, E.; González, I.; Aguilá, I.; Olías, M.; Gómez Ariza, J.L.; Cantano, M. (2006). The present environmental scenario of El Melah Lagoon (NE Tunisia) and its evolution to a future sabkha. *Journal of African Earth Sciences*, 44(3), 289-302.
- Sarricolea, P.; Herrera-Ossandon, M.; Meseguer-Ruiz, O. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.
- SERNAPESCA (Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura) (2012). Anuario Estadístico de Pesca 2012. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. Gobierno de Chile. <http://www.sernapesca.cl/informes/estadisticas>.
- SERNATUR (Servicio Nacional de Turismo-Chile) (2018). Plan de acción Región de Atacama, Sector Turismo. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo.
- SUBPESCA, 2013. Estado de situación de las principales pesquerías chilenas. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. Gobierno de Chile. <https://www.subpesca.cl/port al/615/w3-propertyvalue-1861.html>.

- Tavera, L.; Marchant, M.; Muñoz, P.; Abdala Díaz, R.T. (2022). Spatial and Vertical Benthic Foraminifera Diversity in the Oxygen Minimum Zone of Mejillones Bay, Northern Chile. *Frontiers in Marine Science*, 9, 821564.
- Thiel, M.; Castilla, J.C.; Fernández, M.; Navarrete, S. (2007). The Humboldt current system of northern and central Chile. En: Gibson, R.M.; Atkinson, R.J.A.; Gordon, J.D.M. (eds.). *Oceanography and Marine Biology*, Taylor & Francis, Boca Ratón.
- Tovar-Salvador, M.L.; Pintado-Herrera, M.G.; Lara-Martín, P.A.; Bonnail, E. (2023). Occurrence, sources and environmental risk assessment of organic micropollutants in coastal sediments from the Atacama Region (Chile). *Science of The Total Environment*, 900, 165871.
- Valdés, J.; Castillo, A. (2014). Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27 S), Chile. *Latin american journal of aquatic research*, 42(3), 497-513.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, Vol 30(5):377-392.
- Zagal, C.; Hermosilla, C. (2001). *Guía de invertebrados marinos del litoral Valdiviano*. Independent edition, Santiago de Chile.
- Zapata, J.; Zapata, C.; Gutiérrez, A. (1995). Foraminíferos bentónicos del sur de Chile. *Gayana Zoología*, 59(1), 23-40.
- Zapata, J.; Gutiérrez, A. (1995). Foraminíferos litorales recientes de Tocopilla (22° 06'S; 70° 13'W), Chile. *Estudios Oceanológicos*, 14, 49-59.