



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Respuesta y variabilidad de los  
foraminíferos bentónicos ante los escapes  
de metano y las variables ambientales en  
la zona offshore del cinturón plegado del  
Sinú.**

**Camila María Barragán Jacksson**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento (geociencias)  
Medellín, Colombia

2024



# **Respuesta y variabilidad de los foraminíferos bentónicos ante los escapes de metano y las variables ambientales en la zona offshore del cinturón plegado del Sinú.**

**Camila Maria Barragán Jacksson**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de Recursos hidráulicos**

Director (a):

PhD Gladys Roció Bernal Franco

Línea de Investigación:

Micropaleontología, Geología, Oceanografía

Grupo de Investigación:

Oceánicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad, Departamento (geociencias)

Medellín, Colombia

2024



*(Dedicatoria o lema)*

*A Dios por permitirme lograr grandes cosas, por  
ser luz y guía en cada etapa de mi vida*

*A mi madre por su amor incondicional, su apoyo y  
sus enseñanzas*



## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre Camila Maria Barragan Jacksson

Fecha 29/01/2024

## **Agradecimientos**

Gracias a todas las personas que contribuyeron en la realización del proyecto. A Minciencias, la ANH, GMAS, la UPB y la UNAL.

Agradezco principalmente a la profesora Gladys Bernal por su acompañamiento durante este proceso. Su paciencia, calidez humana y su buena disposición fueron claves en todo momento.

También doy gracias a Lizeth Puerres por ser el puente para la realización de este sueño. Gracias por tu amistad, tus enseñanzas y tu linda energía en momentos difíciles.

A todos los chicos del LabCAT. Las largas jornadas en el laboratorio sin su compañía no hubieran sido iguales.



## Resumen

### **Respuesta y variabilidad de los foraminíferos bentónicos ante los escapes de metano y las variables ambientales en la zona offshore del cinturón plegado del Sinú.**

Los foraminíferos bentónicos han demostrado ser herramientas locales del entendimiento de la dinámica de las emanaciones de metano a nivel mundial. Este estudio caracteriza el nivel de filtración de 18 estaciones dentro un campo de filtración entre la plataforma continental y el talud del cinturón plegado del Sinú a partir de la variabilidad espacial de las poblaciones de foraminíferos bentónicos (FB) con relación a los escapes y la actividad de filtración de fluidos. La variabilidad espacial de las filtraciones se identificó en 4 zonas de actividad, a partir de la dominancia de las asociaciones de las especies dominantes y las variables obtenidas a partir de los FB en conjunto con análisis clusters y PCA. La asociación de *Q. candeiana*, *T. trigonula*, *L. difflugiformis*, *E. excavatum* y *C. poeyanum*, representa la zona de actividad baja; la asociación de *L. ungeriana*, *C. mundulus*, *C. pseudoungerianus* la de filtración moderada; la asociación de *L. soldanii*, *B. irregularis* y *B. cf aspratilis* la de filtración moderada-alta; mientras que la zona de alta filtración se identifica con *C. mundulus* y otras especies hialinas. Además, las adaptaciones fisiológicas como la simbiosis, el tipo de sustrato, y el transporte del metano resultan repercutir sobre las abundancias de estas especies en las distintas zonas de filtración, indicando el favorecimiento de mayores abundancias de FB en zonas de actividad moderada. Finalmente, la relación de los FB con el metano y otras variables ambientales se identificó a partir de un análisis de redundancia (RDA) en donde las poblaciones de FB estudiadas responden principalmente al tipo de sustrato, la salinidad y las filtraciones de metano.

**Palabras clave:** Foraminíferos bentónicos, filtraciones frías, intensidad de filtración, *L. ungeriana*, zona de transición sulfato- metano, Caribe Sur, Cinturón plegado del Sinú

## Abstract

### **Response and variability of benthic foraminifera to methane seepage and environmental variables in the offshore zone of the Sinú fold belt.**

Benthic foraminifera have proven to be local tools for understanding the dynamics of methane seepage worldwide. This study characterizes the filtration level of 18 stations within a filtration field between the continental shelf and the slope of the Sinú fold belt based on the spatial variability of benthic foraminifera (BF) populations in relation to filtrations and fluid migration activity. The spatial variability of the leaks was identified in 4 activity zones, based on the dominance of the assemblages of the dominant species and the variables obtained from BF in conjunction with cluster analysis and PCA. The assemblage of *Q. candeiana*, *T. trigonula*, *L. difflugiformis*, *E. excavatum* and *C. poeyanum*, represents the zone of low activity; the assemblage of *L. ungeriana*, *C. mundulus*, *C. pseudoungerianus* that of moderate filtration; the assemblage of *L. soldanii*, *B. irregularis* and *B. cf. aspratilis* with moderate-high filtration; while the high filtration zone is identified with *C. mundulus* and other hyaline species. Furthermore, physiological adaptations such as symbiosis, type of substrate, and methane transport turn out to have an impact on the abundances of these species in the different filtration zones, indicating the favoring of greater abundances of BF in zones of moderate activity. Finally, the relationship of BF with methane and other environmental variables was identified from a redundancy analysis (RDA) where the BF populations studied respond mainly to the type of substrate, salinity and methane seepage.

**Keywords:**(Benthic foraminifera, Cold Seeps, filtration intensity, *L. ungeriana*, Sulfate and methane transition zone, South Caribbean, Folded Sinú belt).

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>17</b>
1.2 Objetivos .....	18
Objetivo general .....	18
Objetivos específicos.....	18
<b>2. Marco teórico.....</b>	<b>19</b>
2.2 Filtraciones frías de metano.....	19
2.2.1 Presencia de minerales autógenos en filtraciones.....	20
2.2.2 Generación del metano en filtraciones.....	20
2.2.3 Geoformas y estructuras asociadas a filtraciones.....	23
2.3 Filtraciones de metano en el Caribe Colombiano .....	25
2.4 Foraminíferos como bioindicadores marinos.....	26
2.5 Foraminíferos en filtraciones.....	27
2.5.1 Sobrecrecimiento en conchas de foraminíferos .....	31
<b>3. Zona de estudio.....</b>	<b>32</b>
3.2 Marco Geológico.....	33
3.3 Oceanografía.....	34
<b>4. Metodología.....</b>	<b>35</b>
4.2 Campañas de campo .....	35
4.3 Procesamiento de datos oceanográficos.....	38
4.4 Análisis de gases en agua de fondo .....	39
4.5 Caracterización del fondo marino y categoría de filtración .....	39
4.6 Procesamiento de muestras.....	40
4.6.1 Granulometría y foraminíferos .....	40
4.6.2 Identificación de sobrecrecimientos y piritización .....	42
<b>5. Resultados .....</b>	<b>47</b>
5.2 Datos oceanográficos.....	47
5.3 Agua de fondo .....	51
5.4 Caracterización del fondo marino y categoría de filtración.....	53
5.5 Sedimentología.....	61
5.6 Análisis de foraminíferos.....	63

---

5.6.1 Especies dominantes.....	66
5.6.2 Foraminíferos con disolución y fragmentación .....	69
5.6.3 Foraminíferos con sobrecrecimiento y piritización .....	71
5.6.4 Ambiente según la estructura de la pared.....	72
5.6.5 Índice de diversidad de Shannon Weaver (H').....	72
5.6.6 Determinación del índice de oxigenación de FB (BFOI) .....	73
<b>5.6. Análisis estadísticos .....</b>	<b>73</b>
5.6.1. Correlación de variables generales.....	73
5.6.2. Correlación de variables y especies de FB .....	74
5.6.3. Análisis clúster de las estaciones.....	76
5.6.4. Análisis PCA de las especies y estaciones .....	77
5.6.5. Análisis PCA de las estaciones y la categoría de filtración .....	80
5.6.6. Análisis de correspondencia Redundante (RDA) .....	80
<b>6. Discusión .....</b>	<b>84</b>
6.2 Variabilidad espacial de las poblaciones de foraminíferos con relación a las filtraciones y actividad de filtración de fluidos .....	84
Relación de FB con el metano y otras variables ambientales.....	90
<b>7. Conclusión y recomendaciones.....</b>	<b>90</b>
8. Anexos .....	92
9. Bibliografía.....	93

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Zonas diagenéticas en la columna de sedimentos. ....	21
<i>Figura 2.</i> Perfil de profundidad de un ambiente marino alto en sulfato.....	22
<i>Figura 3.</i> Esquematación de un campo de filtración.....	24
<i>Figura 4.</i> Ambientes de filtración asociados al flujo del metano y los microhábitats presentes .....	28
<i>Figura 5.</i> Abundancia de foraminíferos bentónicos en filtraciones .....	29
<i>Figura 6.</i> Variación en la abundancia de FB por el flujo y tipo de transporte del metano.....	30
<i>Figura 7.</i> Mapa de localización de la zona de estudio. ....	32
<i>Figura 8.</i> Mapa geológico estructural de la plataforma continental del Cinturón plegado del Sinú.....	34
<i>Figura 9.</i> Estaciones de muestreo. ....	36
<i>Figura 10.</i> Muestreo de sedimentos superficiales y núcleos.....	37
<i>Figura 11.</i> Muestras recolectadas del nucleador de caja.....	37
<i>Figura 12.</i> Muestra de moluscos extraídos de la estación MSH-15.....	38
<i>Figura 13.</i> Toma de muestras de agua de fondo. ....	38
<i>Figura 14.</i> Gráficas de profundidad vs salinidad y temperatura del sector cercano a las estaciones 1, 2 y 3.....	39
<i>Figura 15.</i> Categoría de filtración.....	40
<i>Figura 16.</i> Procesamiento de muestras. ....	41
<i>Figura 17.</i> Elementos usados para la selección de foraminíferos. ....	42
<i>Figura 18.</i> Tipos de sobrecrecimientos. ....	42
<i>Figura 19.</i> Fotografías SEM de Quinqueloculina con sobrecrecimiento. ....	43
<i>Figura 20.</i> Cortes norte (izquierda) y sur (derecha) de la oceanografía.....	47
<i>Figura 21.</i> Corte de salinidad y temperatura de la zona norte.....	48
<i>Figura 22.</i> Corte de salinidad y temperatura de la zona sur.....	49
<i>Figura 23.</i> Perfiles de salinidad. ....	50
<i>Figura 24.</i> Perfiles de temperatura cercana.....	50
<i>Figura 25.</i> Variables medidas en el agua de fondo. ....	52
<i>Figura 26.</i> Categoría de filtración de las estaciones .....	55
<i>Figura 27.</i> Geoformas de las estaciones cercanas a la costa. ....	57
<i>Figura 28.</i> Geoformas de las estaciones intermedias .....	58
<i>Figura 29.</i> Modelo general 3D de las estaciones cercanas al canal (falla 2).....	59
<i>Figura 30.</i> Geoformas de las estaciones cercanas al talud. ....	60
<i>Figura 31.</i> Porcentaje de lodos y arenas en las muestras. ....	61
<i>Figura 32.</i> Mapa de clasificación granulométrica de las muestras.....	62
<i>Figura 33.</i> Porcentaje de biogénicos y terrígenos en las muestras superficiales.....	63
<i>Figura 34.</i> Mapa de distribución de abundancia de FB .....	64

---

<b>Figura 35.</b> Mapa de distribución de abundancia de FP.....	64
<b>Figura 36.</b> Mapa de distribución de los FB con pared porcelanacea .....	65
<b>Figura 37.</b> Mapa de distribución de los FB de pared aglutinada .....	65
<b>Figura 38.</b> Mapa de distribución de los FB con pared hialina .....	66
<b>Figura 39.</b> Grafica del porcentaje de abundancia de las 15 especies dominantes.....	67
<b>Figura 40.</b> Fotografías SEM de las 15 especies dominantes.....	69
<b>Figura 41.</b> Mapa de porcentaje de disolución de FB.....	70
<b>Figura 42.</b> Mapa de porcentaje de fragmentación de FB.....	70
<b>Figura 43.</b> Mapa de distribución del sobrecrecimiento en FB.....	71
<b>Figura 44.</b> Mapa de distribución de la piritización en FB.....	71
<b>Figura 45.</b> Triángulo de clasificación de ambiente según la estructura de la pared.....	72
<b>Figura 46.</b> Grafica de distribución del índice de Shannon Weaver ( $H'$ ).....	72
<b>Figura 47.</b> Grafica de distribución del índice BFOI .....	73
<b>Figura 48.</b> Matriz de correlación de las 18 variables generales.....	74
<b>Figura 49.</b> Correlación de las variables y las 10 primeras especies dominantes .....	76
<b>Figura 50.</b> Cluster de estaciones a partir de la distribución de especies .....	77
<b>Figura 51.</b> PCA de estaciones y especies .....	78
<b>Figura 52.</b> PCA de la categoría de filtración y las estaciones de acuerdo con la distribución de las especies. ....	80
<b>Figura 53.</b> Sectorización de la actividad de filtración. ....	86

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Descripción de geoformas según su señal de backscatter y su actividad de emisión. ....	25
<b>Tabla 2.</b> Criterio de clasificación de granulometría basado en el % de lodos de las muestras .....	40
<b>Tabla 3.</b> Foraminíferos indicadores de oxigenación) .....	45
<b>Tabla 4.</b> Tabla de interpretación del índice BFOI).....	45
<b>Tabla 5.</b> Valores de la temperatura de la capa isotermal, salinidad superficial y profundidad de la capa isohalina e intensidad de la haloclina. ....	51
<b>Tabla 6.</b> Concentración del metano y otros HCs traza en las muestras de agua de fondo.....	53
<b>Tabla 7.</b> Categoría de filtración de las estaciones .....	54
<b>Tabla 8.</b> Valores explicatorios de las componentes.....	78
<b>Tabla 9.</b> Valores de correlación y explicación de las especies en las componentes .....	78
<b>Tabla 10.</b> Valores estadísticos de los ejes del modelo 1.....	81
<b>Tabla 11.</b> Correlación de los ejes con las variables predictoras del modelo 1.....	81
<b>Tabla 12.</b> Valores estadísticos de los ejes del modelo 2.....	81
<b>Tabla 13.</b> Correlación de las variables con los RDAs del modelo 2. ....	82
<b>Tabla 14.</b> Valores estadísticos de los ejes del modelo 3.....	82
<b>Tabla 15.</b> Correlación de las variables con los RDAs del modelo 3. ....	82
<b>Tabla 16.</b> Modelos de explicación de variables respuesta a partir de variables predictoras. ....	83
<b>Tabla 17.</b> Correlación de las variables predictoras de los modelos con el eje canonico RDA1 .....	83.





# 1. Introducción

La plataforma noroccidental del Caribe colombiano presenta un entorno geológico único (prisma de acreción), formado a partir de la convergencia de la placa Caribe y la margen noroccidental de la placa Sur americana (Kellog et al., 2005). El esfuerzo compresivo de la interacción entre placas propicia la formación de volcanes de lodo, que se generan a partir de la sobrepresurización de fluidos (Aristizábal et al., 2009; Toto & Kellogg, 1992), el escape de lodo que fluye a partir de conductos verticales originados por fallas (Milkov, 2000) entre otros mecanismos. En la costa Caribe estos volcanes se encuentran cerca de reservorios de gas y aceite y la predominancia de arcillas y agua salobre permiten la generación de metano y la degradación de la materia orgánica (Di Lucio et al., 2021). Los fluidos emitidos por los volcanes son intermitentes y se componen de una fase plástica compuesta por agua y sedimentos que se origina a partir de la sobrepresión de los gases en profundidad (Di Luccio et al., 2021). La composición de la fase gaseosa de estos fluidos es una mezcla de hidrocarburos en especial de metano (biogénico o termogénico) y en menor concentración etano, propano y butano, además de gases volcánicos como  $CO_2$  y  $N_2$  (Buttitta et al., 2020). Los estudios de las filtraciones de metano del Caribe Colombiano se han centrado en las relaciones entre las comunidades quimiosintéticas con los ecosistemas circundantes del fondo oceánico, la columna de agua y la identificación de macrofauna bentónica (Dueñas et al., 2021; Gracia et al., 2012). También se han hecho reinterpretaciones estructurales de las secuencias estratigráficas que conforman los cinturones de San Jacinto y Sinú y la caracterización de sus geoformas (Alfaro & Holz, 2014; Barreto et al., 1999), pero los estudios de filtraciones se han limitado al diapirismo de lodo (Carvajal et al., 2010; Herrera & Diaz, 2018; Quintero, 2012; Vernet et al., 1992). Pocos estudios con foraminíferos bentónicos se han realizado en la plataforma continental del Caribe colombiano. Estos no se han centrado en la migración de fluidos, sino en las variables fisicoquímicas que afectan las asociaciones de foraminíferos bentónicos (Bernal et al., 2005, 2008; Gómez & Bernal, 2013; Parada Ruffinatti et al., 1985).

Los foraminíferos bentónicos presentes en el sedimento de las emanaciones de fluidos se usan como bioindicadores de los cambios en las condiciones del medio a partir del cálculo de su abundancia, diversidad y asociaciones de especies (Basso et al., 2020; Gieskes et al., 2011; Gooday et al., 2013; Machain-Castillo et al., 2019; McGann & Conrad, 2018; Panieri et al., 2014), así como la medición de las firmas isotópicas de sus conchas (Martin et al., 2004; Rathburn et al., 2003; Theodor et al., 2016; Torres et al., 2003, 2010a; Zhuang et al., 2016). Los cambios en estas variables han tenido múltiples explicaciones y aun no se tiene claridad sobre la incidencia directa de las filtraciones en ellas. Los estudios en filtraciones han revelado que los foraminíferos son favorecidos cuando el principal proceso biogeoquímico es la metanogénesis anaeróbica del metano y, por el contrario, son afectados cuando se encuentran expuestos a periodos prolongados de anoxia, al igual que a las altas

tasas de emanación del metano (Li et al., 2021). Sin embargo, otros autores indican que bajo las condiciones geoquímicas extremas de las filtraciones activas de metano fallarían los procesos metabólicos de los foraminíferos y por ende su supervivencia (Bernhard et al., 2010). Adicionalmente, la tasa de emanación del fluido y el tipo de transporte de metano presente en las filtraciones, influyen la presencia de ciertos grupos de foraminíferos (Dessandier et al., 2019). Se ha mencionado que, en las zonas de filtración, las especies aglutinadas disminuyen en abundancia, al igual que la diversidad de los FB (Herguera et al., 2014; Panieri & Sen Gupta, 2008). Por otro lado, otros estudios han indicado la incidencia de factores adicionales relacionados a los cambios de abundancia y diversidad de los foraminíferos en estos sitios, como la profundidad del agua, el tipo de sedimento, (Machain-Castillo et al., 2019) la geoforma o lecho bacteriano asociado al escape (Gooday et al., 2013) y el contenido de carbono orgánico (Pan et al., 2018).

En cuanto a las señales isotópicas negativas del  $\delta^{13}\text{C}$ , se ha demostrado que pueden llegar a confirmar la influencia de la filtración sobre estos organismos bentónicos (Hill et al., 2004; Martin et al., 2010; Panieri et al., 2014). Sin embargo, algunas investigaciones han arrojado resultados contradictorios sobre estas señales, debido a que pueden deberse a la dependencia de otras variables ambientales no consideradas tales como la precipitación de carbonatos autógenos, debido a la oxidación anaeróbica del metano (Dessandier et al., 2020; Zhuang et al., 2016; Torres et al., 2010), la actividad biológica asociada con la fuente de alimento (Melaniuk et al., 2022; Hill et al., 2004) y la geoquímica del agua intersticial en el sedimento (Gieskes et al., 2011).

Por tal razón, mediante este estudio se pretende contribuir al reconocimiento y la caracterización de los ambientes de filtración, mediante la descripción de las filtraciones, las concentraciones del metano, otros hidrocarburos y las variaciones ecológicas de los foraminíferos bentónicos presentes en el sedimento. Con lo anterior, se pretende tener un entendimiento de la dinámica espacial de las filtraciones en el sector y su interacción con los foraminíferos bentónicos y las variables ambientales, ampliando así el conocimiento en la ecología de foraminíferos y mejorando el entendimiento de las emanaciones de metano, debido a que son un factor clave en la variación del cambio climático global (Yang et al., 2021) y en la exploración de hidrocarburos. Este estudio aporta una metodología de análisis aplicable a otras localidades y documenta un caso de filtración en una plataforma continental de zona tropical, donde hay muy escasa información de los foraminíferos como indicadores de filtraciones.

## **1.2 Objetivos**

### **Objetivo general**

Caracterizar la respuesta de los foraminíferos bentónicos frente a la exposición de las fugas de metano presentes entre la plataforma interna y el talud al frente del Golfo de Morrosquillo.

### **Objetivos específicos**

1) Determinar la variabilidad espacial de las poblaciones de los foraminíferos en el área de estudio con relación a las distintas manifestaciones de las filtraciones.

- 2) Identificar los sitios de mayor emanación o presencia de hidrocarburos a partir de las variables ambientales, sedimentológicas y poblacionales de los foraminíferos.
- 3) Establecer la relación de las asociaciones de foraminíferos bentónicos con el metano y otras variables ambientales.

## 2. Marco teórico

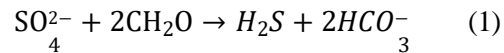
### 2.1 Filtraciones frías de metano

Las filtraciones de metano son definidas como la ventilación o filtración de fluidos que envuelven sedimentos, agua y gas (Talukder, 2012), estas emanaciones son producto de la compactación por sobrecarga y compresión transpresiva que permite la liberación de los fluidos intersticiales (Lorenson et al., 2002), los cuales se encuentran en desequilibrio con el agua de mar, enriquecidos en hidrocarburos y metano que viajan a través del subsuelo marino y emanan en la interfaz agua-sedimento (Naehr et al., 2007). Son comunes en diversos ambientes tectónicos con fluidos ricos en ácido sulfhídrico (Campbell, 2006) y bajas temperaturas debido a su tasa de emisión lenta (Parnell, 2002). En estas zonas de descarga se encuentran precipitados de minerales autógenos y comunidades biológicas metanotróficas como resultado de la interacción entre el agua de fondo y los fluidos circundantes (Naehr et al., 2000). Las principales geoformas asociadas a las filtraciones son los pockmarks, montículos de carbonatos y corales de profundidad. Estas geoformas a su vez están estrechamente relacionadas con estructuras verticales de migración de fluidos como volcanes de lodo, fallas y zonas de estabilidad de los hidratos de gas (Yang et al., 2021). Así mismo, el tamaño y densidad de las manifestaciones en el fondo oceánico indican la cantidad de metano liberado desde la geosfera hasta posiblemente la atmósfera y la presencia de reservorios de hidrocarburos en profundidad (Panieri et al., 2017).

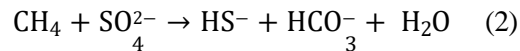
Adicionalmente las zonas de escapes se asocian a comunidades biológicas de metazoos endémicos como los bivalvos de familias Vesicomidae, Lucinidae, etc. (Cosel & Olu, 2009). Sus características sobresalientes son los lechos bacterianos de coloraciones grisáceas con comunidades de almejas del género *Calyptogena* (Barry et al., 1996). Además, albergan macrofauna quimiosintética que a partir de sus simbiontes quimioautótrofos oxidan el metano y/o sulfuro transformándolos en biomasa para la cadena alimenticia (Van Dover, 2000).

### 2.1.1 Presencia de minerales autógenos en filtraciones

La formación de minerales autógenos en los sedimentos está relacionado con la dinámica de la metanogénesis. Bajo ciertas condiciones deposicionales, el contexto geológico y el estado de los ciclos biogeoquímicos pueden permanecer residuos de óxidos de hierro en el agua intersticial que elevan las concentraciones del ion Fe (Amiel et al., 2020). La disponibilidad de Fe en ambientes marinos se debe a la fase residual detrítica de la meteorización de las rocas continentales o a vulcanismo (Lovlie et al., 1972). La posibilidad de tener precipitados de sulfuros de hierro en estos sedimentos se atribuye a la presencia de microambientes en donde se incrementa la reacción del azufre con los óxidos de hierro (Canfield, 1989). Esta reacción ocurre en la interfaz agua-sedimento, donde hay bajas concentraciones de azufre a pesar de que la reducción del sulfato esté activa (Canfield & Berner, 1987). Además de los precipitados de sulfuros de hierro, se han identificado minerales magnéticos de hierro que incrementan el magnetismo de los sedimentos superficiales en conjunto con la disolución reductiva debido a la respiración microbiana (Amiel et al., 2020). Asimismo, estudios recientes han identificado precipitados de óxidos de hierro en los sedimentos más superficiales presentes en la zona de reducción de sulfato y hierro (Amiel et al., 2020), como se ilustra en la (figura 1). Esta zona tiende a estar dominada por la reducción organoclastica del sulfato (Wurgaft et al., 2019). Este proceso se describe en la eq1 (Jørgensen, 2000).



Por otro lado, caracterizar el proceso de la reducción organoclastica del sulfato, ha ayudado a estimar la metanogénesis total de una columna de sedimentos, puesto que proporciona información sobre la dinámica del flujo del metano (Jørgensen et al., 2019). Lo que sucede de forma similar al identificar la reducción del sulfato por medio de la oxidación anaeróbica del metano, dada por la interacción entre el sulfato y el flujo de metano ascendente en la zona de transición sulfato-metano (Sivan et al., 2011). Esta interacción consume el 90% del metano producido en los sedimentos, limitando su liberación a la columna de agua (Valentine, 2002), y es catalizada por archaeas metanotróficas anaeróbicas en conjunto con bacterias reductoras del sulfato (Knittel & Boetius, 2009). Esta reacción se describe en la eq 2.



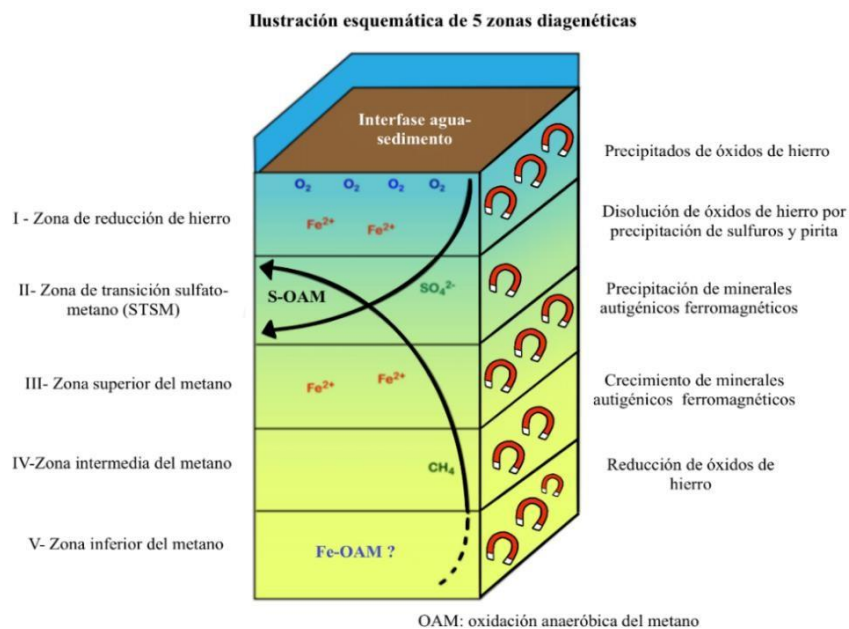
### 2.1.2 Generación del metano en filtraciones

El metano se origina a partir de la remineralización anaeróbica de la materia orgánica, mediante la descomposición de moléculas complejas de carbono a cargo de microbios y bacterias (Whiticar, 1999). El proceso de descomposición involucra 4 asociaciones bacterianas: 1) las bacterias hidrolíticas y fermentadoras 2) las reductoras de  $\text{H}^+$ , 3) las homoacetogénicas, y por último 4) las metanogénicas (Conrad, 1989). La acción de estas bacterias y su predominancia dependen del tipo

de sustrato y la compatibilidad que tengan con los mecanismos de la metanogénesis. Estos sustratos se clasifican en competitivos y no competitivos según Whiticar (1999).

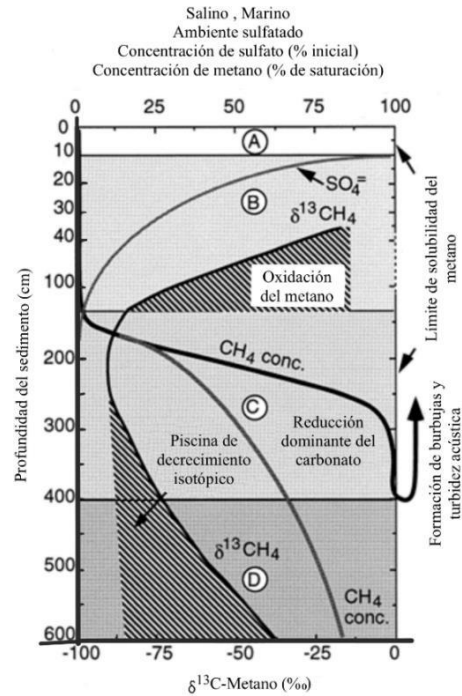
### Substratos competitivos

La metanogénesis en los sustratos competitivos se encuentra altamente restringida y solamente actúa cuando se reduce el sulfato y se inactivan las bacterias reductoras del sulfato, utilizando como reacción primaria la reducción de carbono. Mediante el uso de esta reacción, Zyakun (1992), demostró que el fraccionamiento isotópico del carbono durante la metanogénesis incrementa dependiendo de la tasa de gasificación del  $CO_2$ . Las zonas enriquecidas en sulfato, como los sedimentos marinos (*figura 2*), donde la metanogénesis es muy restringida, el metano está presente en niveles de concentración traza ( $<0.5nM$ ), esto se debe a que la mayor parte de los compuestos de carbono disponible en el medio son metabolizados por los no-metanógenos y liberados parcialmente a la piscina de bicarbonato disuelto. Adicionalmente el consumo de metano anaeróbico en la zona de sulfato también contribuye a la permanencia de niveles bajos de metano (Whiticar, 1999).



**Figura 1.** Zonas diagenéticas en la columna de sedimentos. Tomada y modificada de (Amiel et al., 2020). En la imagen se ilustran las 5 zonas diagenéticas relacionadas con la existencia de precipitados minerales en los sedimentos como los óxidos de hierro, azufre, pirita y minerales ferromagnéticos. Además de los cambios magnéticos en la columna sedimentaria

**Perfil de profundidad de un ambiente marino alto en sulfato**



**Figura 2.** Perfil de profundidad de un ambiente marino alto en sulfato. Tomada y modificada de (Whiticar, 1999). La imagen ilustra la zonificación de los sedimentos en profundidad a partir de las concentraciones del metano y la composición isotópica del carbono en un ambiente marino.

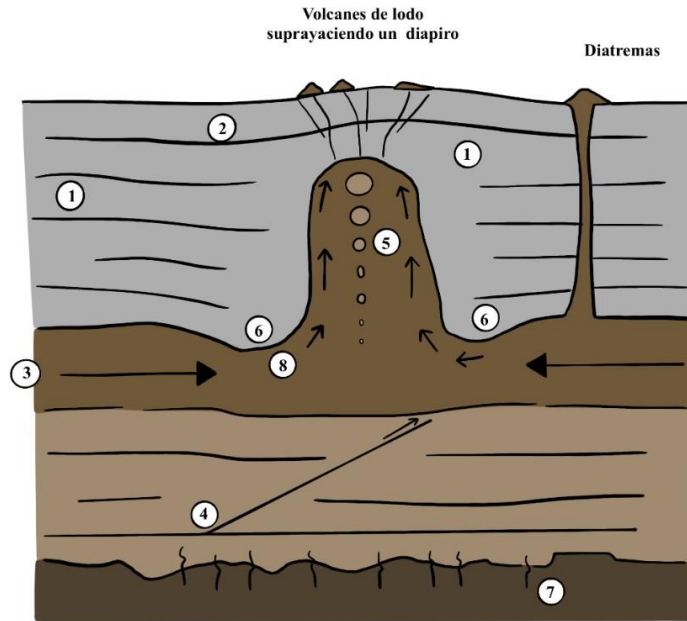
### Substratos no competitivos

Los ambientes conocidos como productores metano de sustratos no competitivos son los manglares, pantanos, entre otros. Estos se caracterizan por incluir los mecanismos metilotrofos y acetotrofos para la metanogénesis.

### 2.1.3 Geformas y estructuras asociadas a filtraciones

El flujo del fluido de las filtraciones presenta agentes de control morfológicos, tectónicos y estratigráficos. La integración de datos sísmicos 3D, backscatter y geofísica, permiten identificar en profundidad la localización del reservorio de emisión, su morfología y las rutas de migración de los fluidos siguiendo las discontinuidades de la columna sedimentaria (Gay et al., 2007). De forma general los pockmarks se han reportado como estructuras de filtración alrededor del mundo, su formación se debe a flujos de alta velocidad. Se reconocen como depresiones de estructura circular o elongadas con diferentes tamaños de diámetro y profundidad que en el caso del Mar del Norte presentan diámetros 50 -100m y profundidades entre 1-3m (Judd & Hovland, 2007). Generalmente aparecen en sedimentos inconsolidados de grano fino y su estructura cóncava revela el poder erosivo de las filtraciones relacionadas con los reservorios en profundidad de gases biogénicos, termogénicos, aceite o una combinación de los tres (Gay et al., 2003). Además, los campos extensos de pockmarks son indicadores de sedimentos cargados de gas producto de la inactividad de diapiros (Gamberro & Rovere, 2010).

Los volcanes de lodo son expresiones superficiales de filtraciones que se generan a partir de intrusiones de lodo en profundidad, debido a la sobrepresión por expansión que genera el metano en los fluidos intersticiales del lodo (Gay et al., 2007), además de presentar precipitados de carbonato dentro de los sedimentos o sobre el fondo y estar rodeados de pockmarks producto de la desgasificación de los diapiros como es el caso del volcán de lodo Anastasya en el Golfo de Cádiz (Rueda et al., 2012). Adicionalmente la ubicación de los volcanes de lodo, indica que el sector tuvo, tiene o actualmente está generando hidrocarburos y sus facies adyacentes pueden albergar una roca reservorio (Tinivella & Giustiniani, 2012). Por tal razón, se han identificado las principales características controladoras de la ocurrencia de un volcán de lodo las cuales son la actividad tectónica compresiva, sobrecarga sedimentaria o tectónica, acreción o solapamiento, generación continua de hidrocarburos y una secuencia sedimentaria compuesta de sedimentos gruesos, de grano fino, suaves y plásticos (Tinivella & Giustiniani, 2012). A diferencia de los volcanes de lodo, los diapiros de lodo son conocidos como estructuras de removilización de material en profundidad que rara vez alcanzan superficie compuestos por shales y arcillas (Kopf, 2002). En la (figura 3) se ilustra la relación entre los diapiros, volcanes de lodo, fallas y otras estructuras presentes en zonas de filtración.



**FUENTES DE FLUIDO PARA LA SOBREPRESIÓN Y EXTRUSIÓN DE LODO**

- 1) Expulsión del fluido intersticial por compactación
- 2) Metano biogénico a partir de la degradación de materia orgánica
- 3) Movilización del fluido de forma lateral a través de los horizontes estratigráficos o zonas de falla.
- 4) Migración de fluidos a lo largo de cabalgamientos profundos
- 5) Metano termogénico e hidrocarburos
- 6) Fluidos a partir de la deshidratación mineral (ópalo, esmectita)
- 7) Fluidos hidrotermales, alteración de la roca cortical.
- 8) Expulsión de fluido desde la deformación interna dentro de las intrusiones diapíricas

**Figura 3.** Esquematación de un campo de filtración. Tomada y modificada de (Kopf, 2002)

Los estudios realizados en campos de filtración han definido la presencia de sitios de mayor o menor escape basándose en el análisis de los sedimentos y la presencia de señales de retrodispersión, además de la distinción de geformas como diapiros de lodo, volcanes de lodo, flujos de lodo y pockmarks (Rovere et al., 2014; Sahling et al., 2008). A continuación, en la *Tabla 1*, se realiza la descripción del tipo de geformas, la señal emitida por el retrodispersor, su actividad de emisión y otras características.



**Tabla 1.** Descripción de geoformas según su señal de backscatter y su actividad de emisión. Según (Kopf, 2002; Rovere et al., 2014; Sahling et al., 2008).

<b>Tipo de geoforma</b>	<b>Señal del Backscatter</b>	<b>Actividad de emisión</b>	<b>Otras características</b>
Volcán de lodo	Alta	Alta	Es común encontrar pockmarks a su alrededor. Pueden presentar costras de hidróxidos de hierro, pirita y siderita autógena en los sedimentos subsuperficiales.
Flujo de lodo	Intermedia	Baja	Se componen de capas de 1m de ancho de lodo sobresaturado en agua que se extiende pendiente abajo del volcán de lodo. Actúan como capa sello para evitar el escape de gas, presentando bajas emisiones. Además, proporcionan condiciones oxicas a los sedimentos superficiales y contienen gran cantidad de precipitados de siderita autógena.
Diapiro de lodo	Baja	Inactiva	Comúnmente acompañado de numerosos pockmarks, pueden presentar costras de carbonato organoclastico que precipitan cerca a los sedimentos superficiales.
Pockmark	-	Alta	La actividad reciente de filtración en estas geoformas puede estimarse a partir de la localización de manchas oscuras que aparecen en los mapas del backscatter derivados de sondas multibeam.

## 2.2 Filtraciones de metano en el Caribe Colombiano

El Caribe Colombiano ha sido considerado como una provincia de gas producto de la actividad microbiana (Katz & Williams, 2003), por tal razón ha sido blanco de proyectos exploratorios desde el descubrimiento de los campos Ballena y Chuchupa en 1970 (Amato, 1970). Sus últimos hallazgos en áreas de profundidades superiores a los 2000m, a partir de perforaciones exploratorias han confirmado la presencia del metano (Gonzalez-Penagos et al., 2019). Los estudios más recientes han identificado la existencia de las filtraciones a partir de reflexiones sísmicas, datos de retrodispersión y anomalías acústicas presentes en la columna de agua (Dueñas et al., 2021). La búsqueda de acumulación de gas en zonas someras en la plataforma se ha realizado con aparatos de alta resolución acústica, identificando geoformas como domos y pockmarks activos e inactivos, además de blanqueos acústicos entre los 25 y 65m debajo del fondo marino, asociados a la migración vertical de gases o fluidos (Osorio-Granada et al., 2023). Adicionalmente, se han realizado análisis sísmicos

para la identificación de hidratos de gas en offshore y de la acumulación de gas en los espacios intersticiales de los sedimentos, mediante reflectores sísmicos de fondo (Rincón-Martínez et al., 2022).

Por otro lado, el diapirismo de lodo, que es un indicador de la migración de fluidos de hidrocarburos gaseosos, principalmente metano (Deville, 2009), se caracteriza por ser un diapirismo argilocinético cuyo principal agente disparador es la diferencia de densidad y su dinámica depende principalmente de la tasa de sedimentación y el ascenso diapírico (Rossello et al., 2022). Trejos-Tamayo et al. (2020) estimaron la edad de los niveles de despegue de los diapiros de lodo en la cuenca San Jacinto-Sinú utilizando el análisis de nano fósiles calcáreos y foraminíferos planctónicos, encontrando que estos niveles datan del Eoceno medio al Mioceno tardío. Adicionalmente, a partir del análisis de gas y agua obtenidos de los volcanes de lodo ubicados hacia la parte norte del Cinturón plegado de San Jacinto, se ha identificado el origen del metano como tipo termogénico en la sección antigua del cinturón y metano tipo microbiano hacia la zona sur en la sección más reciente del cinturón (Lopez-Ramos et al., 2022).

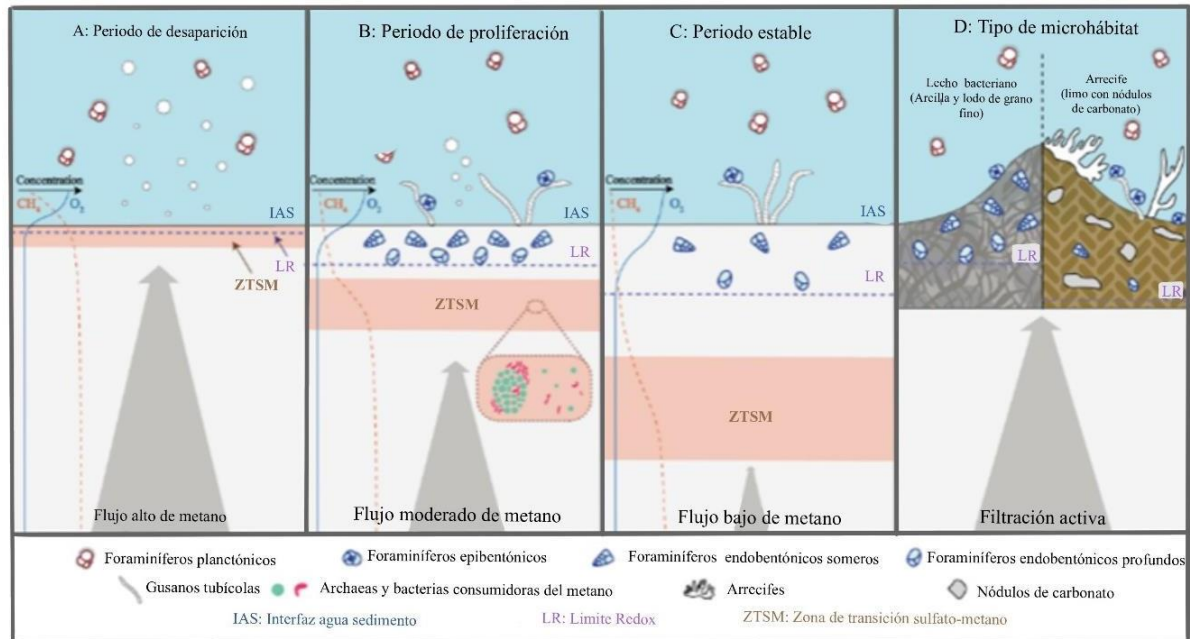
### **2.3 Foraminíferos como bioindicadores marinos**

Los foraminíferos son excelentes bioindicadores de los cambios en el medio, debido a que existen controles ecológicos que determinan su distribución, (Jorissen et al., 1995; Murray, 2006; Sen Gupta, 1999) además su corto rango de vida y las variaciones en sus asociaciones permiten revelar cambios ambientales significativos (Fontanier et al., 2020). La disponibilidad de alimento, el flujo de corriente, la disolución del carbonato (Gooday et al., 2008) y otros factores como el influjo orgánico, los niveles de oxígeno en el sedimento (Kaiho, 1994; Kranner et al., 2022), el tipo de sedimento, la presión hidrostática y el agua de fondo, son responsables de su distribución ecológica (Gooday, 2003). Los cambios en la distribución se han registrado mediante las fluctuaciones en sus densidades y diversidad (Jorissen et al., 2007). Como es el caso del aumento poblacional de foraminíferos con el influjo de materia orgánica parcialmente degradada (Fontanier et al., 2005) o la presencia de mayores abundancias de foraminíferos vivos en sedimentos superficiales relacionados con el desacoplamiento de los sedimentos productivos asociados a corales y el sedimento infrayacente (Fentimen et al., 2018). Además de la identificación de transiciones faunísticas debido al cambio de suplemento alimenticio al generarse un aumento del material orgánico particulado (Takata et al., 2022). Adicionalmente los foraminíferos no solo son utilizados para realizar interpretaciones locales de las condiciones del medio, sino también en la reconstrucción del pasado climático y la circulación oceánica que se reflejan en las composiciones isotópicas de carbono y oxígeno presentes en sus conchas, indicando las condiciones del agua de mar y el agua intersticial al momento de su calcificación (Theodor et al., 2016).

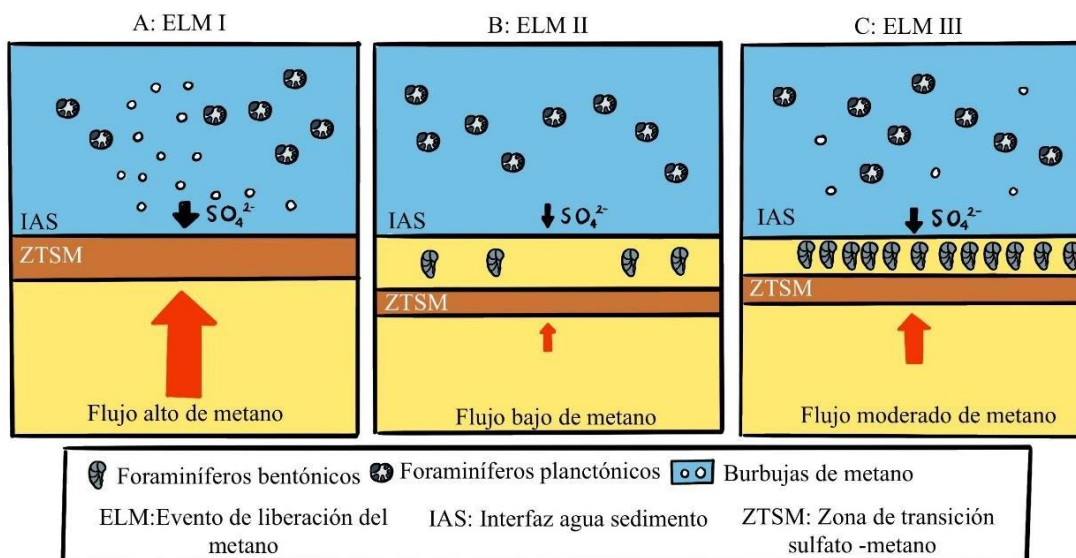
## 2.4 Foraminíferos en filtraciones

Los foraminíferos bentónicos (FB) son encontrados en diversos ecosistemas de filtración como volcanes de lodo, pockmarks, tapetes bacterianos, arrecifes de algas, entre otros, que a su vez contienen microhábitats (*figura 4*), en donde el contenido de carbono orgánico total, los niveles de oxígeno y el tipo de sustrato resultan ser parámetros preferenciales para su establecimiento (Lu et al., 2023). De igual forma, también se ha demostrado que los FB son sensibles a los cambios en la intensidad de filtración, el tipo de transporte del metano, la ubicación de la zona de transición sulfato metano (ZTSM) y las bacterias involucradas en la oxidación del metano (Li et al., 2021; Lu et al., 2023). Por tal razón mediante el estudio de las variaciones de su abundancia y los tipos de pared dominantes, permiten caracterizar la intensidad de las filtraciones de metano, los procesos biogeoquímicos locales relacionados con la ubicación de la ZTSM, como se ilustra en la (*figura 5*). Las abundancias de las poblaciones de FB en estos sitios de filtración son altamente variables y su explicación está ligada a múltiples factores presentes en el medio de filtración. Se han reportado el incremento de las abundancias (Rathburn et al., 2000; Torres et al., 2003), su disminución (Dessandier et al., 2019) o ausencia de cambios significativos (Bernhard et al., 2001; Rathburn et al., 2003). Sin embargo, una de las explicaciones más recientes a las variaciones de las abundancias de FB en sitios de filtración, ha sido expuesta en el estudio de Li et al. (2021), donde se menciona que bajo condiciones de alta disponibilidad de oxígeno molecular, bajos niveles de azufre, una actividad de filtración moderada y el favorecimiento de la difusión del metano, se genera un incremento de bacterias aeróbicas metanotróficas que actúan como fuente de alimento para los FB favoreciendo su abundancia, mientras que en periodos intensos de filtración, cuando la ZTSM está cerca a la interfaz agua-sedimento y hay presencia de metanogénesis anaeróbica que incrementa las concentraciones de ácido sulfhídrico, se generan condiciones inhóspitas para la presencia de FB, disminuyendo su abundancia. A su vez Melaniuk et al. (2022), plantea que los FB vivos incorporan carbono derivado del metano donde hay filtración moderada y mueren en presencia de filtraciones altas, por el incremento del ácido sulfhídrico, donde sus conchas posteriormente son revestidas por sobrecrecimientos de carbonatos autógenos derivados del metano.

En cuanto a la ecología de los foraminíferos en filtraciones, no se han registrado especies endémicas (Bernhard et al., 2001; Rathburn et al., 2000). Por el contrario, las especies que conforman las asociaciones de foraminíferos vivos presentes en estos sitios albergan a su vez foraminíferos registrados en sitios sin filtraciones, como es el caso del estudio de Panieri (2006), en donde los géneros dominantes *Reophax*, *Brizalina*, *Bolivina* y *Rosalina* se encontraron en ambos sectores con filtración y sin filtración. Por tal razón, su distribución depende más de la geoquímica del agua intersticial presente en los sedimentos (Gieskes et al., 2011; Martin et al., 2004) y sus adaptaciones fisiológicas bajo estas condiciones (Bernhard et al., 2001). Por lo que el análisis de sus poblaciones (variaciones en su diversidad, abundancia y sus asociaciones) permite establecer la relación de foraminíferos hialinos oportunistas vs aglutinados en los sitios de muestreo (Dessandier et al., 2019), como respuesta al tipo de transporte del metano y la presencia de tapetes bacterianos u otros microhábitats que en conjunto integran los diferentes ambientes de filtración, como se ilustra en la (figura 6).



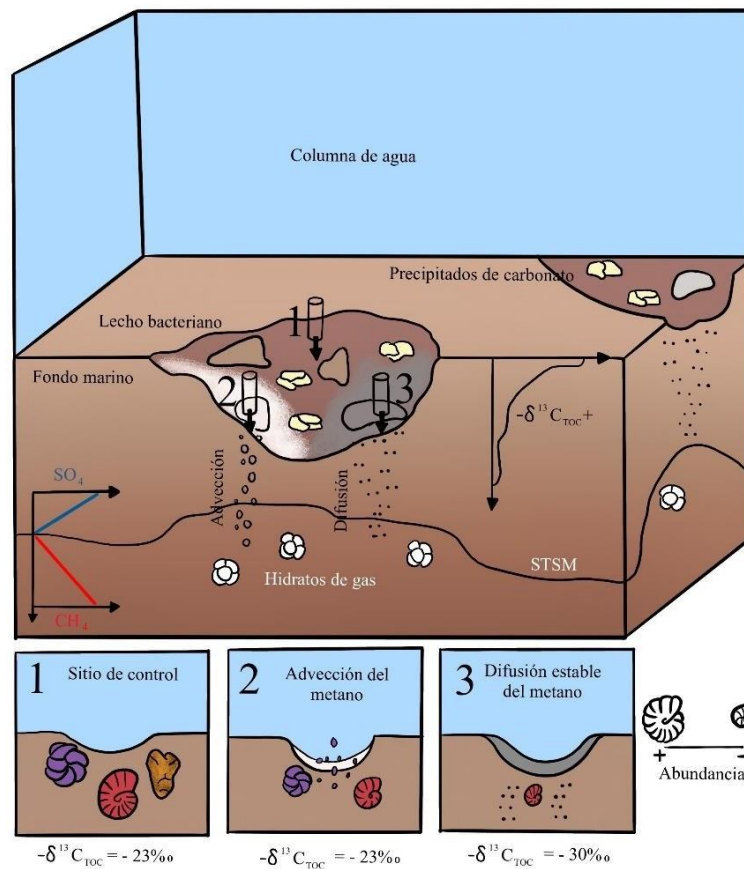
**Figura 4.** Ambientes de filtración asociados al flujo del metano y los microhábitats presentes. Tomado y modificado de (Lu et al., 2023).



**Figura 5.** Abundancia de foraminíferos bentónicos en filtraciones. Tomada y modificada de (Li et al., 2021). En la imagen se ilustran 3 casos de fluctuación del flujo del metano y del cambio de posición de la (ZTSM) relacionado con la abundancia de FB en los centímetros superficiales.

La presencia de una mayor población de foraminíferos aglutinados en sitios de filtración se relaciona con una baja tasa de emisión de fluidos (Li et al., 2021). Martin et al. (2010) encontraron, por ejemplo, que los FB aglutinados constituyen el 45% de las asociaciones en los sitios sin filtración y un 11% en los sitios con filtración, debido a que pueden sobrevivir y prosperar bajo altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  y óptimas condiciones de oxigenación (Herguera et al., 2014). Por otro lado, los FB que se adaptan y viven en sitios de filtración deben soportar la presencia del metano, la disminución del oxígeno y el ácido sulfhídrico (Wollenburg & Mackensen, 2009), como es el caso de los FB infaunales que tienden a predominar en las zonas anóxicas con la presencia de lodos y arcillas enriquecidos en metano (Bhaumik & Gupta, 2005). Un ejemplo de lo anterior es el registro de algunas especies como *Uvigerina peregrina* que sobrevive en estos ambientes con niveles altos de azufre, debido a las condiciones favorables de disponibilidad de alimento de fuentes bacterianas (Torres et al., 2003). Igualmente, otros estudios registran especies tolerantes a condiciones de baja oxigenación como *Chilostomella oolina*, *Globobulimina affinis* y *Globobulimina pseudospinescens* (Kaiho, 1994). Contrario a lo que sucede con los FB epifaunales, que comúnmente incrementan su abundancia en zonas de cese de actividad e incremento del  $\text{O}_2$  (Pan et al., 2018). Así ocurre con el género *Cibicidoides*, que se ha reportado en zonas de baja filtración de metano (Lu et al., 2023). De igual forma, el género *Cibicides*, reportado en el estudio de Wilfert et al. (2015), se encontró colonizando zonas de derrame de los volcanes de lodo, donde aumentó el flujo del metano y la actividad de oxidación anaeróbica del metano (OAM), por lo que la distribución de los FB epifaunales, no siempre está relacionada con la intensidad de filtración, sino también con las condiciones de los microhábitats presentes, como la presencia de sustratos gruesos con precipitados

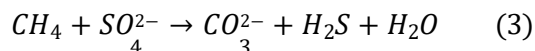
de carbonato o arrecifes de algas (Panieri, 2006). De esta misma manera, las asociaciones pueden variar dependiendo de los microhábitats y las condiciones de oxigenación presentes en el medio, como sucede con las asociaciones de foraminíferos presentes en el volcán de lodo Mosby en Noruega, en donde las asociaciones del centro hacia la parte más externa están integradas por *Cibicidoides wuellerstorfi*- *Lobatula lobatula* que constituyen la asociación oxigenada, seguida de *Cassidulina neoteretis* presente en el centímetro superficial de los sedimentos disóxicos y *Bolivina pseudopunctata* ubicada en los centímetros subsuperficiales del sedimento (Wollenburg & Mackensen, 2009).



**Figura 6.** Variación en la abundancia de FB por el flujo y tipo de transporte del metano. Tomada y modificada de (Dessandier et al., 2019).

### 2.4.1 Sobrecrecimiento en conchas de foraminíferos

La precipitación de minerales autógenos de carbonato en sedimentos marino-someros subsuperficiales es favorecida por la oxidación anaeróbica del metano, incrementado la alcalinidad y producción de bicarbonato en el agua intersticial de los sedimentos (Elvert et al., 1999). Dicha reacción consume metano y sulfato, para producir carbonato y ácido sulfhídrico, como se describe en la eq.3 (Valentine, 2002).



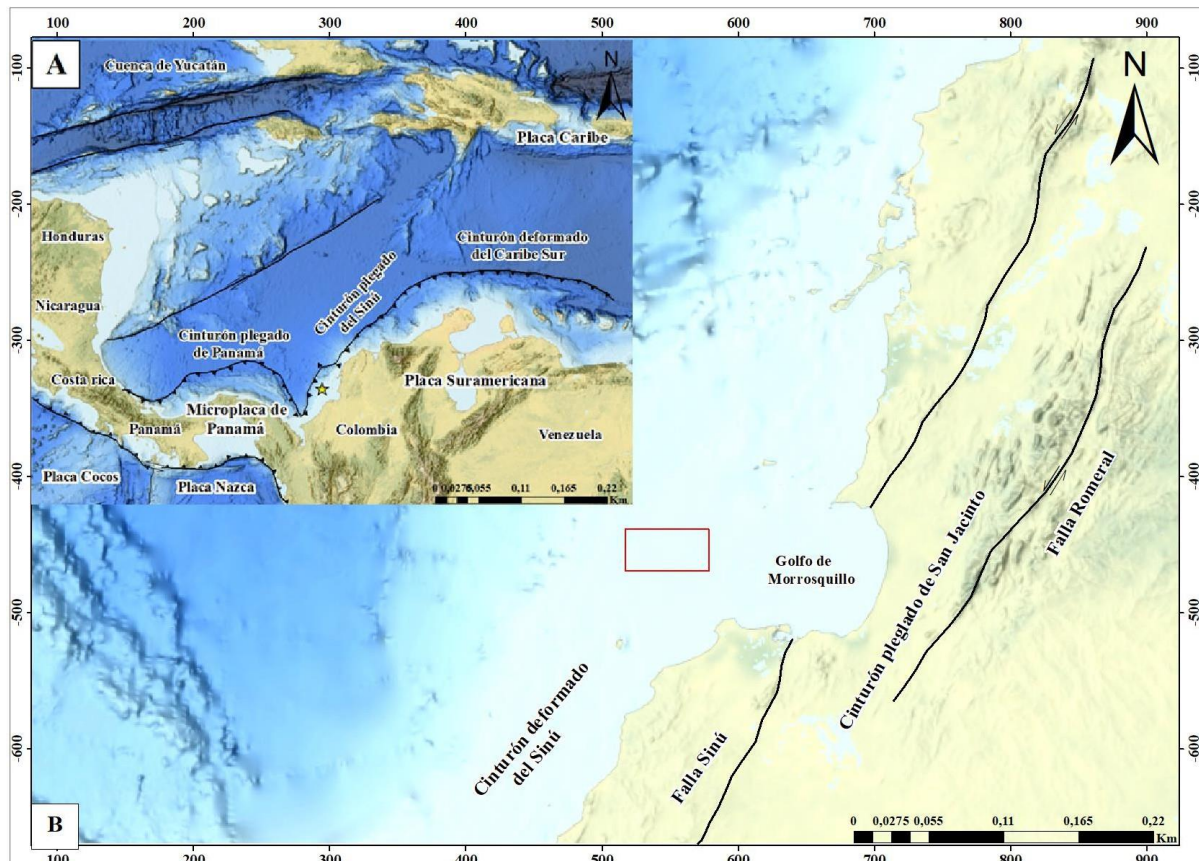
De forma general, los sitios de filtración han presentado agregados de sedimentos cementados alrededor de los sitios de emanación de fluidos. El yeso ha sido uno de los minerales registrados en sedimentos superficiales debido a la oxidación del azufre favorecida por las interacciones entre las bacterias y organismos quimiosintéticos que consumen el  $H_2S$  presente en el agua intersticial (Pierre, 2017). A pesar de los distintos reportes de minerales de carbonato en sedimentos asociados a filtraciones de metano, aún no se tiene certeza de la formación post-depositacional de esta capa secundaria, debido a la presencia de los procesos metabólicos que interactúan con las condiciones reductoras del agua de fondo y los fluidos de filtración en el sedimento (Dantas et al., 2022). Sin embargo, a pesar del desconocimiento de la génesis puntual de estos precipitados, existen estudios que validan el uso de esta característica en los sedimentos, debido a que las variaciones isotópicas y mineralógicas encontradas en la composición de los carbonatos autógenos de plataformas continentales como la Bahía de Monterey, Santa Bárbara, el mar del Norte, entre otras, que han permitido relacionar estos precipitados con controles locales del flujo del carbono, la presencia de hidratos de gas en el sedimento, al igual que la presencia de conductos de fluidos y fallas (Naehr et al., 2007).

Por tal razón, el sobrecrecimiento secundario en las conchas de los foraminíferos se conoce como un indicador de sedimentos filtrados, debido a que altera las firmas isotópicas, la composición elemental y la microestructura de estos individuos en ambientes de filtración (Lu et al., 2023). El registro del sobrecrecimiento en conchas de foraminíferos comenzó con el fin de explicar los resultados anómalos de las composiciones isotópicas altamente empobrecidas en  $C^{13}$  en sitios de filtración (Torres et al., 2003). Estudios han registrado valores menores a -40‰ PDB (Gieskes et al., 2011; Martin et al., 2004). Teniendo en cuenta la importancia de la identificación del sobrecrecimiento en las conchas de los foraminíferos para evitar errores en las mediciones isotópicas, se han implementado diferentes metodologías para su estudio y reconocimiento. Primero en los estudios más recientes se realiza la distinción visual de las características morfológicas de las conchas alteradas, teniendo en cuenta su coloración, estado de la pared y textura (Detlef et al., 2020; Ni et al., 2020). Posterior al análisis visual, se caracteriza el tipo de sobrecrecimiento interno y externo mediante técnicas de análisis geoquímicos, microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía raman (Ni et al., 2020). Otros estudios miden las tasas de Mg/Ca que suelen ser más altas en las conchas de foraminíferos alterados (Torres et al., 2010) y otros diferencian la calcita primaria y secundaria a partir de la medición de los metales traza para identificar los procesos diagenéticos sedimentarios reflejados en la composición elemental de las conchas (Detlef et al.,

2020). Con base en este descubrimiento, las metodologías para los estudios de foraminíferos en filtraciones comenzaron a incluir la limpieza de las conchas, utilizando métodos como el baño ultrasónico en metanol (Hill et al., 2003, 2004; Panieri, 2006b; Rathburn et al., 2000) o etanol y un lavado secundario en agua desionizada para su posterior secado y análisis isotópico (Zhang et al., 2018).

### 3. Zona de estudio

La zona de estudio se ubica en la plataforma continental externa al frente del Golfo de Morrosquillo a una distancia de 59,69 km de la línea de costa, en el cinturón plegado del Sinú (*figura 7*). Comprende un área de 297 km<sup>2</sup> y presenta profundidades desde los 40 hasta los 300m. Contiene elementos sedimentarios y tectónicos que permiten caracterizar la historia geológica del sector, mediante la identificación del diapirismo, basculamientos, fallas, antiguos fondo del mar, paleocanales y estructuras más recientes, como volcanes de lodo y escarpes de falla que se identifican como anomalías positivas del relieve (Ojeda et al., 2007).



**Figura 7.** Mapa de localización de la zona de estudio. **A.** Contexto regional, de las expresiones geomorfológicas y tectónicas del Caribe. **B** Zona local del estudio, margen suroccidental del Caribe colombiano. En rojo se limita el área que abarca el muestreo.

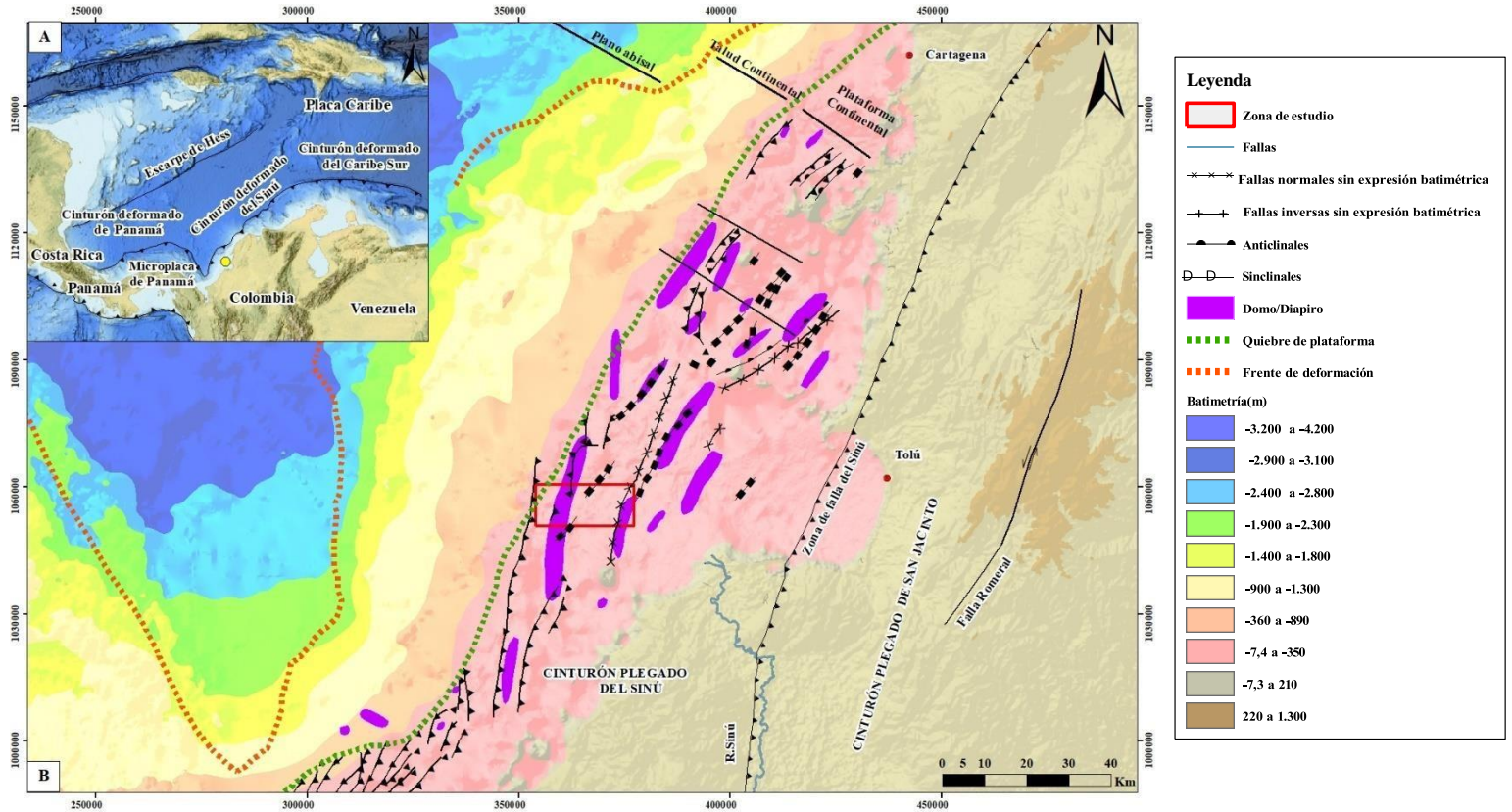


### 3.1 Marco Geológico

El cinturón plegado del Sinú-San Jacinto se localiza al occidente de la falla Romeral, perteneciendo a un prisma de acreción del Paleoceno- Oligoceno que reposa sobre un basamento oceánico del Cretácico (Flinch, 2003). Esta provincia geológica se encuentra controlada por un régimen transpresional entre la placa Caribe que subduce la margen NW de la placa Suramericana desde el Cretácico (Mora et al., 2017; Pardo-Trujillo et al., 2020; Toto & Kellogg, 1992; Trejos-Tamayo et al., 2020). Se subdivide en dos regiones. La región oriental onshore conocida como El cinturón plegado de San Jacinto y la región occidental offshore denominada El cinturón plegado del Sinú. La falla Sinú como se observa en la (figura 8) separa al este la zona expuesta del cinturón San Jacinto y hacia el oeste la porción sumergida más reciente del cinturón del Sinú (Toto & Kellogg, 1992).

El cinturón plegado del Sinú se localiza costa afuera de la parte noroccidental del Caribe Colombiano y a su vez integra la parte sur del cinturón plegado del Caribe sur (Rodríguez et al., 2021), el cual mediante datos de reflexión sísmica en conjunto con la cuenca oriental del Caribe se ha catalogado como un amplio sistema petrolífero (Carvajal-Arenas et al., 2020). Adicionalmente, el prisma de acreción del Sinú es alimentado por grandes cantidades de sedimentos transportados por ríos desde los terrenos volcánicos y cuencas antiguas emergidas (Vinnels et al., 2010), siendo el Río Sinú el mayor contribuyente de sedimentos y en menor medida los ríos Atrato, Mulatos y Magdalena (Restrepo & Kjerfve, 2000, 2004). A partir del Plioceno en adelante, presentó una sedimentación profunda en forma de cuencas piggy-backs, dominada por sedimentos del mioceno, generada por el influjo de material fluvial (Restrepo & Kjerfve, 2000). Esta zona tiene una evolución estructural y tectónica altamente compleja. Es conocida por su diapirismo de lodo y las múltiples expresiones geomorfológicas como crestas de anticlinales, sinclinales y terrazas oceánicas (Carvajal, 2016), además de relieves submarinos que moldean las expresiones del fondo oceánico (Idárraga, 2017). Adicionalmente, en las subcuencas intra-talud, aisladas de la plataforma, se ha reportado el influjo de sedimentos provenientes de los deslizamientos submarinos relacionados con la evolución tectónica de las zonas norte y sur del Cinturón del Sinú (Mateus et al., 2021) y de la presencia de hidratos de gas que desestabilizan el talud y generan depósitos de gravedad (Alfaro & Holz, 2014).

La plataforma continental del cinturón del Sinú, al frente del Golfo de Morrosquillo se encuentra afectada por distintas expresiones morfológicas como sinclinales, fallas normales e inversas con y sin expresión batimétrica, además de la presencia de diapiros hacia la zona más cercana al continente como se evidencia en la (figura 8).



**Figura 8.** Mapa geológico estructural de la plataforma continental del Cinturón plegado del Sinú. Las figuras fueron procesadas utilizando Arc-GIS online, Arc-GIS 10.8 y estudios regionales como (Rodríguez et al., 2021; Rincón-Martínez et al., 2022) y batimetría GEBCO 2023.

## 3.2 Oceanografía

En el mar Caribe colombiano se identifica la circulación de la corriente del Caribe, el giro ciclónico Panamá-Colombia y el centro de surgencia de la Guajira (Andrade & Barton, 2000). En la circulación superficial del Caribe sur occidental, donde se localiza el offshore del Cinturón del Sinú, se identifica la circulación ciclónica del giro de Panamá-Colombia. Esta circulación ciclónica, se compone de giros de mesoescala que interactúan con las aguas de plataforma en el Offshore de Panamá, Colombia y Venezuela (Andrade & Barton, 2000). Por su parte, la variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM), experimenta anomalías positivas débiles durante el Niño (Enfield & Mayer, 1997), e incrementan de marzo a mayo (Bernal et al., 2006). En cuanto a la capa de mezcla en el Caribe esta oscila entre 10 y 90 m de profundidad, registrando las máximas profundidades (20-90 m) en el periodo seco de (Diciembre-Febrero) y las mínimas profundidades (10-50 m) en el periodo lluvioso de (Agosto-Noviembre) (Montoya-Sánchez et al., 2018).

De acuerdo con la oceanografía interna del golfo de Morrosquillo se identifican las siguientes características. El golfo se encuentra protegido topográficamente de la acción de los vientos por la isla Boquerón y las islas de San Bernardo (Otero et al., 2016). La dinámica marina es modulada por las costas, la topografía del fondo marino y los vientos (Bastidas & Ordóñez, 2017). Su estructura

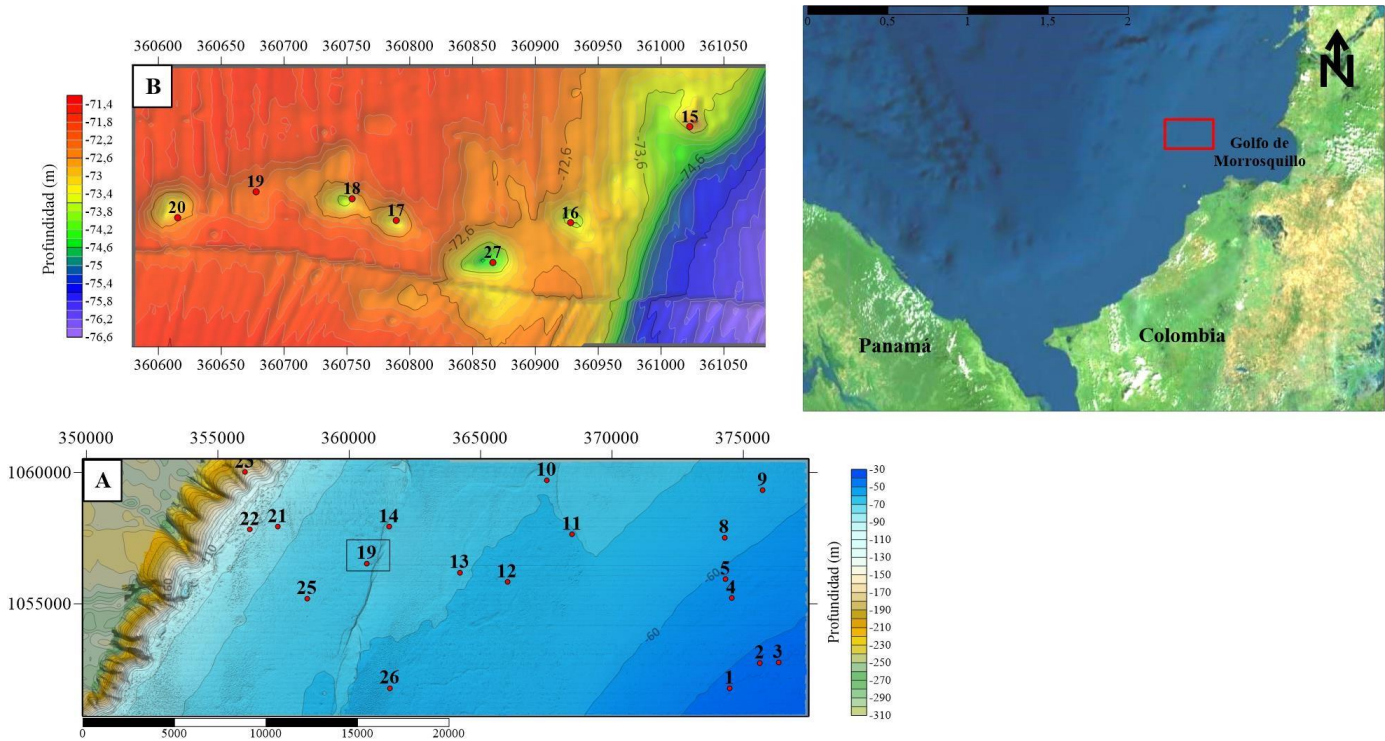
geomorfológica se compone de un área expuesta y otra resguardada, generando variaciones en el comportamiento de las variables de salinidad y temperatura. La zona norte expuesta, presenta menores temperaturas y mayores salinidades, mientras que la zona norte en la Punta de San Bernardo presenta mayores temperaturas y menores salinidades. La acción de estas barreras genera la bifurcación de los vientos que al chocar con la costa de Tolú forman corrientes tipo RIP (Molina et al., 1994). El patrón de circulación de los vientos se ubica en dirección norte-sur con mayor magnitud hacia al norte y presenta un cambio de dirección durante los meses de diciembre-abril y mayo-noviembre (Bastidas & Ordóñez, 2017). Adicionalmente, la temperatura superficial del mar (TSM), no presenta un gradiente marcado durante las tres épocas climáticas, la menor variabilidad anual se encuentra al interior del golfo oscilando entre 28 y 29°C, mientras que la zona expuesta presenta mayor variabilidad con valores de 27.5 hasta 29°C (Bastidas & Ordóñez, 2017). El Golfo de Morrosquillo presenta una baja energía de oleaje. Sin embargo, a pesar de que las alturas de ola son las más bajas en este sector del Caribe, los eventos extremos de oleaje son generados principalmente por el paso de los frentes fríos (Otero et al., 2016). En cuanto a la profundidad de la capa de mezcla del Golfo según los análisis de Montoya-Sánchez et al. (2018), de Junio -Noviembre permanece en 20m y entre Diciembre-Mayo alcanza una profundidad > 30m.

## 4. Metodología

### 4.1 Campañas de campo

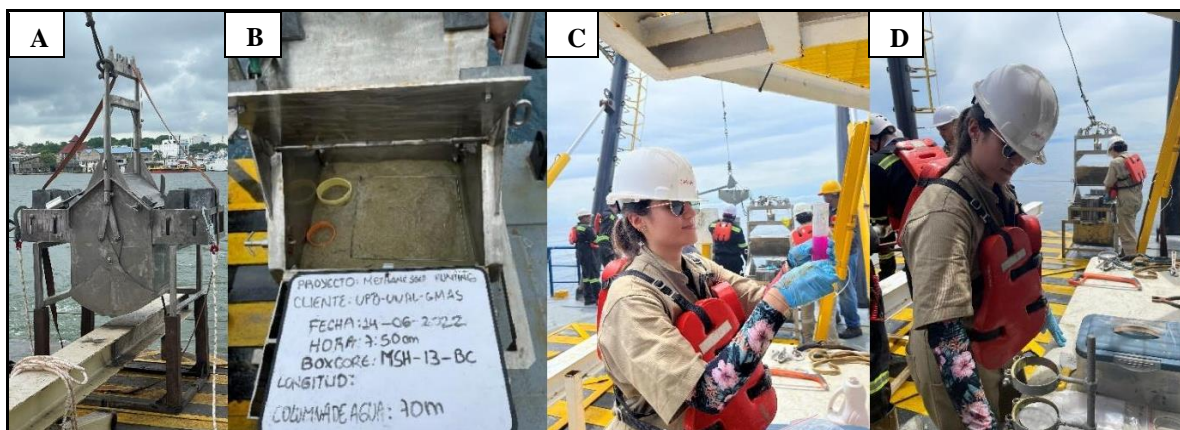
Los muestreos y mediciones hechos en el marco del proyecto “Methane Seep Hunting a multiscale and multi-method approach” fueron obtenidos a bordo de la embarcación DP1- Seaworker MC-05-735 durante dos campañas de investigación. La primera campaña consistió en la recolección de datos oceanográficos, batimetría, geofísica acústica, imágenes de retrodispersión (backscatter) y perfilador de fondo (sub bottom profiler), durante el mes de mayo del 2022. A partir de análisis preliminares de imágenes satelitales para identificar manchas de aceite y gas en la superficie del mar por el equipo de UPB (Hernández-Hamón et al., 2023) y de los datos obtenidos en la primera campaña por el equipo de GEOMARES, se seleccionaron sitios estratégicos para la extracción de las muestras. El diseño del muestreo estuvo a cargo de personal científico de la UPB, la Universidad de Malta, la UNAL y GMAS. Se tuvieron en cuenta las geoformas y estructuras submarinas relacionadas con escapes tales como diapiros de lodo, volcanes de lodo, pockmarks, fallas, señales altas de retrodispersión en la columna de agua y se seleccionaron 2 sitios sin señales de escapes para ser utilizados como puntos de control. En el (*anexo 1*) se presenta un resumen de las características relevantes de cada estación.

Durante la segunda campaña, del 8 al 19 de junio del 2022, se hizo un reconocimiento visual de las estaciones con un ROV marca BlueROV2, la recolección de las muestras de sedimentos con un nucleador de caja y uno de pistón y muestreos de agua de fondo con una botella Niskin. El procedimiento se realizó en 27 estaciones numeradas como MSH (Methane Seep Hunting) de 1 a 27, de las que se obtuvieron núcleos en 18 (*figura 9A*). Los núcleos y datos que no se pudieron coleccionar fue debido a la profundidad o dureza del sustrato (*figura 9B*). Las estaciones tienen profundidades entre 47 y 166 m. En su mayoría están ubicadas en la plataforma externa, a excepción de la estación MSH-23, ubicada en el talud continental (166 m).



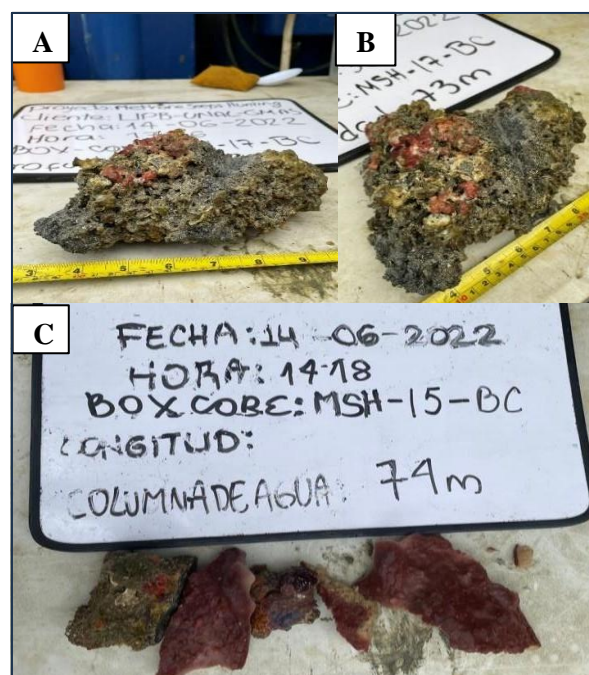
**Figura 9.** Estaciones de muestreo. A. Se observan las 18 estaciones donde se obtuvo muestra. B. Estaciones donde no fue posible la recolección de muestra

Para este trabajo se utilizaron muestras tomadas con el nucleador de caja. El nucleador de caja utilizado fue un GOMEX de 50x 50x50cm como se ilustra en la (*figura 10*). De los núcleos de caja coleccionados en cada estación se obtuvieron 2 subnúcleos, 1 núcleo de 3" (7cm de diámetro) y 15 cm de largo y otros de 4" y 50 cm de largo. Los 5 centímetros superiores de los subnúcleos de 3" se muestrearon con ayuda de un extrusor y fueron dispuestos en bolsas plásticas herméticas con 65 ml de una solución de rosa de bengala y formaldehído al 4%, para luego ser refrigeradas. Los subnúcleos de 4" fueron sellados y refrigerados para ser transportados al laboratorio.

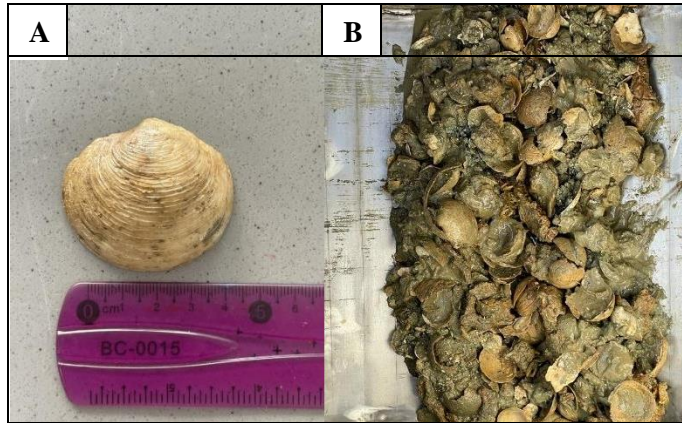


**Figura 10.** Muestreo de sedimentos superficiales y núcleos. **A.** Nucleador de caja con el que se realizaron los muestreos de sedimento. **B.** Se distinguen 2 núcleos, el de 3" (naranja) y el de 4" (amarillo). **C.** Preparación de la solución de rosa de bengala para la tinción de las muestras **D.** Extrusor para la extracción de los primeros centímetros superficiales.

En las estaciones MSH-15, MSH-16, MSH-17, MSH-18 y MSH-19 no fue posible la extracción de sedimentos debido a la presencia de sustratos duros de carbonato que no permitieron la recolección del sedimento. En estas estaciones solo fue posible recolectar fragmentos de esponja en el caso de la estación MSH-15 y fragmentos de roca para la estación MSH-17 como se observa en la (figura 11 A, B, C) También se recolectaron cascajo con moluscos, para la estación MSH-15 como se observa en la (figura 12).



**Figura 11.** Muestras recolectadas del nucleador de caja. En las figuras **A** y **B** se identifica una caliza bioclástica o fragmento de carbonato con presencia de algas. En la figura **C** se observan los fragmentos de esponja encontrados en la estación MSH-15-BC.



**Figura 12.** Muestra de moluscos extraídos de la estación MSH-15. En la imagen se visualizan los moluscos recolectados en el nucleador de caja. **A.** Tamaño de la concha de aproximadamente 4cm de largo.

De la botella Niskin se extrajeron muestras de agua de fondo para medir directamente en el barco los parámetros pH, conductividad, Oxígeno disuelto (OD) y Temperatura, utilizando una sonda multiparamétrica de marca Hach HQ40d como se ilustra en la (figura13).

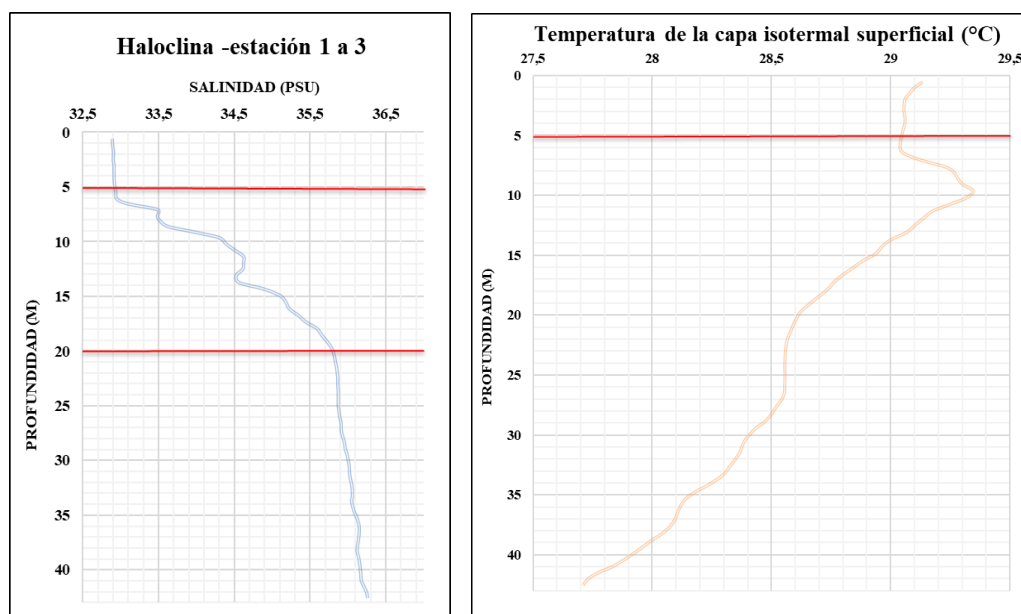


**Figura 13.** Toma de muestras de agua de fondo. **A.** Las muestras son tomadas a boca de botella para evitar la oxigenación del agua y son medidas inmediatamente con la sonda multiparamétrica. **B.** Sonda multiparamétrica realizando la medición del pH y la conductividad en una muestra de agua.

## 4.2 Procesamiento de datos oceanográficos

Los perfiles fisicoquímicos de la columna de agua medidos en la primera campaña con una sonda CTD valeport fueron depurados en el software R v 4.3.0 (R Core Team, 2023) quitando los datos atípicos (outliers) y utilizando los paquetes “oce” (Kelley & Richards, 2023) y “gsw” (Kelley et al., 2022) para calcular la profundidad a partir de la presión y la latitud (los códigos están disponibles a petición).

Con los datos depurados, se visualizó el comportamiento de las variables temperatura y salinidad en la columna de agua, utilizando el Ocean data viewer v 5.3.6 del año 2022, en donde se realizaron perfiles y cortes oceanográficos de las estaciones. Adicionalmente, de forma gráfica, se calcularon los siguientes parámetros para cada perfil: la temperatura de la capa isotermal superficial; la salinidad y profundidad de la capa isohalina y la intensidad de la haloclina. Cada perfil fue relacionado con las estaciones más cercanas. En la (figura 14) se ejemplifica el cálculo gráfico de estos parámetros.



**Figura 14.** Gráficas de profundidad vs salinidad y temperatura del sector cercano a las estaciones 1, 2 y 3. En la gráfica del lado izquierdo se representa el inicio de la haloclina a los 5m con una salinidad de 33,48 y el final de la haloclina a los 20m con una salinidad de 35,83, para una intensidad de 2.35. En la gráfica de la derecha, se representa el final de la capa isotermal a los 5m con una temperatura de 29,05°C.

### 4.3 Análisis de gases en agua de fondo

Las muestras recolectadas para identificar las concentraciones de gases en el agua de fondo fueron tomadas por el equipo de GMAS, extraídas de la botella Niskin, dispuestas en recipientes de vidrio y refrigeradas durante la segunda campaña de investigación. Posteriormente las mediciones fueron realizadas por medio de un cromatógrafo de gases Agilent 8860 con detector FID calentado las muestras a 60°C y realizando la lectura de los volátiles utilizando headspace.

### 4.4 Caracterización del fondo marino y categoría de filtración

La caracterización del fondo marino se hizo a partir de imágenes en HD tomadas por el ROV, la presencia de flujos de gas vistos en perfiles acústicos en la columna de agua y cortes 3D de la batimetría tomada por un ecosonda multi beam SeaBat T50-R. El análisis de la batimetría se realizó en el software Surfer v 16. Se describieron las estructuras de fondo como arrecifes, montículos de

sedimento, lajas de carbonato y evidencias de burbujeo. Con esta información se estableció una categoría de filtración para cada una de las estaciones teniendo en cuenta las características mostradas en la (figura 15).

Categoría de filtración	Definición	Características
0	No hay manifestaciones de la filtración	Sin geoformas asociadas, ni señales de SBP o del perfil acústico
1	Baja filtración	Presencia de geoforma y/o señales leves o medias del SBP y/o perfil acústico o rasgo físico. Al menos 2 características referentes a una filtración
2	Media filtración	Con geoforma asociada o rasgos físicos de filtración como montículo, roca en laja o cascajo de algas. Señales altas o moderadas del SBP al igual que del perfil acústico.
3	Alta filtración	Con geoforma asociada, falla, más de un rasgo físico de filtración como montículo, roca en laja o cascajo de algas, señales altas o moderadas del SBP al igual que del perfil acústico

**Figura 15.** Categoría de filtración. En la imagen se enlistan las características definidas para cada categoría. Donde SBP: Subbottom profiler (perfilador del subfondo).

## 4.5 Procesamiento de muestras

### 4.5.1 Granulometría y foraminíferos

El análisis granulométrico de las muestras se realizó en los 2 cm superficiales de los núcleos de 4” y otras muestras de sedimento que se extrajeron con pala directamente del nucleador de caja, cuando no era posible extraer suficiente material debido a la presencia de sustratos duros. Las muestras fueron secadas en un horno a 60°C por 24 horas, luego se pesaron, se sumergieron en solución dispersante (hexametáfosfato de sodio + carbonato de sodio + agua destilada) y se lavaron en un tamiz de 63 µm. Con el peso seco de la fracción mayor a 63 µm se determinaron los porcentajes de lodos y arenas. Con base en lo anterior, los sedimentos fueron clasificados de acuerdo con su contenido de lodos tal como se indica en la *Tabla 2*.

**Tabla 2.** Criterio de clasificación de granulometría basado en el % de lodos de las muestras

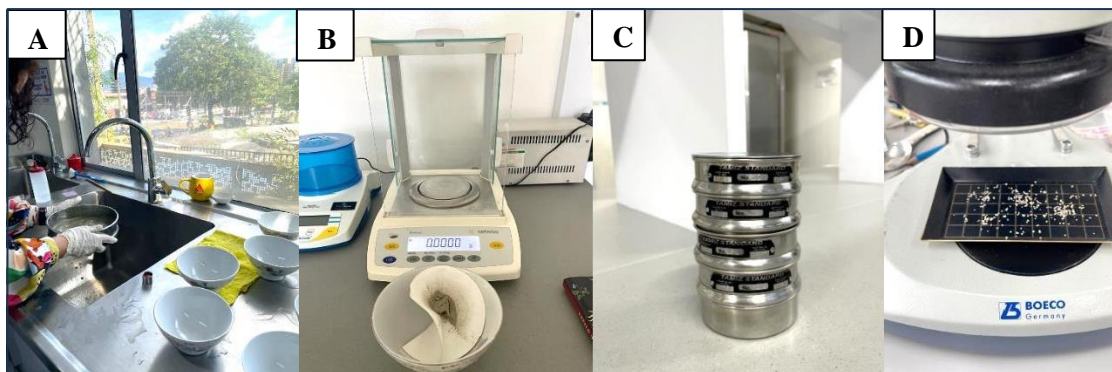
Clasificación del sedimento	Porcentaje de lodos
Arenas	<25%
Arenas Lodosas	25%-50%
Lodos Arenosos	50%-75%
Lodos	>75%

El análisis de foraminíferos se realizó en los 2 cm superficiales de los núcleos de 3” tomados con el extrusor. En total se procesaron 36 muestras, correspondientes a los primeros dos centímetros de los



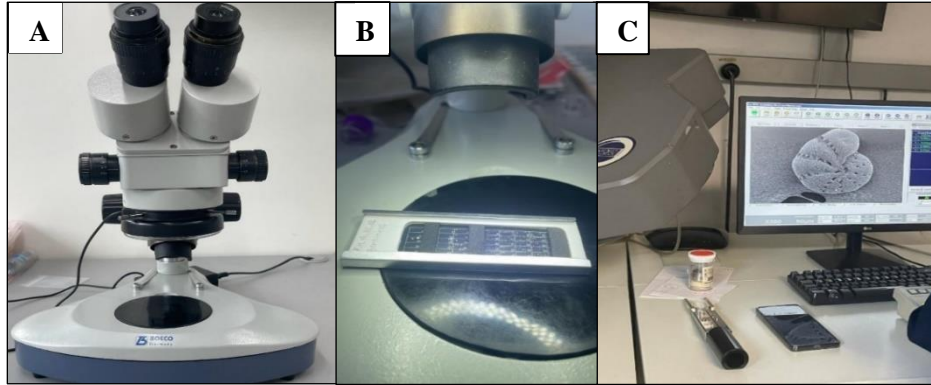
sedimentos superficiales de 18 estaciones. Las muestras fueron lavadas directamente en tamiz de 63 $\mu$ m, y dispuestas en papel filtro para secarse a temperatura ambiente durante aproximadamente 2 días. Posteriormente fueron pesadas y tamizadas en un juego de tamices de tamaños de 1 mm, 500  $\mu$ m, 250  $\mu$ m y 125 $\mu$ m. Cada fracción fue pesada y almacenada en bolsas plásticas herméticas (*figura 16*). Posteriormente se procedió a analizar las muestras bajo un estereomicroscopio marca Boeco 3500. Para esto se tomaron alícuotas de las fracciones de 500  $\mu$ m, 250  $\mu$ m y 125  $\mu$ m. Algunas de ellas fueron tomadas con un microcuarteador y otras directamente. El método de las alícuotas directas demostró ser más eficiente y rápido. Se realizó una comparación de los resultados por los dos métodos y resultaron equivalentes. En las alícuotas se estimaron visualmente el porcentaje de biogénicos (espículas, fragmentos de coral, ostrácodos, foraminíferos) y terrígenos (fragmentos de cuarzo, minerales maficos, líticos, etc.). Después se extrajeron un mínimo de 300 foraminíferos bentónicos (FB) entre las tres fracciones mencionadas, proporcional al peso de cada fracción. Este número, de acuerdo con Fatela & Taborde (2002), es adecuado para un análisis confiable de toda la población. Adicionalmente, se extrajo el total de foraminíferos planctónicos (FP) que había dentro de las alícuotas usadas para la extracción de los 300 FB. No se encontraron foraminíferos teñidos, por lo que la diferenciación entre vivos y muertos no se realizó.

Los FB extraídos fueron organizados para cada fracción en placas micropaleontológicas (*figura 17*), según sus características morfológicas como tipo de pared, enrollamiento, tipo de abertura, número de cámaras, etc. Adicionalmente se cuantificaron aquellos foraminíferos que tuvieran características de sobrecrecimiento, piritización, disolución y fragmentación, para después calcular un porcentaje por muestra y tomarles fotografías en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés).



**Figura 16.** Procesamiento de muestras. **A.** Lavado de la fracción de 63 $\mu$ m. **B.** Muestra seca en papel filtro lista para ser pesada. **C.** Juego de tamices. **D.** Alícuotas de sedimento de la fracción cuarteada para el análisis de componentes biogénicos, terrígenos y selección de foraminíferos

Para la clasificación taxonómica se utilizaron los siguientes manuales y bibliografía disponible en la web como (Debenay, 2013; Jones et al., 1994), entre otros, además del uso de catálogos digitales del registro de especies tales como Foraminifera eu y (WoRMS Editorial Board, 2024).

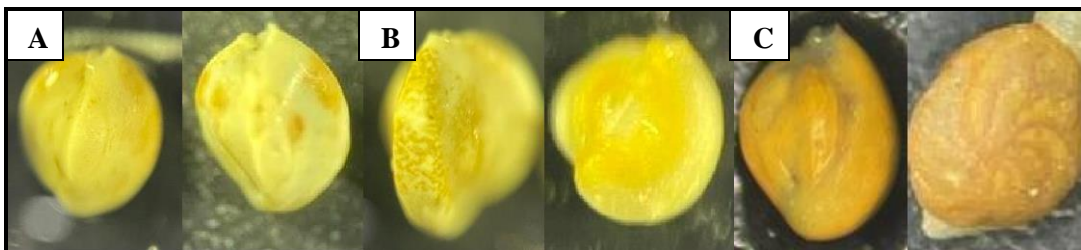


**Figura 17.** Elementos usados para la selección de foraminíferos. **A.** Estereomicroscopio. **B.** Placa micropaleontológica. **C.** Microscopio electrónico de barrido

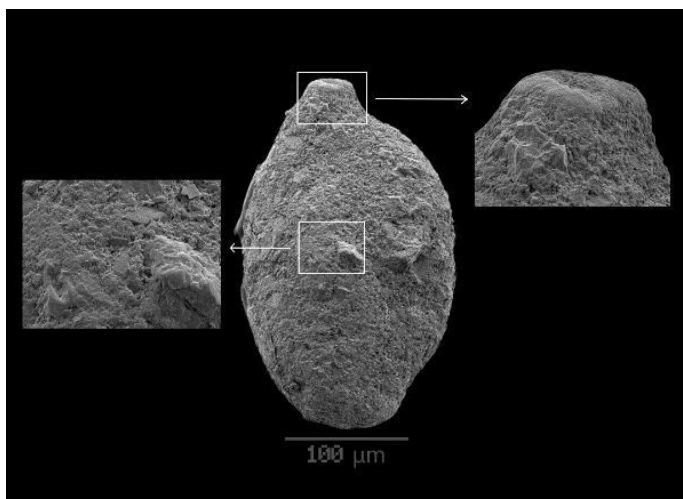
Las abundancias totales de FB y FP fueron calculadas a partir del peso de las alícuotas con respecto al peso total de las arenas en el volumen de los cilindros de muestreo, para determinar el número de individuos por cm<sup>3</sup>. La abundancia por muestra de cada especie fue llevada a porcentaje y se calculó el porcentaje promedio de cada especie en todas las muestras, para seleccionar las 15 especies más representativas del área de estudio (aquellas que tuvieron más del 1.5% en el promedio de todas las muestras).

#### 4.5.2 Identificación de sobrecrecimientos y piritización

Durante la selección de los especímenes por fracción se identificó la presencia de foraminíferos con paredes de coloración naranja-amarillenta que presentaban texturas concéntricas o manchas aleatorias de color naranja sobre sus cámaras y en algunos casos una capa naranja que recubría la totalidad de la concha del foraminífero (*figura 18*). Estas características han sido descritas por otros autores como producto del sobrecrecimiento autógeno de calcita en las conchas de foraminíferos (Detlef et al., 2020; Ni et al., 2020). Una muestra de estos foraminíferos fue vista bajo el SEM para corroborar que estos rasgos se debían a sobrecrecimiento (*figura 19*). De esta manera se establecieron los criterios para identificar y cuantificar foraminíferos con sobrecrecimiento.



**Figura 18.** Tipos de sobrecrecimientos. **A.** Se identifican las formas concéntricas o parches de coloración naranja sobre la pared de los foraminíferos porcelanaceos. **B.** Textura punteada o franjas naranjas a lo largo del borde de las cámaras. **C.** Concha completamente naranja, textura homogénea plana, sin relieve, enmascarando los rasgos de la concha.



**Figura 19.** Fotografías SEM de *Quinqueloculina* con sobrecrecimiento.

Adicionalmente, en algunos casos también se identificaron foraminíferos con un relleno interno de pirita, la cual se asocia con una coloración oscura de la concha.

### 4.5.3 Diagrama ternario de estructura de la pared.

Con el fin de corroborar y conocer el tipo de ambiente al que pertenecen las asociaciones de especies encontradas en las muestras superficiales, se calculó el porcentaje de pared hialina, porcelanacea y aglutinada para cada muestra, ayudándose con la clasificación taxonómica de las especies para rectificar la composición de las conchas. Los porcentajes fueron procesados en el software Past v 4.11 (Hammer et al., 2001) utilizando la función de diagramas ternarios y se comparó con el diagrama ternario de ambientes de Kurniasih et al. (2017) para identificar el tipo de ambiente según el tipo de pared dominante.

### 4.5.4 Índice de diversidad de Shannon Weaver (H')

La estimación de la diversidad de especies de FB se realizó a través del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H'), que ha sido utilizado para estas poblaciones en ambientes de filtración (Machain-Castillo et al., 2019; Panieri, 2006a; Panieri et al., 2009, 2014; Schwing et al., 2017), además de ser usado tradicionalmente por la mayoría de ecólogos debido a la simplicidad computacional de su cálculo y permitir una discriminación marcada de la riqueza de especies en diferentes sitios de muestreo (Magurran, 1988). Este se calculó en el programa Past v 4.11 (Hammer et al., 2001), con la siguiente fórmula (Shannon, 1948):

$$H' = - \sum_{n=1}^s pi * \ln(pi)$$

Donde: s es el número de especies por muestra y pi la proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos. A mayor valor de H', mayor diversidad de especies. Este índice puede adquirir valores entre cero (0) cuando hay una sola especie (Villareal et al., 2004).

#### 4.5.5 Índice de oxigenación de foraminíferos bentónicos (BFOI)

Estudios en filtraciones de metano como Zhang et al., (2018); Pan et al., (2017); Panieri et al., (2014), han utilizado el índice de oxigenación de FB desarrollado por Kaiho (1994, 1999) para identificar los niveles de anoxia en los sedimentos, producto de la oxidación anaeróbica del metano. Este índice se basa en el cálculo de la relación del número de especies óxicas, subóxicas y disóxicas presentes en los sedimentos analizados, permitiendo la estimación de las condiciones de oxígeno disuelto en el medio (Kaiho, 1999). Dependiendo de la dominancia de las especies encontradas, puede calcularse a partir de las 2 ecuaciones descritas a continuación: (Eq 1 y 2).

Caso 1:  $O > 0$

$$\text{BFOI} = \left[ \frac{O}{O + D} \right] * 100 \quad (\text{Eq 1})$$

Caso 2:  $O=0$  y  $SD > 0$

$$\text{BFOI} = \left[ \frac{S}{S+D} - 1 \right] * 50 \quad (\text{Eq 2})$$

Siendo O=Especies indicadoras óxicas, S=Especies indicadores subóxicas y D=Especies indicadoras disóxicas.

Para diferenciar los especímenes en indicadores óxicos, subóxicos y disóxicos se compararon con las especies o géneros descritos en la (Tabla 4) (Puerres et al., 2022), según Kaiho (1994) Los cálculos fueron realizados en el software R v 4.3.0 (los códigos están disponibles a petición).

A continuación, se enlistan las especies o géneros reconocidos en las muestras superficiales y su categorización (no se encontraron grupos subóxicos):

##### Indicadores óxicos

1. *Cibicides sp* 2. *Cibicidoides mundulus* 3. *Cibicidoides wuellerstorfi* 4. *Cibicidoides spp* 5. *Globocassidulina subglobosa* 6. *Quinqueloculina spp* 7. *Triloculina sp* 8. *Pyrgo*

## Indicadores disóxicos

### 1. *Bolivina* 2. *Cassidulina* 3. *laevidentalina* 4. *Fursenkoina*

**Tabla 3.** Foraminíferos indicadores de oxigenación Tomado de (Kaiho, 1994) y modificado por (Puerres et al., 2022)

FBOI	Breve descripción morfológica	Especies indicadoras
<b>Indicadores óxicos</b>	Epifauna de pared gruesa en agua de fondo con alto contenido de oxígeno	<i>Cibicides</i> spp., <i>Cibicoides havanensis</i> , <i>Cibicoides kullenbergi</i> , <i>Cibicoides mundulus</i> , <i>Cibicoides robertsonianus</i> , <i>Cibicoides wuellerstorfi</i> , <i>Cibicoides</i> spp., <i>Globocassidulina subglobosa</i> , <i>Laticarinina pauperata</i> , <i>Pyrgo murrhina</i> , <i>Quinqueloculina</i> spp., y <i>Triloculina</i> spp.
<b>Indicadores subóxicos</b>	A. Grupo conformado por especímenes pequeños de especies óxicas (<350 µm)	
	B. Incluyen habitantes epifaunales e infaunales en condiciones de agua de fondo con alto contenido de oxígeno que comúnmente son habitantes de Epifauna en condiciones de agua de fondo con poco oxígeno	<i>Alabamina</i> spp., <i>Astrononion pusillum</i> , <i>Bolivinita quadrilatera</i> , <i>Bulimina striata</i> , <i>Cancris inaequalis</i> , <i>Cassidulina</i> spp., <i>Ceratobulimina pacifica</i> , <i>Dentalina</i> spp., <i>Ehrenbergina pacifica</i> , <i>Eilohedra nipponica</i> , <i>Favocassidulina favus</i> , <i>Fissurina</i> spp., <i>Gyroidina</i> spp., <i>Gyroidinoides</i> spp., <i>Hoeglundina elegans</i> , <i>Lagena</i> spp., <i>Lenticulina</i> spp., <i>Melonis</i> spp., <i>Nonion</i> spp., <i>Oridorsalis</i> spp., <i>Pullenia</i> spp., <i>Rosalina columbiensis</i> , <i>Sphaeroidina bulloides</i> , <i>Stainforthia apertura</i> , <i>Tosaia hanzawai</i> , <i>Trifarina</i> spp., <i>Uvigerina</i> spp. y <i>Valvulineria</i> spp.
	C. Paredes delgadas y se encuentran en microhábitats intermedios entre los de índices intermedios B y los índices disóxicos.	<i>Bulimina aculeata</i> , <i>Elphidium excavation</i> y <i>Nonionella</i> spp.
<b>Indicadores disóxicos</b>	Infauna de paredes delgadas, alargada, aplanada, en agua de fondo con alto contenido de oxígeno	<i>Bolivina decussata</i> , <i>Bolivina interjuncta</i> , <i>Bolivina pacifica</i> , <i>Bolivina pus illa</i> , <i>Bolivina robusta</i> , <i>Bolivina seminuda</i> , <i>Bolivina spissa</i> , <i>Bolivina</i> spp., <i>Bulimina exilis</i> , <i>Cassidulina tumida</i> , <i>Chilostomella oolina</i> , <i>Chilostomella ovoidea</i> , <i>Dentalina</i> spp., <i>Fursenkoina complanata</i> , <i>Fursenkoina rotundata</i> , <i>Globobulimina affinis</i> , <i>Globobulimina auriculata</i> , <i>Globobulimina pyrula</i> , <i>Gyroidina multilocula</i> , <i>Rutherfordia</i> spp. y <i>Suggrunda eekisi</i> .

Después del cálculo del índice para su interpretación se utilizó la (Tabla 4) (Kaiho, 1994) que relaciona los valores del índice BFOI con los niveles de oxígeno y las condiciones de oxígeno.

**Tabla 4.** Tabla de interpretación del índice BFOI. Tomada y modificada de (Kaiho, 1994)

Condiciones de Oxígeno disuelto		
Condición del medio	Nivel de oxígeno(ml/L)	Índice de oxigenación
Alto en oxígeno	3.0-6.0 +	50-100
Bajo en oxígeno	1.5-3.0	0-50
Subóxico	0.5-1.5	-40-0
Disóxico	0.1-0.3	-50 – (-40)
Anóxico	0.0-0.1	-55

## 4.5.6 Análisis estadísticos

Se elaboraron gráficos de barras en Excel para visualizar la distribución de las especies principales y otras variables en cada una de las estaciones. Las variables ecológicas y ambientales fueron representadas en mapas de distribución elaborados en ArcGIS v 10.8 y se utilizó la función de

densidad de Kernel de la herramienta Spatial Analyst tool para estimar el comportamiento de la distribución espacial, calculando un raster suavizado de densidad a partir de un shapefile de puntos para cada variable. Se utilizó, Surfer v 16 para mejorar la escala de colores y la visualización de los mapas.

Las variables ambientales y ecológicas se organizaron inicialmente en dos matrices, una general y otra de estas variables con las especies principales (*anexo 2*). La matriz general consta de 18 variables (profundidad, salinidad de fondo, temperatura, oxígeno disuelto, pH, % de lodos, % de terrígenos, abundancia FB, abundancia FP, índice BFOI, índice de Shannon ( $H'$ ), concentración de HCs, concentración de metano, categoría de filtración, % de fragmentación, % sobrecrecimiento, % piritización, % de disolución). La matriz de las especies contiene todas las variables ambientales más los porcentajes de las especies.

Los análisis de las variables ambientales y sedimentológicas en conjunto con las variables poblacionales de los foraminíferos fueron procesados en el software R v 4.3.0 (R Core Team, 2023). Para establecer la asociación entre variables, primero se estandarizaron por el método estadístico de mínimos- máximos y luego se calculó el coeficiente de correlación de Pearson en el paquete “corrplot” (Wei & Simko, 2021). Posteriormente, teniendo en cuenta el coeficiente de correlación ( $r > 0.5$ ) y la significancia de las correlaciones ( $p < 0.05$ ) se reconoció la relación entre las distintas variables y se redujo el número de variables según su significancia e independencia.

Adicionalmente, para identificar la agrupación de las estaciones con base en la distribución de las especies dominantes, se realizó un análisis clúster en el software R v 4.3.0, utilizando el paquete “vegan”(Oksanen et al., 2022), la función “vegdist” y el método de Bray -Curtis para calcular la distancia de disimilitud entre estaciones y construir un dendrograma (los códigos están disponibles a petición). Luego se estableció una distancia de corte para identificar el agrupamiento de las estaciones.

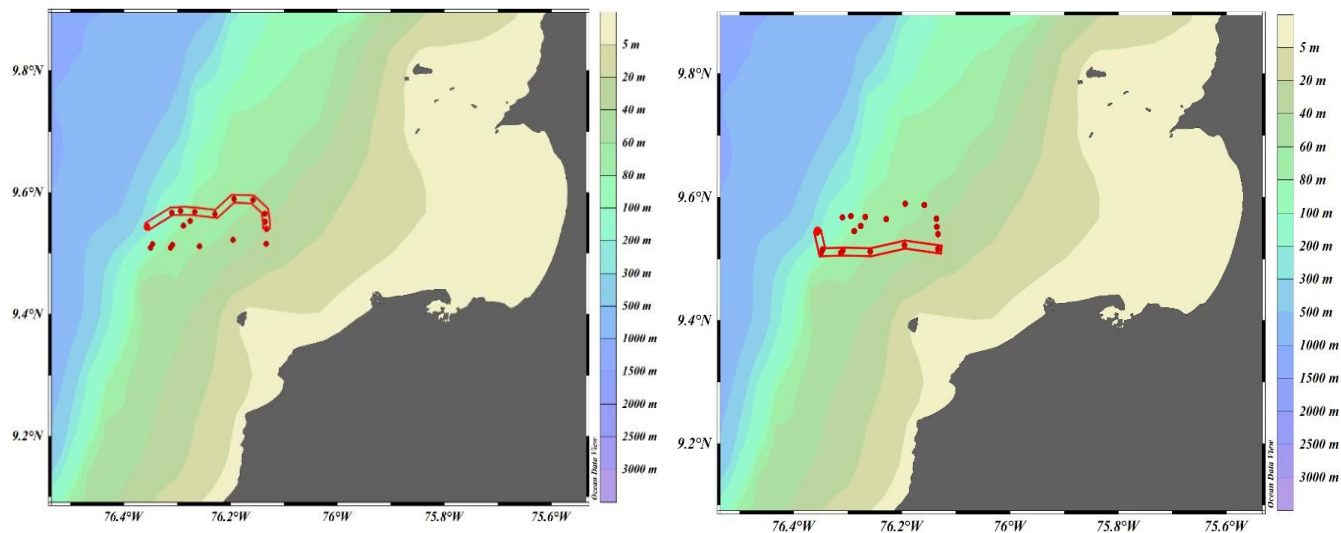
Para el análisis poblacional de las 15 especies dominantes y establecer subconjuntos o similitudes entre ellas, inicialmente se estandarizaron las abundancias relativas por el método de Hellinger y se realizó un Análisis de Componentes Principales o (PCA, por sus siglas en inglés), utilizando los paquetes “vegan”(Oksanen et al., 2022), “ggplot2”(Wickham, 2016) y “factoextra”. Adicionalmente, se realizó otro PCA para establecer la asociación entre las estaciones y las categorías de filtración a partir del porcentaje de abundancia de las 15 especies con los paquetes “ggrepel”(Slowikowski, 2023), “ggdist”(Kay, 2023) y “ggfortify”(Horikoshi & Tang, 2016)(*anexo 3*).

Finalmente se realizaron Análisis de correspondencia Redundante (RDA, por sus siglas en inglés) para construir modelos que permitieran explicar la relación entre las variables respuesta, establecidas como las abundancias de las 15 especies dominantes de FB y las variables predictoras, como la concentración del metano (ppm), el % de lodos, la profundidad, la salinidad, entre otras. Se usaron los paquetes “ggplot2”(Wickham, 2016) y “vegan”(Oksanen et al., 2022)(los códigos están disponibles a petición). La significancia estadística para cada modelo se obtuvo a partir de análisis estadísticos de permutación ANOVA (*anexo 4*).

## 5. Resultados

### 5.1 Datos oceanográficos

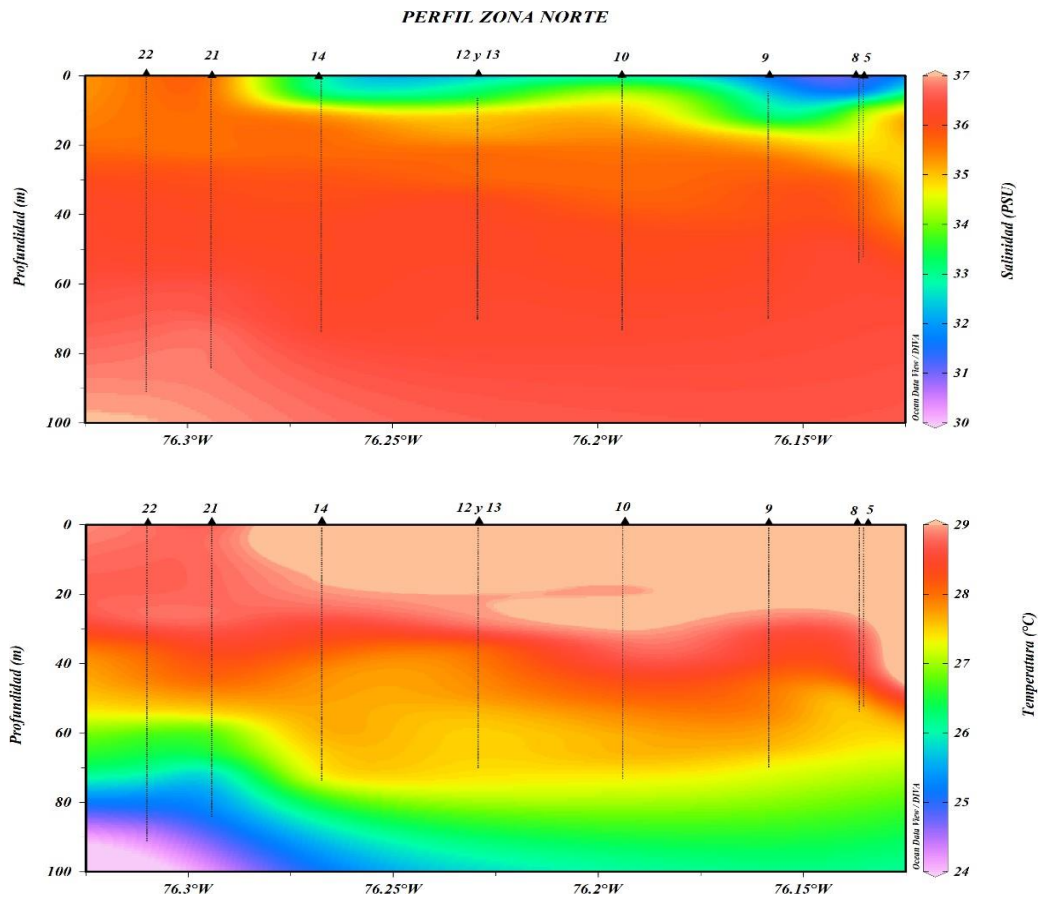
Los perfiles hidrográficos fueron medidos hasta profundidades entre 43 y 100m. Para la interpretación de los datos se realizaron 2 cortes ilustrados en la (figura 20).



**Figura 20.** Cortes norte (izquierda) y sur (derecha) de la oceanografía. La escala de colores representa la profundidad de la batimetría.

El corte norte (figura 21) indica el comportamiento de la salinidad y la temperatura cerca de las estaciones 5, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 21 y 22. La columna de agua presenta una estratificación normal, con aguas más dulces y cálidas en la superficie. La capa de baja salinidad en superficie, con salinidades de 32 a 35 y profundidades entre 10 y 20 m, se presenta sobre la plataforma continental, indicando influencia de aguas dulces continentales. En esta zona, la salinidad en el fondo alcanza valores de 36. Hacia el talud (estaciones 21 y 22), la salinidad es más homogénea en la columna de agua, con valores superficiales de 35.5 y profundos de 37. En cuanto a la temperatura, en las estaciones de la plataforma se nota una masa de agua más cálida (29°C) en superficie (hasta 30 m), que parece coincidir con la capa de agua dulce de aportes continentales. Y en profundidad el agua

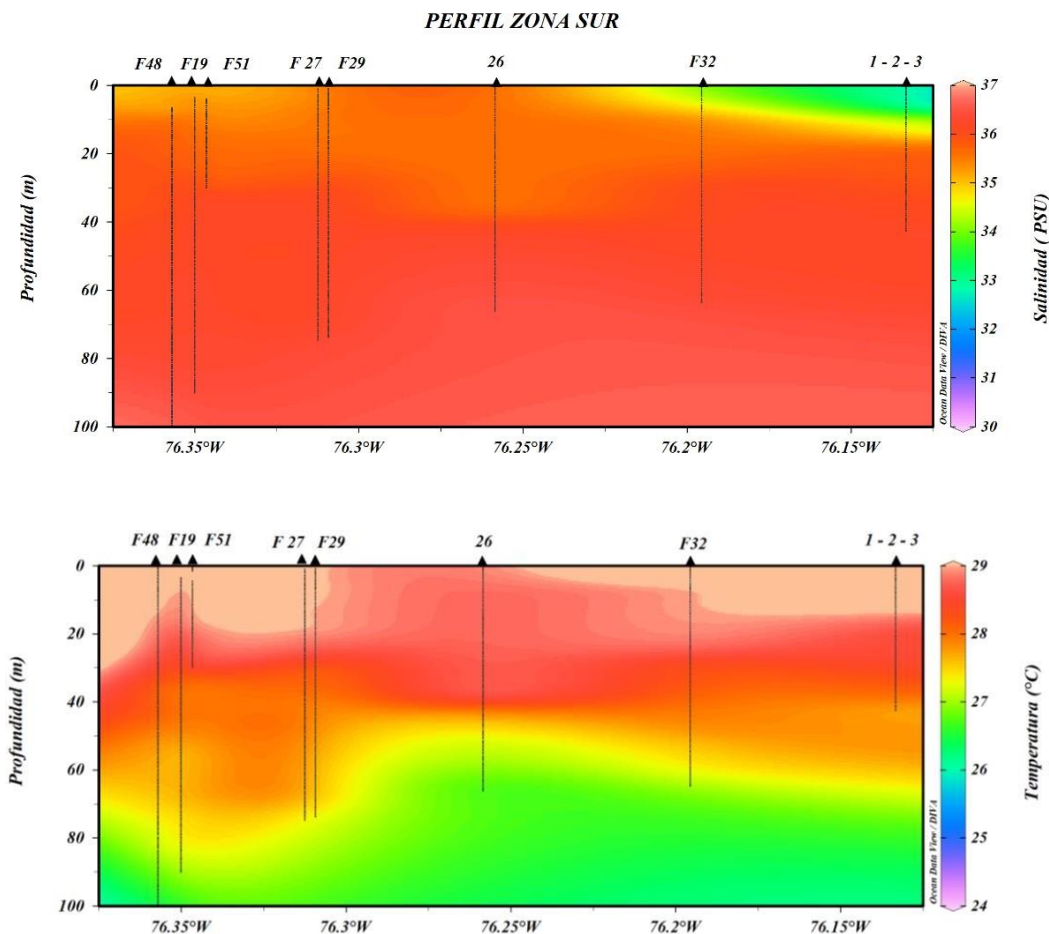
se encuentra estratificada hasta alcanzar 26°C en el fondo. En las estaciones cercanas al talud (21 y 22), el agua pasa de 28°C en superficie, a 24°C en el fondo.



**Figura 21.** Corte de salinidad y temperatura de la zona norte (las líneas muestran la localización y profundidad de los perfiles). Los números indican las estaciones de muestreo asociadas.

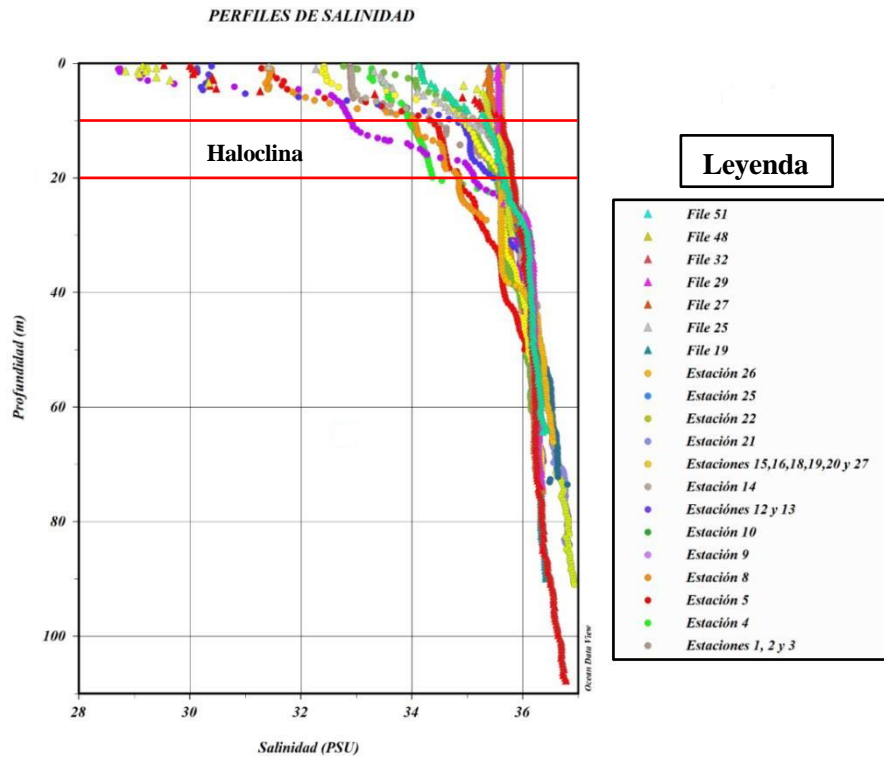
En el corte sur (*figura 22*) se evidencian los perfiles de salinidad y temperatura cercanos a las estaciones 1,2,3 y 26. En el corte de salinidad, la capa superficial de agua dulce está limitada a las estaciones más cercanas al continente y en general la salinidad es más homogénea en la columna de agua. El corte de temperatura muestra estratificación entre 29°C en superficie y 26.5°C en el fondo. Las temperaturas del fondo son más cálidas que en el corte norte. Se observan una especie de ondas internas que pueden ser producto del relieve en profundidad, el espolón de isla fuerte o simplemente la dirección del corte con respecto a la batimetría.



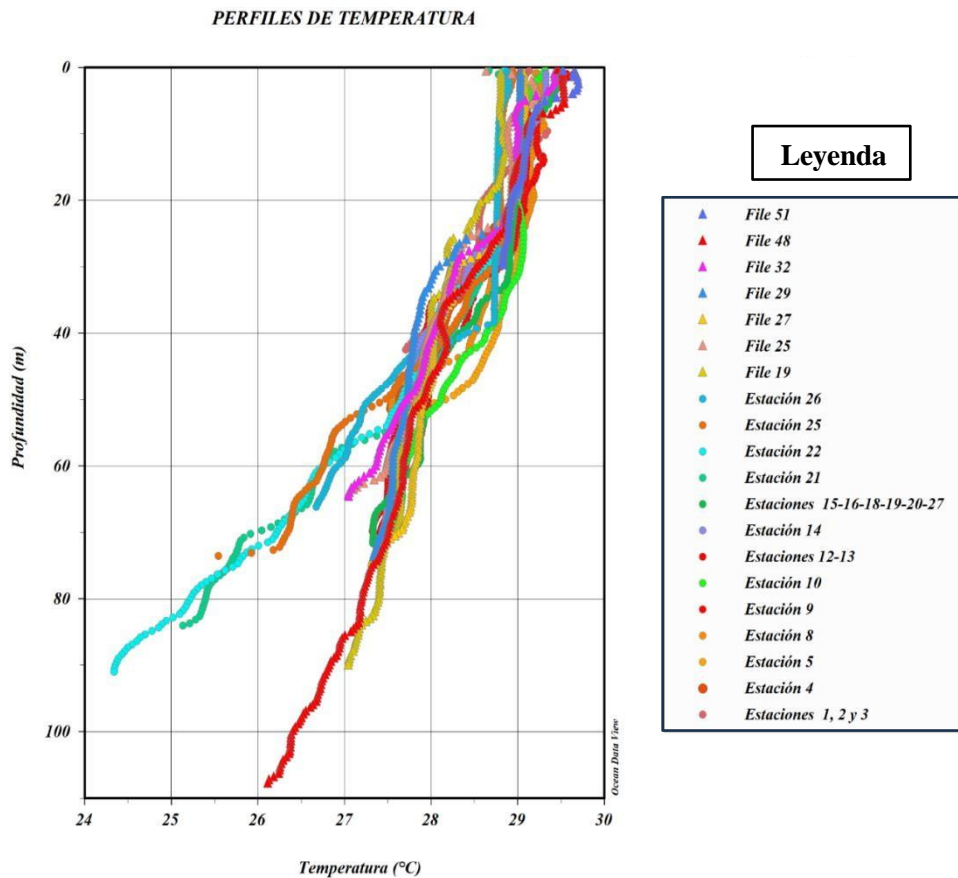


**Figura 22.** Corte de salinidad y temperatura de la zona sur (las líneas muestran la localización y profundidad de los perfiles). Los números indican las estaciones de muestreo asociadas, aquellas acompañadas por la letra F representan los archivos que no se relacionaron con ninguna estación.

En los perfiles medidos, la salinidad aumenta con la profundidad. La haloclina se localiza entre los 10 y 20 m de profundidad para aquellas estaciones con profundidades de hasta 70m. En las estaciones más profundas no se presenta (*figura 23*). Asimismo, la temperatura disminuye con la profundidad. Aunque en los perfiles se nota la capa de mezcla (isotérmica) hasta una profundidad de 20 m y el inicio de la termoclina, no se logró identificar la base de la termoclina (*figura 24*). En general las observaciones de la columna de agua en el área coinciden con Montoya et al. (2018) quienes indicaron que la capa de mezcla en esta zona del Caribe se encuentra entre 20 y 30 m de profundidad.



**Figura 23.**Perfiles de salinidad. Los perfiles están nombrados con la estación asignada o con el nombre del archivo en los casos en los que no hay estación cercana.



**Figura 24.**Perfiles de temperatura. Los perfiles están nombrados con la estación asignada o con el nombre del archivo en los casos en los que no hay estación cercana.

Los resultados relacionados con la temperatura de la capa isoterma, la salinidad de la capa isohalina, profundidad de la capa isohalina y la intensidad de la haloclina se representan en la (Tabla 5). La temperatura de la capa isoterma presenta un valor mínimo de 28.73°C y un valor máximo de 29.53°C entre las 18 estaciones. La menor temperatura medida fue la de la estación MSH-26 y la mayor temperatura se registró en la estación MSH-09.

La salinidad del agua superficial se encuentra entre valores de 29.11 y 35.67. La estación con el menor registro de salinidad en superficie es la estación MSH-09 y la de mayor registro MSH-21. La profundidad de la capa isohalina fluctúa entre los 6m para la estación MSH-05 y 38 m para la estación MSH-10. La intensidad de la haloclina es alta en la estación MSH-09 con un valor de 6.55, seguida por las estaciones MSH-12 y MSH-13 con un valor de 5.49.

**Tabla 5.** Valores de la temperatura de la capa isoterma, salinidad superficial y profundidad de la capa isohalina e intensidad de la haloclina.

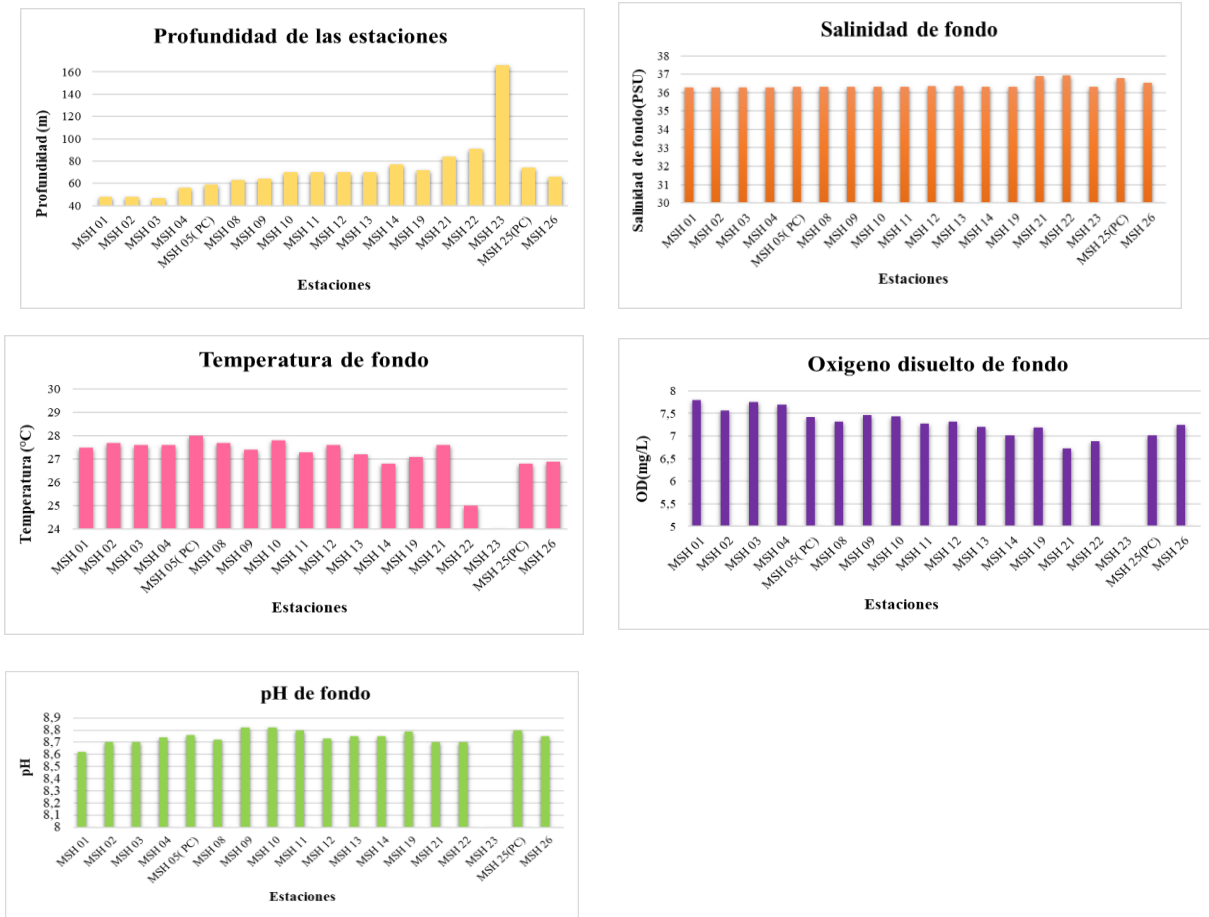
Estaciones	Temperatura de la capa isoterma (t superficial °C)	Salinidad de la capa isohalina (s superficial)	Profundidad de la capa isohalina	Intensidad de la haloclina
MSH 01	29,05	32,93	15	2,35
MSH 02	29,05	32,93	15	2,35
MSH 03	29,05	32,93	15	2,35
MSH 04	29,04	33,48	20	2,43
MSH 05(PC)	29,23	31,66	6	2,76
MSH 08	29,28	31,43	26	4,25
MSH 09	29,53	29,11	22	6,55
MSH 10	29,23	33,7	38	2,255
MSH 11	NA	NA	NA	NA
MSH 12	29,07	30,21	18	5,49
MSH 13	29,07	30,21	18	5,49
MSH 14	29,32	32,96	12	2,7
MSH 19	29,43	32,68	16	2,95
MSH 21	28,84	35,67	NA	NA
MSH 22	28,77	35,62	NA	NA
MSH 23	NA	NA	NA	NA
MSH 25(PC)	28,82	35,64	NA	NA
MSH 26	28,73	35,63	NA	NA

**Nota:** En la tabla se registran los valores calculados para las variables mencionadas. Aquellos espacios con NA, hacen referencia aquellos valores que no pudieron calcularse debido a la ausencia de haloclina o de medidas cercanas a la estación.

## 5.2 Agua de fondo

En la (figura 25) se ilustran las profundidades y los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos en el agua de fondo de cada estación. Debido a la profundidad de la estación MSH-23, no fue posible realizar el muestreo del agua de fondo con la botella Niskin.

La salinidad medida con la sonda multiparamétrica de la mayoría de las estaciones tiene valores < 34. Estos son valores típicos del agua por encima de la haloclina, que está a 20 m de profundidad, pero las estaciones tienen más de 40 m de profundidad. Por lo tanto, los valores de salinidad medidos con la sonda multiparamétrica no son confiables y no serán considerados en la matriz de variables ambientales. A cambio, se usaron los valores de salinidad del CTD medidos cerca de las estaciones en la campaña 1. Al igual que la salinidad, la temperatura de fondo es consistente en todas las estaciones, presentando valores superiores a 27°C en la mayoría de las estaciones, a diferencia de las estaciones MSH-14, MSH-19, MSH-22, MSH-25 y MSH-26, con valores inferiores. La estación MSH-22 fue la más fría, con una temperatura de 25 °C. Los resultados son consistentes con los cortes de temperatura medidos con el CTD.



**Figura 25.** Variables medidas en el agua de fondo. La salinidad corresponde a las mediciones del CTD y no a las mediciones del agua de las botellas Niskin. (PC) indica punto de control.

Los valores de oxígeno disuelto (OD) también son bastante constantes, oscilando entre 6.7 y 7.8 mg/L. Estos valores indican aguas bien oxigenadas. Se observan pequeñas variaciones entre estaciones. Las estaciones más cercanas a la costa (MSH-01, MSH-02, MSH-03 y MSH-04) presentan valores superiores a 7.5 mg/L. Las estaciones desde la MSH-05 hasta la MSH-13, junto

con la MSH-19 y MSH-26 tienen valores entre 7 y 7.5 mg/L. Y finalmente las estaciones MSH-14, MSH-21, MSH-22 y MSH-25 tienen valores inferiores a 7mg/L.

En el caso del pH de fondo, los valores de todas las estaciones son muy homogéneos y no se refleja ningún cambio aparente entre las zonas de la plataforma. Los valores medidos oscilan entre 8.6 y 8.8. Se podrían diferenciar las estaciones con  $\text{pH} \geq 8.75$  (5, 9, 10, 11, 13, 14, 19, 25 y 26) y con  $\text{pH} < 8.75$  (1, 2, 3, 4, 8, 12, 21, 22).

En cuanto a los gases en el agua de fondo (*Tabla 6*), hay mayores concentraciones de metano que de otros gases. Sin embargo, la cantidad de metano encontrada es muy baja para lo esperado en una zona con filtraciones activas (valores  $< 2.45$  ppm). Las concentraciones de la suma de otros hidrocarburos (HCs) fueron menores a 3.17 ppm. Las estaciones que registraron las concentraciones más altas de gases (tanto metano como otros HCs) en las muestras de agua analizadas, dentro de los valores traza registrados por el cromatógrafo de gases son las estaciones MSH-19, MSH-10 y MSH-15.

**Tabla 6.** Concentración del metano y otros HCs traza en las muestras de agua de fondo (unidades de partes por millón (ppm)). Otros HCs = Sumatoria de las concentraciones de los gases de (Etano+Propano+Butano+Isobutano+Pentano+Isopentano).

Estaciones	Metano	Etano	Propano	Butano	Isobutano	Pentano	Isopentano	Otros HCs
MSH-01	0,29	0,01	0,01	0,01	0,31	0,28	0,01	0,63
MSH-02	1,32	0,01	1,07	0,01	0,01	0,01	0,01	1,12
MSH-03	0,96	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06
MSH-04	1,58	0,01	1,02	0,01	0,01	0,01	0,01	1,07
MSH-05	2	0,01	1,57	0,01	0,01	0,01	0,31	1,92
MSH-08	0,79	1,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,31	1,38
MSH-09	1,15	0,01	1,19	0,01	0,01	0,01	0,27	1,5
<b>MSH-10</b>	<b>1,92</b>	<b>0,01</b>	<b>1,94</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,36</b>	<b>2,34</b>
MSH-12	1,18	0,01	1,54	0,01	0,01	0,01	0,01	1,59
MSH-14	0,62	0,35	0,01	0,01	0,01	0,01	0,13	0,52
<b>MSH-15</b>	<b>1,82</b>	<b>1,58</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,44</b>	<b>2,06</b>
MSH-16	1,15	0,49	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,54
MSH-17	0,71	0,01	0,66	0,01	0,01	0,01	0,01	0,71
MSH-18	1,34	0,01	0,46	0,01	0,01	0,01	0,24	0,74
<b>MSH-19</b>	<b>2,45</b>	<b>0,81</b>	<b>1,5</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,83</b>	<b>3,17</b>
MSH-20	0,57	0,01	0,01	0,01	0,42	0,01	0,01	0,47
MSH-21	1,09	0,01	0,52	0,01	0,6	0,01	0,19	1,34
MSH-26	1,73	0,23	0,01	0,58	0,01	0,01	0,01	0,85

### 5.3 Caracterización del fondo marino y categoría de filtración

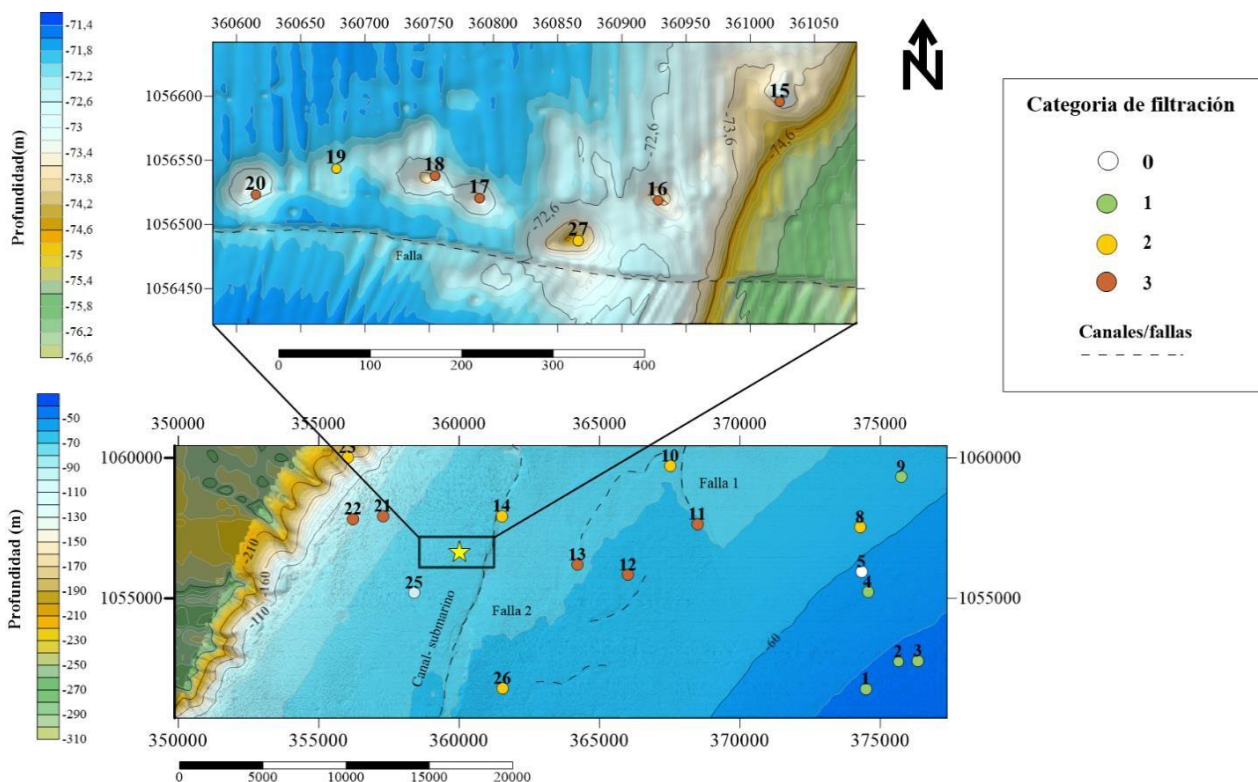
La caracterización del fondo marino se realizó con base en las observaciones del ROV y el análisis de la batimetría mediante la distinción de las geofomas submarinas, en donde se localizan las zonas con pockmarks, las zonas con presencia de conos o pequeños volcanes de lodo, la descripción del canal que atraviesa de norte a sur la zona intermedia y otros elementos estructurales que permiten entender los procesos asociados con filtraciones en la zona. De acuerdo con la combinación de los

rasgos asociados con filtraciones se establecieron categorías de filtración tal como se describe en la (Tabla 7). En la (figura 26) se puede observar la distribución espacial de las categorías de filtración establecidas para cada una de las estaciones.

**Tabla 7.** Categoría de filtración de las estaciones

Estación	Pockmark	Señales de SBP	Filtraciones perfil acústico	Falla con domo	Rocas en laja	Cascajo de algas	lecho bacteriano	Montículos	Tipo de fondo	Observaciones ROV		Categoría filtraciones
										Orificios/filtraciones		
MSH 01	Si	Falla con domo	Posibles filtraciones	Si	No	No	No	No	Blando	No se observaron filtraciones		1
MSH 02	Si	Leves	Posibles filtraciones	Si	No	No	No	No	Blandos lodosos	Se observaron orificios de varios tamaños, pero no son evidencia de orificios por filtraciones.		1
MSH 03	No	Leves	Posibles filtraciones	No	Mala operación ROV							1
MSH 04	No	Leves	Posibles filtraciones	No	No	No	No	No	Blandos lodosos	No se observaron filtraciones. Se observaron cardúmenes de peces		1
MSH 05 (PC)	Blanco zona somera	Sin perfiles acústicos		No	No	No	No	No	Blandos lodosos	Presencia de orificios agrupados de tamaños variados.		0
MSH 08	No	Altas con slicks	Hay evidencia de filtraciones en el Water Column y Slicks	No	No	No	No	No	Blando	No se observaron filtraciones.		2
MSH 09	No	Medias	posibles filtraciones que se dispersan desde el fondo hasta la columna de agua	No	No	No	No	No	Blando con alteraciones en el fondo	No se observaron filtraciones, pero si orificios y alteraciones en el fondo		1
MSH 10	Si	moderadas con slicks	posibles filtraciones que se. Estación próxima a un slick	No	No	No	No	No	Blando	No se observaron filtraciones. Se aprecian macroalgas en pequeñas depresiones sobre el suelo		2
MSH 11	Si	señales medias de SBP con WC en falla	evidencia de filtraciones en el WC. Se observa en una falla	falla	Si	No	No	No	Duro	No se observan filtraciones		3
MSH 12	Si	señales altas en SBP con WC cerca a slick	Posibles filtraciones	No	Si	No	No	No	Moderadamente blando	Presencia de orificios en el fondo. Fondo		3
MSH 13	Si	señales alta SBP, cerca a slick	posibles filtraciones que se elevan 10 m	No	Si	No	No	No	Deformidades en el fondo	No se observan filtraciones/ si orificios		3
MSH 14	No	señales medias SBP con WC cerca slick	posibles filtraciones que se elevan 10 m	Si	Si	No	No	Si	Moderadamente blando, depresiones en el fondo	Se observan orificios grandes		2
MSH 15	Si	señales alta en SBP con WC cerca slick	posibles filtraciones que se elevan 10 m	Volcán con domo de falla	Si	No	No	No	Duro	presencia de burbujas/presencia de filtraciones		3
MSH 16	Si	señales altas SBP, con domo de falla	posibles filtraciones que se elevan 10 m	Si	Si	No	No	No	Duro	Orificios/ no se observan filtraciones		3
MSH 17	Si	señales altas SBP, con domo de falla	Numerosas filtraciones En el perfil acústico que se extienden Desde el fondo hasta 30 m	Si	Si	No	No	No	Duro	Orificios con numerosas filtraciones		3
MSH 18	Si	señales en SPB media con domo falla	posibles filtraciones que se elevan 10 m cerca al fond	Si	Si	No	No	Si	Deformidades en el fondo	Sin filtraciones		3
MSH 19	Si	con señales en SPB media.	posibles filtraciones que se desde el fondo hasta 55 m.	Si	No	Si	No	No	Fondo con algas orificios con algas	No se observan filtraciones. Presencia de fondo con Orificios con algas		2
MSH 20	Si	señales altas SBP, con domo de falla	posibles filtraciones que se elevan desde el fondo hasta 35 m con presencia de Intermitencia de la señal En la columna	Si	Si	No	No	No	Duro	Se observaron orificios y filtraciones aisladas		3
MSH 21	Si	señales leves SBP	Con posibles filtraciones en la Columna de agua entre 50 y 75 m no se observaron señales En el fondo	No	No	Si	Si	Si	Duro	Orificios (peces se escondieron) Posibles filtraciones columna de agua		3
MSH 22	Si	con señales en SBP media y presencia de domo	Con posibles filtraciones que se elevan 10 m cerca al fondo Hasta 50 m	si	No	Si	Si	Si	Duro	Orificios grandes/ No se observaron filtraciones		3
MSH 23	Volcán en slump	Sin perfiles acústicos		No	No	Si	No	No	Fondo con algas costrosas	Sin información		2
MSH 25(PC)	Blanco zona somera	Sin perfiles acústicos		No	No	Si	NO	No	Presencia de fondos con algas costrosas coralíneas, esponjas y octocorales. Fondo duro, cascajo,	No se observan filtraciones.		0
MSH 26	No	señales leves SBP en domo de falla	Con posibles filtraciones que se elevan desde media agua entre 35 y 55 m, además de algunas detecciones cerca al fondo hasta 66 m.	Si	No	No	No	Si	Fondos con macroalgas	No se observan filtraciones pero si orificios		2
MSH 27	Pockmark de gran extensión	sin señales en SBP o WC	Sin perfiles acústicos	No	Si	si	No	No	Fondos con algas y rocas	Filtraciones sobre fondos con algas y rocas		2

En general las estaciones cercanas a la costa presentan categoría de filtración 1. Alrededor de estas estaciones se encontró la presencia de domos, montículos/conos de aproximadamente 1m o 1.5m de altura y pockmarks con 100 m de diámetro y 1 m de profundidad, como se observa en la (figura 27), para el pockmark ubicado en la zona SE de las estaciones MSH-02 y MSH-03. La estación MSH-01 se localiza al lado de un domo con falla, pero no presenta otras señales. Adicionalmente, en la estación MSH-05 no se encontraron señales del SBP ni señales acústicas, solamente se reconocieron orificios sobre el fondo blando observados en las imágenes del ROV.



**Figura 26.** Categoría de filtración de las estaciones. En la imagen se visualiza la categorización de todas las estaciones de la zona de estudio donde 0 indica la ausencia de características relacionadas con filtración y 3 el nivel máximo de filtración. Además se observa la presencia de fallas de carácter distensivo a lo largo de la zona que suelen formar canales submarinos y ser conductos o espacios estructurales que permiten la liberación de fluidos a la columna de agua.

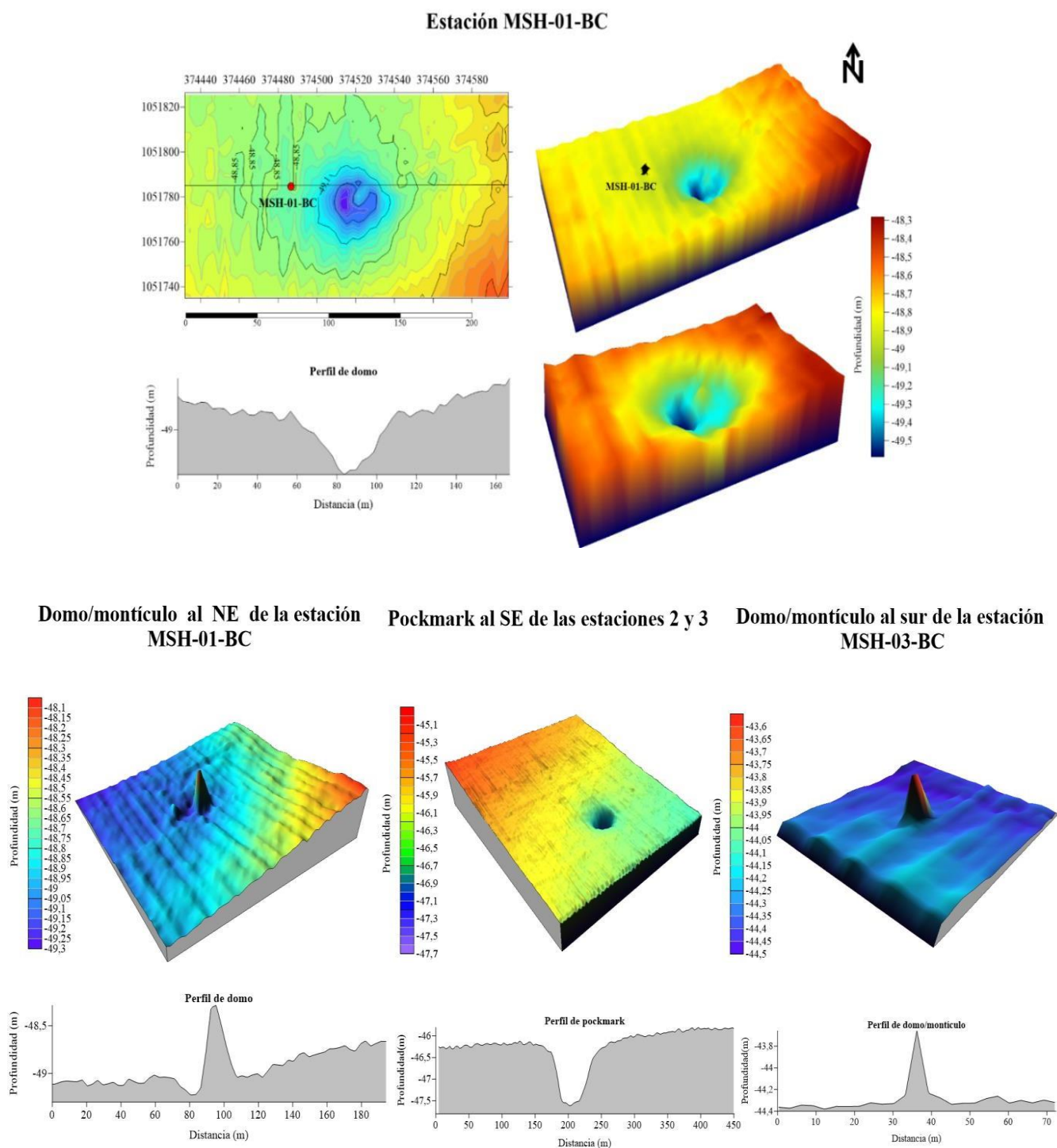
En las estaciones de la zona intermedia incrementa el nivel de filtración según las señales obtenidas. Esta zona refleja la incidencia de eventos de deformación distensivos debido a la generación de fallas que forman canales y socaban la superficie del fondo, como se observa en la (figura 26) Las estaciones MSH-11, MSH-12 y MSH-13 se clasifican en un nivel 3 de filtración debido a que se ubican dentro de pockmarks como se identifica en la (figura 28). Estos pockmarks presentan dimensiones de 15m de diámetro y 2m de profundidad en el caso de la estación 12 y 6m de diámetro y ~ 1m de profundidad en la estación MSH-13. De igual forma, estas estaciones registraron señales altas a medias del SBP, se encuentran cerca a slicks (manchas de aceite en superficie) y presentan

fondos deformados, mientras que las estaciones MSH-10 y MSH-26 se localizan en planicies cercanas a pockmarks y presentan señales leves del SBP.

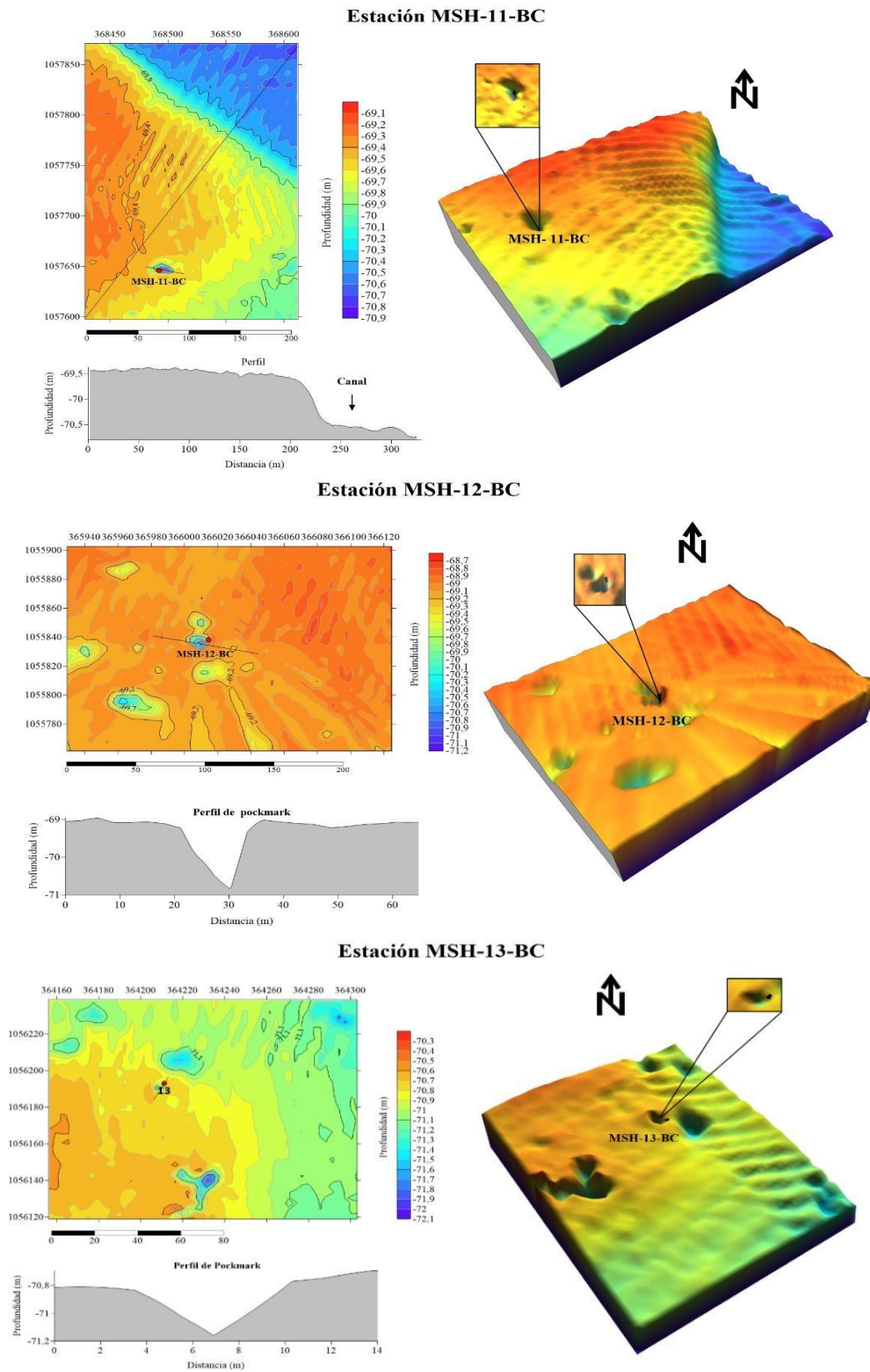
Las estaciones profundas ubicadas después de la falla 2 que forma el canal, presentan niveles 2 y 3 de filtración. Esta zona refleja una alta incidencia de esfuerzos distensivos, ocasionando la intersección de fallas que forman escarpes o terracedo del fondo, debilitando el terreno y haciéndolo susceptible a la liberación de material proveniente de profundidad (*figura 29*). Las estaciones MSH-14 y MSH-27 cercanas a la falla 2 son catalogadas con nivel 2 de filtración. La estación MSH-14 se encuentra sobre una falla o terraza paralela al canal y la MSH-27 dentro de un pockmark. Las estaciones cercanas a la estación 27 son clasificadas con nivel de filtración 3 debido a que integran un campo de pockmarks (*figura 29*), los cuales presentan profundidades no mayores a 2m y ~ 25 m de diámetro. Estas estaciones registraron señales altas y medias del SBP, lajas de carbonato y fondos con orificios. La estación MSH-15 por su parte no es un pockmark, es una estructura en forma de cono de 2m de alto y fue la única estación en donde se evidenció la emanación de burbujas en tiempo real durante la toma de imágenes con el ROV, por ende se nombró como la estación estrella del muestreo, reflejando la incidencia de escape de fluidos en este sector.

En cuanto a las estaciones más cercanas al talud, las estaciones con nivel de filtración 3 son la MSH-21 y MSH-22. La estación MSH-21 no se localiza sobre ninguna geoforma. La estación MSH-22 se encuentra en un pockmark y al sur de esta se localiza un campo amplio y extenso de pockmarks de diferentes dimensiones como se observa en la (*figura 30*). La estación MSH-23 se ubica en el flanco de un domo a 160m de profundidad en el quiebre del talud. Finalmente, la estación MSH-25 se encuentra sobre una planicie sin señales aparentes de filtración. Es importante destacar que las dos estaciones con categoría 0 (MSH-5 y MSH-25) correspondieron a las estaciones que se habían seleccionado como control. Sin embargo, aunque en ellas no hubo manifestaciones claras de filtración, no se puede afirmar que la influencia del campo de filtración es absolutamente nula.



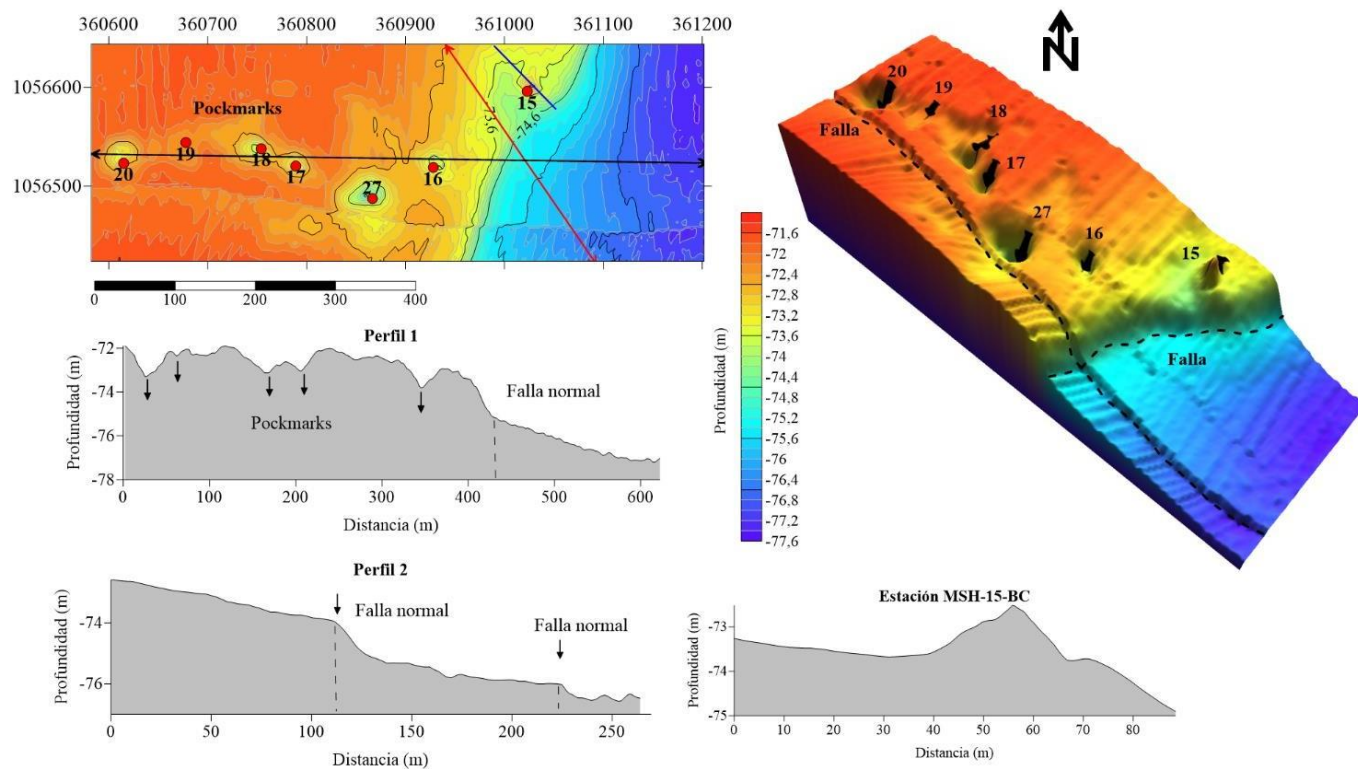


**Figura 27.** Geofomas de las estaciones cercanas a la costa. En la imagen se identifican los digramas 3D de la batimetría y perfiles de las geofomas registradas en las estaciones y zonas aledañas.

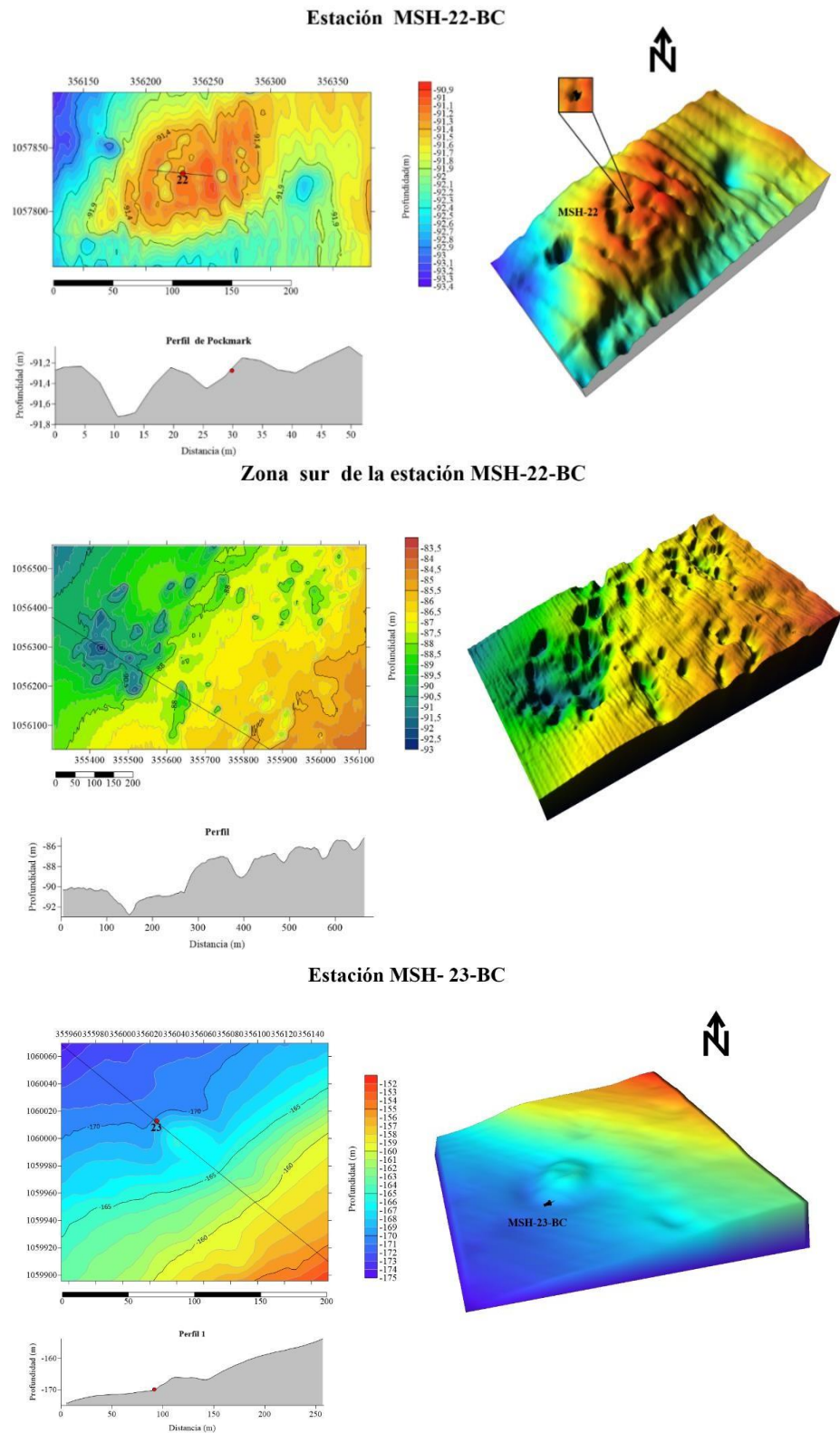


**Figura 28.** Geofomas de las estaciones intermedias. En la imagen se ilustran los diagramas 3D y perfiles de los pockmarks presentes en esta zona.

### Batimetría y modelo general 3D de las estaciones 15 a 20 y 27



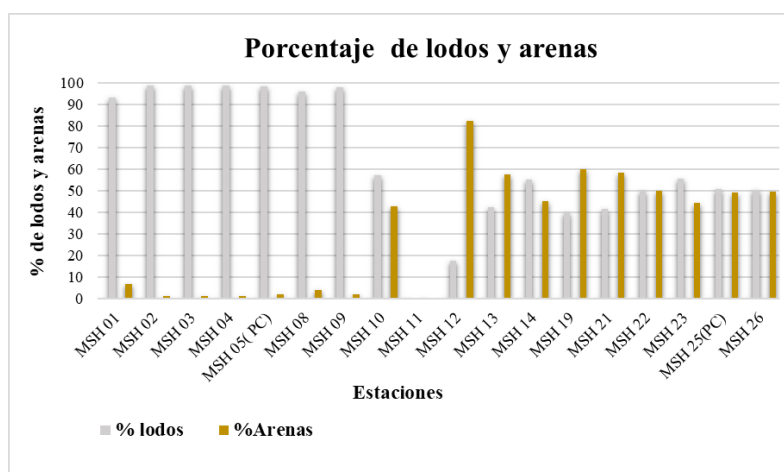
**Figura 29.** Modelo general 3D de las estaciones cercanas al canal (falla 2). En la imagen se registran los perfiles de los pockmarks que se encuentran en esta zona y la presencia de las fallas, además del perfil de la estación MSH-15-BC.



**Figura 30.** Geformas de las estaciones cercanas al talud. En la imagen se visualizan las geformas de las estaciones MSH-22 y MSH-23.

## 5.4 Sedimentología

En cuanto a la distribución general del tamaño de grano de los sedimentos (*figura 32*), se reconocen 2 zonas principales. La primera es la zona más somera del área de estudio, donde se ubican las estaciones MSH-01 a MSH-09, la cual se compone de lodos con un porcentaje de arenas < 10% (*figura 31*). Los sedimentos presentaron una coloración gris-verdosa. Las partículas tamaño arena consistieron en fragmentos biogénicos. La procedencia de estos sedimentos posiblemente está asociada a la presencia de volcanes de lodo en el sector.



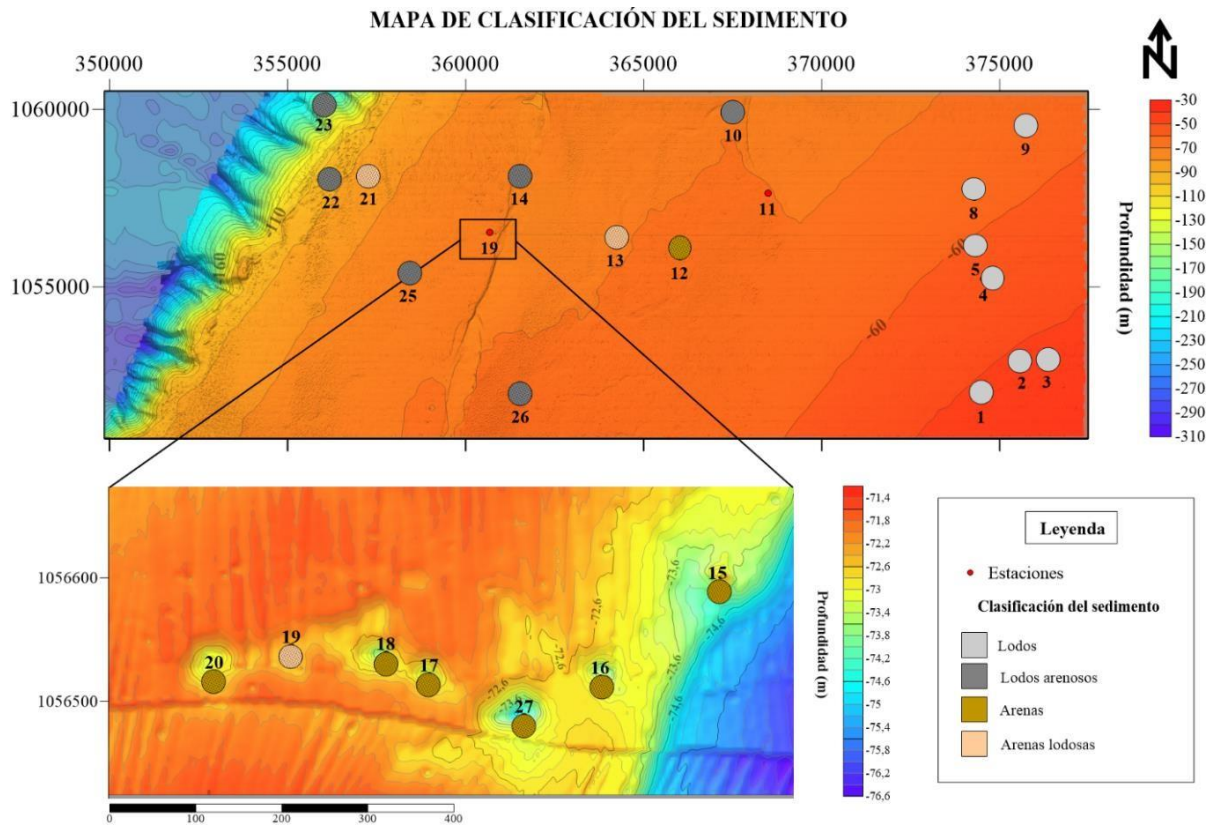
**Figura 31.** Porcentaje de lodos y arenas en las muestras. Se excluyen las estaciones donde no se pudo hacer muestreo de foraminíferos.

La segunda zona está compuesta por el resto de las estaciones (MSH-10 a MSH-26) y contiene lodos arenosos, arenas lodosas y arenas. Las estaciones MSH-10, MSH-14, MSH-22, MSH-23, MSH-25 y MSH-26 están constituidas por lodos arenosos con % de arenas entre 40 y 50. Estos lodos arenosos se distribuyen de manera aleatoria entre la zona intermedia y la zona más profunda cercana al talud.

En la estación MSH-10 se encontró un sedimento de coloración gris-verdosa compuesto por una matriz lodosa con arena-fina que contiene minerales máficos. En la estación MSH-14 se indentificó un sedimento verde-amarillento de una matriz limo-arenosa con arena-fina, compuesta de fragmentos de conchas, carbonatos y bivalvos. En la estación MSH-22 se encontró una matriz limo-arenosa con arena-fina compuesta de fragmentos biogénicos, minerales máficos y félsicos. En la estación MSH-23 el sedimento presentó una coloración gris-amarillenta de matriz fina con arena-fina compuesta de minerales máficos y conchas. El sedimento de la estación MSH-25 presentó una matriz fina de coloración gris amarillenta a gris oscura con arena fina compuesta de algas rojizas, fragmentos de conchas, corales, minerales félsicos y máficos. Finalmente, la estación MSH-26 presentó un sedimento amarillento de matriz lodosa con minerales máficos y arena -fina compuesta de fragmentos biogénicos de conchas, bivalvos y gasterópodos.

Las estaciones MSH-13, MSH-19 y MSH- 21 están compuestas de arenas lodosas (con 50 – 60 % de arenas). Las estaciones MSH-12, MSH-15 a MSH-18, MSH-20 y MSH-27 son arenas con menos del 20% de lodos. La zona cercana al canal de la falla 2 (*figura 32*), presenta arenas, excepto por la muestra MSH-19 que fue precisamente la única de la que se recuperó núcleo. La estación MSH-12 es la única con sedimento arenoso por fuera de este sector. En la estación MSH-11 no fue posible extraer muestra del nucleador de caja para realizar el análisis granulométrico debido a que se recuperó muy poco sedimento del nucleador de caja.

La estación MSH-13 presentó un sedimento amarillo-verdoso de matriz limo-arenosa con arena-fina compuesta de fragmentos biogénicos. La estación MSH-19 presentó un sedimento gris verdoso con una matriz limosa y arenas finas a muy finas compuestas de fragmentos biogénicos y carbonatos.



**Figura 32.** Mapa de clasificación granométrica de las muestras. En la imagen se identifica la distribución del tipo de sedimento para cada estación.

En la estación MSH-21 se identificó una matriz limo-arenosa con minerales máficos y arenas finas con fragmentos biogénicos. Para el caso de las estaciones arenosas solo se describió el sedimento de la estación MSH-12, el cual se compone de un sedimento amarillento de matriz limo-arenosa con arenas gruesas de líticos máficos y félsicos con fragmentos de cuarzo y conchas.

La cuantificación del porcentaje de terrígenos y biogénicos en la fracción arena de los sedimentos diferenció los mismos grupos de estaciones (MSH-01-MSH-09 y MSH-10-MSH-26) (*figura.33*). En este caso, la muestra MSH-21 presenta una composición de arenas más parecida al grupo de los lodos. La fracción arena de los sedimentos está constituida por más de un 40% de biogénicos. La

mayoría de las estaciones presentan menos de 30% de terrígenos a excepción de las estaciones MSH-11 y MSH-12 que se componen de un 50%.

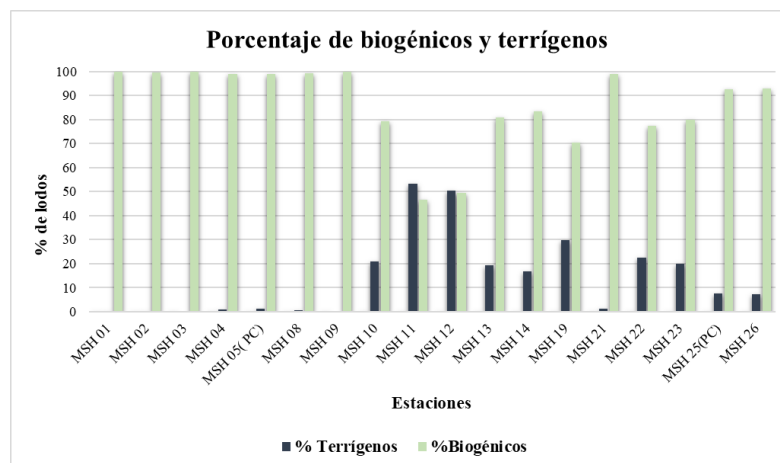


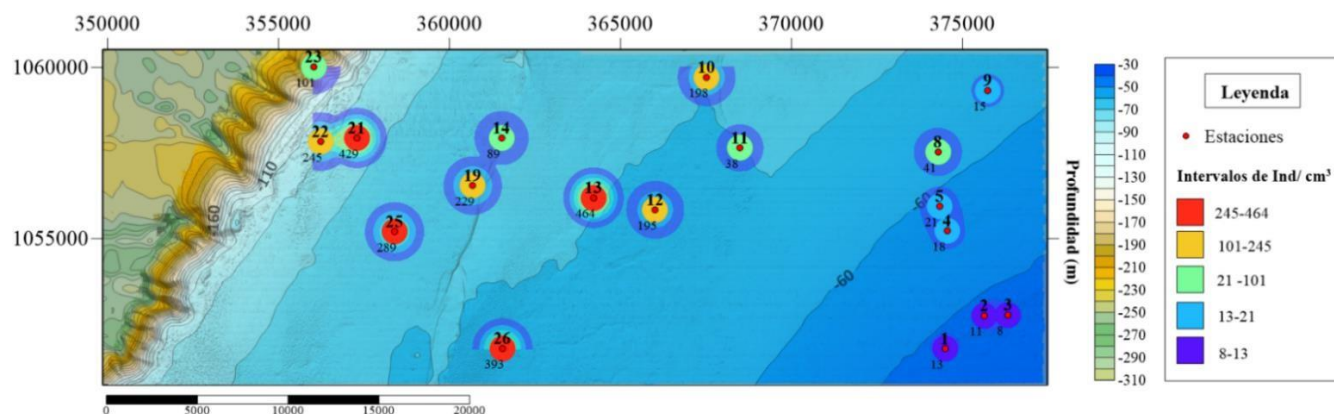
Figura 33. Porcentaje de biogénicos y terrígenos en las muestras superficiales.

## 5.5 Análisis de foraminíferos

Se extrajeron un total de 11.811 foraminíferos bentónicos y 8.952 planctónicos en las 36 muestras analizadas. Se separaron 178 especímenes con características morfológicas diferentes, que fueron clasificados en 43 géneros y 135 especies (*anexo 5*). Las abundancias más bajas de FB se presentaron en las estaciones lodosas, más cercanas a la costa (MSH-01 a MSH-09), registrando abundancias menores a 100 Ind/cm<sup>3</sup>, siendo la estación MSH-03 la menos abundante en FB de todas las estaciones analizadas (*figura 34*).

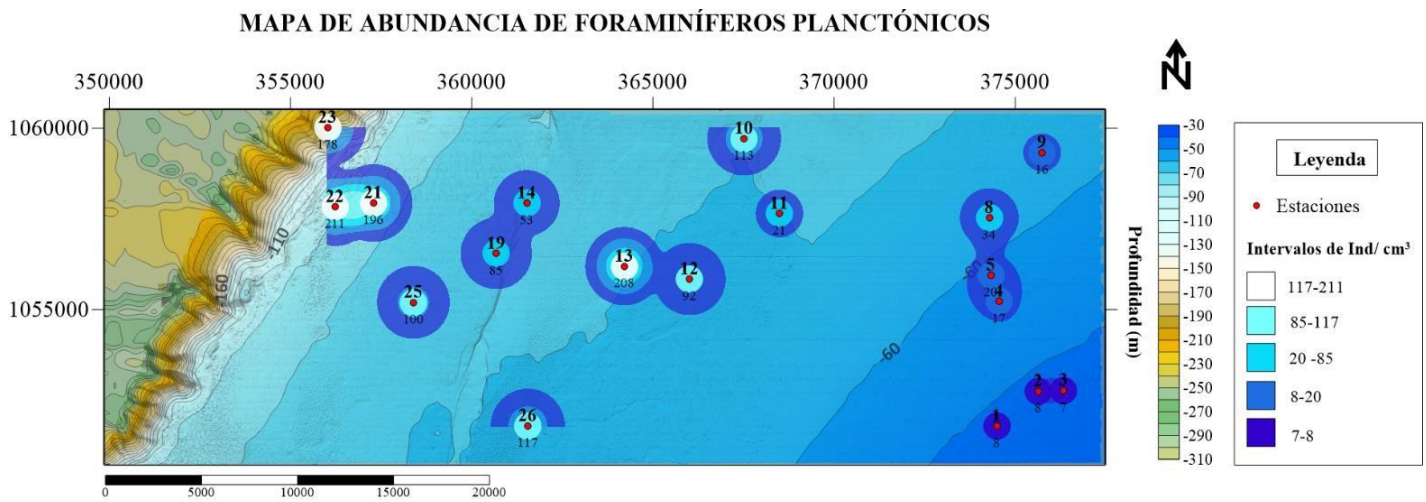
El grupo de muestras de la zona intermedia y cercana al talud presentó abundancias entre 38 y 464 Ind/cm<sup>3</sup>. En este grupo, las estaciones con menores abundancias (21-101 ind/cm<sup>3</sup>) fueron la MSH-11, MSH-14 y MSH-23. Seguidas por las estaciones MSH-10, MSH-12, MSH-19 y MSH-22 con abundancias entre 101 y 245 ind/cm<sup>3</sup>. Y finalmente las muestras con mayores abundancias (245-464 ind/cm<sup>3</sup>) corresponden a las estaciones MSH-13, MSH-21, MSH-25 y MSH-26. Dentro de este sector no hay un patrón espacial definido para estas abundancias.

### MAPA DE ABUNDANCIA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS



**Figura 35.** Mapa de distribución de abundancia de FB. En la imagen se indentifica la abundancia de FB para cada una de las 18 estaciones analizadas en numero de individuos / $cm^3$ . Los círculos hacen referencia al perímetro estimado por el analisis de kernel , en donde existe la probablidad de ocurrencia de otros intervalos de abundancia entorno a las estaciones analizadas.

Con respecto a las abundancias de los FP, se observó un comportamiento muy similar al de la distribución de las abundancias de los FB. Sin embargo, las abundancias de los FP son mucho menores. Como se observa en la ( *figura 35* ), los FP son menos abundantes en las estaciones de lodos, con valores entre 7 y 34 Ind/ $cm^3$ . El grupo de muestras de la zona intermedia y cercana al talud presentó abundancias mayores a 20 ind/ $cm^3$  con una diferenciación espacial entre las muestras de la zona intermedia y la del talud. Las estaciones cercanas al talud tuvieron abundancias de FP  $>117$  ind/ $cm^3$ , mientras que las muestras de la zona intermedia estuvieron entre 20 y 117 ind/ $cm^3$ , a excepción de la MSH-13 que tuvo abundancias similares a la zona del talud.

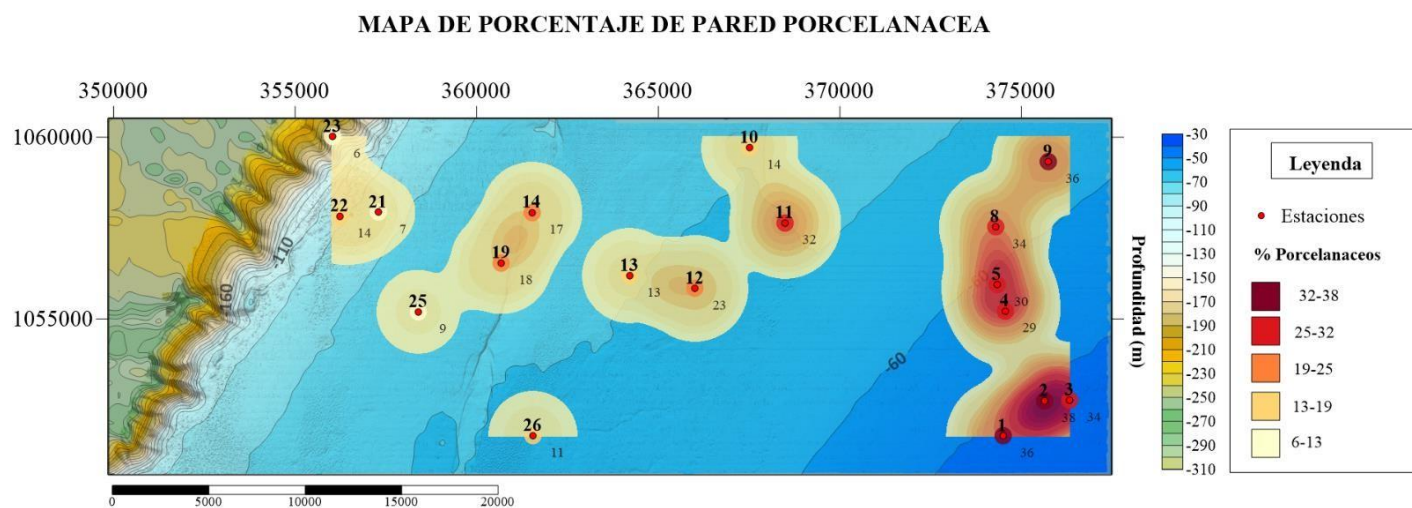


**Figura 34.** Mapa de distribución de abundancia de FP.

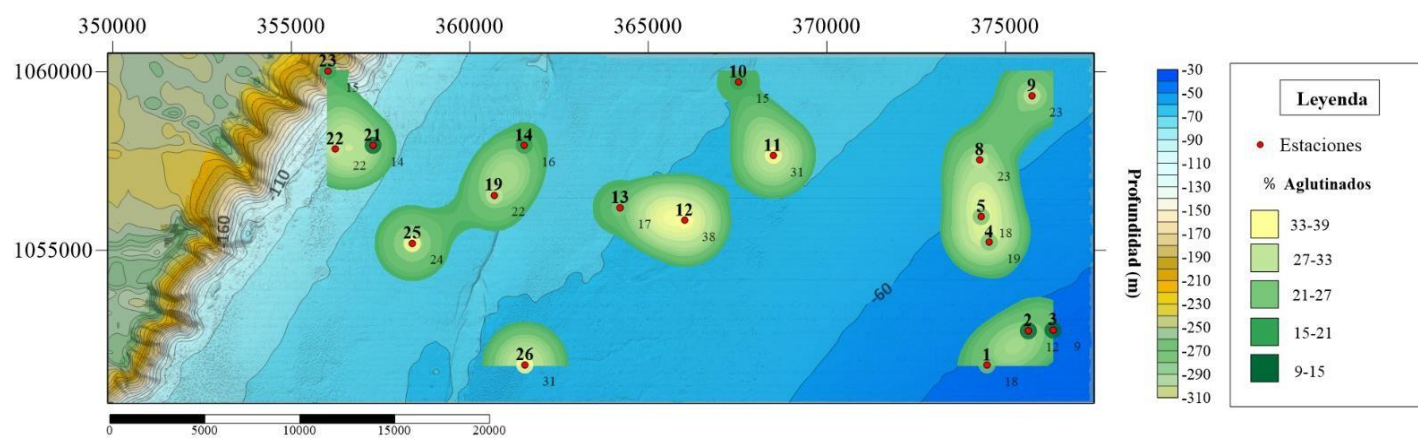
La distribución espacial del porcentaje del tipo de pared de FB puede verse en las figs 36, 37 y 38. En la distribución del porcentaje de pared porcelanacea ( *figura 36* ) se obtuvo un promedio de 22.7% en todas las estaciones. En las estaciones cercanas a la costa hay mayores porcentajes de FB de pared porcelanacea, con valores entre 30 y 38%. La estación MSH-02 presenta el mayor porcentaje de FB de pared porcelanacea con un 38%, mientras que las estaciones MSH-21, MSH-23, MSH-25 y MSH-26 registran valores inferiores al 12%. Para el caso de la pared aglutinada ( *figura 37* ), que tiene un promedio de distribución del 20.9 % en las estaciones, los mayores porcentajes se encontraron en las estaciones intermedias. Las estaciones MSH-11, MSH-12 y MSH-26 tienen los porcentajes mas altos de pared aglutinada, superiores al 31%, mientras que la estación MSH-03, con un 9 %, es la estación con menor aparición de FB aglutinados. La pared hialina ( *figura 38* ) es la dominante en toda la zona de estudio, con un promedio de 56.4% en las estaciones. Los porcentajes de pared hialina son superiores al 50% en 11 de las 18 estaciones analizadas. Los valores mas altos se ubican en las estaciones cercanas al talud, siendo las estaciones MSH-21 y MSH-23 donde más domina esta pared, con porcentajes de 77% y 78%, mientras que las estaciones MSH-11 y MSH-12 presentan los porcentajes más bajos, con un 36 % y 38%, respectivamente. Así, aunque la pared hialina domina en todas las estaciones, se observa que los FB de pared porcelanacea son más abundantes en las



estaciones lodosas, los de pared aglutinada en la zona intermedia, con lodos arenosos y arenas, y los de pared hialina en la zona cercana al talud, en presencia de lodos arenosos.



*Figura 36.* Mapa de distribución de los FB con pared porcelanacea



*Figura 37.* Mapa de distribución de los FB de pared aglutinada

## MAPA DE PORCENTAJE DE PARED HIALINA

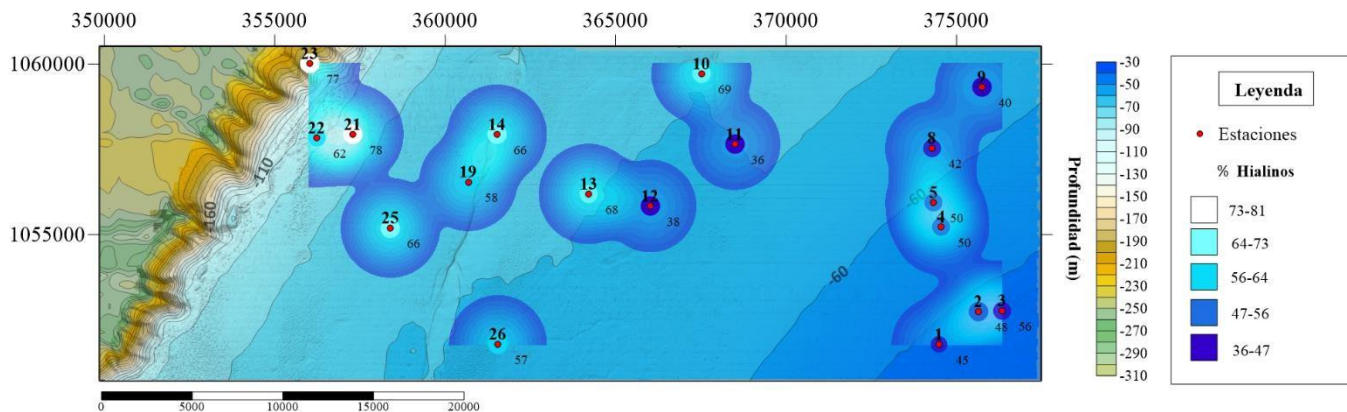


Figura 38. Mapa de distribución de los FB con pared hialina

### 5.5.1 Especies dominantes

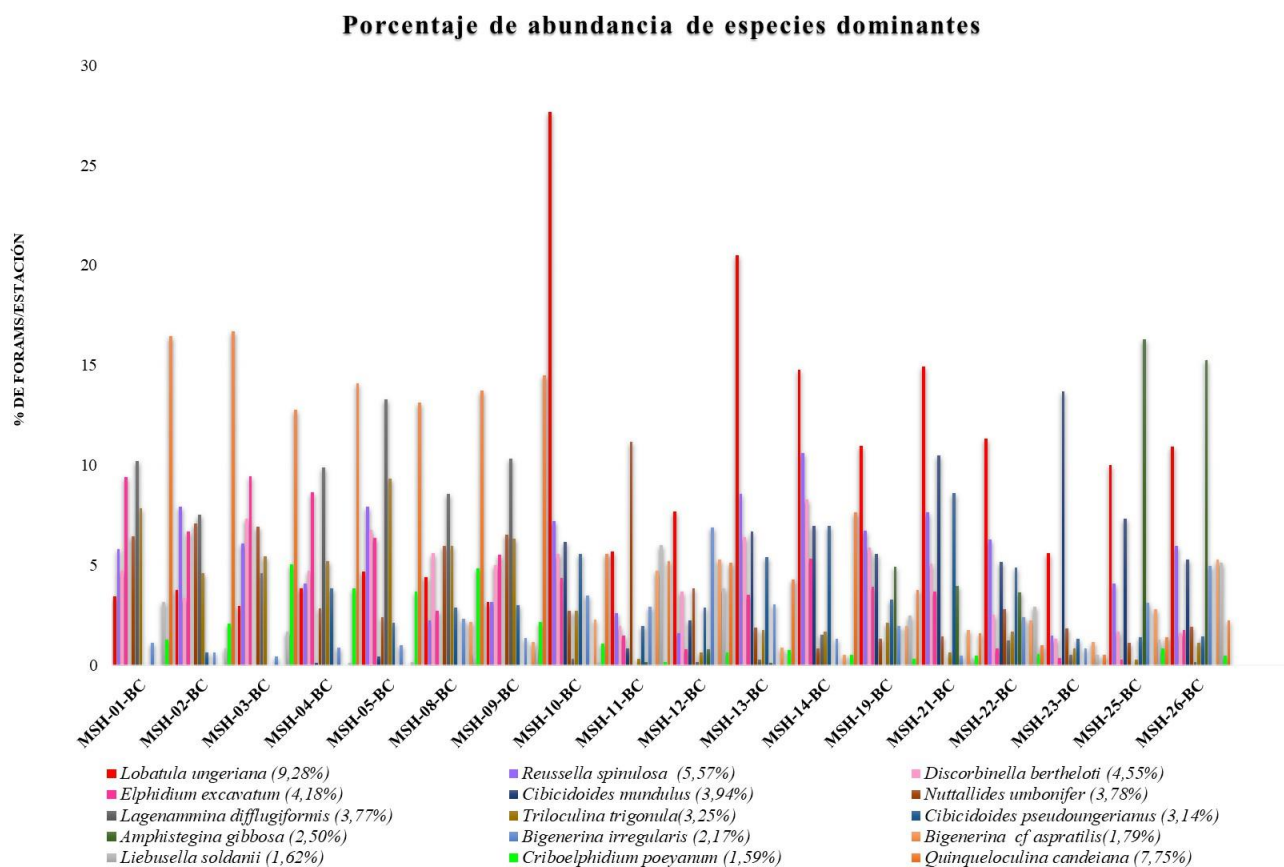
De las 135 especies reconocidas, se seleccionaron 15 especies dominantes con un porcentaje de abundancia  $> 1.5\%$  como se observa en las (figuras 39 y 40). La especie más dominante en el área de estudio es *Lobatula ungeriana*, de pared hialina, con un porcentaje promedio de abundancia de 9.28%. En las estaciones lodosas se encuentra en porcentajes inferiores al 5 %, mientras que en las estaciones intermedias y profundas oscila entre 10 y 28%. Su mayor abundancia ocurre en la estación MSH-10 (27.6%) y en la estación MSH-13 (20.5%).

La segunda especie dominante es *Quinqueloculina candeiana*, de pared porcelanácea, con un 7.75% de abundancia promedio. Esta especie es más abundante hacia las estaciones lodosas, con porcentajes de hasta 17%. Las estaciones MSH-01 y MSH-02 presentan su mayor abundancia con valores de 16%. Su presencia es contraria a la de *Lobatula ungeriana* y decrece en las estaciones intermedias (4 a 7%) y profundas (0.4 a 4%).

La tercera especie dominante es *Reusella Spinulosa*, de pared hialina, representando el 5.57% de todas las especies encontradas. Su distribución a lo largo de las estaciones es casi homogénea, oscilando entre un valor de 1.5% correspondiente a la estación MSH-12, hasta valores cercanos al 10%, siendo la estación MSH-14, con 10.6%, la más abundante en esta especie.

*Discorbinella bertheloti*, de pared hialina, con un 4.55% de abundancia, es la cuarta especie dominante. Se encuentra ampliamente distribuida en todas las estaciones. Su abundancia fluctúa entre valores de 1.31% en la estación MSH-23 hasta 8.31% en la estación MSH-14. De forma general se observa que su abundancia es muy baja en las estaciones cercanas al talud.

*Elphidium excavatum*, de pared hialina, con un valor promedio de abundancia de 4.18%, es la quinta especie dominante. Presenta valores entre 6% a 9% en las estaciones lodosas, donde es mas abundante (especialmente en las estaciones MSH-01 y MSH-03). Su menor abundancia se encuentra en la estación MSH-25 con 0.28%.



*Cibicidoides mundulus*, de pared hialina, con 3.94% es la sexta especie mas abundante en los sedimentos. Su presencia es nula en las estaciones MSH-01, MSH-02 y MSH-03. Su aparición en las muestras asciende desde la estación MSH-10 con un 6% de abundancia, hasta la estación MSH-21, con 10.49%. Su comportamiento se relaciona con el de *Lobatula ungeriana*.

*Nuttallides umbonifer*, de pared hialina, con 3.78% de dominancia ocupa el séptimo lugar dentro de las 15 especies dominantes. Presenta un comportamiento similar con las especies *Quinqueloculina candeiiana*, *Reussella spinulosa*, *Discorbinella bertheloti* y *Elphidium excavatum*, con bajas abundancias en las estaciones MSH-22, MSH-23 y MSH-25. Su mayor abundancia se ubica en la estación MSH-11 con un valor de 11.18%.

*Lagenammia difflugiformis*, de pared aglutinada, con un porcentaje de 3.77%, es la octava especie dominante. La aparición de esta especie se restringe hacia las estaciones lodosas, siendo muy dominante en la estación MSH-05 con 13% de abundancia. Esta especie no se presentó en las estaciones MSH-11, MSH-19, MSH-21 y MSH-25.

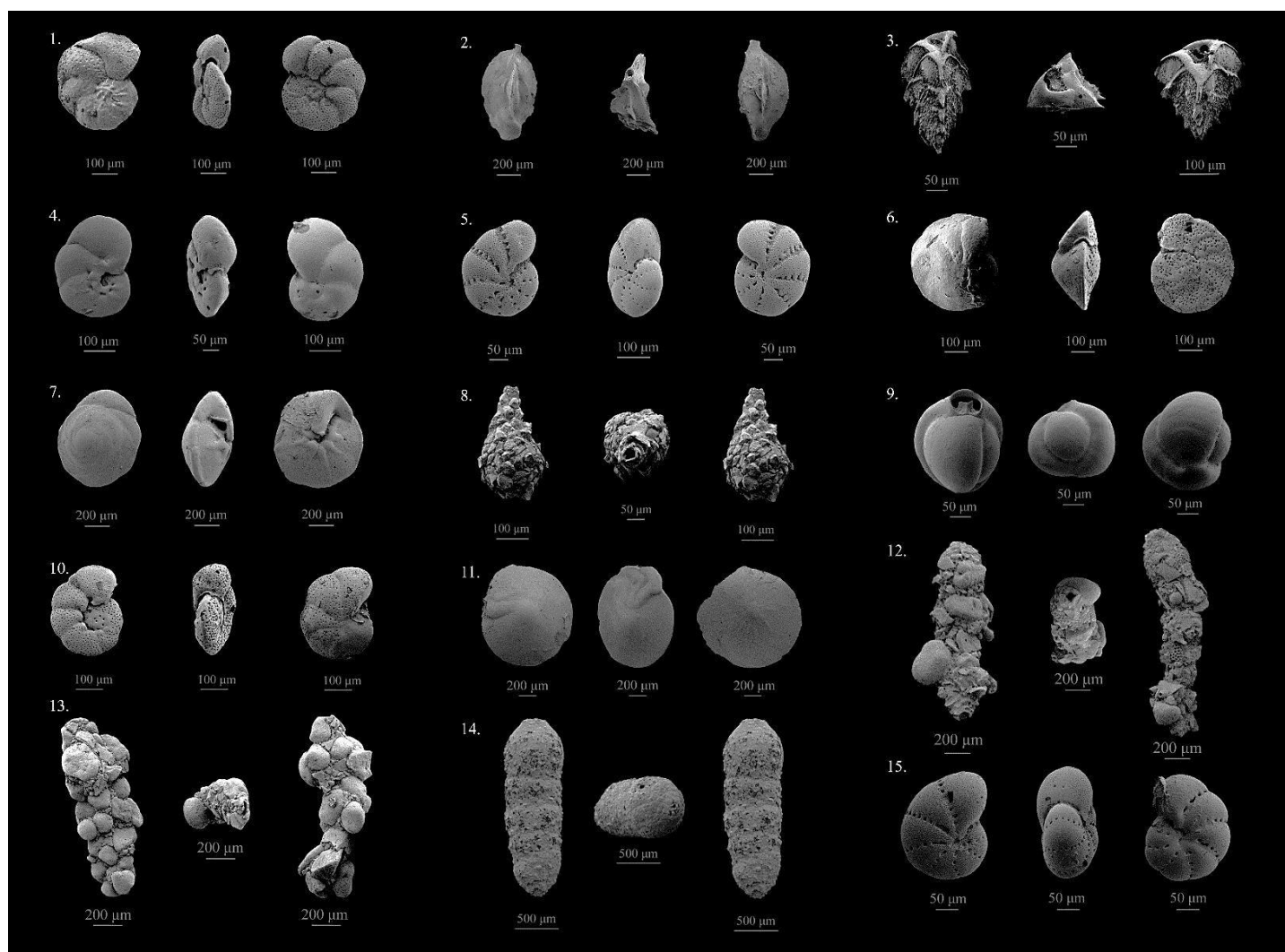
La novena especie dominante, de pared porcelanácea, con un 3.25% de abundancia, es *Triloculina trigonula*. Disminuye su abundancia en las estaciones cercanas al talud y aumenta en las estaciones lodosas, con su mayor abundancia en la estación MSH-05 (9.32%) y menor en la estación MSH-25 (0.28%).

*Cibicidoides pseudoungerianus*, con 3.14% de dominancia, y la tercera especie del género *Cibicidoides*, ocupa el décimo lugar en las especies dominantes. Su distribución es igual a la de las dos especies de *Cibicidoides* reportadas anteriormente, por ende su abundancia aumenta hacia las estaciones más profundas. La estación MSH-21 tiene la mayor abundancia (8.58%).

*Amphistegina gibbosa*, de pared hialina, con 2.50%, representa la especie 11 de las dominantes. No se registra en las estaciones lodosas cercanas a la costa, por el contrario su máxima abundancia se registra en las estaciones MSH-25 y MSH-26, con porcentajes de 16.31% y 15.24%, respectivamente.

En orden descendente de dominancia continúa *Bigenerina irregularis*, de pared aglutinada, con 2.17%. Presenta una distribución aleatoria. Su máxima y mínima abundancias se registran en la estación MSH-12 (6.86%) y MSH-03 (0.41%). Continúa *Bigenerina cf aspratilis*, con 1.79% de abundancia y una distribución similar a *Bigenerina irregularis*. Su máxima abundancia se reporta en las estaciones MSH-25 y MSH-12 con valores aproximados de 5.3%. No ocurre en las primeras cinco estaciones lodosas.

*Liebusella soldanii*, de pared aglutinada, con 1.62%, es la penúltima especie dentro de las 15 especies dominantes. Su abundancia es del 0% en las estaciones MSH-13 y MSH-14. Su máxima abundancia se reporta en la estación MSH-11. Y la última especie dominante es *Criboelphidium poeyanum*, de pared hialina, con 1.59% de abundancia. La mayor abundancia se localiza en la estación MSH-03, sus abundancias disminuyen a partir de la estación MSH-10, y la mínima se da en la estación MSH-23 (0%).

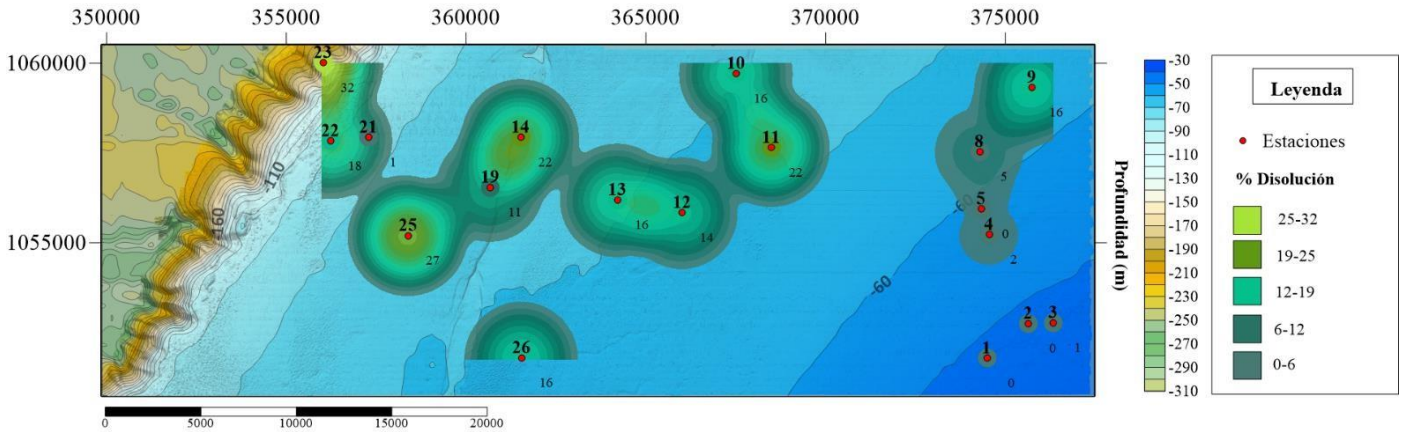


**Figura 40.** Fotografías SEM de las 15 especies dominantes. 1. *Lobatula ungeriana* 2. *Quinqueloculina candeiana* 3. *Reusella Spinulosa* 4. *Discorbinella bertheloti* 5. *Elphidium excavatum* 6. *Cibicidoides mundulus* 7. *Nutallides umbonifer* 8. *Lagenammima difflugiformis* 9. *Triloculina trigonula* 10. *Cibicidoides pseudoungerianus* 11. *Amphistegina gibbosa* 12. *Bigenerina irregularis* 13. *Bigenerina cf aspratilis* 14. *Liebusella soldanii* 15. *Criboelphidium poeyanum*.

### 5.5.2 Foraminíferos con disolución y fragmentación

Los porcentajes de distribución de la disolución de FB se registran en la (figura 41). Las estaciones lodosas no presentan disolución a excepción de la estación MSH-09 con 16.5% de FB disueltos. A partir de la zona intermedia comienza a aumentar el porcentaje de FB disueltos, siendo las estaciones MSH-11 y MSH-14 con 22%, la estación MSH-25, con 27%, y la estación MSH-23 con 32%, las estaciones con mayor disolución.

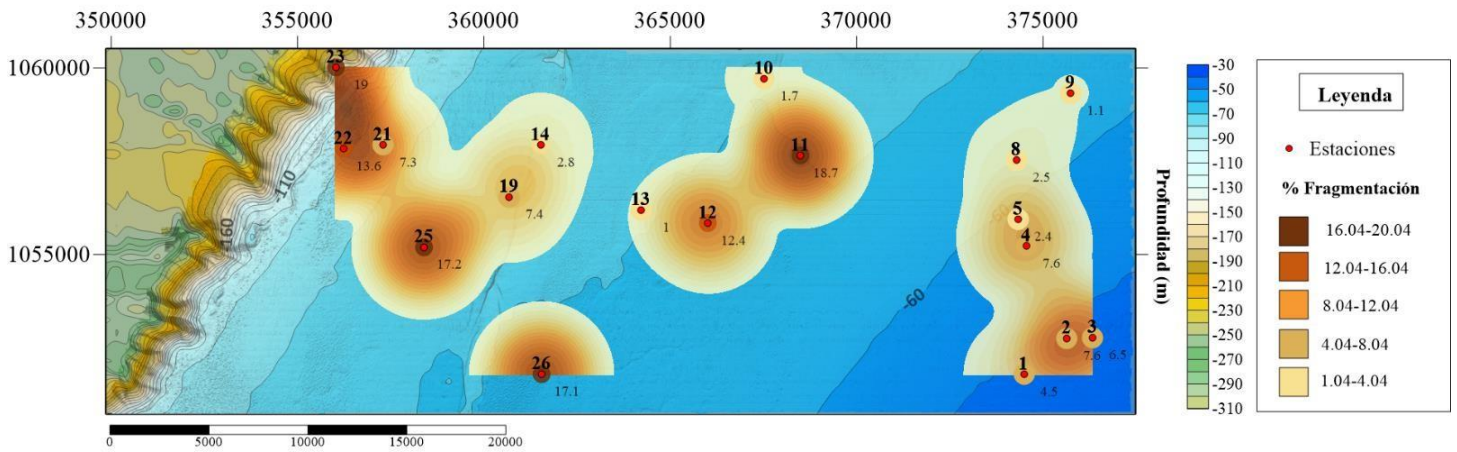
### MAPA DE PORCENTAJE DE DISOLUCIÓN



**Figura 41.** Mapa de porcentaje de disolución de FB.

La distribución de los foraminíferos fragmentados en las muestras es alta en las estaciones MSH-23, MSH-11, MSH-25 y MSH-26, con porcentajes superiores al 15%. La estación con más FB fragmentados es la estación MSH-23, con 19%, seguida por la estación MSH-11 con 18% de FB fragmentados. Las estaciones en donde se registró muy baja fragmentación son las estaciones lodosas y las cercanas al canal así como se ilustra en la (figura 42).

### MAPA DE PORCENTAJE DE FRAGMENTACIÓN



**Figura 42.** Mapa de porcentaje de fragmentación de FB.

### 5.5.3 Foraminíferos con sobrecrecimiento y piritización

Los valores de sobrecrecimiento (figura 43) son muy bajos en las estaciones lodosas (< 5%). Hacia la zona intermedia se evidencia un aumento del sobrecrecimiento en la estación MSH-11 con 15.2% y la estación MSH-12 con 11.4%, luego disminuye hacia las estaciones cercanas al canal con valores < 7% y nuevamente incrementa hacia la estación MSH-23 con 18.5%, siendo la estación con mayor sobrecrecimiento registrado.

MAPA DE PORCENTAJE DE SOBRECRECIMIENTO

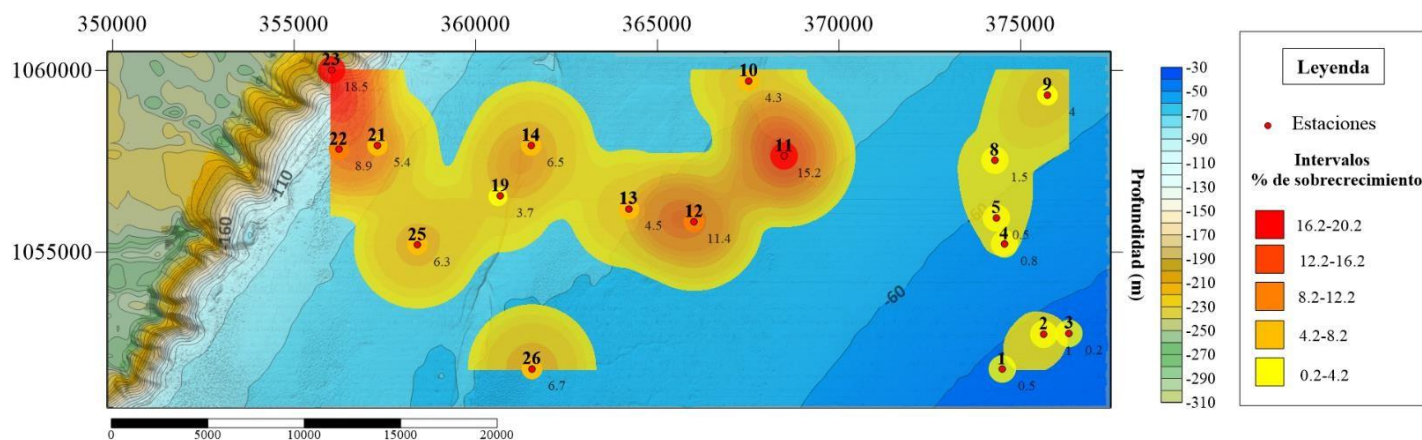


Figura 43. Mapa de distribución del sobrecrecimiento en FB.

Se encontraron muy pocos FB piritizados (figura. 44), solo en 7 estaciones de las 18. De estas, la mayoría tuvieron < 1% de FB piritizados. Y las únicas estaciones con más del 1% de piritización fueron la MSH-19 con 3.8% y la MSH-23, con 1.14%.

MAPA DE PORCENTAJE DE PIRITIZACIÓN

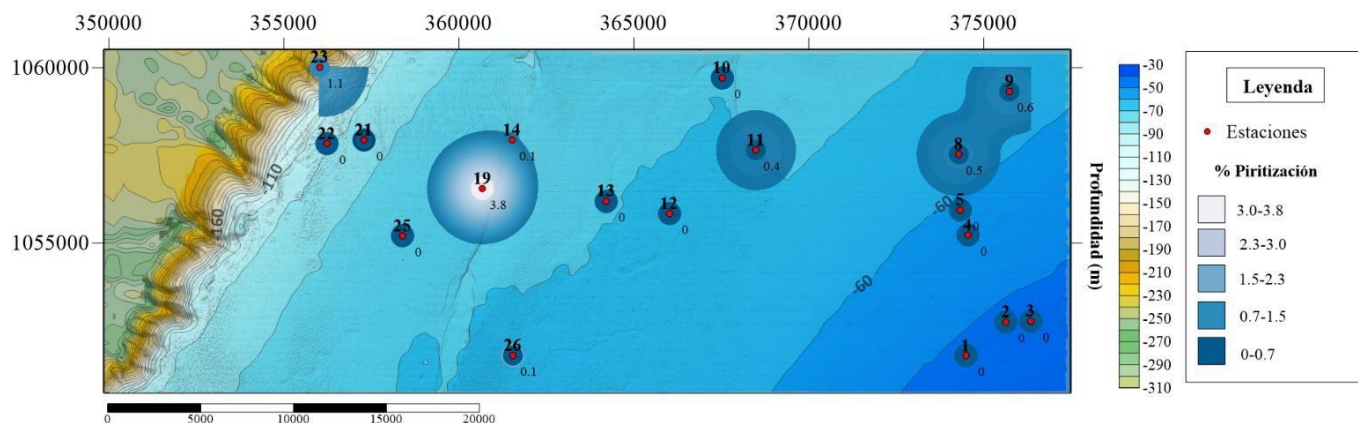


Figura 44. Mapa de distribución de la piritización en FB.

### 5.5.4 Ambiente según la estructura de la pared.

Mediante el cálculo del porcentaje para cada una de las tres paredes de los FB encontrados, el ambiente se clasifica como un ambiente marino continental normal, así como se ilustra en la (figura 45).

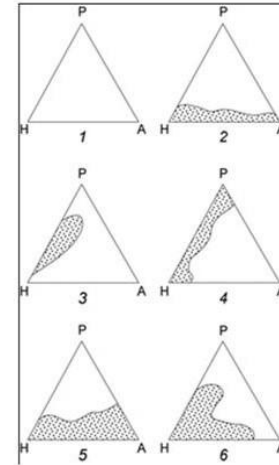
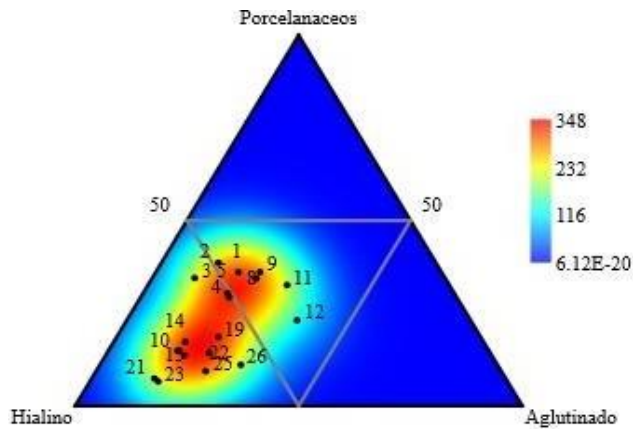


Fig. 2. Triangular diagram showing the abundance of foraminifera in several different environment [11], note: 1. Fresh water; 2. Hypo saline lagoon; 3. Normal marine lagoon and carbonate platform; 5. Shelf; 6. Normal marine continental; P-porcelain; H-hyaline; A-agglutinated.

Figura 45. Triángulo de clasificación de ambiente según la estructura de la pared.

### 5.5.5 Índice de diversidad de Shannon Weaver (H')

Los valores del índice de diversidad son superiores a 3 en todas las estaciones (oscilan entre 3 y 3.8), así como se observa en la (figura 46). La estación MSH-19 refleja el índice más alto de todas las estaciones (3.8) y la estación MSH-10 el más bajo (3). El índice de las estaciones MSH-01, MSH-02 y MSH-03 es  $< 3.2$ .

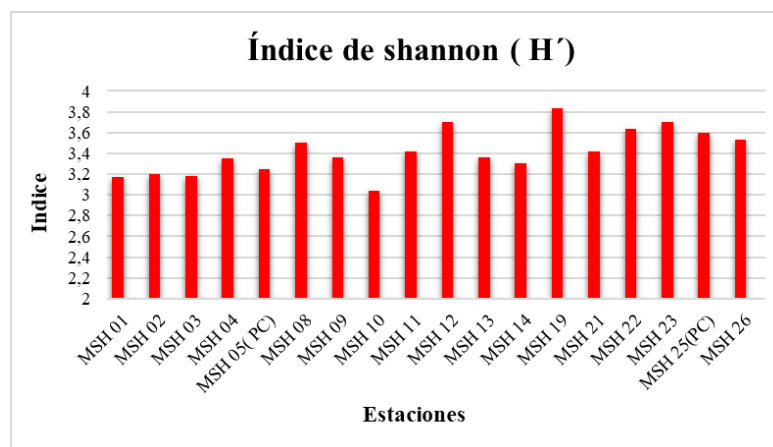


Figura 46. Gráfica de distribución del índice de Shannon Weaver (H').



### 5.5.6 Determinación del índice de oxigenación de FB (BFOI)

Con base en los valores calculados para el índice BFOI, se identifica que todos los fondos están oxigenados y son altos en oxígeno según la (Tabla 4). El índice presenta un valor mínimo de 78.69 en la estación MSH-23 y valores >90 para el resto de las estaciones. En la (figura 47) se observan los valores del índice calculados para cada estación.

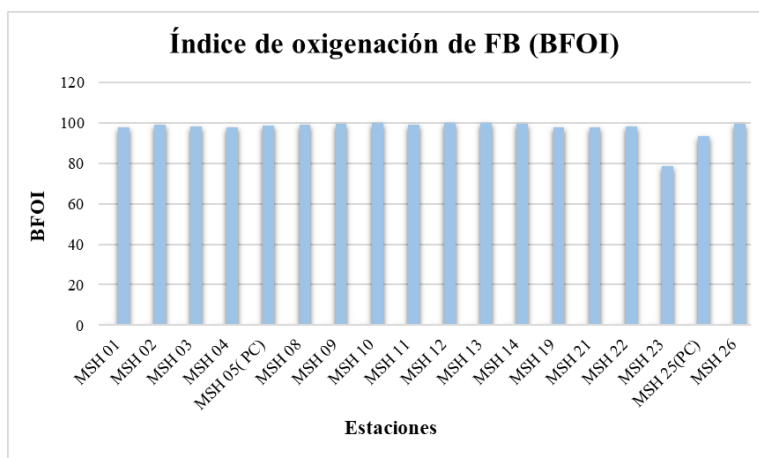


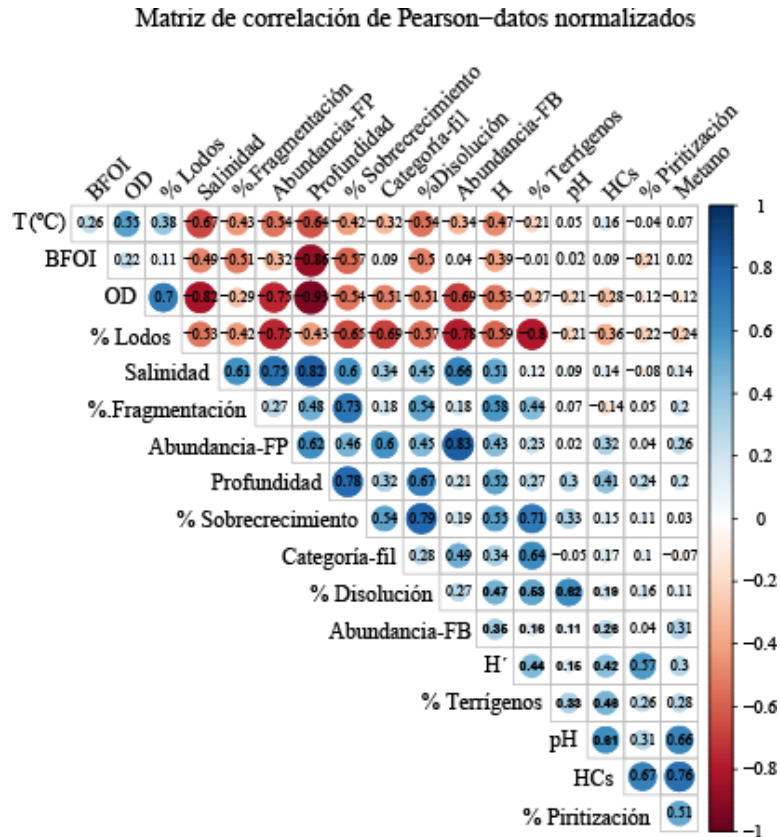
Figura 47. Grafica de distribución del índice BFOI.

## 5.6. Análisis estadísticos

### 5.6.1. Correlación de variables generales

La matriz de correlación de Pearson normalizada de las 18 variables generales se ilustra en la (figura 48). En la matriz se observan las siguientes correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ): El metano está correlacionado positivamente con el pH ( $r = 0.66$ ,  $p = 0.00018$ ), otros HCs ( $r = 0.76$ ,  $p = 1.51 \times 10^{-6}$ ) y el porcentaje de piritización ( $r = 0.51$ ,  $p = 4.98 \times 10^{-4}$ ). Los hidrocarburos presentan una relación positiva con la piritización ( $r = 0.67$ ,  $p = 3.13 \times 10^{-5}$ ), el pH ( $r = 0.61$ ,  $p = 0.00036$ ), el % terrígenos ( $r = 0.46$ ,  $p = 2.9 \times 10^{-2}$ ) y el índice de diversidad de Shannon ( $H'$ ) ( $r = 0.42$ ,  $p = 3.04 \times 10^{-2}$ ).

La abundancia de FB se correlaciona positivamente con la salinidad ( $r = 0.66$ ,  $p = 2.27 \times 10^{-5}$ ) y la categoría de filtración ( $r = 0.49$ ,  $p = 5.23 \times 10^{-5}$ ) y negativamente con el % de lodos ( $r = -0.78$ ,  $p = 7.58 \times 10^{-7}$ ) y el oxígeno disuelto ( $r = -0.69$ ,  $p = 1.64 \times 10^{-6}$ ). La mayor correlación se da con la abundancia de FP (0.83) y los FP tienen las mismas correlaciones ambientales que los FB.



**Figura 48.** Matriz de correlación de las 18 variables generales

El porcentaje de fragmentación se correlacionó con el porcentaje de sobrecrecimiento ( $r=0.73$ ,  $p=9.11e-08$ ), la salinidad ( $r=0.61$ ,  $p=1.49e-05$ ), el índice de diversidad ( $H'$ ) ( $r = 0.58$ ,  $p=1.92e-05$ ) y el porcentaje de disolución ( $r=0.54$ ,  $p=5.03e-06$ ). El sobrecrecimiento se relacionó también con el porcentaje de disolución ( $r = 0.79$ ,  $p=5.01e-10$ ), la profundidad ( $r=0.78$ ,  $p=1.06e-07$ ), el porcentaje de terrígenos ( $r = 0.71$ ,  $p=3.24e-05$ ), la diversidad ( $H'$ ) ( $r = 0.55$ ,  $p=4.23e-06$ ) y finalmente la categoría de filtración ( $r=0.54$ ,  $p=2.51e-04$ ). Por su parte, la categoría de filtración se relacionó también con el porcentaje de terrígenos ( $r= 0.64$ ,  $p=5.5e-05$ ).

### 5.6.2. Correlación de variables y especies de FB

La matriz de correlación que incluye las 15 especies dominantes y las variables generales ( $n=33$ ) fue examinada, pero para hacer una síntesis de las correlaciones más significativas se decidió hacer una matriz de correlación reducida con las 10 primeras especies dominantes y las variables que mostraron

ser más determinantes (figura 49). A continuación se describen las correlaciones significativas de las variables ambientales más determinantes con las especies de FB.

El metano se correlacionó positivamente con *Lobatula ungeriana* ( $r = 0.31$ ,  $p = 2.47e-02$ ) y *Amphistegina gibbosa* ( $r = 0.35$ ,  $p = 1.03e-04$ ) y negativamente con *Quinqueloculina candeiana* ( $r = -0.39$ ,  $p = 1.76e-03$ ) y *Nuttalides umbonifer* ( $r = -0.48$ ,  $p = 1.78e-04$ ). Otros HCs se correlacionaron positivamente con *Lobatula ungeriana* ( $r = 0.38$ ,  $p = 8.11e-03$ ), *Cibicidoides pseudoungerianus* ( $r = 0.25$ ,  $p = 4.97e-02$ ) y *Cibicidoides mundulus* ( $r = 0.25$ ,  $p = 1.83e-03$ ) y negativamente con *Elphidium excavatum* ( $r = -0.43$ ,  $p = 4.23e-03$ ), *Quinqueloculina candeiana* ( $r = -0.36$ ,  $p = 1.70e-03$ ) y *Nuttalides umbonifer* ( $r = -0.38$ ,  $p = 3.75e-04$ ). La categoría de filtración también se correlaciona positivamente con las tres especies de *Cibicidoides*: *L. ungeriana* ( $r = 0.44$ ,  $p = 2.71e-04$ ), *C. mundulus* ( $r = 0.36$ ,  $p = 3.42e-05$ ) y *C. pseudoungerianus* ( $r = 0.53$ ,  $p = 3.41e-03$ ) y negativamente con *Elphidium excavatum* ( $r = -0.50$ ,  $p = 2.06e-06$ ), *Triloculina trigonula* ( $r = -0.64$ ,  $p = 2.59e-08$ ), *Quinqueloculina candeiana* ( $r = -0.55$ ,  $p = 5.74e-07$ ) y *Lagenammia difflugiformis* ( $r = -0.65$ ,  $p = 1.38e-08$ ).

Por otro lado, la mayoría de las especies tienen una relación negativa o casi nula con el metano, los hidrocarburos, *L. ungeriana*, la categoría de filtración y los porcentajes de fragmentación, sobrecrecimiento y disolución. Por ejemplo, *E. excavatum*, de pared hialina, presenta correlaciones negativas con el porcentaje de sobrecrecimiento ( $r = -0.76$ ,  $p = 7.6e-10$ ), el porcentaje de disolución ( $r = -0.74$ ,  $p = 1.94e-11$ ), el porcentaje de fragmentación ( $r = -0.62$ ,  $p = 3.28e-06$ ), la categoría de filtración ( $r = -0.50$ ,  $p = 8.27e-05$ ) y *C. mundulus* ( $r = -0.56$ ,  $p = 1.27e-06$ ). En el caso de *T. trigonula*, de pared porcelanacea, también ocurren relaciones negativas con el porcentaje de fragmentación ( $r = -0.62$ ,  $p = 6.0e-05$ ), sobrecrecimiento ( $r = -0.72$ ,  $p = 6.16e-08$ ), disolución ( $r = -0.69$ ,  $p = 1.21e-09$ ), categoría de filtración ( $r = -0.64$ ,  $p = 2.5e-06$ ) y *C. mundulus* ( $r = -0.69$ ,  $p = 6.7e-09$ ). Por su parte, *Lagenammia difflugiformis*, de pared aglutinada, tiene correlaciones negativas con el porcentaje de fragmentación ( $r = -0.51$ ,  $p = 4.15e-04$ ), sobrecrecimiento ( $r = -0.63$ ,  $p = 1.42e-06$ ), disolución ( $r = -0.64$ ,  $p = 2.84e-08$ ), categoría de filtración ( $r = -0.65$ ,  $p = 1.5e-06$ ) y *C. mundulus* ( $r = -0.7$ ,  $p = 8.22e-10$ ). En cambio, *A. gibbosa*, de pared hialina, si presenta relación positiva con el % de disolución ( $r = 0.31$ ,  $p = 4.12e-04$ ) y *C. mundulus* ( $r = 0.31$ ,  $p = 8.11e-04$ ).

### Matriz de correlación Pearson de especies y variables—datos normalizados

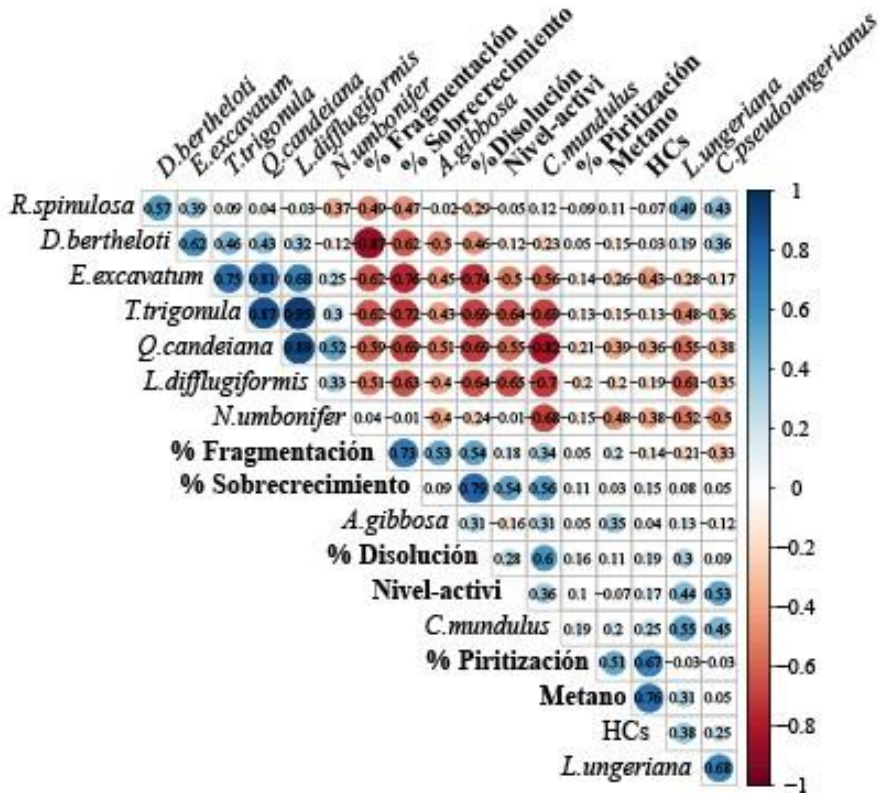
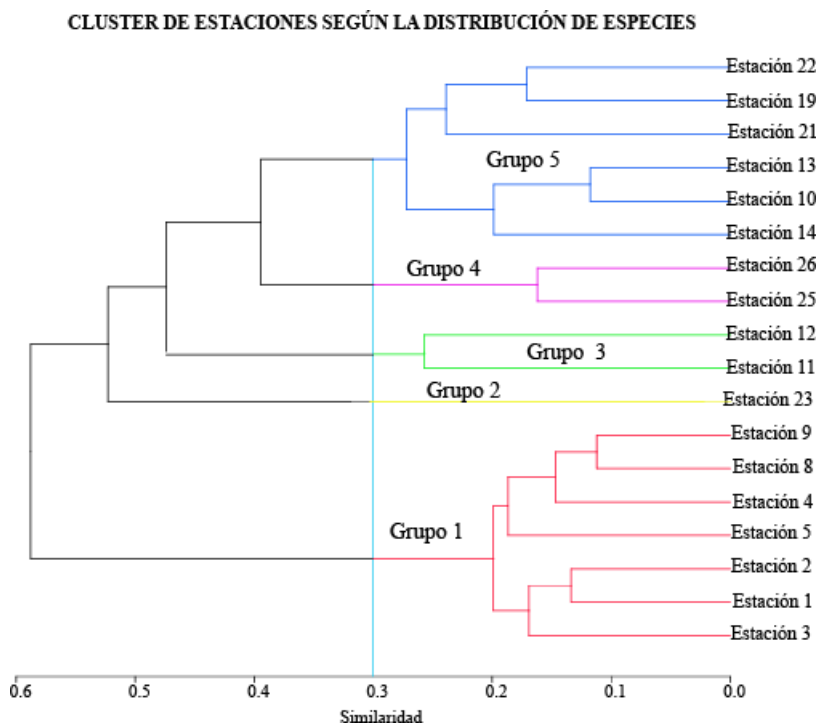


Figura 49. Correlación de las variables y las 10 primeras especies dominantes

### 5.6.3. Análisis clúster de las estaciones

Con el fin de determinar la agrupación de las distintas estaciones teniendo en cuenta los porcentajes de abundancia de las especies dominantes se obtuvo el diagrama presentado en la (figura 50). La agrupación de las estaciones se realizó con una distancia de corte de 0.3. Con base en esta distancia se determinaron 5 grupos de estaciones. El primer grupo está integrado por las estaciones MSH-01 hasta la MSH-09. Luego la estación MSH-23 que se encuentra sola, ubicada en el quiebre del talud, conforma el grupo 2. Después se agruparon las estaciones MSH-11 y MSH-12, que se ubican en el grupo 3, seguidas del grupo 4 que se integra por las estaciones MSH-25 y MSH-26. El quinto grupo corresponde a las estaciones MSH-10, MSH-14 y MSH-13, MSH-19, MSH-21 y MSH-22.



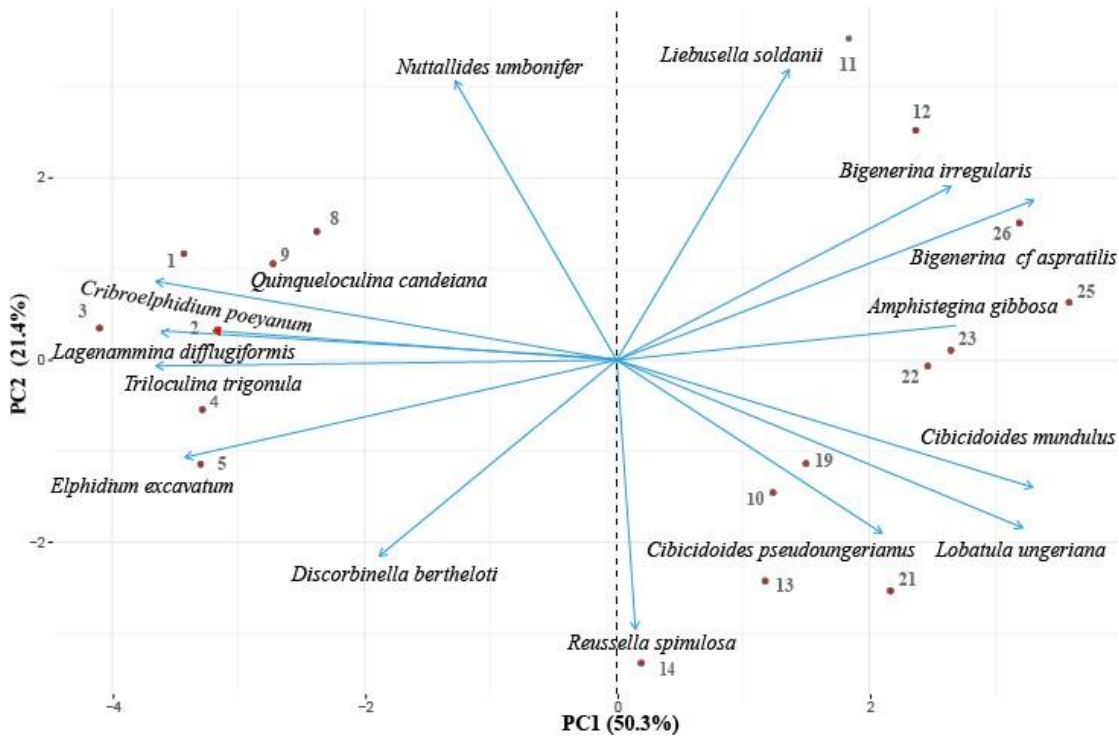
**Figura 50.** Cluster de estaciones a partir de la distribución de especies

#### 4.6.4. Análisis PCA de las especies y estaciones

En la (figura 51) se observan las 2 componentes principales en las que se pretende explicar la variabilidad de la distribución de las especies en un 71.74% (Tabla 8). La componente 1 (PC1) explica en un 50.3% la varianza de la distribución de las especies y la componente 2 (PC2) 21.4%. La asociación de las especies con cada componente principal se observa en la (Tabla 9).

Las mayores asociaciones con PC1 ( $>0.6$ ), que contribuyen en gran medida a la explicación de la componente ( $\cos^2\theta_{ij}$ ), se describen a continuación. Correlaciones positivas las presentan las especies aglutinadas *Bigenerina irregularis*, *Bigenerina cf aspratilis* y las especies hialinas *Cibicidoides mundulus*, y *Lobatula ungeriana*. Correlaciones negativas las presentan *Quinqueloculina candeiana*, *Triloculina trigonula* de pared porcelanacea, *Elphidium excavatum* *Criboelphidium poeyanum* de pared hialina y *Lagenammia difflugiformis* de pared aglutinada. Por su parte, las mayores asociaciones con PC2 corresponden a *Nuttalides umbonifer* y *Liebusella soldanii* (positivas) y *Reussella spinulosa* (negativa).

La componente 2 (PC2) explica en un 21.4% la varianza de las especies. Las especies *Liebusella soldanii*, *Nuttalides umbonifer*, *Reussella spinulosa* y *Discorbinella Berthelothi* presentan las correlaciones y los valores de explicación mas altos para PC2.



**Figura 51.** PCA de estaciones y especies.

La distribución de las estaciones respecto a los PCAs (*figura 51*) reafirma las agrupaciones encontradas en el análisis cluster. El grupo 1 se ubica en el lado negativo del PC1, y los grupos 2 a 5 en el lado positivo. Estos últimos grupos se dividen según el PC2. Los grupos 2, 3 y 4 se encuentran en el lado positivo del PC2, mientras que el grupo 5 se encuentra en el lado negativo.

**Tabla 8.** Valores explicatorios de las componentes de las especies en las componentes

	PC1	PC2
Valor propio	7.55	3.21
Porcentaje de varianza explicada	50.34	21.40
Porcentaje de varianza acumulada	50.34	71.74

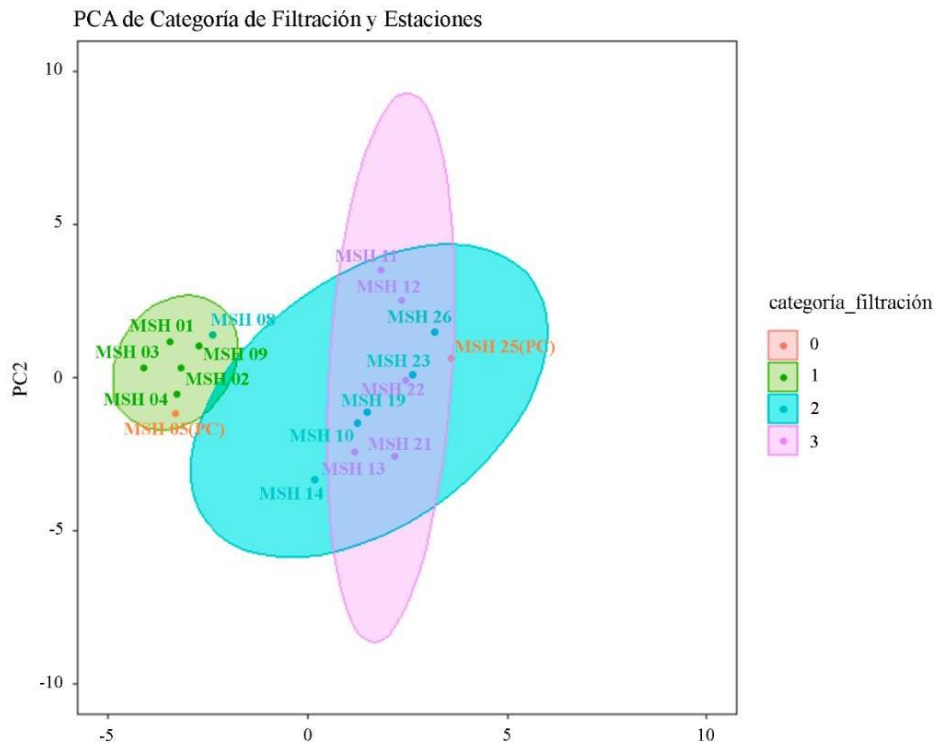
**Tabla 9.** Valores de correlación y explicación de las especies en las componentes

Especie	PC1		PC2	
	<i>r</i>	$\cos^2\theta_{ij}$	<i>r</i>	$\cos^2\theta_{ij}$
<i>Lobatula ungeriana</i>	0.80	0.653745777	-0.46	0.2136710448
<i>Quinqueloculina candeiana</i>	-0.91	0.842510652	0.21	0.0472360483
<i>Reussella spinulosa</i>	0.03	0.001396458	-0.74	0.5512640456
<i>Discorbinella bertheloti</i>	-0.47	0.223835235	-0.54	0.2923858657
<i>Elphidium excavatum</i>	-0.86	0.739895887	-0.26	0.0719682772
<i>Cibicidoides mundulus</i>	0.82	0.687093961	-0.35	0.1230566603
<i>Nuttallides umbonifer</i>	-0.32	0.103782794	0.77	0.5935728860
<i>Lagenammina difflugiformis</i>	-0.90	0.822702617	0.07	0.0058839171
<i>Triloculina trigonula</i>	-0.91	0.842381690	-0.01	0.0002610731
<i>Cibicidoides pseudoungerianus</i>	0.52	0.279043265	-0.47	0.2279175124
<i>Amphistegina gibbosa</i>	0.67	0.457057181	0.09	0.0091303728
<i>Bigenerina irregularis</i>	0.66	0.443481581	0.47	0.2298786889
<i>Bigenerina cf aspratilis</i>	0.83	0.689834706	0.44	0.1942493225
<i>Liebusella soldanii</i>	0.34	0.118062006	0.80	0.6430998459
<i>Criboelphidium poeyanum</i>	-0.80	0.646916490	0.08	0.0065683507

A partir de la agrupación de las especies y estaciones se identifican 3 zonas con su asociación de especies respectiva. La primera asociación se encuentra relacionada con las estaciones lodosas más cercanas a la costa (MSH-01 a MSH-09), e integra especies de los tres tipos de pared: *Quinqueloculina candeiana*, *Elphidium excavatum*, *Lagenammina difflugiformis*, *Triloculina trigonula*, *Criboelphidium poeyanum*. La segunda zona, ubicada en estaciones intermedias (MSH-12, MSH-11 y MSH-26), presenta una asociación de especies aglutinadas: *Liebusella soldanii*, *Bigenerina irregularis* y *Bigenerina cf aspratilis*. La zona 3, asociada con los *Cibicidoides*, está respresentada por estaciones ubicadas en la zona intermedia, el canal y cerca al talud (MSH-10, MSH-19, MSH-13, MSH-14 y MSH-21, MSH-22). Las estaciones MSH-23 y MSH-25 no corresponden a ninguna de estas zonas. En cuanto a las especies que no están representadas en las zonas descritas, *Amphistegina gibbosa* caracteriza a MSH-25 y también está presente de manera importante en la MSH-26. *Reussella spinulosa* y *Discorbinella bertheloti* son abundantes en la MSH-14. *Nuttallides umbonifer* es abundante en la MSH-11.

### 5.6.5. Análisis PCA de las estaciones y la categoría de filtración

Los resultados del PCA realizado para establecer la asociación entre las estaciones, la categoría de filtración y la abundancia de especies se resume en la (figura 52). Se observa que las estaciones de categoría 1 conforman un grupo distintivo. Las estaciones de categoría 2 y 3 conforman otro grupo y no es clara la diferenciación entre ellas. Las estaciones de control (MSH-05 MSH-25) a las que se les asignó inicialmente categoría 0, no se diferencian mucho de las agrupaciones descritas. La MSH-5 se ubica en el grupo de las estaciones de categoría 1, y la MSH-25 en el grupo de las estaciones de categoría 2-3. Un caso similar sucede con la estación MSH-08 que fue designada con categoría de filtración 2 y se agrupa junto con las estaciones de categoría 1.



**Figura 52.** PCA de la categoría de filtración y las estaciones de acuerdo con la distribución de las especies.

### 5.6.6. Análisis de correspondencia Redundante (RDA)

Se construyeron diferentes modelos RDA utilizando como variables respuesta los porcentajes de abundancia de las 15 especies dominantes y como variables predictoras las variables ambientales y sedimentológicas de las estaciones (profundidad, salinidad de fondo, temperatura, oxígeno disuelto, pH, % de lodos, % de terrígenos, concentración de HCs, concentración de metano y categoría de filtración). De acuerdo con los resultados, se hicieron modificaciones de las variables ambientales predictoras hasta encontrar 3 modelos que permitieron interpretar la variabilidad de la abundancia de las especies en la zona de estudio.



El modelo 1, con un p valor =0.001, incluyó las variables predictoras salinidad, porcentaje de lodos, hidrocarburos, metano y profundidad. Sus resultados se resumen en las (Tablas 10 y 11). Los dos primeros ejes canónicos explican el 90.89% de la varianza, pero solo el eje canónico 1 (RDA1) fue significativo (p valor=0.001). El porcentaje de distribución de las especies dominantes es explicado en mayor medida por el RDA1 y su relación significativa con la salinidad ( $r = -0.7539$ , p valor =0.001) y el porcentaje de lodos ( $r = 0.8745$ , p valor= 0.005), y no significativa con la profundidad ( $r = -0.9124$ , p valor= 0.08), el metano ( $r = -0.3575$ , p valor= 0.147) y los hidrocarburos ( $r = -0.3699$ , p valor= 0.384).

**Tabla 10.** Valores estadísticos de los ejes del modelo 1. En negrilla las correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

	<b>RDA1</b>	<b>RDA2</b>	<b>RDA3</b>	<b>RDA4</b>	<b>RDA5</b>
Valor propio	<b>0.1151</b>	0.01565	0.009831	0.00318	0.0004056
Porcentaje de varianza explicada	<b>0.7985</b>	0.10851	0.068174	0.02205	0.0028125
Porcentaje de varianza acumulada	<b>0.7985</b>	0.90696	0.975136	0.99719	1.0000000

**Tabla 11.** Correlación de los ejes con las variables predictoras del modelo 1. En negrilla las correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

<b>Variables predictoras</b>	<b>RDA1</b>	<b>RDA2</b>	<b>RDA3</b>	<b>RDA4</b>	<b>RDA5</b>
Metano	-0.3575	0.08763	-0.2625	-0.11664	0.8843
HCS	-0.3699	-0.13097	-0.2142	-0.87189	0.1998
Salinidad	<b>-0.7539</b>	<b>0.26854</b>	<b>-0.5478</b>	<b>0.03497</b>	<b>-0.2412</b>
% Lodos	<b>0.8745</b>	<b>-0.17111</b>	<b>-0.4351</b>	<b>0.12591</b>	<b>0.0267</b>
Profundidad	-0.9124	-0.30635	-0.2214	-0.11716	-0.1042

El modelo 2, con un p valor =0.001, incluyó las variables predictoras porcentaje de lodo, metano, profundidad y salinidad. Sus resultados se resumen en las (Tablas 12 y 13) Los dos primeros ejes canónicos explican el 92.66% de la varianza, pero solo el eje canónico 1 (RDA1) fue significativo (p valor=0.001). Las variables significativas en el modelo 2 fueron la salinidad (p valor=0.001) y el % de lodos (p valor=0.003). Las variables no significativas fueron la profundidad (p valor = 0.08) y el metano (p valor= 0.142)(anexo 3).

**Tabla 12.** Valores estadísticos de los ejes del modelo 2. En negrilla las correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

<b>Valores Modelo 2</b>	<b>RDA1</b>	<b>RDA2</b>	<b>RDA3</b>	<b>RDA4</b>
Valor propio	<b>0.1136</b>	0.01542	0.009755	0.0004501
Porcentaje de varianza explicada	<b>0.8159</b>	0.11076	0.070081	0.0032333
Porcentaje de varianza acumulada	<b>0.8159</b>	0.92669	0.996767	1.0000000

**Tabla 13.** Correlación de las variables con los RDAs del modelo 2. En negrilla las correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

<b>Variables predictoras</b>	<b>RDA1</b>	<b>RDA2</b>	<b>RDA3</b>	<b>RDA4</b>
Metano	-0.3607	0.07464	-0.2581	0.89315
Salinidad	<b>-0.7601</b>	<b>0.24865</b>	<b>-0.5498</b>	<b>-0.24099</b>
Porcentaje de lodo	<b>0.8807</b>	<b>-0.16415</b>	<b>-0.4442</b>	<b>0.01209</b>
Profundidad	-0.9184	-0.32927	-0.2006	-0.08899

Teniendo en cuenta que la profundidad no presentó una relación significativa en los dos modelos anteriores, se realizó el modelo 3 (tablas 14 y 15), el cual explica el comportamiento de las variables respuesta en un 100% (p valor= 0.001) a partir de la salinidad y % lodos. Donde RDA1 explica el 93.29% y es significativo (pvalor= 0.001) y RDA2 explica 6.71% y no es significativo (p valor=0.41). Las variables significativas en el modelo fueron la salinidad y el % de lodos con p valores de 0.001 y 0.002 respectivamente.

**Tabla 14.** Valores estadísticos de los ejes del modelo 3. En negrilla las correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

<b>Valores modelo 3</b>	<b>RDA1</b>	<b>RDA2</b>
Valor propio	<b>0.1061</b>	0.007625
Porcentaje de varianza explicada	<b>0.9329</b>	0.067062
Porcentaje de varianza acumulada	<b>0.9329</b>	1.000000

**Tabla 15.** Correlación de las variables con los RDAs del modelo 3. En negrilla las correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

<b>Variables predictoras</b>	<b>RDA1</b>	<b>RDA2</b>
Salinidad	<b>-0.8000</b>	-0.5999
Porcentaje de lodo	<b>0.9051</b>	-0.4253

En los tres modelos se identificó que las correlaciones significativas se asocian a la salinidad y el % de lodos. Por ende, de los modelos anteriores se interpretó que las abundancias de las especies responden en mayor medida a la salinidad y el % de lodos.

Por otro lado se realizaron modelos para entender la relación de cada una de las variables respuesta de la matriz general (abundancia FB, abundancia FP, índice BFOI, índice de Shannon ( $H'$ ), % de fragmentación, % sobrecrecimiento, % piritización y % de disolución) con respecto a las variables predictoras mencionadas anteriormente. 4 modelos explicaron bien la varianza y fueron significativos (Tabla 16).

**Tabla 16.** Modelos de explicación de variables respuesta a partir de variables predictoras. Donde Prof:Profundidad, S:Salinidad,%T:%de terrigenos, HCs:Concentración de hidrocarburos. En negrilla las variables con correlaciones significativas ( $p < 0.05$ ).

Modelo	P valor	% de explicación	Variable Respuesta	Variables Predictoras			
Modelo 4	0.001	93.98	Abundancia de FB	<b>Prof</b>	<b>% Lodo</b>	<b>S</b>	<b>% T</b>
Modelo 5	0.001	95.77	Abundancia de FP	<b>Prof</b>	<b>% Lodo</b>	<b>S</b>	<b>%T</b>
Modelo 6	0.001	83	% Sobrecrecimiento	<b>Categ-fil</b>	<b>HCs</b>	<b>Prof</b>	<b>Categ-fil</b>
Modelo 7	0.003	90.31	%Disolución	<b>Prof</b>	<b>OD</b>	<b>T°C</b>	<b>Categ-fil</b>

Las variables H', BFOI, % de fragmentación y % piritización no pueden explicarse mediante un modelo RDA, debido a que ninguna variable predictora durante la elaboración de los modelos presentó un porcentaje de explicación acumulado significativo. En cambio, las variables Abundancia de FB, Abundancia de FP, % Sobrecrecimiento y %Disolución si fueron explicadas por las variables predictoras tal como se indica en las (Tablas 16 y 17)

**Tabla 17.** Correlación de las variables predictoras de los modelos con el eje canonico RDA1.

Modelo 4-Abundancia FB			Modelo 5-Abundancia FP		
Variables	RDA 1	PC1	Variables	RDA 1	PC1
Profundidad	0.8792	0	Profundidad	0.9359	0
Salinidad	0.6663	0	Salinidad	0.6617	0
% Lodos	-0.8299	0	% Lodos	-0.7885	0
% Terrigenos	0.8163	0	% Terrigenos	0.7908	0

Modelo 6 - % Sobrecrecimiento			Modelo 7- % Disolución		
Variables	RDA 1	PC1	Variables	RDA 1	PC1
HCs	0.5762	0	Profundidad	0.5989	0
Categoría -fil	0.6405	0	Temperatura	-0.6245	0
Profundidad	0.9255	0	OD	-0.3127	0
			Categoría-fil	0.7292	0

Con base en los modelos 4 y 5 se establece que los cambios en las abundancias de los FB y FP pueden ser explicadas a partir de las variables profundidad, % de lodos, salinidad y % de terrígenos en arenas. En el caso del % de sobrecrecimiento (modelo 6), se indentifica que la categoría de filtración, la concentración de hidrocarburos y la profundidad son variables que permiten entender la existencia y variabilidad del sobrecrecimiento en las conchas de los FB evaluados. Finalmente, el % de disolución (modelo 7) está controlado por la profundidad, temperatura, oxígeno disuelto y categoría de filtración.

## 6. Discusión

### 6.1 Variabilidad espacial de las poblaciones de foraminíferos con relación a las filtraciones y actividad de filtración de fluidos

Los FB funcionan como indicadores locales de las emisiones de metano (Panieri et al., 2012). Se ha reportado que en los sitios de filtración fría hay mayor dominancia de especies hialinas y una menor proporción de especies porcelanáceas y aglutinadas (Lu et al., 2023). Las especies de pared aglutinada son mas escasas debido a su intolerancia a las condiciones geoquímicas de las filtraciones (Dessandier et al., 2019). En el caso de la zona de estudio, los FB de pared porcelanácea predominan hacia las estaciones lodosas, las de pared aglutinada en la zona intermedia (entre las fallas 1 y 2) y las de pared hialina en la zona entre el canal y el talud (*figuras 36, 37 y 38*). Los resultados obtenidos de los análisis cluster y PCA para las asociaciones de especies de FB indicaron 4 zonas que pueden asociarse con la distribución espacial de los tipos de pared, que a su vez tienden a indicar una sectorización del campo de filtración en distintos ambientes de actividad de emisión de fluidos. Esta sectorización comienza con una menor actividad relacionada a las estaciones mas someras, que incrementa hasta llegar a la estación mas profunda, ubicada en el talud. Sin embargo, la distribución de la actividad no es uniforme en todas las zonas.

Por tal razón, incorporar otras variables como la identificación de los altos porcentajes de fragmentación y sobrecrecimiento en las conchas de FB es importante en la caracterización de las estaciones con mayor actividad. En el caso del porcentaje de sobrecrecimiento, el modelo RDA 6 explica cómo la categoría de filtración, la concentración de los hidrocarburos y la profundidad resultan ser las variables mas significativas en la explicación del sobrecrecimiento. El sobrecrecimiento en la zona de estudio aparece, donde se encuentran las estaciones con categoría de filtración 2 y 3, concentraciones mas altas de hidrocarburos en el agua de fondo y profundidades superiores a los 70 m. Los altos porcentajes de sobrecrecimiento en estas estaciones podrían indicar actividad de filtración alta, debido a que los carbonatos autógenos son indicadores de episodios de intensificación de las filtraciones (Badesab et al., 2020). La precipitación de carbonatos en zonas de filtración se origina a partir de la OAM y la oxidación microbiana de los hidrocarburos, mediante archaeas y bacterias reductoras del sulfato (Hinrichs et al., 1999; Valentine & Reeburgh, 2000), cuando hay actividad en la ZTSM, liderada por el flujo activo del metano (Dantas et al., 2022). El

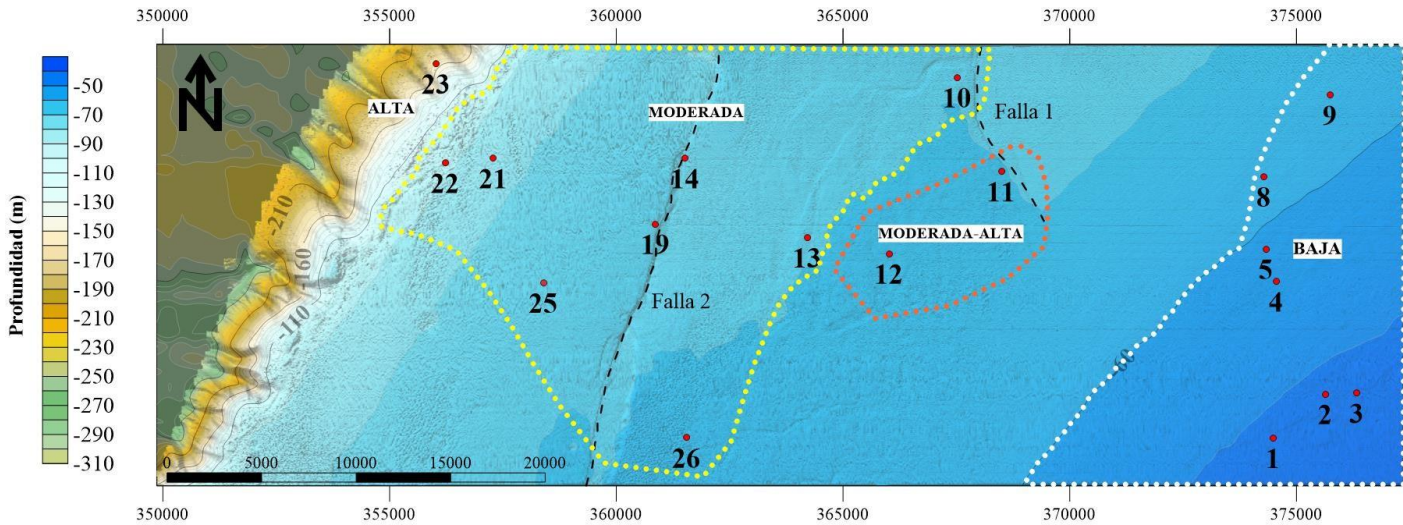
sobrecrecimiento a su vez se encuentra vinculado a la tasa de emisión de las filtraciones y la variación de la composición geoquímica de los sitios de filtración( Feng et al., 2009).

Por su parte, el porcentaje de disolución se relaciona positivamente con la profundidad y la categoría de filtración y negativamente con la temperatura. Lo que indica que a mayor profundidad, categoría de filtración y baja temperatura, hay mayor disolución en los sedimentos superficiales. La disolución se correlaciona con los cambios en la geoquímica del agua intersticial y con el transporte del flujo del carbono inorgánico disuelto del agua intersticial al agua de fondo, presentando diferentes estados de preservación en las conchas de organismos calcáreos presentes en filtraciones(Cai et al., 2006). La disolución de superficies carbonatadas ocurre en filtraciones activas, debido a la generación de microambientes ácidos en las biopelículas de las bacterias oxidantes del azufre(Leprich et al., 2021), que coexisten en lechos bacterianos de superficies carbonatadas alteradas, donde oxidan el ácido sulfhídrico o tiosulfato disminuyendo el pH(Carson et al., 2003; Houghton et al., 2016), y generando la disolución de los carbonatos presentes en la superficie de las filtraciones(Leprich et al., 2021).

Entonces, para definir la actividad de filtración de fluidos a partir de las variables y su análisis estadístico, en la *Tabla 18* se hace una síntesis de cómo cada uno de estos indica la intensidad de la filtración. Y finalmente, teniendo en cuenta la distribución de las variables medidas en los foraminíferos (tipos de pared, distribución espacial de las abundancias, asociaciones de especies dominantes), la estructura de la pared (sobrecrecimiento, disolución y fragmentación), los resultados de estadística multivariada de especies dominantes y la identificación de las especies reportadas en niveles altos de actividad de filtración, se podrían clasificar los grupos de estaciones según la actividad presente, en una escala cualitativa baja, moderada, moderada-alta y alta (*figura 53*).

**Tabla 18.** Intensidad de filtración para cada estación.

Muestra	Categoría	Abundancia FB	Tipo de Pared	% Disolución	% Fragmentación	% Sobrecrecimiento	Analisis Cluster	PCA
MSH 01	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 02	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 03	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 04	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 05	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 08	Moderada	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 09	Baja	Baja	Baja	Moderada	Baja	Baja	Baja	Baja
MSH 10	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Moderada
MSH 11	Alta	Alta	Moderada-Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
MSH 12	Alta	Moderada	Moderada-Alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Alta
MSH 13	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Moderada	Moderada	Moderada
MSH 14	Moderada	Alta	Moderada	Alta	Baja	Moderada	Moderada	Moderada
MSH 19	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Moderada	Moderada	Moderada
MSH 21	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Moderada	Moderada	Moderada
MSH 22	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Moderada
MSH 23	Alta	Alta	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
MSH 25	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Alta
MSH 26	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Alta



**Figura 53.** Sectorización de la actividad de filtración. Las líneas punteadas dividen los diferentes sectores propuestos a partir de los foraminíferos.

### *Estaciones de baja actividad*

La zona de baja actividad está relacionada con las estaciones lodosas más cercanas a la costa, las cuales presentaron bajas señales del backscatter, ausencia de señales en la columna de agua, categoría 1 de filtración y baja abundancia de FB. Estas estaciones se componen de fondos blandos, constituidos por más del 80% de lodo. Los lodos son de color gris verdoso indicativo de bajo contenido de materia orgánica y altamente viscosos. Sus características físicas se asemejan a los lodos diapíricos del sector del Sinú (Carvajal, 2016; Carvajal et al., 2010), lo que puede indicar, junto con los argumentos que se discuten a continuación, que corresponden a flujos de volcanes de lodo en todo este sector. Los flujos de volcanes de lodo son regiones que registran actividad baja de filtración, debido a que actúan como capa sello para evitar el escape de gas (Sahling et al., 2008). Por otro lado, las bajas abundancias de FB, generalmente han sido asociadas a zonas de alta filtración (Bernhard et al., 2001; Dessandier et al., 2019; Melaniuk et al., 2022). En este caso, la baja abundancia y diversidad pueden no estar relacionadas con la actividad de flujo de metano presente en este sector, y sí con el tipo de sedimento arcilloso del vulcanismo de lodo. El estudio de Wollenburg & Mackensen (2009) obtuvo bajas abundancias de FB en planicies de lodo provenientes de volcanes de lodo. Por otro lado, según Palmisano et al. (2024), los volcanes del Caribe central colombiano presentan constituyentes tóxicos como As, Cd, Hg, Ni, y Cr; altas concentraciones de Fe y exceso de Co, Ni, Mn, y U. Estos altos contenidos de metales disminuyen la diversidad de los FB (Dimiza et al., 2022). Lo que indica que la baja abundancia y diversidad presentes en estas estaciones también pueden relacionarse con la toxicidad de los lodos diapíricos.

En esta zona, son abundantes 5 de las 15 especies dominantes. Estas 5 especies son organismos endobentónicos típicos de ambientes ricos en arcillas y lodos (*Q. candeiana*, *T. trigonula*, *L. difflugiformis*, *E. excavatum* y *C. poeyanum*). Estas especies disminuyen en conjunto hacia las estaciones intermedias y profundas. En cuanto al tipo de pared, domina la porcelanácea, que compone las especies dominantes *Q. candeiana* y *T. trigonula*, especies de gran abundancia en esta zona. Cabe resaltar que en este sector también hay presencia de especies de pared aglutinada y hialina.

Los géneros *Quiqueloculina* y *Elphidium* son reconocidos por su sensibilidad a la hipoxia y presentan una adaptación corta a periodos máximos de anoxia de 24 horas (Moodle & Hess, 1992). Por lo tanto, a pesar de que pueden tener un metabolismo anaeróbico facultativo, su permanencia en ambientes de anoxia prolongada, como es el caso del límite óxico-anóxico donde conviven estos foraminíferos infaunales, se ve afectado por las condiciones de mayor filtración. Adicionalmente *C. poeyanum* carece de la morfología típica de especies que capturan cloroplastos como la presencia de tubérculos o dientes en su concha (Jorissen, 1988), lo cual imposibilita su supervivencia al restringir su adaptación a la simbiosis, debido a la falta de estas características morfológicas (Bernhard & Bowser, 1999). En el caso particular de *E. excavatum*, especie endosimbiótica, su supervivencia disminuye en zonas de altas concentraciones de  $CO_2$  (Herguera et al., 2014), explicando así la ausencia de estas dos especies hacia las estaciones más profundas, donde hay mayor actividad de filtración. Sin embargo, existen casos particulares de algunas especies del género *Elphidium* que presentan la adaptación a la captura de cloroplastos o cleptoplastidia (Lintner et al., 2023) en zonas anóxicas ricas en azufre (Bernhard & Bowser, 1999). Por su parte, *L. difflugiformis* se ha reportado en sedimentos lodosos en asociación con especies del género *Reophax*, en ambientes con alto influjo de materia orgánica (Murray, 2006), además es reconocida por ser altamente sensible a bajos niveles de oxigenación.

#### ***Estaciones de actividad Moderada***

La zona de actividad moderada presenta un incremento en las señales del backscatter e identifica la presencia de pockmarks para las estaciones MSH-13, MSH-19 y MSH-22. Esta zona presenta una variabilidad textural en el sedimento, encontrando lodos arenosos, arenas y arenas lodosas. El incremento de un 60% de arenas, da lugar a la aparición de FB epifaunales como *L. ungeriana*, que tienden a proliferar en sustratos duros arenosos de grano grueso, inclusive en nódulos de carbonato (Panieri, 2006), además de relacionarse con microhabitats elevados, donde se adhieren a rocas, conchas, esponjas, y poliquetos, entre otros organismos (Linke & Lutze, 1993). Una de las características de las estaciones de esta agrupación es que hay variabilidad entre ellas en cuanto a sobrecrecimiento, disolución y abundancia de FB.

En la estación MSH-10, donde hay mayor predominancia de *L. ungeriana*, se evidencia una concentración alta de metano e hidrocarburos gaseosos en el agua de fondo, siendo una de las tres estaciones del estudio con las concentraciones más altas. Con lo anterior y una abundancia de 198 ind/cm<sup>3</sup>, considerada media-alta, además de presentar bajos porcentajes de fragmentación, disolución, etc; esta estación puede identificarse con una filtración moderada, debido a que algunos estudios indican que la presencia de *C. wuellerstorfi*, el cual es cercano a *L. ungeriana* se asocia más

a zonas de bajo flujo del metano(Lu et al., 2023). Esta estación está cerca a una falla que presentó alta emanación de fluidos en la columna de agua, además de estar dominada por la asociación de los *Cibicidoides* y presentar una reducción significativa de las especies aglutinadas, como sucede de igual forma para las estaciones MSH-13 y MSH-14 (con alta disolución). La abundancia mas alta en todo el estudio se registró en la estación MSH-13, explicada principalmente por el flujo moderado de filtración, relacionado con el transporte del metano por advención que genera el debilitamiento de la ZTSM, permitiendo que haya una mayor disponibilidad de oxígeno molecular en los sedimentos suprayacentes a la ZTSM(Kiel & Peckmann,2019), donde se generan condiciones biogeoquímicas favorables para la presencia de bacterias aeróbicas metanotróficas(Thomas, 2003). Estas bacterias resultan ser fuente de alimento para los FB que realizan simbiosis con bacterias, como es el caso del género *Uvigerina* (Bernhard et al., 2001).*Uvigerina peregrina*, en particular, ha sido registrada almacenando nitrato para realizar denitrificación en medios anóxicos(Langlet et al., 2020), al igual que otros FB hialinos del género *Melonis* (Glock, 2023)que proliferan en esta estación. Por tal razón, el incremento de las abundancias de los FB en filtración moderada se relaciona con las especies de FB con adaptaciones fisiológicas a la simbiosis y la presencia de bacterias aeróbicas metanotróficas (Li et al., 2021). Sin embargo, cabe resaltar que la simbiosis parece ser la adaptación mas usada cuando las condiciones geoquímicas del límite óxico-anóxico son arduas(Bernhard et al., 2006; Nomaki et al., 2014), pero la denitrificación, la cleptoplastidia y la inactividad (Glock, 2023), pueden ser también las adaptaciones que permiten la supervivencia de otras especies en esta estación.

En las estaciones MSH-19, MSH-21 y MSH-22 se encontró la disminución de FB aglutinados y predominancia de la asociación de los *Cibicidoides* que presentan correlaciones positivas con el metano y los HCs. En las estaciones MSH-21 y MSH-22, hay presencia de tapetes bacterianos y de géneros como *Uvigerina*, *Cibicidoides* y *Globocassidulina*. Para la estación MSH-19 localizada dentro de un pockmark, paralela a una falla, que a su vez intersecta el canal, se identifica la mayor concentración de metano y de hidrocarburos presentes en las muestras de agua de fondo analizadas. Se puede inferir que la supervivencia de los FB presentes en estas estaciones está sostenida por la actividad de bacterias metanotróficas que se alimentan del metano y proveen alimento a los FB(Bernhard et al., 2001; Lu et al., 2023). Adicionalmente, la imposibilidad de obtener sedimentos de las estaciones cercanas a la MSH-19 y la observación de la presencia de lajas de carbonato en las imagenes del ROV, además de visualizar un ambiente arrecifal con presencia de burbujas en el caso de la estación MSH-15 y recuperar esponjas y carbonatos en las estaciones MSH-15 y MSH-17, indicarían un ambiente de filtración activo, así como el que reporta Lu et al. (2023) de acuerdo con la descripción de los ambientes de filtración en la (figura 4D, sección 2.4).

En el caso de las estaciones MSH-25 y MSH-26 que presentaron altas abundancias e indicios de mayor fragmentación y disolución, abundaron especímenes de *A. gibossa*, la cual es reportada en los sedimentos superficiales de plataformas continentales(Santa-Rosa et al., 2021). El género *Amphistegina* no ha sido asociado específicamente con filtraciones. Sin embargo, la especie *A. gibossa* ha sido descrita como una especie altamente adaptable debido a la simbiosis múltiple que puede tener simultaneamente con varios organismos, por ejemplo, albergar varias especies de diatomeas al mismo tiempo(Lee et al., 1995). Su movilidad le asegura alcanzar luz solar en zonas mas profundas(Murray, 2006), incluso se ha reportado que bajo concentraciones elevadas de  $CO_2$  sufre alteraciones menores en la coloración del simbiote(Stuhr et al., 2021). Adicionalmente, estas



dos estaciones presentan altos porcentajes de disolución y fragmentación. Particularmente, la estación MSH-25 presenta altos porcentajes de ambas variables al igual que la presencia de géneros reportados en filtraciones como *Globocassidulina*, *Melonis*, *Uvigerina* y *Cibicidoides* (Lu et al., 2023).

### ***Estaciones de actividad Moderada-alta***

La zona de actividad de filtración moderada-alta corresponde a las estaciones MSH-11 y MSH-12, que se encuentran situadas sobre pockmarks. En estas estaciones incrementan los porcentajes de fragmentación, sobrecrecimiento y disolución, evidencias importantes de la actividad de fluidos. En las poblaciones de FB hay una dominancia de foraminíferos aglutinados con la presencia de las especies *B. irregularis* y *L. soldanii*. Aunque en zonas de filtración intensa disminuye la presencia de FB aglutinados, estos pueden ser abundantes donde hay presencia de alta liberación de  $CO_2$ , que a su vez incrementa la disolución y disminuye la presencia de FB calcáreos (Dessandier et al., 2019). La producción de  $CO_2$  a partir del metano ocurre por el revertimiento del metabolismo de las archaeas debido a la variación en la disponibilidad de las enzimas, reponsables de transferencia de iones y electrones (Bhattarai et al., 2019). Las altas concentraciones de  $CO_2$  no son aptas para la presencia de FB calcareos (Herguera et al., 2014) lo que explica la ausencia de los foraminíferos calcáreos infaunales sin adaptaciones morfológicas en estas zonas de filtración, como son *T. trigonula*, y foraminíferos hialinos como *C. poeyanum* y *E. excavatum*.

El sobrecrecimiento revela implicaciones sobre la dinámica diagenética relacionada con la oxidación anaeróbica del metano, incrementando la alcalinidad y la producción del bicarbonato en el agua intersticial (Elvert et al., 1999), que posteriormente genera la precipitación de los sobrecrecimientos en las paredes de las conchas de los FB. Así, altos porcentajes de sobrecrecimiento en estas estaciones pueden asociarse a una mayor degradación de la materia orgánica sedimentaria y reacciones redox secundarias, que producen iones bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), facilitando la formación de carbonato autógeno (Ni et al., 2020). Adicionalmente, también puede inferirse de acuerdo con la baja abundancia en la estación MSH-11 (38 ind/cm<sup>3</sup>), que tal vez esta estación haya estado sometida a periodos de alta filtración.

### ***Estación de actividad alta***

La estación MSH-23, localizada en el quiebre del talud, se diferencia de las estaciones anteriores debido a que presenta baja abundancia de FB y dominancia de especies hialinas. De las especies dominantes en la zona de estudio la única presente en esta estación es *C. mundulus*, con un porcentaje significativo. Además de presentar altos porcentajes de sobrecrecimiento, fragmentación, disolución y estar ubicada sobre el flanco de un domo con falla, lo que podría indicar actividad alta de filtración. Asimismo en esta estación, en comparación con las otras estaciones, se encontró una mayor proporción de géneros de especies hialinas relacionadas con filtración a nivel mundial, como *Uvigerina*, *Melonis*, *Cibicidoides*, *Globocassidulina*, *Bolivina* y *Lenticulina*.

## 6.2 Relación de FB con el metano y otras variables ambientales

A partir de los modelos estadísticos RDA, las variables ambientales más relacionadas con las asociaciones de FB fueron el porcentaje de lodos, la salinidad, los hidrocarburos, el metano y la profundidad. De todas estas, el % de lodos y la salinidad fueron las variables predictoras más significativas dentro del modelo con mayor varianza explicada, para entender la distribución de las asociaciones de especies dominantes. El % de lodos muestra dos sectores diferenciados, uno caracterizado por las estaciones MSH-01-MSH-09, conformado por lodos, y otro, correspondiente a las demás estaciones, con lodos arenosos, arenas lodosas y arenas. Como se ha discutido antes, el sector de las estaciones MSH-01-MSH-09 parece corresponder a flujos de lodos provenientes de volcanes diapíricos, relacionados con baja abundancia y diversidad de FB, y un grupo de especies dominadas por paredes aglutinadas. La salinidad, por su parte, es muy homogénea en la zona de estudio, pero se observa un aumento en las estaciones MSH-21 a MSH-26. En estas estaciones aumentaron los FB de pared hialina de los géneros *Uvigerina*, *melonis*, *Globocassidulina*, *Bolivina*, entre otros, con adaptaciones fisiológicas como la simbiosis facultativa y la desnitrificación.

Finalmente, con todo este análisis, si nos preguntamos qué controla más las poblaciones de FB en la zona de estudio, los flujos de metano o las variables ambientales, la respuesta podría ser que hay una asociación compleja entre ambos, que está reflejada en las poblaciones de FB. El porcentaje de lodos está muy relacionado en este caso con la actividad de filtración, por constituirse en una capa sello y por su contenido de metales tóxicos. La salinidad es una variable más independiente de las filtraciones, que logró separar un grupo de especies hialinas que no se identificó en los análisis estadísticos de las poblaciones de FB. Sin embargo, en estas estaciones si se logró identificar un efecto importante de la intensidad de la filtración, que las agrupó en categorías diferentes. Por lo tanto, se podría afirmar que las poblaciones de FB estudiadas responden principalmente al tipo de sustrato, la salinidad y las filtraciones de metano.

## 7. Conclusión y recomendaciones

Este trabajo permitió identificar la variabilidad en la actividad de los 18 sitios de filtración presentes en la plataforma continental de la zona offshore del cinturón del Sinú, a partir de las poblaciones de FB. Distinguir su variación fue posible a partir de la división del sector en 4 niveles de actividad mediante el uso principal de las asociaciones y las variables obtenidas a partir de los FB. De forma general, la inhabilidad morfológica a la simbiosis; y la intolerancia a la hipoxia, a altas concentraciones de  $CO_2$  y al aumento de la acidez fueron algunas características presentadas por las especies dominantes en la zona de actividad baja. Esta zona estuvo relacionada con la asociación de *Q. candeiana*, *E. excavatum*, *L. difflugiformis*, *T. trigonula*, y *C. poeyanum*. Las especies presentes en los sectores de actividad moderada como el *L. ungeriana*, son beneficiadas por los cambios texturales del sustrato y la advención del metano, al igual que aquellas especies que realizan

simbiosis, reflejando altas abundancias de los FB en las estaciones de este sector. En el caso de las especies presentes en las estaciones de actividad moderada - alta, relacionadas con la asociación de *L. soldanii*, *B. irregularis* y *B. cf aspratilis*, su tolerancia a los niveles de CO<sub>2</sub> y el aumento de acidez permitieron su supervivencia. Finalmente, en la estación de filtración alta, la baja abundancia de FB, junto con un cambio en la asociación de especies y la aparición de especies hialinas con múltiples adaptaciones fisiológicas, explican la actividad presente en este sector.

En cuanto a la relación de los FB con el metano y las variables ambientales, se identificó que su distribución está relacionada principalmente con los cambios en el porcentaje de lodo y la salinidad, pero al mismo tiempo, algunos factores ambientales están relacionados con la filtración del metano. Por lo que la interacción de estas variables actúan en conjunto en la distribución de las asociaciones, debido a que el % de lodo se relaciona con las especies dominantes que proliferan en las estaciones someras, la salinidad con el incremento de las especies hialinas y las filtraciones de metano con la abundancia de las especies del género *Cibicidoides*, en especial la especie *L. ungeriana*, siendo la especie más abundante en el estudio, que actuó como un indicador de los sitios con mayor contenido de metano presente en el agua de fondo.

## **Recomendaciones:**

Realizar el muestreo del agua intersticial de las muestras superficiales, para identificar la composición química y evaluar su relación con la OAM y la ubicación de la ZTSM. Además de analizar la composición geoquímica e isotópica de los sedimentos y los FB para corroborar el nivel de intensidad de filtración con los valores del  $\delta^{13}C$  y registrar las variaciones en la alcalinidad, sulfuro y sulfato de las muestras superficiales, para entender la dinámica geoquímica en cada sitio de filtración.

Interpretar la sísmica para ubicar los rasgos estructurales en profundidad que se relacionan con la emisión de fluidos.

Indagar sobre las adaptaciones fisiológicas de las especies presentes para tener un mejor entendimiento de su comportamiento y distribución. Como por ejemplo, la simbiosis en la *A. Gibossa* y los simbioentes que almacena, la cleptoplastidia en el género *Elphidium* y la variación de la concentración de sus carotenoides en relación con su adaptación a los medios de baja filtración del metano, entre otras.

## 8. Anexos

### Anexo 1. Resumen de las Características de las estaciones previas al muestreo.

Mapa_planificacion_de_campaña												
FID	Shape *	Este	Norte	Anomalia	Pockmar	Origen ema	Profundida	Nivel	Orden	Muestreo	Atributo	
0	Point ZM	366009.9	1055835.3	Filtración-01	Sí	Sí	63	Fuerte	12	Si	Pockmar señales alta en SBP con WC cerca slick	
1	Point ZM	374109	1057493.1	Filtración-02	No	Sí	63	Fuerte	7	Posible	Sin pocmark señales media SBP evidencia WC	
2	Point ZM	374281.4	1057528.5	Filtración-03	No	Sí	62	Fuerte	8	Si	Sin pocmark señales fuertes SBP con WC slicks	
3	Point ZM	361025.6	1056601.8	Filtración-04	Posible Volcán	Sí	73	Fuerte	15	Si	Volan señales alta SBP con domo falla	
4	Point ZM	364208.5	1056189.9	Filtración-05	Sí	Sí	70	Fuerte	13	Si	Pocmark señales altas SPB cerca slicks	
5	Point ZM	360931.6	1056526.4	Filtración-06	Sí	Sí	73	Fuerte	16	Si	Pocmark señales altas SBP con domo falla	
6	Point ZM	360789.3	1056520.7	Filtración-07	Sí	Sí	73	Fuerte	17	Si	Pocmark señales media SBP con domo falla	
7	Point ZM	360754	1056537.7	Filtración-08	Sí	Sí	73	Moderado	18	Posible	Pocmark señales media SPB con domo falla	
8	Point ZM	360677.3	1056541.4	Filtración-09	Sí	Sí	72	Moderado	19	Posible	Pocmark señales media SPB con domo falla	
9	Point ZM	360623.2	1056535.4	Filtración-10	Sí	Sí	73	Moderado	20	Si	Pocmark señales altas SPB con domo falla	
10	Point ZM	368493	1057845.4	Filtración-11	Sí	No	70	Moderado	11	Si	Pocmark señales media SPB con WC en falla	
11	Point ZM	374546.6	1055220.6	Filtración-12	No	Sí	53	Moderado	4	Si	Sin pocmark señales leve SBP	
12	Point ZM	367517.8	1059713.5	Filtración-13	Sí	No	64	Moderado	10	Si	Pocmark señales media SBP slick	
13	Point ZM	376337	1052768.8	Filtración-15	No	No	48	Leve	3	Si	Sin pocmark señales en SBP en falla con domo	
14	Point ZM	375630.4	1052752.1	Filtración-16	No	Sí	48	Leve	2	Si	Pocmark señales en SBP en falla con domo	
15	Point ZM	374468	1051803.9	Filtración-17	Sí	No	48	Moderado	1	Si	Pocmark señales en SBP en falla con domo	
16	Point ZM	373904.1	1057504.3	Filtración-19	No	Sí	63	Moderado	6	Posible	Sin pocmark señales media SBP evidencia WC	
17	Point ZM	375734.4	1059324.7	Filtración-22	No	Sí	64	Moderado	9	Si	Sin pocmark señales leves SPB	
18	Point ZM	361548.3	1051791.2	Filtración-23	No	Sí	66	Leve	26	Si	Sin pocmark señales leves SPB domo falla	
19	Point ZM	361519.8	1057934.6	Filtración-24	No	No	77	Moderado	14	Si	Sin pocmark señales media SPB con domo falla	
20	Point ZM	357288.1	1057934.6	Filtración-25	Sí	No	85	Leve	21	Si	Pocmark señales leve SBP	
21	Point ZM	356230.3	1057829.5	Filtración-26	Sí	Sí	91	Moderado	22	Si	Pocmark señales medi SBP con domo	
22	Point ZM	354347,790724	1058486,362091	Filtración-28	No	Si	185	Fuerte	24	Posible	Sin pocmark señales leve SBP	
23	Point ZM	355933,337951	1059923,817621	Filtración-29	No	No	166	Fuerte	23	Posible	Volcan en silp	
24	Point ZM	374344,045507	1055940,559059	Blanco	No	No	59		5	Blanco	Blanco zona somera	
25	Point ZM	358400,914982	1055364,884648	Blanco	No	No	74		25	Blanco	Blanco zona profunda	
26	Point ZM	360867.2	1056485		Si	No	74		27	Posible	Pockmar de gran extension sin señales en SBP o WC	

### Anexo 2. Matriz completa de las 18 variables y las 15 especies dominantes

%PI	%Diso	<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	<i>Quinqueloculina candeiana</i>	<i>Reussella spiculosa</i>	<i>Discorbina bertheloti</i>	<i>Criboelphidium excavatum</i>	<i>Cibicides mundulus</i>	<i>Nuttallides umbonifer</i>	<i>Lagenammia difflugiformis</i>	<i>Triloculina trigonula</i>	<i>Cibicides pseudoungerianus</i>	<i>Amphistegina gibbosa</i>	<i>Bigenaria irregularis</i>	<i>Bigenaria cf aspratilis</i>	<i>Liebusella soldanii</i>	<i>Criboelphidium poeyanum</i>
0.0	0.7	3.45	16.46	5.80	4.70	9.40	0.00	6.43	10.19	7.84	0.00	0	1.1	0	3.13	1.25
0.0	0.0	3.76	16.70	7.93	3.34	6.68	0.00	7.10	7.52	4.59	0.63	0	0.63	0	0.84	2.09
0.0	1.9	2.94	12.79	6.08	7.34	9.43	0.00	6.92	4.61	5.45	0.00	0	0.42	0	1.68	5.03
0.0	2.9	3.83	14.09	4.08	4.70	8.65	0.12	2.84	9.89	5.19	3.83	0	0.87	0	0.12	3.83
0.0	0.0	4.66	13.14	7.91	6.78	6.36	0.42	2.40	13.28	9.32	2.12	0	0.99	0	0.14	3.67
0.6	5.4	4.38	13.71	2.24	5.60	2.71	0.00	5.97	8.58	5.97	2.89	0	2.33	2.15	0.56	4.85
0.7	16.5	3.17	14.50	3.17	5.00	5.50	0.00	6.50	10.33	6.33	3.00	0	1.33	1.17	0.83	2.17
0.0	16.4	27.67	5.56	7.22	5.56	4.36	6.17	2.71	0.30	2.71	5.56	0	3.46	2.26	0.15	1.05
0.5	22.3	5.67	5.19	2.59	1.94	1.46	0.81	11.18	0.00	0.32	1.94	0.16	2.92	4.7	6	0.64
0.0	14.6	7.67	5.11	1.60	3.67	0.80	2.24	3.83	0.16	0.64	2.88	0.8	6.87	5.27	3.83	0.64
0.1	16.6	20.50	4.28	8.55	6.42	3.52	6.67	1.89	0.25	1.76	5.41	0.13	3.02	0.88	0	0.75
0.2	22.0	14.76	7.63	10.61	8.29	5.31	6.97	0.83	1.49	1.66	6.97	0	1.33	0.5	0	0.5
3.9	12.0	10.97	3.76	6.71	5.89	3.93	5.56	1.31	0.00	2.13	3.27	4.91	1.96	1.96	2.45	0.33
0.1	1.5	14.94	1.59	7.63	5.09	3.66	10.49	1.43	0.00	0.64	8.59	3.97	0.48	1.75	0.32	0.48
0.0	18.4	11.31	0.98	6.28	2.51	0.84	5.17	2.79	1.23	1.68	4.89	3.63	2.37	2.23	2.93	0.56
1.1	32.0	5.60	0.49	1.48	1.32	0.33	13.67	1.81	0.49	0.82	1.32	0	0.82	1.15	0.49	0
0.0	27.0	9.99	1.41	4.08	1.69	0.28	7.31	1.13	0.00	0.28	1.41	16.32	3.09	2.81	1.27	0.84
0.2	16.4	10.91	2.25	5.94	1.61	1.77	5.30	1.93	0.16	1.12	1.44	15.25	4.98	5.3	5.14	0.48

### Anexo 3. Código de los PCAS

```

1 #PCA-ESPECIES PRINCIPALES
2
3 #Se cargan las librerías
4
5 library("vegan")
6 library("factoextra")
7 library("ggplot2")
8 library("ggfortify")
9 library("ggrepel")
10
11 install.packages("ggfortify")
12
13 #Leo la base de datos
14 setwd("C:/PROYECTO_UNAL/Methane_Seep_Hunting/TESIS_MAESTRIA/DATOS_ESPECIES_R/analisis")
15 dir()
16 library(readxl)
17 dir_me<-("C:/PROYECTO_UNAL/Methane_Seep_Hunting/TESIS_MAESTRIA/DATOS_ESPECIES_R/analisis/matriz_especies.xlsx")
18 dir_var_c<-("C:/PROYECTO_UNAL/Methane_Seep_Hunting/TESIS_MAESTRIA/DATOS_ESPECIES_R/analisis/variables_categ.xlsx")
19 matriz_especies<-read_excel(dir_me)
20 variables_categ<-read_excel(dir_var_c)
21 attach(matriz_especies)
22 attach(variables_categ)
23 cor(matriz_especies[,2:16])
24 mean(cor(matriz_especies[,2:16]))

```

```

53 # METODO-2:COMPONENTES PRINCIPALES-PRCOMP PACKAGE
54
55 #Hago correlación
56 pca.prcomp<-prcomp(matriz_especies[2:16], scale= TRUE,center=TRUE)
57
58 #Aplico la transformación de hellinger
59
60 pca.prcomp.h<-decostand(matriz_especies[2:16],"hellinger")
61 pca.prcomp<-prcomp(pca.prcomp.h, scale=TRUE, center=TRUE)
62 summary(pca.prcomp)
63 #Eigenvalues
64 eig.val<-get_eigenvalue(pca.prcomp)
65
66 #Resultados especies(variables)
67 esp<-get_pca_var(pca.prcomp)
68 #correlaciones de estaciones con las especies
69 esp$cor
70 esp$contrib
71 esp$cos2
72 str(pca.prcomp)
73 pca.prcomp$x
74 varespec.PCAs<-cbind(matriz_especies,pca.prcomp$x[,1:2])

```

```

76 #Plot:Screeplot
77
78 #Screeplot
79
80 screeplot(pca.prcomp,bstick=TRUE,type="l", main=NULL)
81
82
83 #Manual/: PC1 representa alrededor del 50% de la varianza de los datos
84 pca.prcomp.var<-pca.prcomp$sdev ^2 # para ver cuanto varianza representa cada componente
85 pca.prcomp.var.perc<-round(pca.prcomp.var/sum(pca.prcomp.var)*100,1) # convertila a porcentaje
86 barplot(pca.prcomp.var.perc, main ="Scree Plot",xlab= "Componente Principal", ylab="Porcentaje de varianza explicada")
87
88 #Con el paquete factoextra
89
90 fviz_eig(pca.prcomp)
91
92 #Plot:Biplot
93 biplot(pca.prcomp,scaling="symmetric")
94
95 fviz_pca_biplot(pca.prcomp,repel=TRUE,col.var = "#2E9FD8",col.ind = "#696969")

```

```

107 #PCA-Categoría de filtración
108
109 #Package ggplot2 y/o ggfortify
110
111 pca.prcomp.data<-data.frame(pca.prcomp$x)#crea los PCs como columnas y las muestras como filas
112
113 pca.prcomp.data$plotx<-pca.prcomp.data[,1] #asigna la primera columna como el plotx
114 pca.prcomp.data$ploty<-pca.prcomp.data[,2]
115
116 #Incluye una columna con categorías
117
118 Estaciones=as.character(variables_categ$Estaciones)
119 pca.prcomp.data$Estaciones<-Estaciones
120
121 categoria_filtracion=as.character(variables_categ$categoria_filtracion)
122 pca.prcomp.data$categoria_filtracion<-categoria_filtracion

```

```

140 #CATEGORIA FILTRACION Y ESTACIONES
141 library(ggrepel) # Para geom_text_repel
142 library(ggdist) # Para stat_ellipse
143
144 class(pca.prcomp.data$Estaciones)
145 class(pca.prcomp.data$categoria_filtracion)
146 pca.prcomp.data$categoria_filtracion ← as.factor(pca.prcomp.data$categoria_filtracion)
147 pca.prcomp.data$Estaciones ← as.factor(pca.prcomp.data$Estaciones)
148
149 pca.prcomp_plot ← ggplot(pca.prcomp.data, aes(x = plotx, y = ploty, color=categoria_filtracion, label = Estaciones, group = categoria_filtracion)) +
150   geom_point() +
151   ggtitle("PCA de Categoría de Filtración y Estaciones") +
152   geom_text_repel(fontface = "bold", show.legend = FALSE) +
153   xlab("PC1") + ylab("PC2") + # Corrección en las etiquetas de los ejes
154   coord_fixed(ratio = 2) +
155   stat_ellipse(geom = "polygon", aes(fill = after_scale(alpha(colour, 0.3))),
156   data = pca.prcomp.data[pca.prcomp.data$categoria_filtracion ≠ "versicolor", ]) +
157   theme_bw() +
158   theme(panel.grid = element_blank())
159
160 pca.prcomp_plot +
161   coord_cartesian(xlim = c((-5), 10), ylim = c((-10), 10))
162

```

#### Anexo 4. Significancia estadística de los 3 modelos RDA propuestos.

```

> anova(spec.rda1, perm.max=1000) #tells you if entire model is significant
Permutation test for rda under reduced model
Permutation: free
Number of permutations: 999

Model: rda(formula = spec.h_sin_NAS ~ `metano (ppm)` + HCs + S + `% L` + `Prf(m)`, data = t.env)
      Df Variance      F Pr(>F)
Model    5 0.136783 3.6864 0.002 **
Residual  7 0.051947
---

```

```

> anova(spec.rda1, by="terms", perm.max=1000) #tells you which terms are significant
Permutation test for rda under reduced model
Terms added sequentially (first to last)
Permutation: free
Number of permutations: 999

Model: rda(formula = spec.h_sin_NAS ~ `metano (ppm)` + HCs + S + `% L` + `Prf(m)`, data = t.env)
      Df Variance      F Pr(>F)
`metano (ppm)`  1 0.016783 2.2615 0.119
HCs              1 0.009739 1.3124 0.251
S                1 0.054980 7.4087 0.001 ***
`% L`           1 0.040216 5.4192 0.007 **
`Prf(m)`        1 0.015065 2.0301 0.118
Residual        7 0.051947
---

```

```

> anova(spec.rda2, perm.max=1000) #tells you if entire model is significant
Permutation test for rda under reduced model
Permutation: free
Number of permutations: 999

Model: rda(formula = spec.h_sin_NAS ~ `metano (ppm)` + S + `% L` + `Prf(m)`, data = t.env)
      Df Variance      F Pr(>F)
Model    4 0.13272 4.7391 0.001 ***
Residual  8 0.05601
---

```

```
> anova(spec.rda2, by="terms", perm.max=1000) #tells you which terms are significant
Permutation test for rda under reduced model
Terms added sequentially (first to last)
Permutation: free
Number of permutations: 999

Model: rda(formula = spec.h_sin_NAS ~ `metano (ppm)` + S + `% L` + `Prf(m)`, data = t.env)
      Df Variance      F Pr(>F)
`metano (ppm)` 1 0.016783 2.3971 0.105
S              1 0.059526 8.5022 0.001 ***
`% L`         1 0.040742 5.8192 0.006 **
`Prf(m)`     1 0.015669 2.2380 0.108
Residual      8 0.056010
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
> anova(spec.rda3, perm.max=1000) #tells you if entire model is significant
Permutation test for rda under reduced model
Permutation: free
Number of permutations: 999

Model: rda(formula = spec.h_sin_NAS ~ S + `% L`, data = t.env)
      Df Variance      F Pr(>F)
Model   2 0.113701 7.5772 0.001 ***
Residual 10 0.075029
```

```
> anova(spec.rda3, by="terms", perm.max=1000) #tells you which terms are significant
Permutation test for rda under reduced model
Terms added sequentially (first to last)
Permutation: free
Number of permutations: 999

Model: rda(formula = spec.h_sin_NAS ~ S + `% L`, data = t.env)
      Df Variance      F Pr(>F)
S       1 0.070641 9.4152 0.001 ***
`% L`   1 0.043060 5.7392 0.003 **
Residual 10 0.075029
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

## Anexo 5. Listado de especies de FB encontradas en las 18 estaciones, según su tipo de pared.

### PARED PORCELANACEA

<i>Quinqueloculina candeiana</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Siphonaperta agglutinata</i> (Cushman, 1917)	<i>Miliolinella subrotunda</i> (Montagu, 1803)	<i>Triloculina cf bermudezi</i> (Acosta, 1940)
<i>Quinqueloculina Lamarckiana</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Quinqueloculina sp1</i>	<i>Triloculina tricarinata</i> (d'Orbigny in Deshayes, 1832)	<i>Spirosigmoilina bradyi</i> Collins 195
<i>Quinqueloculina polygona</i> d'Orbigny, 1839	<i>Quinqueloculina tricarinata</i> d'Orbigny, 1839	<i>Articulina paucicostata</i> Cushman, 1944	<i>Peneroplis planatus</i> (Fichtel & Moll, 1798)
<i>Quinqueloculina seminulum</i> (Linnaeus, 1758)	<i>Pyrgo subsphaerica</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Triloculina sp</i>	<i>spiroloculina sp1</i>
<i>Triloculina trigonula</i> (Cushman, 1929)	<i>Articulina cf mexicana</i> (Cushman, 1922)	<i>Triloculina sp1</i>	<i>Spirophthalmidium cf acutumargo</i> (Brady, 1884)
<i>Massilina gualtieriana</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Pyrgo Elongata</i> (D'orbigny 1826)	<i>Pyrgo depressa</i> (d'Orbigny 1826)	<i>Spirosigmoilina tenuis</i> (Czjžek, 1848)
<i>Spirophthalmidium cf sp</i> (Cushman, 1927)	<i>Spiroloculina depressa</i> d'Orbigny, 1826	<i>Pyrgo sp</i>	<i>Archaias angulatus</i> (Fichtel & Moll, 1798)
<i>Quinqueloculina sp</i>	<i>Cornuspira planorbis</i> Schultze, 1854	<i>Quinqueloculina poeyana</i> d'Orbigny, 1839	<i>Miliolinella fichteliana</i> (d'Orbigny, 1839)
<i>Quinqueloculina agglutinans</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Spiroloculina planissima?</i> - <i>Massilina occlusa</i>	<i>Quinqueloculina subpoeyana</i> d'Orbigny, 1840	<i>Cyclorbiculina compressa</i> (d'Orbigny, 1839)
<i>Triloculina Oblonga</i> (Lamarck, 1804)	<i>Massilina sp</i>	<i>Quinqueloculina laevigata</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Peneroplis carinatus</i> d'Orbigny, 1839
			<i>Articulina sp</i>

## PARED AGLUTINADA

<i>Marsipella</i> sp	<i>Bigeneria irregularis</i> (Phleger & Parker, 1951)	<i>Glaphyrammina americana</i> (Cushman, 1910)	<i>Pseudoclavulina serventyi</i> (Chapman & Parr, 1935)
<i>Lagenammina difflugiformis</i> (Brady, 1879)	<i>Cylindroclavulina bradyi</i> (Cushman, 1911)	<i>Textularia candeiana</i> d'Orbigny, 1839	<i>Pseudoclavulina cf. tricarinata</i> (LeRoy, 1941)
<i>Clavulina</i> sp	<i>Pseudoclavulina</i> (Cushman, 1936)	<i>Textularia calva</i> Lalicker, 1935	<i>Cribrostomoides jeffreysii</i> (Williamson, 1858)
<i>Pseudoclavulina</i> sp	<i>Martinottiella communis</i> (d'Orbigny, 1846)	<i>Textularia earlandi</i> Parker, 1952	<i>Lituotuba lituiformis</i> (Brady, 1879)
<i>Reophax</i> sp	<i>Paratrochammina challengerii</i> Brönnimann & Whittaker, 1988	<i>Textularia lateralis</i> Lalicker, 1935	<i>Liebusella soldanii</i> (Jones & Parker, 1860)
<i>Bigenerina</i> sp	<i>Parathrochammina</i> sp	<i>Textularia siphonifera</i> sp	<i>Liebusella</i> sp
<i>Textularia cf. hystrix</i> Jones, 1994 sp o <i>Eggerella</i> sp	<i>Pseudoclavulina</i> Cushman, 1936	<i>Migros flintii</i> (Cushman, 1911)	<i>Spirotextularia floridana</i> (Cushman, 1922)
<i>Textularia</i> sp1.	<i>Textularia agglutinans</i> d'Orbigny, 1839	<i>Karrerella bradyi</i> (Cushman, 1911)	<i>Nodulina dentaliniformis</i> (Brady, 1881)
<i>Textularia</i> sp	<i>Bigenerina cf. aspratilis</i> Loeblich & Tappan, 1994	<i>Sahulina conica</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Reophax compressus</i> Goës, 1894
<i>Textularia cf. hystrix</i> Jones, 1994 sp1 o <i>Eggerella</i> sp1	<i>Gaudryina aequa</i> (Cushman, 1947)	<i>Eggerella Bradyi</i> Cushman, 1911	<i>Reophax comprima</i> (Phleger & Parker, 1951)
			<i>Reophax fusiformis</i> (Williamson, 1858)

## PARED HIALINA

<i>Nuttallides umbonifer</i> (Cushman, 1933)	<i>Siphonina pulchra</i> , new species (Cushman, 1919)	<i>Lenticulina orbicularis</i> (d'Orbigny, 1826)	<i>Glabratella Dorreen</i> , 1948 sp
<i>Discorbinella bertheloti</i> (d'Orbigny, 1839) o <i>Hanzawaia boueana</i>	<i>Siphonina jacksonensis</i> Cushman & Applin, 1926	<i>Lenticulina</i> sp.	<i>Heterostegina depressa</i> d'Orbigny, 1826
<i>Discorbinella</i> sp.	<i>Planogypsina acervalis</i> (Brady, 1884)	<i>Uvigerina auferiana</i> d'Orbigny var. <i>laevis</i> Goes	<i>Cymbaloporeta squamosa</i> (d'Orbigny, 1839)
<i>Eponides repandus</i> (Fichtel & Moll, 1798)			
	<i>Planogypsina</i> sp	<i>Pullenia quinqueloba</i> (Reuss, 1851)	<i>Cassidulina obtusa</i> Williamson, 1858
<i>Cancris sagra</i> (d'Orbigny, 1839) o <i>Cangris cf. carinatus</i>	<i>Cibicidoides pseudoungerianus</i> (Cushman, 1922)	<i>Hanzawaia</i> sp	<i>Neolenticulina variabilis</i> (Reuss, 1850)
<i>Cancris auricula</i> (Fichtel & Moll, 1798)	<i>Amphistegina</i> sp	<i>Trifarina bradyi</i> Cushman, 1923	<i>Vaginulinopsis planata</i> (Phleger & Parker, 1951)
<i>Cancris</i> sp	<i>Planulina</i> sp	<i>Siphoninella soluta</i> (Brady, 1881)	<i>Amphicoryna Schlumbergeri</i> in Milne-Edwards, 1881
<i>Cibicidoides Wuellerstorfi</i> (Schwager, 1866)	<i>Rosalina</i> sp3	<i>Operculina</i> sp.	<i>lagena</i> sp
<i>Reussella spinulosa</i> (Reuss, 1850)	<i>Amphistegina lessona</i> d'Orbigny in Deshayes, 1830	<i>Ammonia beccarii</i> (Linnaeus, 1758)	<i>lagena</i> sp1
<i>Criboelphidium poeyanum</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Planorbulina</i> sp	<i>Bolivina</i> sp	<i>lagena</i> sp2
<i>Elphidium excavatum</i> (Terquem, 1875)	<i>Cymbaloporeta Bradyi</i> (Cushman, 1915)	<i>Acervulina inhaerens</i> Schultze, 1854	<i>Lagena spicata</i> Cushman & McCulloch, 1950
<i>Criboelphidium</i> sp	<i>Rosalina floridana</i> (Cushman, 1922)	<i>Cassidulina carinata</i> Silvestri, 1896	<i>Lagena sulcata</i> (Walker & Jacob, 1798)
<i>Cibicidoides</i> sp	<i>Rosalina globularis</i> d'Orbigny, 1826	<i>Sphaeroidina bulloides</i> d'Orbigny in Deshayes, 1832	<i>Laevidentalina aphelis</i> Loeblich & Tappan, 1986
<i>Nonion sloanii</i> (D'Orbigny).	<i>Cibicidoides mundulus</i> (Brady, Parker & Jones, 1888)	<i>Siphonina</i> sp.	<i>Lagena semistriata</i> Williamson, 1848
<i>Nonionoides grateloupii</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Planorbulina mediterraneensis</i> d'Orbigny, 1826	<i>Rosalina subarauca</i> (Cushman, 1922)	<i>Lagena sulcata var. spicata</i> (Walker & Jacob, 1798)
<i>Nonionoides</i> sp	<i>Melonis affinis</i> (Reuss, 1851)	<i>Cibicides refulgens</i> sp	<i>Bombulina spinata</i> (Cushman, 1935)
<i>Rosalina</i> sp.	<i>Uvigerina peregrina</i> Cushman, 1851	<i>Dyobicides biserialis</i> Cushman & Valentine, 1930	<i>Guttulina pyruiliniformis</i> (McCulloch, 1977)
<i>Rosalina</i> sp4	<i>Neocorbina terquemii</i> (Rzehak, 1888)	<i>Uvigerina flintii</i> (Cushman, 1923)	<i>Glandulina laevigata</i> (d'Orbigny, 1826)
<i>Rosalina cf. globularis</i>	<i>Globocassidulina subglobosa</i> (Brady, 1881)	<i>Bolivina cochei</i> Cushman & Adams, 1935	<i>Fissurina cf. sp</i>
<i>Tretomphaloides concinnus</i> (Brady, 1884)	<i>Globocassidulina</i> sp	<i>Globocassidulina crassa</i> (d'Orbigny, 1839)	<i>Pyramidulina comatula</i> (Cushman, 1923)
<i>Ammonia</i> sp	<i>Heterostegina</i> sp	<i>Lenticulina calcar</i> (Linnaeus, 1758)	<i>Hoeglundina elegans</i> (d'Orbigny, 1826)
<i>Buccella frigida</i> (Cushman, 1922)	<i>Elphidium crispum</i> (Linnaeus, 1758)	<i>Cassidulina laevigata</i> d'Orbigny, 1826	<i>Turrispirillina arctica</i> (Cushman, 1933)
<i>Fursenkoina compressa</i> (Bailey, 1851)	<i>Rosalina floridensis</i> (Cushman, 1930)	<i>Pullenia bulloides</i> (d'Orbigny, 1846)	<i>Spirulina decorata</i> (Brady, 1884)
<i>Siphonina reticulata</i> (Czjzek, 1848)	<i>Amphistegina gibbosa</i> d'Orbigny, 1839	<i>Operculina complanata</i> (DeFrance in Blainville, 1822)	

## 9. Bibliografía

- Alfaro, E., & Holz, M. (2014). Seismic geomorphological analysis of deepwater gravity-driven deposits on a slope system of the southern Colombian Caribbean margin. *Marine and Petroleum Geology*, 57, 294–311. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.06.002>
- Amato, F. L. (1970). Petroleum Developments in South America, Central America, Mexico, and Caribbean Area in 1976. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.; (United States)*, 62:10.
- Amiel, N., Shaar, R., & Sivan, O. (2020). The Effect of Early Diagenesis in Methanic Sediments on Sedimentary Magnetic Properties: Case Study From the SE Mediterranean Continental Shelf. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00283>
- Andrade, C. A., & Barton, E. D. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C11), 26191–26201. <https://doi.org/10.1029/2000JC000300>



- Aristizábal, C. O., Ferrari, A. L., & Cléverson, S. G. (2009). *CONTROL NEOTECTÓNICO DEL DIAPIRISMO DE LODO EN LA REGIÓN DE CARTAGENA, COLOMBIA (Neotectonic control of mud diapirism in the Cartagena region, Colombia)* (Vol. 8, Issue 1).
- Badesab, F., Dewangan, P., & Gaikwad, V. (2020). Magnetic Mineral Diagenesis in a Newly Discovered Active Cold Seep Site in the Bay of Bengal. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.592557>
- Barreto, M., Barrera, R., Benavides, J., Cardozo, E., Hernández, H., Marín, L., Posada, B., Salvatierra, C., Sierra, P., & Villa, A. (1999). Diagnóstico Ambiental del Golfo de Morrosquillo (Punta Rada-Tolú). In *Applied Geomorphological Surveys* (Vol. 23).
- Barry, J. P., Gary Greene, H., Orange, D. L., Baxter, C. H., Robison, B. H., Kochevar, R. E., Nybakken, J. W., R, D. L., & McHugh, C. M. (1996). Biologic and geologic characteristics of cold seeps in Monterey Bay, California. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 43(11–12), 1739–1762. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(96\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(96)00075-1)
- Basso, D., Beccari, V., Almogi-Labin, A., Hyams-Kaphzan, O., Weissman, A., Makovsky, Y., Rüggeberg, A., & Spezzaferri, S. (2020). Macro- and microfauna from cold seeps in the Palmahim Disturbance (Israeli off-shore), with description of *Waisiuconcha corsellii* n.sp. (Bivalvia, Vesicomidae). *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 171(January), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104723>
- Bastidas, C., & Ordóñez, A. (2017). Región 7: golfo de Morrosquillo. In *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe* (pp. 126–139). INVEMAR.
- Bernal, G., Agudelo, A. C., López, S. M., & Domínguez, J. G. (2005). Textura, Composición y Foraminíferos Bentónicos de los Sedimentos Superficiales en los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano. *Boletín Científico CCCP*, 12(12), 95–112. [https://doi.org/10.26640/01213423.12.95\\_112](https://doi.org/10.26640/01213423.12.95_112)
- Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P., & Andrade, C. (2006). PATRONES DE VARIABILIDAD DE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES DEL MAR EN LA COSTA CARIBE COLOMBIANA. *Ciencias de La Tierra*, XXX(115), 196–208.
- Bernal, G., Ruiz Ochoa, M., Piedrahita, M., & Restrepo, E. (2008). Foraminíferos En Los Sedimentos Superficiales Del Sistema Lagunar De Cispatá Y La Interacción Río Sinú-Mar Caribe Colombiano. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 0(23), 5–20.
- Bernhard, J. M., & Bowser, S. S. (1999). Benthic foraminifera of dysoxic sediments: chloroplast sequestration and functional morphology. *Earth-Science Reviews*, 46, 149–165. [www.elsevier.com/locate/elsevier](http://www.elsevier.com/locate/elsevier)
- Bernhard, J. M., Buck, K. R., & Barry, J. P. (2001). Monterey Bay cold-seep biota: Assemblages, abundance, and ultrastructure of living foraminifera. *Deep Sea Research Part I:*

*Oceanographic Research Papers*, 48(10), 2233–2249. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00017-6)

- Bernhard, J. M., Martin, J. B., & Rathburn, A. E. (2010). Combined carbonate carbon isotopic and cellular ultrastructural studies of individual benthic foraminifera: 2. Toward an understanding of apparent disequilibrium in hydrocarbon seeps. *Paleoceanography*, 25(4). <https://doi.org/10.1029/2010PA001930>
- Bernhard, J. M., Ostermann, D. R., Williams, D. S., & Blanks, J. K. (2006). Comparison of two methods to identify live benthic foraminifera: A test between Rose Bengal and CellTracker Green with implications for stable isotope paleoreconstructions. *Paleoceanography*, 21(4). <https://doi.org/10.1029/2006PA001290>
- Bhattacharai, S., Cassarini, C., & Lens, P. N. L. (2019). Physiology and Distribution of Archaeal Methanotrophs That Couple Anaerobic Oxidation of Methane with Sulfate Reduction. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 83(3). <https://doi.org/10.1128/MMBR.00074-18>
- Bhaumik, K. A., & Gupta, A. (2005). *Deep-sea benthic foraminifera from gas hydrate-rich zone, Blake Ridge, Northwest Atlantic (ODP Hole 997A)*. 1–6. <https://www.researchgate.net/publication/299301008>
- Buttitta, D., Caracausi, A., Chiaraluce, L., Favara, R., Gasparo Morticelli, M., & Sulli, A. (2020). Continental degassing of helium in an active tectonic setting (northern Italy): the role of seismicity. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55678-7>
- Cai, W.-J., Chen, F., Powell, E. N., Walker, S. E., Parsons-Hubbard, K. M., Staff, G. M., Wang, Y., Ashton-Alcox, K. A., Callender, W. R., & Brett, C. E. (2006). Preferential dissolution of carbonate shells driven by petroleum seep activity in the Gulf of Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1–2), 227–243. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.020>
- Campbell, K. A. (2006). Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232(2–4), 362–407. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.018>
- Canfield, D. E. (1989). *Reactive iron in marine sediments*. *Geochimica Et Cosmochimica*, 53, 619–632.
- Canfield, D. E., & Berner, R. A. (1987). Dissolution and pyritization of magnetite in anoxic marine sediments. *Geochimica Et Cosmochimica*, 51, 645–659.
- Carson, B., Kastner, M., Bartlett, D., Jaeger, J., Jannasch, H., & Weinstein, Y. (2003). Implications of carbon flux from the Cascadia accretionary prism: results from long-term, in situ measurements at ODP Site 892B. *Marine Geology*, 198(1–2), 159–180. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00099-9)

- Carvajal, J. H. (2016). Mud Diapirism in the Central Colombian Caribbean Coastal Zone. In *World Geomorphological Landscapes* (pp. 35–53). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0_3)
- Carvajal, J. H., Mendivelso, Domingo., Forero, H., Castiblanco, C. R., Pinzón, L. M., & Prada, Miguel. (2010). Investigación del diapirismo de lodo y evolución costera del Caribe colombiano. Geomorfología Sector I. *Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas*, 1–234.  
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481101000.pdf>
- Carvajal-Arenas, L. C., Torrado, L., Mann, P., & English, J. (2020). Basin modeling of Late Cretaceous / Mio-Pliocene (.) petroleum system of the deep-water eastern Colombian Basin and South Caribbean Deformed Belt. *Marine and Petroleum Geology*, *121*, 104511.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104511>
- Conrad, R. (1989). *Control of Methane Production in Terrestrial Ecosystems*.
- Cosel, R. Von, & Olu, K. (2009). Large Vesicomidae (Mollusca: Bivalvia) from cold seeps in the Gulf of Guinea off the coasts of Gabon, Congo and northern Angola. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *56*(23), 2350–2379.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.04.016>
- Dantas, R. C., Hassan, M. B., Cruz, F. W., & Jovane, L. (2022). Evidence for methane seepage in South Atlantic from the occurrence of authigenic gypsum and framboidal pyrite in deep-sea sediments. *Marine and Petroleum Geology*, *142*, 105727.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105727>
- Debenay, J.-P. (2013). *A Guide to 1,000 Foraminifera from Southwestern Pacific New Caledonia PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM*.
- Dessandier, P. A., Borrelli, C., Kalenitchenko, D., & Panieri, G. (2019). Benthic Foraminifera in Arctic Methane Hydrate Bearing Sediments. *Frontiers in Marine Science*, *6*(December), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00765>
- Detlef, H., Sosdian, S. M., Kender, S., Lear, C. H., & Hall, I. R. (2020). Multi-elemental composition of authigenic carbonates in benthic foraminifera from the eastern Bering Sea continental margin (International Ocean Discovery Program Site U1343). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *268*, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.025>
- Deville, É. (2009). *Mud Volcano Systems*. In *Volcanoes: Formation, Eruptions and Modelling: Vol. Chapter 5* (pp. 95–126). Nova Science Publishers.
- Di Luccio, D., Banda Guerra, I. M., Correa Valero, L. E., Morales Giraldo, D. F., Maggi, S., & Palmisano, M. (2021). Physical and geochemical characteristics of land mud volcanoes along

- Colombia's Caribbean coast and their societal impacts. *Science of The Total Environment*, 759, 144225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144225>
- Dimiza, M. D., Triantaphyllou, M. V., Portela, M., Koukousioura, O., & Karageorgis, A. P. (2022). Response of Living Benthic Foraminifera to Anthropogenic Pollution and Metal Concentrations in Saronikos Gulf (Greece, Eastern Mediterranean). *Minerals*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/min12050591>
- Dueñas, L. F., Puentes, V., León, J., & Herrera, S. (2021). Fauna associated with cold seeps in the deep Colombian Caribbean. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 173(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103552>
- Elvert, M., Suess, E., & Whiticar, M. J. (1999). Anaerobic methane oxidation associated with marine gas hydrates: superlight C-isotopes from saturated and unsaturated C 20 and C 25 irregular isoprenoids. In *Naturwissenschaften* (Vol. 86). Springer-Verlag.
- Enfield, D. B., & Mayer, D. A. (1997). Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C1), 929–945. <https://doi.org/10.1029/96JC03296>
- Fatela, F., & Taborda, R. (2002). Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45(2), 169–174. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(02\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(02)00021-X)
- Feng, D., Chen, D., & Roberts, H. H. (2009). Petrographic and geochemical characterization of seep carbonate from Bush Hill (GC 185) gas vent and hydrate site of the Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7), 1190–1198. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.07.001>
- Fentimen, R., Rüggeberg, A., Lim, A., Kateb, A. El, Foubert, A., Wheeler, A. J., & Spezzaferri, S. (2018). Benthic foraminifera in a deep-sea high-energy environment: the Moira Mounds (Porcupine Seabight, SW of Ireland). *Swiss Journal of Geosciences*, 111(3), 561–572. <https://doi.org/10.1007/s00015-018-0317-4>
- Flinch, J. (2003). Structural Evolution of the Sinu-Lower Magdalena Area (Northern Colombia). *AAPG Bulletin*, 1–22. <https://www.researchgate.net/publication/275211246>
- Fontanier, C., Jorissen, F. J., Chaillou, G., Anschutz, P., Grémare, A., & Griveaud, C. (2005). Live foraminiferal faunas from a 2800m deep lower canyon station from the Bay of Biscay: Faunal response to focusing of refractory organic matter. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(7), 1189–1227. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.01.006>
- Fontanier, C., Mamo, B., Mille, D., Duros, P., & Herlory, O. (2020). Deep-sea benthic foraminifera at a bauxite industrial waste site in the Cassidaigne Canyon (NW Mediterranean): Ten months after the cessation of red mud dumping. *Comptes Rendus. Géoscience*, 352(1), 87–101. <https://doi.org/10.5802/crgeos.5>

- Gamberi, F., & Rovere, M. (2010). Mud diapirs, mud volcanoes and fluid flow in the rear of the Calabrian Arc Orogenic Wedge (southeastern Tyrrhenian sea). *Basin Research*, 22(4), 452–464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00473.x>
- Gay, A., Lopez, M., Berndt, C., & Séranne, M. (2007). Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, 244(1–4), 68–92. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.06.003>
- Gay, A., Lopez, M., Cochonat, P., Sultan, N., Cauquil, E., & Brigaud, F. (2003). Sinuous pockmark belt as indicator of a shallow buried turbiditic channel on the lower slope of the Congo basin, West African margin. *Geological Society, London, Special Publications*, 216(1), 173–189. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.216.01.12>
- Gieskes, J., Rathburn, A. E., Martin, J. B., Pérez, M. E., Mahn, C., Bernhard, J. M., & Day, S. (2011). Cold seeps in Monterey Bay, California: Geochemistry of pore waters and relationship to benthic foraminiferal calcite. *Applied Geochemistry*, 26(5), 738–746. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.01.032>
- Glock, N. (2023). Benthic foraminifera and gromiids from oxygen-depleted environments – survival strategies, biogeochemistry and trophic interactions. *Biogeosciences*, 20(16), 3423–3447. <https://doi.org/10.5194/bg-20-3423-2023>
- Gómez, E., & Bernal, G. (2013). Influence of the environmental characteristics of mangrove forests on recent benthic foraminifera in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean. *Ciencias Marinas*, 39(1), 69–82. <https://doi.org/10.7773/cm.v39i1.2175>
- Gonzalez-Penagos, F., Milkov, A., Lopez, E., & Duarte, L. (2019, June 19). Microbial and Thermogenic Petroleum Systems in the Colombian offshore Caribbean — New Geochemical Insights in an Emerging Basin. *2019 AAPG Annual Convention and Exhibition*.
- Gooday, A. J. (2003). Benthic foraminifera (protista) as tools in deep-water paleoceanography: Environmental influences on faunal characteristics. In *Advances in Marine Biology* (Vol. 46, pp. 1–90). [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(03\)46002-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(03)46002-1)
- Gooday, A. J., Kamenskaya, O. E., & Soltwedel, T. (2013). Basal foraminifera and gromiids (Protista) at the Håkon-Mosby Mud Volcano (Barents Sea slope). *Marine Biodiversity*, 43(3), 205–225. <https://doi.org/10.1007/s12526-013-0148-5>
- Gooday, A. J., Nomaki, H., & Kitazato, H. (2008). Modern deep-sea benthic foraminifera: A brief review of their morphology-based biodiversity and trophic diversity. *Geological Society Special Publication*, 303, 97–119. <https://doi.org/10.1144/SP303.8>
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., & Sellanes, J. (2012). Methane seep molluscs from the Sinú-San Jacinto fold belt in the Caribbean Sea of Colombia. *Journal of the Marine Biological*

- Association of the United Kingdom*, 92(6), 1367–1377.  
<https://doi.org/10.1017/S0025315411001421>
- Hammer, D. A. T., Ryan, P. D., Hammer, Ø., & Harper, D. A. T. (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. In *Palaeontologia Electronica* (Vol. 4, Issue 1). <http://palaeo-electronica.org>[http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm).
- Herguera, J. C., Paull, C. K., Perez, E., Ussler, W., & Peltzer, E. (2014). Limits to the sensitivity of living benthic foraminifera to pore water carbon isotope anomalies in methane vent environments. *Paleoceanography*, 29(3), 273–289. <https://doi.org/10.1002/2013PA002457>
- Hernández-Hamón, H., Ramírez, P. Z., Zaraza, M., & Micallef, A. (2023). Google Earth Engine app using Sentinel 1 SAR and deep learning for ocean seep methane detection and monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101036. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101036>
- Herrera, C., & Diaz, C. (2018). Evaluación geológica, geotécnica y ambiental de los fenómenos de volcanismo de lodos en la Costa Caribe Colombiana volcano in the Colombian Caribbean Coast. *Universitaria, Fundación Comfenalco, Tecnológico*, 23(01), 104–111.
- Hill, T. M., Kennett, J. P., & Spero, H. J. (2003). Foraminifera as indicators of methane-rich environments: A study of modern methane seeps in Santa Barbara Channel, California. *Marine Micropaleontology*, 49(1–2), 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(03\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(03)00032-X)
- Hill, T. M., Kennett, J. P., & Valentine, D. L. (2004). Isotopic evidence for the incorporation of methane-derived carbon into foraminifera from modern methane seeps, Hydrate Ridge, Northeast Pacific. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(22), 4619–4627. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.012>
- Hinrichs, K.-U., Hayes, J. M., Sylva, S. P., Brewer, P. G., & Delong, E. F. (1999). Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature*, 398, 802–805.
- Horikoshi, M., & Tang, Y. (2016). *ggfortify: Data Visualization Tools for Statistical Analysis Results*.
- Houghton, J. L., Foustoukos, D. I., Flynn, T. M., Vetriani, C., Bradley, A. S., & Fike, D. A. (2016). Thiosulfate oxidation by *Thiomicrospira thermophila*: metabolic flexibility in response to ambient geochemistry. *Environmental Microbiology*, 18(9), 3057–3072. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13232>
- Idárraga, J. (2017). *GEODYNAMIC MODEL OF THE SUBDUCTION SYSTEMS BENEATH COLOMBIA FROM SEISMIC ANISOTROPY MEASUREMENTS AND ITS LINK TO THE REGIONAL MORPHO-TECTONIC CONTEXT OF THE CARIBBEAN AND PACIFIC CONTINENTAL MARGINS* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31326.84801>

- Jones, R. Wynn., Brady, H. B., & Natural History Museum (London, E. (1994). *The Challenger foraminifera*. Oxford University Press.
- Jørgensen, B. B. (2000). Bacteria and Marine Biogeochemistry. In *Marine Geochemistry* (pp. 173–207). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04242-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04242-7_5)
- Jørgensen, B. B., Beulig, F., Egger, M., Petro, C., Scholze, C., & Røy, H. (2019). Organoclastic sulfate reduction in the sulfate-methane transition of marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 254, 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.03.016>
- Jorissen, F. J. (1988). *BENTHIC FORAMINIFERA FROM THE ADRIATIC SEA; PRINCIPLES OF PHENOTYPIC VARIATION*. 1–174.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0377-8398(95)00047-X)
- Jorissen, F. J., Fontanier, C., & Thomas, E. (2007). Chapter Seven Paleoceanographical Proxies Based on Deep-Sea Benthic Foraminiferal Assemblage Characteristics. In *Developments in Marine Geology* (Vol. 1, pp. 263–325). [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01012-3](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01012-3)
- Judd, A., & Hovland, M. (2007). Seabed fluid flow: the impact on geology, biology, and the marine environment. In *Choice Reviews Online* (Vol. 45, Issue 01). <https://doi.org/10.5860/choice.45-0294>
- Kaiho, K. (1994). Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved-oxygen levels in the modern ocean. *Geology*, 22(8), 719. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0719:BFDOIA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0719:BFDOIA>2.3.CO;2)
- Kaiho, K. (1999). Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI). *Marine Micropaleontology*, 37(1), 67–76. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(99\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(99)00008-0)
- Katz, B., & Williams, K. (2003). *Biogenic Gas Potential Offshore Guajira Peninsula, Colombia*.
- Kay, M. (2023). *ggdist: Visualizations of Distributions and Uncertainty* (R package version 3.3.0). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3879620>
- Kelley, D., 'Richards, C., & WG127 SCOR/IAPSO. (2022). *gsw: Gibbs Sea Water Functions* (1.1-1).
- Kelley, D., & 'Richards, C. (2023). *oce: Analysis of Oceanographic Data* (1.8-0).
- Kellog, J., Toto, E., & Ceron, J. (2005). *STRUCTURE AND TECTONICS OF THE SINU-SAN JACINTO ACCRETIONARY PRISM IN NORTHERN COLOMBIA*.

- Kiel, S., & Peckmann, J. (2019). Resource partitioning among brachiopods and bivalves at ancient hydrocarbon seeps: A hypothesis. *PLoS ONE*, *14*(9).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221887>
- Kurniasih, A., Hari Nugroho, S., & Setyawan, R. (2017). Marine ecology conditions at Weda Bay, North Maluku based on statistical analysis on distribution of recent foraminifera. *MATEC Web of Conferences*, *101*, 04014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710104014>
- Knittel, K., & Boetius, A. (2009). Anaerobic Oxidation of Methane: Progress with an Unknown Process. *Annual Review of Microbiology*, *63*(1), 311–334.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.micro.61.080706.093130>
- Kopf, A. J. (2002). SIGNIFICANCE OF MUD VOLCANISM. *Reviews of Geophysics*, *40*(2), 2-1-2–52. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
- Kranner, M., Harzhauser, M., Beer, C., Auer, G., & Piller, W. E. (2022). Calculating dissolved marine oxygen values based on an enhanced Benthic Foraminifera Oxygen Index. *Scientific Reports*, *12*(1), 1376. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05295-8>
- Langlet, D., Bouchet, V. M. P., Riso, R., Matsui, Y., Suga, H., Fujiwara, Y., & Nomaki, H. (2020). Foraminiferal Ecology and Role in Nitrogen Benthic Cycle in the Hypoxic Southeastern Bering Sea. *Frontiers in Marine Science*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.582818>
- Lee, J. J., Morales, J., Symons, A., & Hallock, P. (1995). Diatom symbionts in larger foraminifera from M Caribbean hosts. In *Marine Micropaleontology* (Vol. 26).
- Leprih, D. J., Flood, B. E., Schroedl, P. R., Ricci, E., Marlow, J. J., Girguis, P. R., & Bailey, J. V. (2021). Sulfur bacteria promote dissolution of authigenic carbonates at marine methane seeps. *The ISME Journal*, *15*(7), 2043–2056. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00903-3>
- Li, N., Feng, D., Wan, S., Peckmann, J., Guan, H., Wang, X., Wang, H., & Chen, D. (2021). Impact of methane seepage dynamics on the abundance of benthic foraminifera in gas hydrate bearing sediments: New insights from the South China Sea. *Ore Geology Reviews*, *136*(February), 104247. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104247>
- Linke, P., & Lutze, G. F. (1993). Microhabitat preferences of benthic foraminifera a static concept or a dynamic adaptation to optimize food acquisition? In *Marine Micropaleontology* (Vol. 20).
- Lintner, M., Wildner, M., Lintner, B., Wanek, W., & Heinz, P. (2023). Spectroscopic analysis of sequestered chloroplasts in *Elphidium williamsoni* (Foraminifera). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *238*. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112623>
- Lopez Ramos, E., Penagos, F. G., Martinez, D. A. R., & Gomez, N. R. M. (2022). DETACHMENT LEVELS OF COLOMBIAN CARIBBEAN MUD VOLCANOES. *CTyF - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, *12*(2), 49–77. <https://doi.org/10.29047/01225383.401>



- Lorenson, T. D., Kvenvolden, K. A., Hostettler, F. D., Rosenbauer, R. J., Orange, D. L., & Martin, J. B. (2002). Hydrocarbon geochemistry of cold seeps in the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, *181*(1–3), 285–304. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00272-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00272-9)
- Lovlie, R., Lowrie, W., & Jacobs, M. (n.d.). *MAGNETIC PROPERTIES AND MINERALOGY OF FOUR DEEP-SEA CORES\**.
- Lu, Y., Yang, H., Huang, B., Liu, Y., & Lu, H. (2023). Foraminifera associated with cold seeps in marine sediments. *Frontiers in Marine Science*, *10*.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1157879>
- Machain-Castillo, M. L., Ruiz-Fernández, A. C., Gracia, A., Sanchez-Cabeza, J. A., Rodríguez-Ramírez, A., Alexander-Valdés, H. M., Pérez-Bernal, L. H., Nava-Fernández, X. A., Gómez-Lizárraga, L. E., Almaraz-Ruiz, L., Schwing, P. T., & Hollander, D. J. (2019). Natural and anthropogenic oil impacts on benthic foraminifera in the southern Gulf of Mexico. *Marine Environmental Research*, *149*(November 2018), 111–125.  
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.06.006>
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological Diversity and Its Measurement*. Springer Netherlands.  
<https://doi.org/10.1007/978-94-015-7358-0>
- Martin, J. B., Day, S. A., Rathburn, A. E., Perez, M. E., Mahn, C., & Gieskes, J. (2004). Relationships between the stable isotopic signatures of living and fossil foraminifera in Monterey Bay, California. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *5*(4), n/a-n/a.  
<https://doi.org/10.1029/2003GC000629>
- Martin, R. A., Nesbitt, E. A., & Campbell, K. A. (2010). The effects of anaerobic methane oxidation on benthic foraminiferal assemblages and stable isotopes on the Hikurangi Margin of eastern New Zealand. *Marine Geology*, *272*(1–4), 270–284.  
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.024>
- McGann, M., & Conrad, J. E. (2018). Faunal and stable isotopic analyses of benthic foraminifera from the Southeast Seep on Kimki Ridge offshore southern California, USA. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *150*, 92–117.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.01.011>
- Melaniuk, K., Szybor, K., Treude, T., Sommer, S., & Rasmussen, T. L. (2022). Influence of methane seepage on isotopic signatures in living deep-sea benthic foraminifera, 79° N. *Scientific Reports*, *12*(1), 1169. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05175-1>
- Milkov, A. V. (2000). *Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates*. 29–42. [www.elsevier.nl/locate/margeo](http://www.elsevier.nl/locate/margeo)

- Molina Márquez, A., Molina Márquez, C., Giraldo Ospina, L., Parra Llanos, C., & Chevillot, P. (1994). Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del Golfo de Morrosquillo. *Boletín Científico CIOH*, 15, 93–113. [https://doi.org/10.26640/01200542.15.93\\_113](https://doi.org/10.26640/01200542.15.93_113)
- Montoya-Sánchez, R. A., Devis-Morales, A., Bernal, G., & Poveda, G. (2018). Seasonal and interannual variability of the mixed layer heat budget in the Caribbean Sea. *Journal of Marine Systems*, 187, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.07.003>
- Moodley, L., & Hess, C. (1992). This content downloaded from 188.64.177.143 on Tue. In *Source: Biological Bulletin* (Vol. 183, Issue 1).
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez-Mejía, M., Faccenna, C., Veloza, G., Vélez, V., de Freitas, M., & Mesa, A. (2017). Linking Late Cretaceous to Eocene Tectonostratigraphy of the San Jacinto Fold Belt of NW Colombia With Caribbean Plateau Collision and Flat Subduction. *Tectonics*, 36(11), 2599–2629. <https://doi.org/10.1002/2017TC004612>
- Murray, J. W. (2006). *Ecology and applications of benthic foraminifera*. [www.cambridge.org/9780521828390](http://www.cambridge.org/9780521828390)
- Naehr, T. H., Eichhubl, P., Orphan, V. J., Hovland, M., Paull, C. K., Ussler, W., Lorenson, T. D., & Greene, H. G. (2007). Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: A comparative study. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(11–13), 1268–1291. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.04.010>
- Naehr, T., Rodriguez, N., Bohrmann, G., Paull, C., & Botz, R. (2000). METHANE-DERIVED AUTHIGENIC CARBONATES ASSOCIATED WITH GAS HYDRATE DECOMPOSITION AND FLUID VENTING ABOVE THE BLAKE RIDGE DIAPIR 1. In *Scientific Results* (Vol. 164).
- Ni, S., Quintana Krupinski, N. B., Groeneveld, J., Persson, P., Somogyi, A., Brinkmann, I., Knudsen, K. L., Seidenkrantz, M. S., & Filipsson, H. L. (2020). Early diagenesis of foraminiferal calcite under anoxic conditions: A case study from the Landsort Deep, Baltic Sea (IODP Site M0063). *Chemical Geology*, 558. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119871>
- Nomaki, H., Chikaraishi, Y., Tsuchiya, M., Toyofuku, T., Ohkouchi, N., Uematsu, K., Tame, A., & Kitazato, H. (2014). Nitrate uptake by foraminifera and use in conjunction with endobionts under anoxic conditions. *Limnology and Oceanography*, 59(6), 1879–1888. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.1879>
- Ojeda, G., Restrepo-correa, I., & Correa, I. (2007). Morfología Y Arquitectura Interna De Una Plataforma Continental Cambiante: Golfo De Morrosquillo. *Boletín de Geología*, 29(2), 105–114.
- Oksanen, J., Gavin, L., Simpson, L., Blanchet, G., & Kindt, R. (2022). *vegan: Community Ecology Package* (2.6-4).

- Osorio-Granada, A. M., Jigena-Antelo, B., Vidal-Perez, J., Zambianchi, E., Osorio-Granada, E. G., Torrecillas, C., Romero-Cozar, J., Leon-Rincón, H., Oviedo-Prada, K., & Muñoz-Perez, J. J. (2023). Acoustic Evidence of Shallow Gas Occurrences in the Offshore Sinú Fold Belt, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2121. <https://doi.org/10.3390/jmse11112121>
- Otero, L. J., Ortiz-Royero, J. C., Ruiz-Merchan, J. K., Higgins, A. E., & Henriquez, S. A. (2016). Storms or cold fronts: ¿what is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(2), 391–401. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-391-2016>
- Palmisano, M., Balassone, G., Maggi, S., Arenas, A. A., Banda Guerra, I. M., Correa Valero, L. E., Ippolito, F., Mondillo, N., Morales Giraldo, D. F., Mormone, A., Pellino, A., Putzolu, F., & Di Luccio, D. (2024). Geochemistry and mineralogy of muds and thermal waters from mud volcanoes in the NW Caribbean Coast of Colombia and their potential for pelotherapy. *Catena*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107621>
- Pan, M., Wu, D., Yang, F., Sun, T., Wu, N., & Liu, L. (2018). Geochemical sedimentary evidence from core 973-2 for methane activity near the Jiulong Methane Reef in the northern South China Sea. *Interpretation*, 6(1), T163–T174. <https://doi.org/10.1190/INT-2017-0001.1>
- Panieri, G. (2006). Foraminiferal response to an active methane seep environment: A case study from the Adriatic Sea. *Marine Micropaleontology*, 61(1–3), 116–130. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2006.05.008>
- Panieri, G., Aharon, P., Sen Gupta, B. K., Camerlenghi, A., Ferrer, F. P., & Cacho, I. (2014). Late Holocene foraminifera of blake ridge diapir: Assemblage variation and stable-isotope record in gas-hydrate bearing sediments. *Marine Geology*, 353, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.020>
- Panieri, G., Bünz, S., Fornari, D. J., Escartin, J., Serov, P., Jansson, P., Torres, M. E., Johnson, J. E., Hong, W., Sauer, S., Garcia, R., & Gracias, N. (2017). An integrated view of the methane system in the pockmarks at Vestnesa Ridge, 79°N. *Marine Geology*, 390, 282–300. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.06.006>
- Panieri, G., Camerlenghi, A., Cacho, I., Cervera, C. S., Canals, M., Lafuerza, S., & Herrera, G. (2012). Tracing seafloor methane emissions with benthic foraminifera: Results from the Ana submarine landslide (Eivissa Channel, Western Mediterranean Sea). *Marine Geology*, 291–294, 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.11.005>
- Panieri, G., Camerlenghi, A., Conti, S., Pini, G. A., & Cacho, I. (2009). Methane seepages recorded in benthic foraminifera from Miocene seep carbonates, Northern Apennines (Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284(3–4), 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.10.006>

- Panieri, G., & Sen Gupta, B. K. (2008). Benthic Foraminifera of the Blake Ridge hydrate mound, Western North Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology*, *66*(2), 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.08.002>
- Parada Ruffinatti, C., Castillo Rodríguez, E., & Miranda Peña, M. C. (1985). Ecología, sistemática y distribución de Foraminíferos Bentónicos entre la desembocadura del río Sinú y Coveñas, Caribe Colombiano. *Caldasia*, *14*(67), 299–327.
- Pardo-Trujillo, A., Cardona, A., Giraldo, A. S., León, S., Vallejo, D. F., Trejos-Tamayo, R., Plata, A., Ceballos, J., Echeverri, S., Barbosa-Espitia, A., Slattey, J., Salazar-Ríos, A., Botello, G. E., Celis, S. A., Osorio-Granada, E., & Giraldo-Villegas, C. A. (2020). Sedimentary record of the Cretaceous–Paleocene arc–continent collision in the northwestern Colombian Andes: Insights from stratigraphic and provenance constraints. *Sedimentary Geology*, *401*, 105627. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105627>
- Parnell, J. (2002). Fluid Seeps at Continental Margins: towards an Integrated Plumbing System. *Geofluids*, *2*(2), 57–61. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00035.x>
- Pierre, C. (2017). Origin of the authigenic gypsum and pyrite from active methane seeps of the southwest African Margin. *Chemical Geology*, *449*, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.11.005>
- Puerres, Lizeth Y., Barragán-Jackson, Camila María, & Bernal, Gladys. (2022). Revisión de metodologías de foraminíferos relacionadas con filtraciones de hidrocarburos en el fondo del océano: implicaciones para el Caribe colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (51), 38–49. Publicación electrónica del 18 de febrero de 2023. <https://doi.org/10.15446/rbct.101793>
- Quintero, J. (2012). *Interpretación sísmica de volcanes de lodo en la zona Occidental del Abanico del delta del Rio Magdalena, Caribe Colombiano*. Universidad de EAFIT.
- R Core Team. (2023). *A Language and Environment for Statistical Computing* (4.3.0).
- Rathburn, A. E., Levin, L. A., Held, Z., & Lohmann, K. C. (2000). Benthic foraminifera associated with cold methane seeps on the northern California margin: Ecology and stable isotopic composition. *Marine Micropaleontology*, *38*(3–4), 247–266. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(00\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(00)00005-0)
- Rathburn, A. E., Pérez, M. E., Martin, J. B., Day, S. A., Mahn, C., Gieskes, J., Ziebis, W., Williams, D., & Bahls, A. (2003). Relationships between the distribution and stable isotopic composition of living benthic foraminifera and cold methane seep biogeochemistry in Monterey Bay, California. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *4*(12). <https://doi.org/10.1029/2003GC000595>
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Water Discharge and Sediment Load from the Western Slopes of the Colombian Andes with Focus on Rio San Juan. *The Journal of Geology*, *108*(1), 17–33. <https://doi.org/10.1086/314390>

- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2004). The Pacific and Caribbean Rivers of Colombia: Water Discharge, Sediment Transport and Dissolved Loads. In *Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments* (pp. 169–187). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-07060-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-662-07060-4_14)
- Rincón-Martínez, D., Ruge, S. M., & Silva Arias, A. (2022). Seismic analysis of the geological occurrence of gas hydrate in the Colombian Caribbean offshore. *Journal of South American Earth Sciences*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103800>
- Rodríguez, I., Bulnes, M., Poblet, J., Masini, M., & Flinch, J. (2021). Structural style and evolution of the offshore portion of the Sinu Fold Belt (South Caribbean Deformed Belt) and adjacent part of the Colombian Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 125, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104862>
- Rossello, E. A., Osorio, J. A., & López-Isaza, S. (2022). The argilokinetic diapirism of the Colombian Caribbean Margin: a review of its sedimentary conditioning factors applied to hydrocarbon exploration. *Boletín de Geología*, 44(1), 15–48. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022001>
- Rovere, M., Gamberi, F., Mercorella, A., Rashed, H., Gallerani, A., Leidi, E., Marani, M., Funari, V., & Pini, G. A. (2014). Venting and seepage systems associated with mud volcanoes and mud diapirs in the southern Tyrrhenian Sea. *Marine Geology*, 347, 153–171. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.013>
- Rueda, J. L., Díaz-del-Río, V., Sayago-Gil, M., López-González, N., Fernández-Salas, L. M., & Vázquez, J. T. (2012). Fluid Venting Through the Seabed in the Gulf of Cadiz (SE Atlantic Ocean, Western Iberian Peninsula). In *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat* (pp. 831–841). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385140-6.00061-X>
- Sahling, H., Bohrmann, G., Spiess, V., Bialas, J., Breitzke, M., Ivanov, M., Kasten, S., Krastel, S., & Schneider, R. (2008). Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow. *Marine Geology*, 249(3–4), 206–225. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.11.010>
- Santa-Rosa, L. C. de C., Disaró, S. T., Totah, V., Watanabe, S., & Guimarães, A. T. B. (2021). Living Benthic Foraminifera from the Surface and Subsurface Sediment Layers Applied to the Environmental Characterization of the Brazilian Continental Slope (SW Atlantic). *Water*, 13(13), 1863. <https://doi.org/10.3390/w13131863>
- Schwing, P. T., O'Malley, B. J., Romero, I. C., Martínez-Colón, M., Hastings, D. W., Glabach, M. A., Hladky, E. M., Greco, A., & Hollander, D. J. (2017). Characterizing the variability of benthic foraminifera in the northeastern Gulf of Mexico following the Deepwater Horizon event (2010–2012). *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 2754–2769. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7996-z>

- Sen Gupta, B. K. (1999). Foraminifera in marginal marine environments. In *Modern Foraminifera* (pp. 141–159). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/0-306-48104-9\\_9](https://doi.org/10.1007/0-306-48104-9_9)
- Sivan, O., Adler, M., Pearson, A., Gelman, F., Bar-Or, I., John, S. G., & Eckert, W. (2011). Geochemical evidence for iron-mediated anaerobic oxidation of methane. *Limnology and Oceanography*, *56*(4), 1536–1544. <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.4.1536>
- Slowikowski, K. (2023). *ggrepel: Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with “ggplot2”* (R package version 0.9.3).
- Stuhr, M., Cameron, L. P., Blank-Landeshammer, B., Reymond, C. E., Doo, S. S., Westphal, H., Sickmann, A., & Ries, J. B. (2021). Divergent Proteomic Responses Offer Insights into Resistant Physiological Responses of a Reef-Foraminifera to Climate Change Scenarios. *Oceans*, *2*(2), 281–314. <https://doi.org/10.3390/oceans2020017>
- Takata, H., Cho, J. H., Kang, J., Asahi, H., Lim, H. S., Park, Y.-H., & Hyun, S. (2022). Biotic responses of deep-sea benthic foraminifera in the equatorial Indian Ocean during the Quaternary: Influence of the ballasting effect on organic matter by calcareous plankton skeletons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *585*(January 2021), 110724. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110724>
- Talukder, A. R. (2012). Review of submarine cold seep plumbing systems: leakage to seepage and venting. *Terra Nova*, *24*(4), 255–272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01066.x>
- Tarazona, D. M., Prieto, J. A., Murphy, W., & Vesga, J. N. (2021). Identification of submarine landslides in the Colombian Caribbean Margin (Southern Sinú Fold Belt) using seismic investigations. *The Leading Edge*, *40*(12), 914–922. <https://doi.org/10.1190/tle40120914.1>
- Theodor, M., Schmiedl, G., & Mackensen, A. (2016). Stable isotope composition of deep-sea benthic foraminifera under contrasting trophic conditions in the western Mediterranean Sea. *Marine Micropaleontology*, *124*, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2016.02.001>
- Thomas, E. (2003). Extinction and food at the seafloor: A high-resolution benthic foraminiferal record across the Initial Eocene Thermal Maximum, Southern Ocean Site 690. *Special Paper of the Geological Society of America*, *369*, 319–332. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2369-8.319>
- Tinivella, U., & Giustiniani, M. (2012). An Overview of Mud Volcanoes Associated to Gas Hydrate System. In *Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems*. InTech. <https://doi.org/10.5772/51270>
- Torres, M. E., Martin, R. A., Klinkhammer, G. P., & Nesbitt, E. A. (2010). Post depositional alteration of foraminiferal shells in cold seep settings: New insights from flow-through time-resolved analyses of biogenic and inorganic seep carbonates. *Earth and Planetary Science Letters*, *299*(1–2), 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.07.048>

- Torres, M. E., Mix, A. C., Kinports, K., Haley, B., Klinkhammer, G. P., McManus, J., & de Angelis, M. A. (2003). Is methane venting at the seafloor recorded by  $\delta^{13}\text{C}$  of benthic foraminifera shells? *Paleoceanography*, 18(3), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2002pa000824>
- Toto, A. E. L., & Kellogg, J. N. (1992). Structure of the Sinu-San Jacinto fold belt-An active accretionary prism in northern Colombia. In *Journal of South American Earth Sciences* (Vol. 5, Issue 2).
- Trejos-Tamayo, R., Vallejo, F., Arias, V., García, C., Pardo-Trujillo, A., Bedoya, E., & Flores, J. A. (2020). Biostratigraphy of ejected material from mud volcanoes in the Caribbean region of Colombia: Contribution to the stratigraphy of Sinú Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102782>
- Valentine, D. L. (2002). Biogeochemistry and microbial ecology of methane oxidation in anoxic environments: a review. In *Antonie van Leeuwenhoek* (Vol. 81). <https://doi.org/10.1023/A:1020587206351>
- Valentine, D. L., & Reeburgh, W. S. (2000). New perspectives on anaerobic methane oxidation. *Environmental Microbiology*, 2(5), 477–484. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2000.00135.x>
- Van Dover, C. (2000). *The Ecology of Deep-Sea Hydrothermal Vents*. Princeton University Press.
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceno, L., & Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*, 202(2–4), 335–349. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90118-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90118-P)
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., & Umaña, A. M. (2004). *MANUAL DE MÉTODOS PARA EL DESARROLLO DE INVENTARIOS DE BIODIVERSIDAD* (C. M. Villa, Ed.). Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. [www.humboldt.org.co](http://www.humboldt.org.co)
- Vinnels, J. S., Butler, R. W. H., McCaffrey, W. D., & Paton, D. A. (2010). Depositional processes across the Sinú Accretionary Prism, offshore Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4), 794–809. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.008>
- Wei, T., & Simko, V. (2021). *R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix* (0.92).
- Whiticar, M. J. (1999). Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. In *Chemical Geology* (Vol. 161). [www.elsevier.com/locate/chemgeo](http://www.elsevier.com/locate/chemgeo)
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wilfert, P., Krause, S., Liebetrau, V., Schönfeld, J., Haeckel, M., Linke, P., & Treude, T. (2015). Response of anaerobic methanotrophs and benthic foraminifera to 20 years of methane

emission from a gas blowout in the North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 68, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.012>

Wollenburg, J. E., & Mackensen, A. (2009). The ecology and distribution of benthic foraminifera at the Håkon Mosby mud volcano (SW Barents Sea slope). *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(8), 1336–1370. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.02.004>

WoRMS Editorial Board. (2024, January 31). *World Register of Marine Species*.

Wurgaft, E., Findlay, A. J., Vigderovich, H., Herut, B., & Sivan, O. (2019). Sulfate reduction rates in the sediments of the Mediterranean continental shelf inferred from combined dissolved inorganic carbon and total alkalinity profiles. *Marine Chemistry*, 211, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2019.03.004>

Yang, J., Lu, M., Yao, Z., Wang, M., Lu, S., Qi, N., & Xia, Y. (2021). A Geophysical Review of the Seabed Methane Seepage Features and Their Relationship with Gas Hydrate Systems. *Geofluids*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9953026>

Zhang, B., Pan, M., Wu, D., & Wu, N. (2018). Distribution and isotopic composition of foraminifera at cold-seep Site 973-4 in the Dongsha area, northeastern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 168(May), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.05.007>

Zhuang, C., Chen, F., Cheng, S. H., Lu, H. F., Wu, C., Cao, J., & Duan, X. (2016). Light carbon isotope events of foraminifera attributed to methane release from gas hydrates on the continental slope, northeastern South China Sea. *Science China Earth Sciences*, 59(10), 1981–1995. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5323-7>

Zyakun. (1992). *Isotopes and their possible use as biomarkers of microbial products*.