



Universidad de Caldas



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA



**CARACTERIZACIÓN DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS DEL NÚCLEO NCS1 EN EL ATOLÓN CAYO SERRANA: DISTRIBUCIÓN, VARIABILIDAD Y RESPUESTA DE ESTOS ANTE EVENTOS OCEÁNICOS EXTREMOS**

**Jessica Paola Hernández Marín  
Camila María Barragán Jacksson**

**CARACTERIZACIÓN DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS DEL NÚCLEO  
NCS1 EN EL ATOLÓN CAYO SERRANA: DISTRIBUCIÓN, VARIABILIDAD Y  
RESPUESTA DE ESTOS ANTE EVENTOS OCEÁNICOS EXTREMOS.**

Jessica Paola Hernández Marín  
Camila María Barragán Jackson

UNIVERSIDAD DE CALDAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ESTRATIGRAFÍA (IIES)  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
PROGRAMA DE GEOLOGÍA  
MANIZALES  
2021

**CARACTERIZACIÓN DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS DEL NÚCLEO NCS1 EN EL ATOLÓN CAYO SERRANA: DISTRIBUCIÓN, VARIABILIDAD Y RESPUESTA DE ESTOS ANTE EVENTOS OCEÁNICOS EXTREMOS.**

Jessica Paola Hernández Marín  
Camila María Barragán Jackson

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de: Geóloga

Directora:

MSc. Lizeth Yamile Puerres

Codirector:

MSc. Raúl Trejos Tamayo

UNIVERSIDAD DE CALDAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ESTRATIGRAFÍA (IIES)  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
PROGRAMA DE GEOLOGÍA  
MANIZALES

2021

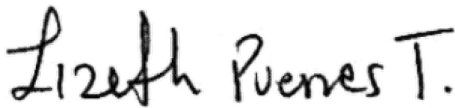
La M. Sc. **Lizeth Yamile Puerres Torres** (directora), investigadora asociada al grupo Oceánicos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y el M. Sc. **Raúl Trejos Tamayo** (codirector), investigador asociado al Grupo de Investigaciones en Estratigrafía y Vulcanología – GIEV “Cumanday” de la Universidad de Caldas.

CERTIFICAN:

Que las Estudiantes Jessica Paola Hernández Marín y Camila María Barragán Jacksson han realizado y completado satisfactoriamente bajo nuestra supervisión en el Departamento de Ciencias Geológicas, adscrito a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Caldas, el trabajo de grado titulado:

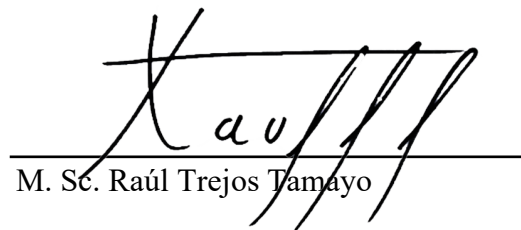
**Caracterización de foraminíferos bentónicos del núcleo NCS1 en el atolón Cayo Serrana: Distribución, variabilidad y respuesta de estos ante eventos oceánicos extremos.**

Y que para que quede constancia, firmamos el presente certificado 07 de septiembre de 2021.



M. Sc. Lizeth Yamile Puerres Torres

Directora



M. Sc. Raúl Trejos Tamayo

Codirector

## Agradecimientos

Agradecemos al Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) y al Grupo Oceánicos por brindarnos la oportunidad de ampliar nuestro conocimiento y la concepción sobre las dinámicas de los océanos. A nuestros directores Liz y Raúl por la guía, apoyo, paciencia y disposición para colaborarnos en el desarrollo de este proyecto. A la Universidad de Caldas por brindarnos un segundo hogar que nos permitió formarnos profesionalmente, a los profesores de Geología por transmitirnos sus conocimientos y sus valiosas enseñanzas.

Al Profesor Andrés Pardo, Don David, María Dolly, Don Gustavo por su colaboración a lo largo del proceso, A Moni por su ayuda en la taxonomía de planctónicos, al profe Andrés Salazar por su guía y observaciones que contribuyeron a este estudio. A Aleja por la ayuda con los análisis de datos. A la profesora Gladys Bernal y a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por suministrar las muestras para hacer posible el desarrollo de este proyecto. A Germán Patarroyo por la disposición en colaborarnos. A la expedición científica Seaflower por generar espacios para crear conocimiento.

*Jessica y Camila.*

A Dios por su grandeza y la maravillosa forma de entregarme su amor en cada pequeño detalle de la vida.

A mi madre amorosa e incondicional por enseñarme la disciplina, tenacidad y el amor como bases para hacer realidad mis sueños, gracias por ser mi gran apoyo en todo.

A mi padre por apoyarme e inculcarme la pasión por la ciencia.

A David mi colega preferido, con quien he compartido momentos inolvidables durante esta trayectoria y quien me impulso a continuar en cada momento.

A Raúl, Lizeth, Andrés y Aleja por compartir sus conocimientos y adentrarnos en el mundo de la oceanografía.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron presentes en este camino de enseñanzas.

A Jessica, Valen Domínguez, Valen H, Pablini, Lauren, Meli, Fernanda Román y Laura Leal por hacer parte de esta etapa de mi vida, por los buenos momentos, las risas y absolutamente todo, los llevo en mi corazón. ¡Gracias!

*Camila.*

A Dios por permitirme cumplir este sueño. A mi madre por ser un ejemplo enorme de fortaleza y resiliencia, por ser ese pilar de apoyo que ha estado siempre, por su paciencia, amor y guía. A mi hermano Maikel por su compañía y los sacrificios realizados. A mi padre por su amor incondicional. A Alaska por brindarme alegría. A ellos por haber creído en mí, mi eterna gratitud.

A mi familia por su apoyo incondicional. Especialmente a mi tío Diego por el apoyo y el ejemplo. A Santiago por su compañía, cariño y palabras de aliento por ser un ejemplo de disciplina y bondad.

Al profe Raúl y Liz y por permitirme aprender, por mostrarme la grandeza que hay en el mundo de la micropaleontología. A Aleja por ayudarnos a analizar las cosas desde otra perspectiva. Al profe Andrés por la ayuda y enseñanzas. Al profe Carlos A. Guzmán por su colaboración y enseñanza.

A mi compañera de tesis Cami por las enseñanzas y brindarme su bonita amistad. A Lauren mi patner in crime por la compañía, risas, ayuda y apoyo. A valen por su amistad y contagiarme su espíritu aventurero. A Pabli por las risas y la amistad. A valen h, a Johan, a Lau Leal. A ellos gracias por su bonita vibra, por las alegrías, las aventuras y la compañía.

*Jessica H.*

## Resumen

El núcleo NCS1 localizado en la laguna del atolón de Cayo Serrana en el Archipiélago de San Andrés y Providencia en el Mar Caribe, fue objeto de estudio para evaluar la respuesta de la microfauna bentónica de foraminíferos a la incidencia de eventos oceánicos extremos como huracanes, dada la alta vulnerabilidad de la zona al paso de estos eventos. Se identificaron 10 especies dominantes de las cuales se obtuvo la asociación *Archaias angulatus*, *Asterigerina carinata*, *Cyclorbiculina compressa*, y *Acervulina inhaerens* indicadora de condiciones de alta energía y transporte. Adicionalmente la proliferación de otras especies como *Asterigerina carinata*, *Rosalina floridana* y *Quinqueloculina poeyana* explican las dinámicas ecológicas subsecuentes al paso de eventos extremos que de igual forma ocasionan anomalías ecofenotípicas en los géneros *Archaias*, *Cyclorbiculina* y *Laevipeneroplis*. Estas evidencias junto con variaciones en la abundancia, diversidad, fragmentación y análisis de parámetros granulométricos indicadores de energía (media y desviación estándar), permitieron proporcionar indicios de cambios en el transporte y energía del medio que fueron soportados por análisis de datos en Modelos Aditivos Generalizados, concluyendo que los principales cambios a nivel ecológico y sedimentarios fueron ocasionados por eventos extremos que afectaron la zona de Cayo Serrana.

**Palabras claves:** Cayo Serrana, Atolón, Foraminíferos bentónicos, Granulometría, Eventos Extremos, Huracanes, Paleoecología.



## Abstract

The NCS1 core located in the lagoon of the Cayo Serrana atoll in the Archipelago of San Andres and Providencia in the Colombian Caribbean Sea, was studied to evaluate the response of the benthic foraminifera assemblage to the incidence of oceanic extreme events such as hurricanes, due to the high vulnerability of the area to the passage of these events. Ten dominant species were identified, mainly assemblage made of *Archaias angulatus*, *Asterigerina carinata*, *Cyclorbiculina compressa* *Rotorbinella rosea*, and *Acervulina inhaerens* were proxies of high energy and transport conditions. Additionally, the spread of other species such as *Asterigerina carinata*, *Rosalina floridana*, and *Quinqueloculina poeyana* explain the ecological dynamics related to the passage of extreme events that may have caused ecophenotypic anomalies in the genera *Archaias*, *Cyclorbiculina* and *Laevipeneroplis*. These evidences together with variations in their abundance, diversity, fragmentation and granulometric parameters indicators of energy (mean and standard deviation) allowed us to provide clues on the changes of transport and energy of the environment that were supported by data analysis in Generalized Additive Models (GAM). We conclude that the main ecological and sedimentary changes were caused by extreme events that affect the area of Cayo Serrana.

**Key words:** Serrana Cay, Atoll, Benthic foraminifera, Grain size, Extreme events, Hurricanes, Paleoecology.

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	17
1.2. Objetivos.....	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1. Formación Atolones.....	19
2.2. Eventos Extremos .....	22
2.3. Eventos Extremos en el Caribe .....	25
2.4. Eventos Extremos en Atolones e Impactos en su Morfología .....	28
2.5. Foraminíferos.....	30
2.6. Foraminíferos en Atolones.....	35
2.7. Los Foraminíferos como Bioindicadores de Eventos Extremos en Atolones.....	35
2.8. Deformación en Foraminíferos .....	37
3. Zona de Estudio.....	39
3.1. Marco Geológico.....	42
3.2 Oceanografía y Climatología regional.....	44
4. Metodología .....	46
4.1. Base de datos sobre eventos extremos en la zona de estudio .....	46
4.2. Extracción y muestreo núcleo NSC1 .....	47
4.3. Granulometría .....	47

4.4.	Selección y clasificación de foraminíferos .....	48
4.5.	Diagrama ternario de ambiente según a la estructura de la pared.....	50
4.6.	Determinación del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') .....	50
4.7.	Deformación en foraminíferos.....	51
4.8.	Análisis de datos .....	51
5.	Resultados .....	52
5.1.	Eventos extremos en el área de estudio. ....	52
5.2.	Granulometría del núcleo NCS1.....	58
5.3.	Análisis de foraminíferos.....	61
5.4.	Ambiente según la estructura de la pared .....	66
5.5.	Índice de diversidad de Shannon – Wiener (H').....	67
5.6.	Deformación en Foraminíferos .....	68
5.7.	Foraminíferos y variables indicadoras de energía .....	71
6.	Discusión.....	76
6.1.	<i>Influencia de eventos oceánicos extremos en el Atolón Cayo Serrana .....</i>	<i>76</i>
6.2.	<i>Respuesta de foraminíferos bentónicos ante eventos oceánicos extremos. ....</i>	<i>78</i>
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	86
8.	Referencias .....	88
9.	Anexos.....	107

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Efectos de las variaciones eustáticas del nivel del mar (línea azul) sobre el desarrollo y estructura de los atolones.....	20
<b>Figura 2.</b> Zonificación morfológica de un atolón.....	22
<b>Figura 3.</b> Esquema de ejemplificación de las variaciones de la FDP para la variable clima. Tomado y modificado de IPCC (2007). ....	23
<b>Figura 4.</b> Distribución de foraminíferos planctónicos y bentónicos.....	31
<b>Figura 5.</b> Estructura de la concha de los foraminíferos. ....	32
<b>Figura 6.</b> Tipos arreglos de las cámaras de foraminíferos.....	33
<b>Figura 7.</b> Tipos de paredes de foraminíferos.....	34
<b>Figura 8.</b> Localización zona de estudio. ....	40
<b>Figura 9.</b> Mapa geomorfológico de Serrana.....	41
<b>Figura 10.</b> Contexto geológico regional del Caribe. El recuadro amarillo indica la localización de estudio.....	43
<b>Figura 11.</b> Cuencas del Caribe y trayectorias de corrientes. . ....	45
<b>Figura 12.</b> Metodología aplicada en la investigación.....	49
<b>Figura 13.</b> Trayectoria de huracanes con paso cercano a Cayo Serrana. ....	55
<b>Figura 14.</b> Parámetros granulométricos del núcleo NCS1. ....	60
<b>Figura 15.</b> Distribución de los parámetros de abundancia y fragmentación de los foraminíferos bentónicos a lo largo del núcleo NSC1.....	61
<b>Figura 16.</b> Abudancia porcentual de los foraminíferos bentónicos dominantes en el NCS1 vs. la litología. ....	62
<b>Figura 17.</b> Especies dominantes núcleo NCS1.....	63

<b>Figura 18.</b> Variación en la preservación de conchas en <i>A. angulatus</i> ..	64
<b>Figura 19.</b> Diagrama ternario de asignación de ambiente de acuerdo a la estructura de pared dominante.	67
<b>Figura 20.</b> Diversidad ( $H'$ ) en el núcleo NCS1.	68
<b>Figura 21.</b> Conteo por tipo de deformación en los 3 géneros analizados.....	69
<b>Figura 22.</b> Gráfica de abundancia de deformación general para el núcleo NCS1 y de los dos géneros más deformados ( <i>Archaias</i> y <i>Cyclorbiculina</i> ).	70
<b>Figura 23.</b> Matriz de correlación de las variables.....	72
<b>Figura 24.</b> Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la abundancia total de foraminíferos.....	72
<b>Figura 25.</b> Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la diversidad total de foraminíferos. ....	73
<b>Figura 26.</b> Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la abundancia de fragmentos.....	74
<b>Figura 27.</b> Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la abundancia de deformaciones.....	75
<b>Figura 28.</b> Huracanes con trayectoria sobre Cayo Serrana. ....	76
<b>Figura 29.</b> Variables indicadoras de energía vs. Abundancia y diversidad de foraminíferos bentónicos.....	81
<b>Figura 30.</b> Modelos Aditivos Generalizados con interacción de parámetros granulométricos como variables predictoras. <b>A.</b> Mapa de calor abundancia $FB \sim$ media * desviación estándar. <b>B.</b> Modelo 3D. <b>C.</b> Mapa de calor Diversidad $\sim$ media * desviación <b>D.</b> Modelo 3D.....	82

**Figura 31.** Modelos Aditivos Generalizados con interacción de parámetros granulométricos como variables predictoras. abundancia de fragmentos  $\sim$  media \* desviación estándar **A.**

Mapa de calor **B.** Modelo 3D. .... 83

**Figura 32.** Modelos Aditivos Generalizados con interacción de parámetros granulométricos como variables predictoras. Abundancia de deformaciones  $\sim$  media \* desviación estándar **A.**

Mapa de calor **B.** Modelo 3D ..... 84

### Lista de tablas

**Tabla 1.** Procesos involucrados en la formación de los atolones. .... 21

**Tabla 2.** En la tabla se identifican 18 eventos categorizados como huracanes de categoría 4 y 5. .... 53

### Lista de anexos

**Anexo 1.** Base de datos de eventos con trayectoria cercana a cayo serrana. .... 107

**Anexo 2.** Análisis gráfico de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los Modelos Aditivos Generalizados (GAM). .... 109

**Anexo 3.** Curvas de frecuencia muestras núcleo NCS1. .... **¡Error! Marcador no definido.**

**Anexo 4.** Listado de especies encontradas en el núcleo NCS1. .... 113

**Anexo 5.** Base de datos de Matriz de correlación. .... 118

## 1. Introducción

Un evento extremo se puede considerar como un momento y un lugar en el que las condiciones meteorológicas, climáticas o medioambientales -como la temperatura, las precipitaciones, la sequía o las inundaciones- se sitúan por encima de un valor umbral cercano a los extremos superior o inferior del rango de mediciones históricas (Herring, 2020; Zhu & Toth, 2013). Los eventos extremos son acontecimientos dinámicos que impiden el funcionamiento normal de un sistema o sistemas (Broska et al., 2020) modificando los promedios o centro de distribución de variables (IPCC, 2007) causando efectos desproporcionales (Altwegg et al., 2017). La investigación en este tipo de eventos se ha visto impulsada debido a la necesidad de comprender los mecanismos generadores y la resistencia de un sistema con el fin de proporcionar estrategias de control y alerta (Rings et al., 2019). En los ecosistemas marinos los eventos extremos son probablemente un factor de control en su estructura y funcionamiento (Ummenhofer & Meehl, 2017) generando variaciones químicas que influyen la supervivencia de los organismos así como las dinámicas de sus poblaciones (Harley et al., 2006), además de involucrar la disminución en la temperatura superficial, mezcla de la termoclina, entre otros cambios que persisten durante varios días (Zedler et al., 2002). En ambientes arrecifales los eventos extremos perturban las dinámicas de los sedimentos ocasionando la abrasión y remoción de los sustratos duros (Cruz-Palacios & van Tussenbroek, 2005) involucrando un incremento en las corrientes y grandes oleajes que provocan la removilización de material y microfauna bentónica como los foraminíferos los cuales sufren abrasión y fragmentación de sus conchas (Kosciuch et al., 2018; Bramante et al., 2019). Las asociaciones de foraminíferos bentónicos proveen información sobre las

condiciones del medio y cambios en las condiciones ambientales (Meng et al., 2020) reflejando variaciones morfológicas en sus conchas, lo que los convierte en una herramienta para distinguir condiciones de estrés ambiental (Geslin et al., 2000).

En el Caribe colombiano, el Atolón de Cayo Serrana hace parte de la Reserva de Biosfera Seaflower y los estudios realizados en éste se han encargado de describir su ecología y morfología ( Milliman, 1969; Geister & Díaz, 1997), la configuración y evolución de su línea de costa (Zambrano & Andrade, 2011), así como la caracterización del tipo de sedimentos y la estructura ecológica del fondo a partir de herramientas como la hidroacústica e imágenes submarinas (Martínez-Clavijo et al., 2019). En cuanto a la biología de este cayo, se ha reportado la presencia de comunidades microbianas asociadas a macroorganismos como los corales y esponjas marinas (Alvarez-Yela et al., 2019); además, se ha estudiado los parámetros de crecimiento de corales y su respuesta frente a oscilaciones multidecadales (Lizcano-Sandoval et al., 2019). Sin embargo, son escasos los estudios sobre la fauna bentónica en la zona (E.G. Salazar-Ríos, 2020; Bernal - Garzón, 2021), especialmente los relacionados con eventos oceánicos energéticos extremos, aun cuando la zona se localiza dentro del cinturón de huracanes del Caribe (INVEMAR, 2002), convirtiéndola en una zona de alta vulnerabilidad frente a estos eventos (Ortiz, 2012). Uno de los pocos estudios realizados en Serrana con foraminíferos consistió en usar estos microfósiles como indicadores de la calidad del agua para el crecimiento de corales y la variación de la cobertura coralina y de otros substratos (Sánchez et al., 2019). En este sentido, la presente investigación contribuye al conocimiento de la fauna bentónica de foraminíferos de la Reserva de Biósfera Seaflower en la laguna de Cayo Serrana, su distribución y respuesta ante posibles eventos oceánicos energéticos extremos.



## 1.1. Planteamiento del problema

Los estudios en la Reserva de Biósfera Seaflower sobre la diversidad faunística se han centrado principalmente en definir las comunidades biológicas de organismos sésiles (Díaz-pulido et al., 2004; Díaz Merlano, 2005; Jaramillo-González & Acosta, 2009; Sanchez et al., 2005), al igual que la abundancia de otro tipo de organismos como peces, moluscos, tortugas, entre otros (CCO, 2015; Vega Sequeda et al., 2015). Las especies registradas para cada grupo faunístico no representan los totales esperados debido a que la investigación de la ecología y la biodiversidad marina es una disciplina relativamente reciente en el país (Díaz & Acero, 2003).

De acuerdo a el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio (IPCC, 2014) se ha demostrado que muchas especies marinas modifican su distribución y abundancia geográfica, así como sus interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático en curso, el cual en los últimos decenios ha generado impactos en los sistemas naturales y antrópicos en todos los continentes y océanos. La región insular de San Andrés y Providencia junto con los cayos, de acuerdo a Ortiz (2012), se puede considerar como una zona vulnerable frente a eventos extremos, debido a que eventos como frentes fríos provenientes de latitudes medias, tormentas tropicales, huracanes y eventos ENOS modifican la temperatura, nubosidad, humedad y el oleaje presente en estas zonas (Lozano-Duque et al., 2010; Narváez & León, 2003; Ortiz-Royero et al., 2013), generando efectos en las variaciones de la temperatura superficial del mar, los cuales, al estar ligados con aspectos físicos inciden también en aspectos biológicos de los organismos (Bernal et al., 2006). El efecto de eventos energéticos sobre el ecosistema y la microfauna bentónica para las zonas costeras del Caribe únicamente ha sido relacionado en estudios como el de Puerres et al. (2018) en el Archipiélago Islas del

Rosario, donde los foraminíferos bentónicos (FB) fueron los bioindicadores principales de eventos energéticos presentes en registros sedimentarios. Debido al incremento en la incidencia e intensidad de este tipo de eventos en la actualidad (E.G. Ortiz, 2007) y sumado a los pocos estudios en la zona, resulta relevante evaluar los efectos de estos fenómenos mediante el uso de foraminíferos bentónicos como un aporte al conocimiento paleoceanográfico en el atolón de Cayo Serrana en la Reserva de Biósfera Seaflower.

## 1.2. Objetivos

### Objetivo General

- Determinar la distribución y asociaciones de foraminíferos bentónicos en el núcleo NCS1 y evaluar su respuesta ante eventos oceánicos extremos en el Atolón de Cayo Serrana.

### Objetivos Específicos

- Analizar cualitativamente cuáles son los posibles eventos oceánicos extremos que han afectado el Atolón Serrana.
- Evaluar cambios en la energía a través del análisis granulométrico de las 40 muestras de sedimentos pertenecientes al NCS1.
- Determinar la diversidad y las asociaciones de Foraminíferos bentónicos en el núcleo NCS1 y su respuesta a los eventos oceánicos extremos.
- Reconocer anomalías ecofenotípicas en especies de Foraminíferos bentónicos en el núcleo NCS1 asociadas a eventos oceánicos extremos.

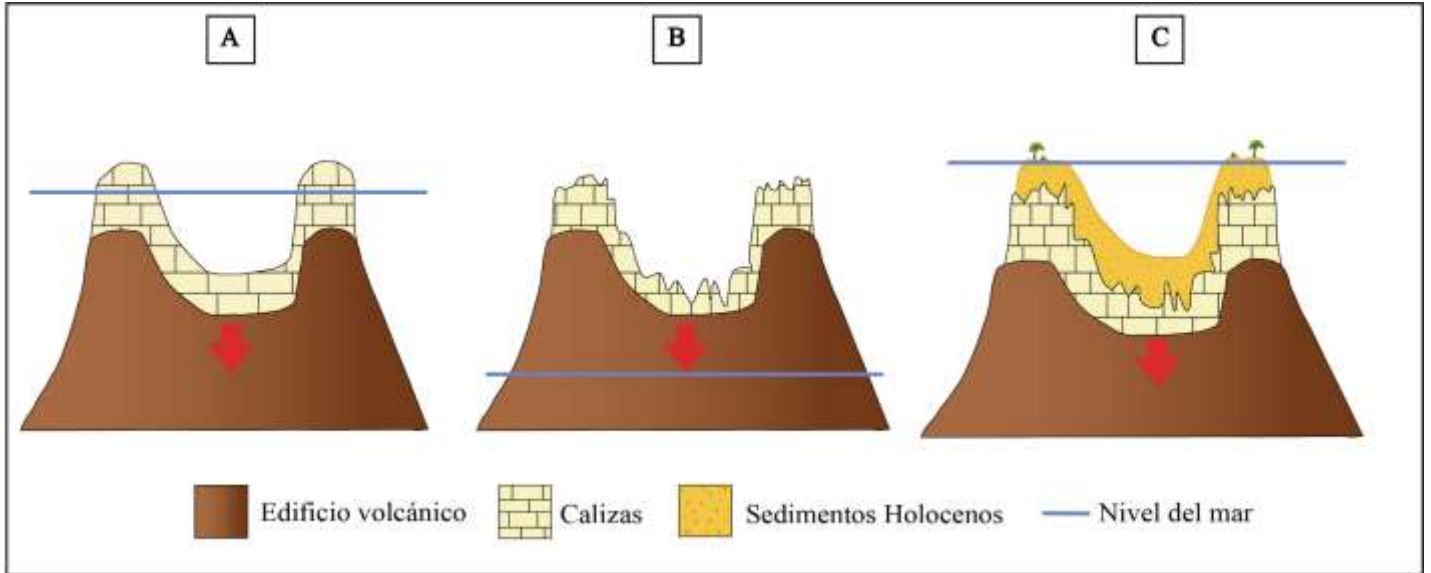
## 2. Marco Teórico

### 2.1. Formación Atolones

Los atolones son estructuras arrecifales de forma anular que también se pueden presentar como plataformas arrecifales aisladas en la mayoría de archipiélagos (Huggett, 2011; Woodroffe, 2008). Están compuestos esencialmente por carbonato de calcio y sedimentos arenosos sueltos o ligeramente consolidados, que son producto de la abrasión marina del arrecife, así como de otras posibles fuentes, como sedimentos transportados por corrientes de agua dulce de continentes cercanos o grandes islas (Falkland & Diaz, 1991), que tienden a formar un recinto calcáreo irregular alrededor de uno o varias lagunas diferenciadas de gran profundidad (Herold, 1959).

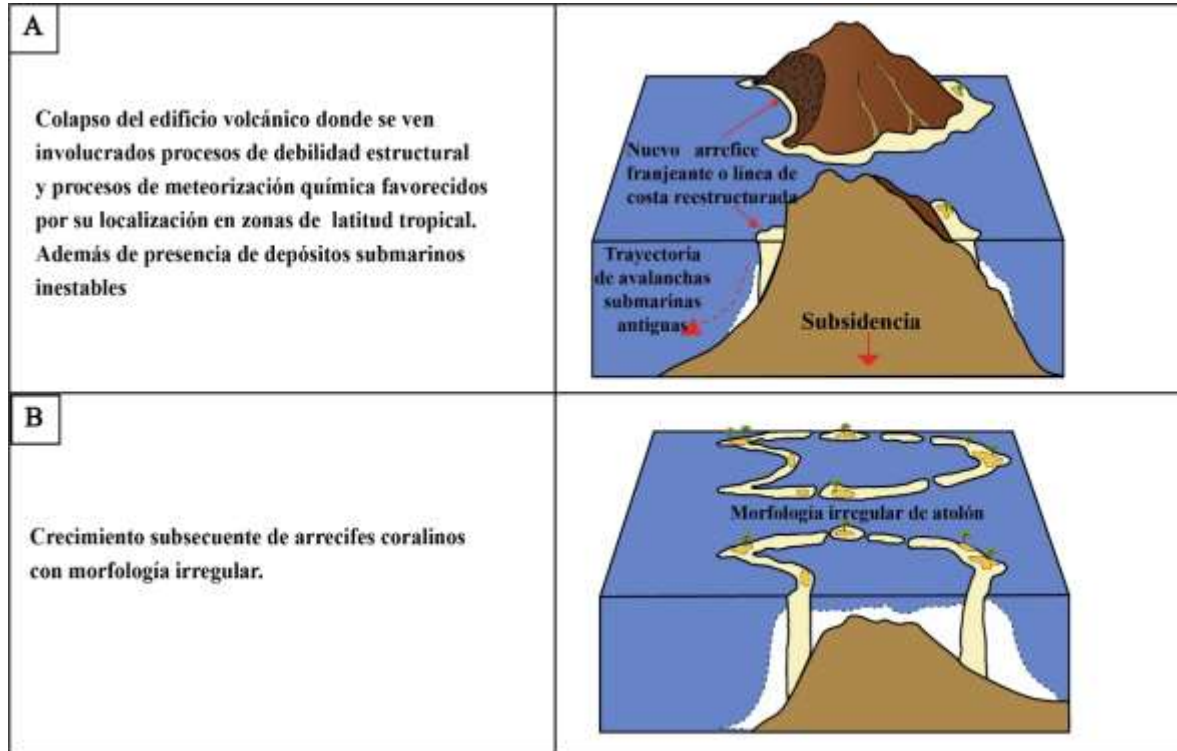
Su formación, según Darwin (1842) en su obra sobre la estructura y distribución de los arrecifes de coral, se basa en la premisa de la subsidencia de una isla volcánica y el crecimiento de barreras de corales. Materialmente se compone de comunidades marinas constituidas principalmente por algas calcáreas, corales formadores de arrecifes y organismos como foraminíferos y ostrácodos y algunos tipos de moluscos que ayudan a la formación y consolidación de estos, además, de plantas marinas que propician la precipitación de carbonato de calcio para la formación de calizas a partir de la remoción de dióxido de carbono (Herold, 1959). Su evolución y desarrollo también se encuentra ligado a variaciones glacio-eustáticas del nivel del mar en periodos como el Pleistoceno y el Holoceno (*Figura 1A*) (Fairbridge, 1961), en donde la caída del nivel de mar expone las plataformas arrecifales las cuales posteriormente son sometidas a procesos de karstificación y erosión (*Figura 1B*), (Stoddart, 1969; Ayers, 1984; Falkland & Diaz, 1991; Falkland, 1993; Werner et al., 2017), y a periodos en el que el aumento relativo del nivel del mar opera como el

principal agente modelador de la estructura del atolón (Herold, 1959) (*Figura 1C*). Terry & Goff (2013) añaden una serie de procesos involucrados a la formación de los atolones planteada por Darwin, los cuales se relacionan en la *Tabla 1*.

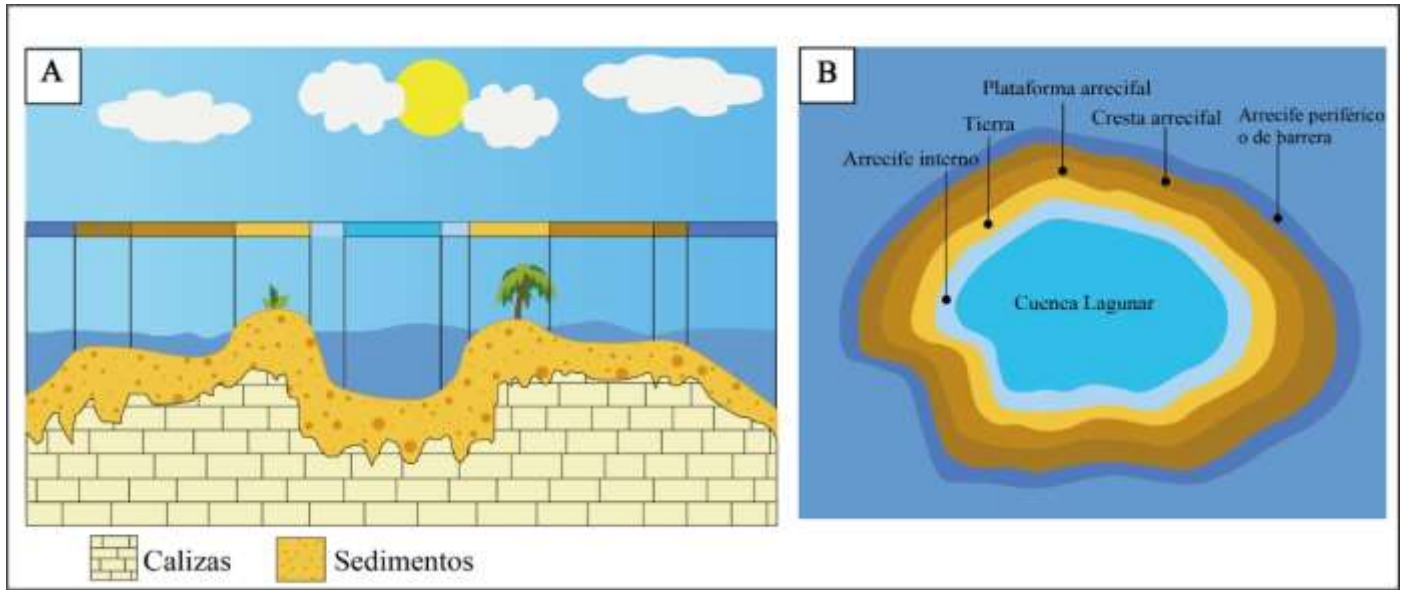


**Figura 1.** Efectos de las variaciones eustáticas del nivel del mar (línea azul) sobre el desarrollo y estructura de los atolones. **A.** Subsistencia del edificio volcánico que promueve la formación de plataformas carbonatadas. **B.** Exposición de plataformas carbonatadas a procesos de karstificación y erosión debido a descensos en el nivel del mar durante periodos de glaciación. **C.** Incremento en el nivel del mar que permite el re – crecimiento de los arrecifes y deposición de sedimentos holocenos. La flecha roja representa la subsistencia del edificio volcánico. Tomado y modificado (Werner et al., 2017).

**Tabla 1.** Procesos involucrados en la formación de los atolones. Tomado y modificado de Terry & Goff, 2013.



En la evolución de las características morfológicas de ambientes arrecifales y sus zonificaciones (*Figura 2*), juegan un papel importante la localización, factores abióticos como la luz, profundidad, mareas, circulación del agua, acción de las olas, nutrientes, temperatura y salinidad (Spalding et al., 2001; Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation, 2014), lo que propicia un entorno básico para cada atolón constituido por un arrecife periférico o de barrera, plataforma arrecifal de sotavento y barlovento y una cuenca lagunar (Milliman, 1969).

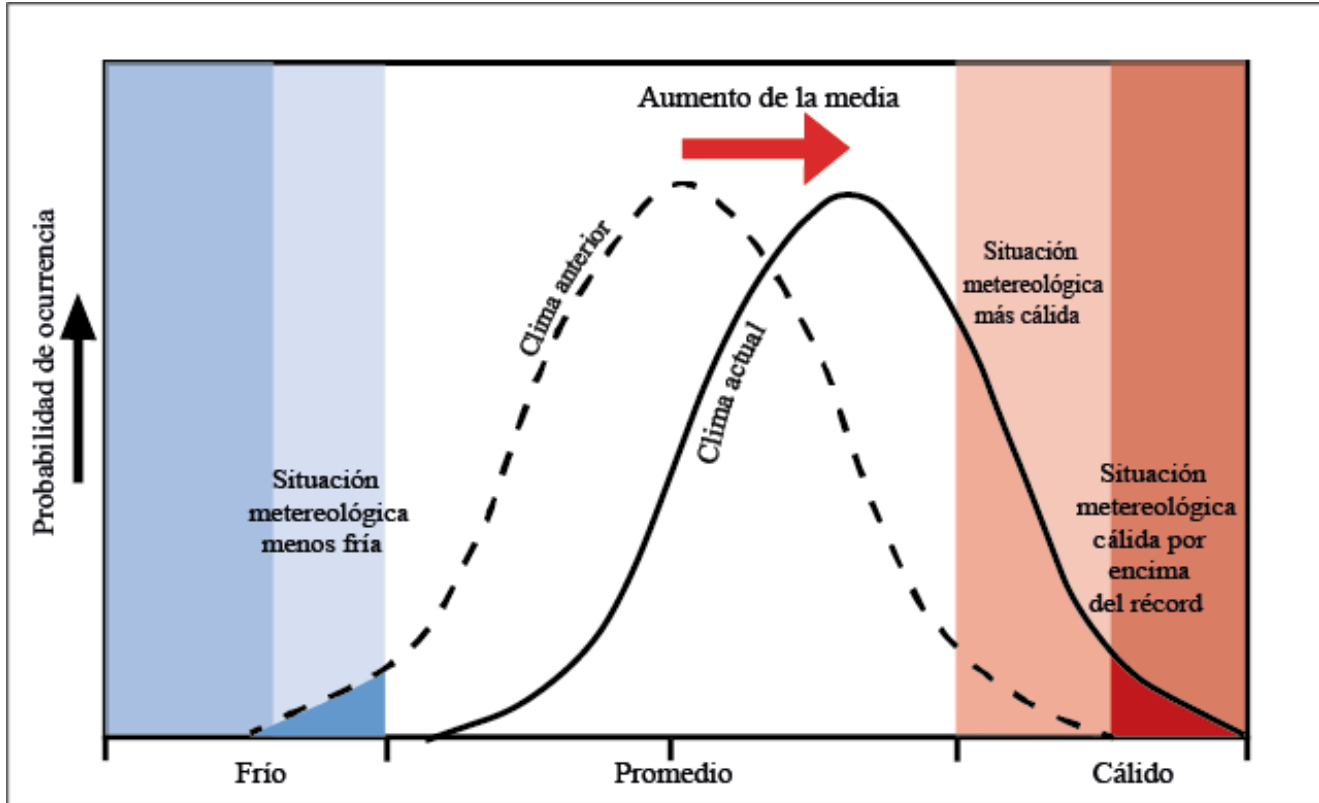


**Figura 2.** Zonificación morfológica de un atolón **A.** Perfil. **B.** Vista en planta. Tomado y modificado de Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation (2014).

## 2.2. Eventos Extremos

Las múltiples definiciones presentadas para el término evento extremo generan ambigüedad y la necesidad de una definición general de uso interdisciplinar, por tal razón Broska et al. (2020), proponen como evento extremo a aquel acontecimiento dinámico dentro de un marco temporal limitado que impide el funcionamiento normal de un sistema o sistemas. Desde un contexto estadístico un evento extremo es aquel cuya probabilidad de ocurrencia en el punto inferior y superior (percentiles 10 y 90) de una gama de valores es denominada función de distribución de probabilidad (FDP), un cambio pequeño en ésta se refleja como un cambio en el promedio o centro de distribución (IPCC, 2007), tal como se muestra en la *Figura 3* para la variable clima, donde el incremento en la media resulta en extremos más frecuentes en el punto superior mientras que en el inferior por el contrario en la reducción de su

frecuencia, lo que se traduce para la variable ejemplificada en más extremos cálidos y menos extremos fríos (Bailey & van de Pol, 2016).



**Figura 3.** Esquema de ejemplificación de las variaciones de la FDP para la variable clima. Tomado y modificado de IPCC (2007).

Estudios y análisis realizados dentro de un contexto climatológico atribuyen este término a eventos como las olas de calor, fuertes precipitaciones (Cuculeanu & Pavelescu, 2013; Perkins-Kirkpatrick & Pitman, 2018), periodos de sequía, periodos húmedos, tormentas tropicales (Easterling et al., 2000) olas gigantes (Dysthe et al., 2008; Farazmand & Sapsis, 2018), entre otros.

(Easterling et al., 2000) propone para los extremos climáticos dos condiciones para su categorización; en la primera se consideran todos aquellos extremos climáticos que involucren una estadística simple tal como lo son las temperaturas o precipitaciones, cuya periodicidad sea diaria o mensual dentro de un año. En la segunda condición se consideran aquellos eventos más complejos que no tienen una periodicidad anual tal como lo son las sequías, inundaciones, tsunamis y huracanes.

La generación de eventos extremos por lo general es producto de una combinación de factores antrópicos y naturales como los aumentos en las temperaturas superficial del mar, variaciones en la circulación atmosférica, sistemas de altas presiones entre otros (IPCC, 2007), que tiene como motores climáticos de los impactos la tendencia al calentamiento y desecación, temperaturas y precipitaciones extremas, manto nivales, ciclón destructivo, variaciones en el nivel del mar y acidificación de los océanos (IPCC, 2014).

En el caso de los extremos oceánicos su ocurrencia es dada cuando se excede los niveles normales de las condiciones meteorológicas y oceánicas (percentil 90, 95 o 99) (Bernal et al., 2016), presentándose eventos como las olas de calor marinas y los frentes fríos (Ummenhofer & Meehl, 2017). En el océano, cambios abióticos como el forzamiento climático antropogénico son los causantes de variaciones tanto físicas como químicas, que desencadenan el aumento del nivel del mar, cambios de circulación, cambios en el pH, UV y CO<sub>2</sub>, viéndose modificado los patrones de zonificación y rangos biogeográficos (Harley et al., 2006). El comprender la respuesta de los individuos, poblaciones y comunidades a estos eventos es un objetivo relevante en la investigación ecológica (Bailey & van de Pol, 2016) y así mismo lo es identificar cómo es la transferencia de materia y energía dentro y a través de



los límites del ecosistema y los mecanismos involucrados en los picos de actividad de los procesos naturales (Sanchez-Vidal et al., 2012).

Los eventos extremos son cada vez más comunes e intensos (Ebi & Bowen, 2016), siendo de alta relevancia en los últimos años debido a los cambios que pueden provocar en el sistema humano y natural (Easterling et al., 2000; Meehl et al., 2000), haciéndose indispensable la evaluación de su evolución para la implementación de planes de adaptación, que permitan mitigar los impactos potenciales del cambio climático en ecosistemas marinos (Harley et al., 2006; Trenberth et al., 2015).

### **2.3. Eventos Extremos en el Caribe**

La región del Mar Caribe está expuesta a peligros naturales como terremotos, tsunamis y huracanes (Lander et al., 2002), aunque la incidencia de eventos como los tsunamis no corresponden al principal peligro natural, aun así tienen el potencial de producir desastres regionales catastróficos (O’loughlin & Lander, 2003). Este tipo de eventos son relativamente frecuentes al oeste de Centroamérica y en la parte oriental de las Antillas menores (Cotilla Rodríguez, 2011), catálogos históricos de tsunamis son reportados para lugares de las Antillas como Martinica (Accary & Roger, 2010), Monserrat (Pelinovsky et al., 2004), Puerto Rico (Mercado & McCann, 1998), Guadalupe ( Zahibo et al., 2005; Nikolkina et al., 2010), Antillas Francesas ( Zahibo et al., 2011), Venezuela (Peñaloza - Murillo, 2016) entre otros. Para el caso de las costas colombianas debido a su lejanía con las posibles fuentes de origen de los tsunamis, las alturas de olas generadas que llegarían a la costa no serían significativamente superiores a aquellas que se presentan por interacción océano – atmósfera, fenómeno conocido comúnmente como “mar de leva” (Caicedo et al., 1996).

Para el caso de eventos de efectos catastróficos y comunes en regiones tropicales como los huracanes (Tanner et al., 1991), éstos son capaces de modelar la estructura de los ecosistemas en las islas caribeñas (Waide, 1991). Las perturbaciones de los arrecifes del Caribe Colombiano en la actualidad están ligadas a la presencia de huracanes, eventos de blanqueamiento coralino, enfermedades epidémicas y la proliferación de algas (Garzon & Diaz, 2003).

El archipiélago de San Andrés y Providencia ha sido una de las áreas más vulnerables al paso de huracanes, debido a que la costa Caribe colombiana presenta un clima determinado por 2 periodos estacionales afectados por la precipitación, el patrón de los vientos alisios del este y el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (Ortiz-Royero et al., 2013). El movimiento de la ZCIT produce 3 periodos climáticos, los cuales son modificados por el sistema de monzones americano, corrientes de viento atmosférico de bajo nivel y las fases ENOS (Andrade & Barton, 2000). Producto de lo anterior, lo que se conoce como “frente frío” incide parcialmente en el estado del tiempo en el Caribe Colombiano, y están relacionados con las grandes alturas de ola comúnmente asociadas a los efectos de huracanes y tormentas durante los meses de Junio a Noviembre (Ortiz-Royero et al., 2013); un ejemplo es el caso del frente frío del año 2002 durante los días 5 y 8 de enero que formó una nubosidad y propició lluvias de 27 mm en el archipiélago de San Andrés y Providencia (Narváez & León, 2003).

La incidencia de huracanes para el área insular del Caribe colombiano, ha sido descrita en diversos estudios y reportes( Thomas et al., 2012; CCO, 2015; Ricaurte-Villota & Bastidas-Salamanca, 2017). Un estudio de la CIOH y la DIMAR de los años 1964-2004 reveló que el 32% de los huracanes generados en el Atlántico afectaron el Mar Caribe y 17% la Costa

Caribe colombiana, siendo septiembre el mes en el que se generaron más huracanes durante los 40 años estudiados (UNGRD, 2018b). Asimismo, en este mismo estudio la UNGRD durante los años de 1842-2014, registró la incidencia de 54 ciclones tropicales en un radio de 100 km sobre 6 puntos geográficos en la costa Caribe colombiana, indicados por el Centro Nacional de Huracanes de Miami, donde San Andrés y Providencia resultan ser las áreas con mayor vulnerabilidad.

De igual forma, Ortiz (2012) catalogó la Isla de San Andrés y la zona insular del Archipiélago como las más vulnerable a el paso de tormentas y huracanes en el Caribe colombiano, durante los años 1900 a 2010, identificando los siguientes eventos como los más cercanos y significativos: tormenta N° 4 en 1911, Hattie en 1961, Alma en 1970, Joan en 1988, Cesar en 1996, Katrina en 1999 y Beta en 2005, de los anteriores huracanes Hattie y Katrina presentaron categoría 5,. Adicionalmente el huracán Joan junto con el huracán Fifi fueron eventos que produjeron las mayores alturas de olas en la cuenca del Caribe y que tuvieron la capacidad de generar el mayor impacto costero (Lizano & Mora- Escalante, 2019).

Los corales en el Caribe Colombiano se encuentran expuestos a los eventos naturales extremos que en combinación con la influencia antropogénica disminuyen la calidad de agua dejándolos vulnerables al blanqueamiento coralino y siendo una respuesta común de los corales a factores de estrés local y global (Prazeres et al., 2020; Souder, 2009). El blanqueamiento coralino es la respuesta a los cambios en la temperatura superficial del mar, en interacción con otras variables como la salinidad, turbidez, nubosidad entre otras (Romero et al., 2014). Las perturbaciones antropogénicas en los arrecifes colombianos como la sedimentación, la sobrepesca, la contaminación química, la eutrofización, la pesca con dinamita, la extracción coralina y la presencia de aguas residuales, degradan y deterioran los

arrecifes de coral (Garzón & Díaz, 2003). Se han reportado varios eventos de blanqueamiento coralinos en las costas del Caribe colombiano: en el año 1987 se afectaron los arrecifes de Santa Marta, Islas del Rosario y Bahía Portete (La Guajira); en 1990 y 1995 se identificaron blanqueamientos menores en las Islas del Rosario y Chengue; en el año 2005 ocurrió el blanqueamiento masivo más severo en la región, debido a un aumento en la temperatura del mar de 1.5-2.5°C durante el mes de mayo, afectando moderadamente los arrecifes de San Andrés y Providencia (Rodríguez-Ramírez et al., 2005). Actualmente los corales de la zona insular han sido designados a una categoría de riesgo crítico, debido a la alteración de los procesos bióticos (Uribe et al., 2020).

#### **2.4. Eventos Extremos en Atolones e Impactos en su Morfología**

Se ha mencionado que los cambios en la estructura de los atolones dependen del aumento del nivel del mar, cuya ocurrencia logra exceder la tasa de crecimiento vertical de arrecifes, generando su degradación y la habilidad para actuar como barrera protectora de la estructura frente a posibles inundaciones y al impacto generado por la energía de las olas producto de eventos extremos, ya sean de origen climático o tectónico (Storlazzi et al., 2015). Los procesos erosivos y acreccionarios presentes en atolones, están ligados particularmente a huracanes y ciclones, los cuales han permitido el desarrollo de patrones erosivos controlados por vientos, olas de tormenta y la acción del aumento del nivel del mar (Nurse et al., 2014).

Para identificar la acción de este tipo de eventos en atolones, se ha implementado el uso de las características texturales de los sedimentos y las asociaciones de foraminíferos que permiten conocer el origen, transporte y condiciones de depositación e identificar la presencia de posibles eventos extremos como el efecto de tsunamis, huracanes y ciclones, mediante la

observación de sedimentos altamente retrabajados y depositados en zonas de baja energía (Puerres et al., 2018)

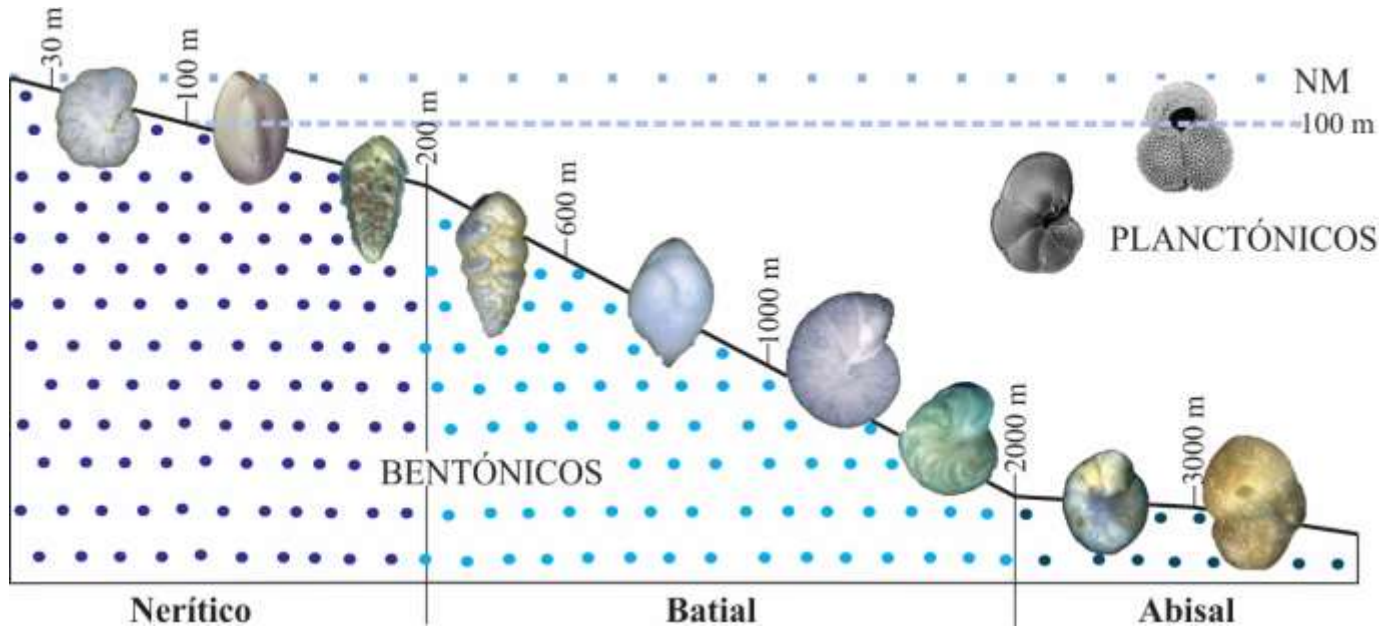
Las evidencias en la distinción entre sedimentos asociados con tsunamis y tormentas es casi nula, estos eventos se reconocen mediante la identificación de capas de sedimentos gruesos, por ejemplo, capas de rudstones con restos de coral re-depositados procedentes de áreas marginales o arrecifes, que fueron transportados hasta la laguna y que se encuentran en sucesiones lagunares de grano fino, con presencia de componentes derivados del arrecife como algas coralinas, foraminíferos y fragmentos de coral, como se distinguió en el atolón de las Maldivas, relacionando las capas con paleotsunamis (Klostermann et al., 2014).

Asimismo mediante el estudio geomorfológico del atolón Fakarava en la Polinesia Francesa, se lograron identificar los efectos del impacto de la depresión tropical 13F, que originó vientos de 74 km/h, una presión de 999.8 hpa y alturas de ola entre 4 y 4.9 m; a partir del estudio de la variación de la línea de costa del atolón, utilizando fotografías satelitales y el análisis de la densidad de la vegetación y los depósitos sedimentarios, identificando la aglomeración de restos de corales vivos que fueron arrancados de las pendientes externas, la acumulación de material suelto y escombros de coral procedentes de las plataformas conglomeráticas, que contribuyeron al crecimiento de la isla, pero a su vez disminuyeron la línea de costa, como consecuencia de la reducción de la cubierta vegetal debido a la ejecución de las actividades humanas en el atolón (Duvat et al., 2020). Este tipo de análisis, en conjunto con la distinción de especies de foraminíferos asociadas a diferentes medios oceánicos en sedimentos cercanos a la línea de costa, permiten inferir la repercusión de dichos eventos (Puerres et al., 2018).

## 2.5. Foraminíferos

Los foraminíferos son rizópodos protozoarios, unicelulares de gran abundancia y distribución en los océanos modernos y en el registro geológico (microfósiles) desde el Cámbrico (Goldstein & Corliss, 1994; Goldstein, 1999; Monticelli Petró, 2018). Proporcionan a una valiosa fuente de información en términos de diversificación evolutiva, adaptación al hábitat y extinción selectiva (Tappan & Loeblich, 1988), además son buenos bioindicadores del cambio global y de la salud de los ecosistemas marinos (Martins et al., 2019). Como indicadores oceanográficos, permiten conocer de manera indirecta variables como la temperatura, la salinidad, los nutrientes y la oxigenación de las masas de aguas oceánicas (Jorissen et al., 2007; Kucera, 2007), que son ampliamente usados en determinaciones bioestratigráficas, especialmente del Mesozoico y Cenozoico (Jones, 2013).

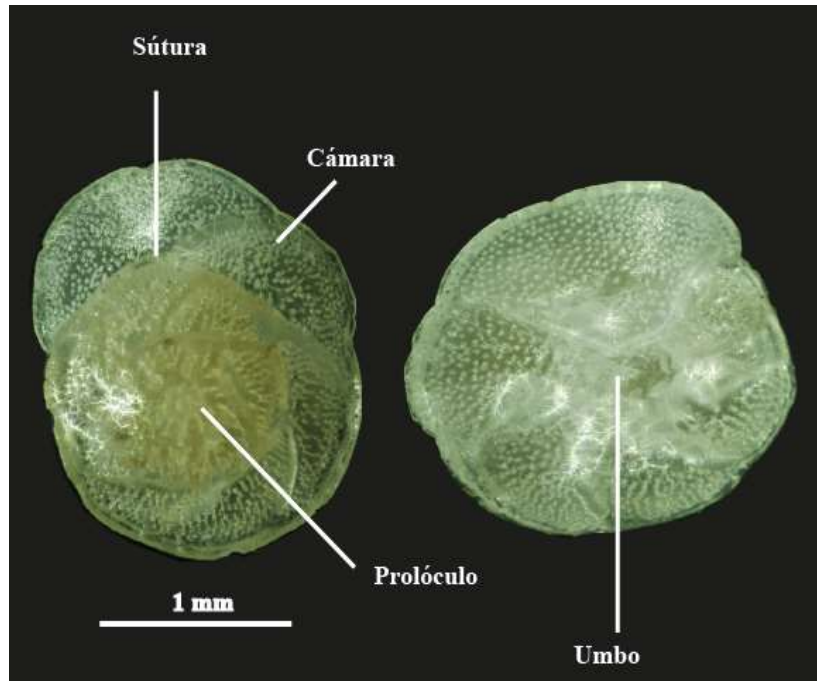
En función del hábitat, se dividen en planctónicos y bentónicos (*Figura 4*) (Arenillas - Sierra et al., 2000), la distribución de estos dos grupos se ve influenciada por la asociación de parámetros tanto bióticos como abióticos que no pueden ser considerados aisladamente (Acosta Herrera, 2004). Los primeros viven en suspensión, flotando en la columna de agua, y se caracterizan por presentar formas principalmente globulares, de paredes finas con perforaciones y pústulas; mientras que los foraminíferos bentónicos presentan gran variedad de formas y ornamentación (Petró, 2018), estos habitan en el fondo marino, ya sea sobre el sustrato (epifaunales) o enterrados a pocos centímetros de este (infaunales) (Jorissen et al., 1995)



**Figura 4.** Distribución de foraminíferos planctónicos y bentónicos. La distribución de los bentónicos es de acuerdo al esquema de batimetría de van Morkhoven et al. (1986). El orden de las especies desde batimetrías más someras a más profundas es el siguiente: *Astrononion stelligerum*, *Quinqueloculina seminulum*, *Brizalina aliformis*, *Brizalina subspinescens*, *Bulimina callahan*, *Melonis barleeaanum*, *Planulina costata*, *Praecystammina globigerinaeformis*, *Cibicidoides havanensis*. Los foraminíferos planctónicos son *Globigerinoides ruber* y *Globorotalia tumida*.

En cuanto a la estructura de su concha Acosta (2004) proporciona una descripción básica (Figura 5), la cual posee como unidad base la cámara; siendo el prolóculo la primera cámara desarrollada; el septo la pared que separa una cámara de otra, las suturas y la apertura, esta última tiene importancia funcional ya que es el área donde ocurre la comunicación entre el citoplasma y el ambiente, puede ser simple o múltiple con forma variable (redondeada, oval,

en forma de arco, etc.), su ubicación puede ser en la última cámara, a la base de la cara apertural o en todo el margen periférico y adicionalmente puede desarrollar estructuras esqueléticas como placas, labio, diente, etc. (Mikhalevich & Debenay, 2001)

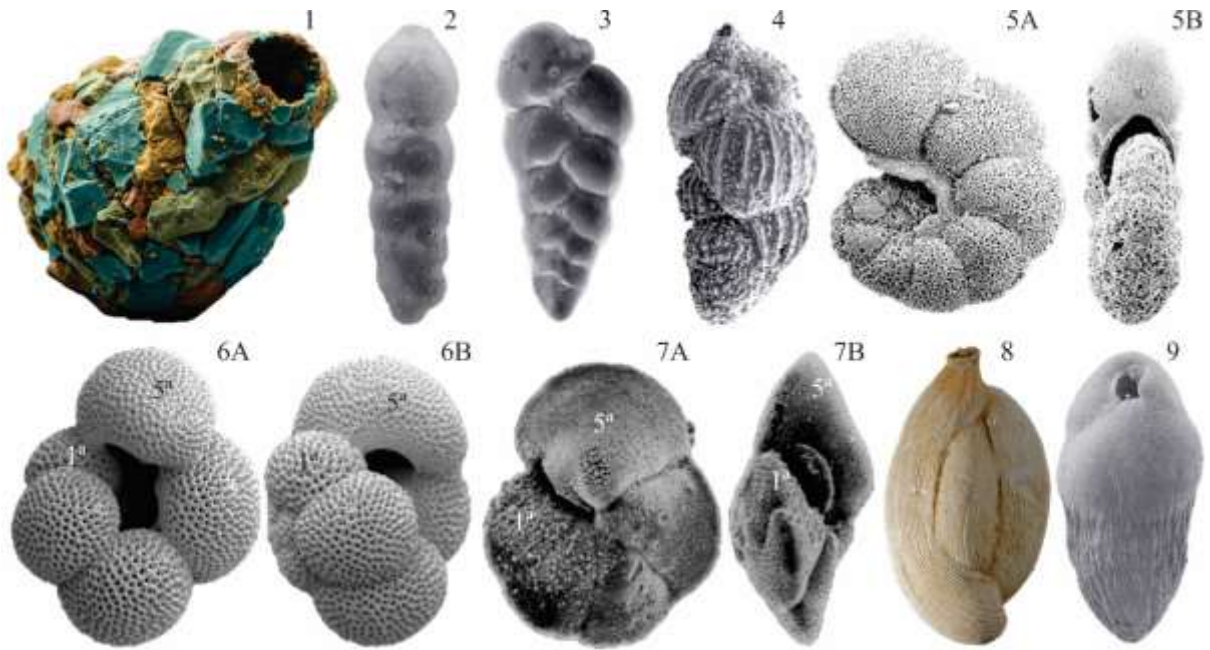


**Figura 5.** Estructura de la concha de los foraminíferos: foraminífero bentónico *Rotorbis auberii*.

Las características de las cámaras varían mucho desde formas uniloculares que pueden ser globosas, tubulares, radiadas, ramificadas o irregulares a formas multiloculares de disposición y ornamentación variable (Armstrong & Brasier, 2005) (figura 6), otras características como el arreglo de las cámaras en las formas multiloculares puede disponerse de distintas maneras, ya sea que las últimas cámaras envuelvan las primeras (evoluto) o que pase lo contrario (involuta), que el desarrollo sea en un solo plano (planoespiral) o en espiral (trocoespiral) entre otros ( Haynes, 1981; Culver, 1993), presentando así una alta diversidad



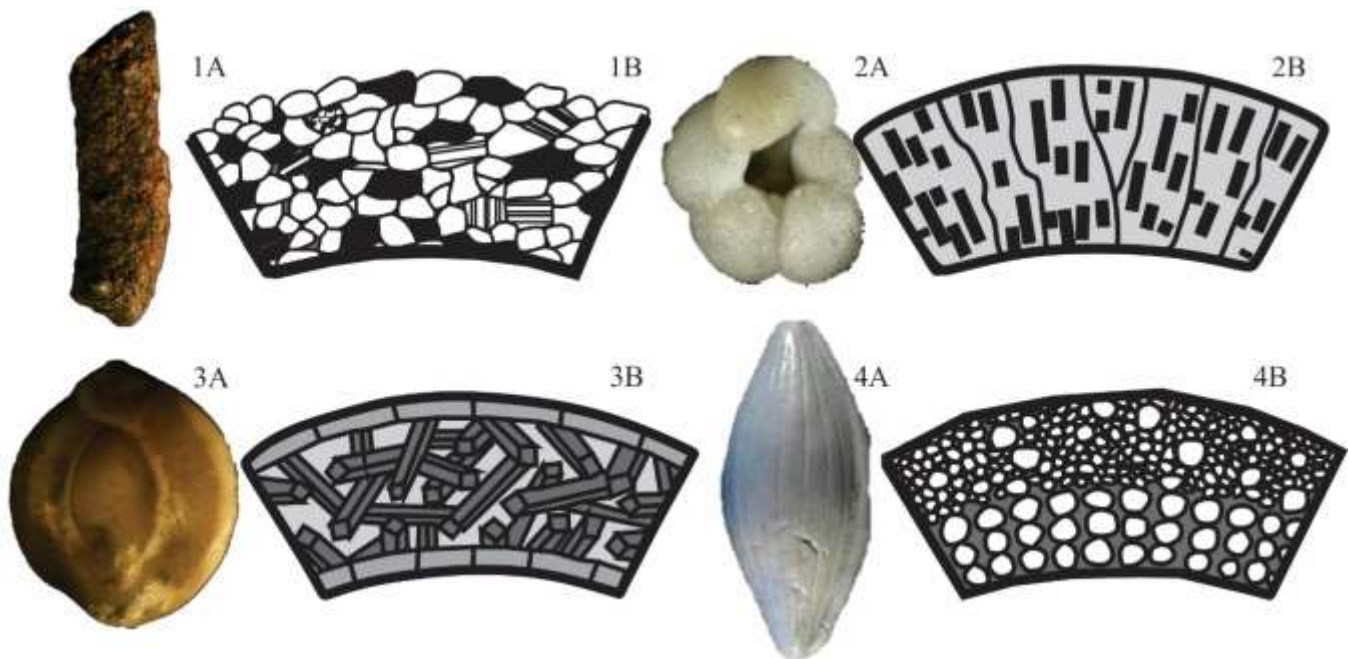
de formas en la disposición de las cámaras, que pueden combinarse o permanecer igual en las diferentes etapas ontogénicas (Petró, 2018).



**Figura 6.** Tipos arreglos de las cámaras de foraminíferos. **1.** Cámara simple (*Dufflugia pyriformis*). **2.** Uniserial (*Ellipsoidella kugleri*). **3.** Biserial (*Bolivina inflata*). **4.** Triserial (*Uvigerina semiornata*). **5.** Planoespiral (*Planoglobanomalina pseudoalgeriana*). **6A.** Trochospiral alto vista umbilical (*Ciperoella fariasi*). **6B.** Trochospiral alto vista de perfil. **7A.** Trochospiral bajo vista umbilical (*Globorotalia archeomenardii*). **7B.** Trochospiral bajo vista de perfil. **8.** Milioliforme (*Adelosina colomi*). **9.** Fusiforme (*Praebulimina* sp.).

Respecto a la composición de la concha, se pueden agrupar en aglutinados y calcáreos (Figura 7), Culver (1993) & Hottinger (2006) proporcionan definiciones para cada uno de los tipos de pared originadas:

- **Pared aglutinada:** Se forma a partir de sedimentos del fondo oceánico, conchas o fragmentos de concha que son adheridos a la estructura a partir de un cemento secretado por el mismo organismo.
- **Pared calcárea:** Originadas por la segregación de carbonato de calcio por parte del organismo. Existen 3 tipos: las hialinas (conchas de aspecto transparente o vítreo, algunas perforadas), porcelanáceas (conchas imperforadas translúcidas a opacas) y microgranulares (granos equidimensionales y subsféricos de calcita cristalina).



**Figura 7.** Tipos de paredes de foraminíferos. **1A.** Foraminífero bentónico de pared aglutinante (*Nothia* sp.); **1B.** Estructura pared aglutinada. **2A.** Foraminífero planctónico de pared hialina (*Globigerinella calida*). **2B.** Estructura pared hialina **3A.** foraminífero bentónico de pared calcárea, porcelanacea (*Quinqueloculina* sp.). **3B.** Estructura pared porcelanacea. **4A.** Foraminífero bentónico del grupo de los fusulinidos, con pared microgranular. **4B.** Pared microgranular. Basado en: Culver (1993) & Scott et al. (2007).

## 2.6. Foraminíferos en Atolones

Este tipo de microorganismos han permitido entender la dinámica oceánica de los arrecifes coralinos en atolones (Bicchi et al., 2002; Parker & Gischler, 2011), además de catalogar las diferentes respuestas de sus comunidades ante la incidencia de los cambios generados por las actividades humanas (Martins et al., 2019) y los eventos extremos climáticos (Zeppilli et al., 2015). Los cambios globales inducidos por diversos factores antropogénicos se ven reflejados en las asociaciones de foraminíferos bentónicos, ya que estos son sensibles a la nitrificación costera como es el caso de los grandes foraminíferos simbiotes, los cuales pierden dominancia sobre las especies más pequeñas, herbívoras y detritívoras cuando la disponibilidad de nutrientes incrementa en ambientes tropicales arrecifales, además también suelen ser sensibles al aumento de la radiación ultravioleta (Hallock et al., 1995; Hallock, 2000; Uthicke & Altenrath, 2010), exhibiendo daños en los simbiotes, la calcificación, reproducción y el aumento de la susceptibilidad a la depredación e infestación por parte de otras especies (Hallock, 2016). Otros estudios realizados con foraminíferos en atolones, también demuestran la influencia antropogénica como un factor controlador de la distribución y densidad poblacional de los foraminíferos bentónicos de gran tamaño, evidenciando su disminución cerca de las zonas superpobladas (Osawa et al., 2010; Fujita et al., 2014).

## 2.7. Los Foraminíferos como Bioindicadores de Eventos Extremos en Atolones

La respuesta de los foraminíferos bentónicos ante los cambios en las características del medio, usualmente se refleja en la combinación de factores ambientales, bióticos y abióticos (Fajemila et al., 2015; Dong et al., 2019). Las variaciones en el tiempo de estos factores han sido consideradas por distintos autores como Bicchi et al. (2002), Chen & Lin (2017) y

Schultz et al. (2010), quienes a través del estudio de las asociaciones de foraminíferos y su biodiversidad, han reconocido cambios en el medio y su correlación con distintos eventos extremos como huracanes, inundaciones de la laguna, aumento en la temperatura del agua, entre otras.

Para identificar la influencia de una fuerte hidrodinámica y la presencia de ciclones tropicales en las comunidades arrecifales, se han utilizado ampliamente el estudio de registros sedimentarios (Fellowes et al., 2017; Toomey et al., 2013; Yu et al., 2009) .Sin embargo han sido muy pocos los estudios que relacionan los registros sedimentarios y las asociaciones de foraminíferos bentónicos, como herramientas para identificar la historia de la influencia de ciclones tropicales, en arrecifes coralinos. En el caso del arrecife Heron, al sur del arrecife de la Gran Barrera, se realizó el estudio de las asociaciones de foraminíferos bentónicos antes y después del Ciclón Hamish (H4), identificando una homogeneización y decrecimiento en la diversidad de las especies después del evento, (Strotz et al., 2016). Otros eventos extremos como tsunamis y tormentas han quedado registrados en sedimentos del Holoceno en atolones de las Maldivas, donde el uso de foraminíferos bentónicos de los géneros *Amphistegina* y *Calcarina*, junto con la caracterización granulométrica de los depósitos sedimentarios, permitieron la identificación de capas gruesas de sedimento en sucesiones lagunares, resultantes de tsunamis en la región (Klostermann et al., 2014). Asimismo en el Atolón de Jaluit en las Islas Marshall mediante el análisis tafonómico de foraminíferos, se estimaron eventos asociados a la generación de grandes olas, describiendo el grado de abrasión, corrosión de las conchas y categorizando su grado de alteración dependiendo de su fragmentación y desgaste, resultando en la identificación de 2 ciclones tropicales históricos, correlacionando las edades de radiocarbono del núcleo con eventos sincrónicos como lo

fueron, el tifón Ophelia en año 1958 que tocó tierra en el atolón Jaluit, devastando parte de las islas y un tifón sin nombre registrado, cuya ocurrencia fue descrita en el año 1905 (Bramante et al., 2019).

De igual forma las anomalías recientes en temperatura, causantes del blanqueamiento de coral son registradas en los atolones de North Ari y Rashoo en las Maldivas, a partir de la medición del Foram Index (FI), usando las conchas de los foraminíferos bentónicos y el índice de los constituyentes del sedimento (SI) siendo un indicador también de la calidad del agua, la estructura de la comunidad, los procesos de pastoreo y bioerosión, en donde ambos índices identificaron un proceso de deterioro ambiental durante los años 2015 y 2018, relacionado con una anomalía intensa de la temperatura superficial del agua, durante los meses de Marzo y Junio (Beccari et al., 2020).

## **2.8. Deformación en Foraminíferos**

En los foraminíferos bentónicos, cambios en la morfología de su concha se han asociado a parámetros ecológicos entre ellos salinidad, solubilidad de carbonato de calcio, profundidad, nutrición, substrato, oxígeno disuelto, luminosidad, contaminación, hidrodinámica, elementos traza y rápidas fluctuaciones ambientales (Boltovskoy et al., 1991), dichos parámetros no actúan independientemente y la respuesta de los foraminíferos suelen reflejar los efectos combinados de estos, por ende lograr identificar el efecto individual de los parámetros en los cambios de la morfología es difícil, a excepción de que se haga en experimentos de laboratorio controlados (Collins, 1989), ejemplo de esto fueron las observaciones realizadas por Dong et al. (2020) en las que se demuestra que una declinación en el pH conduce a la disminución de la abundancia y riqueza de foraminíferos de pared hialina y porcelanácea, presentándose además procesos de calcificación reducida,

disminución en la tasa de crecimiento, reproducción tardía y cámaras aberrantes. En otro trabajo, Dong et al. (2019) evalúa el efecto de la temperatura en los foraminíferos, mostrando que frente a un disminución de esta se dan cambios en las dominancias, siendo mayores para los rotálidos y menores para los miliólidos, reflejando la preferencia que tienen los miliólidos por las aguas cálidas.

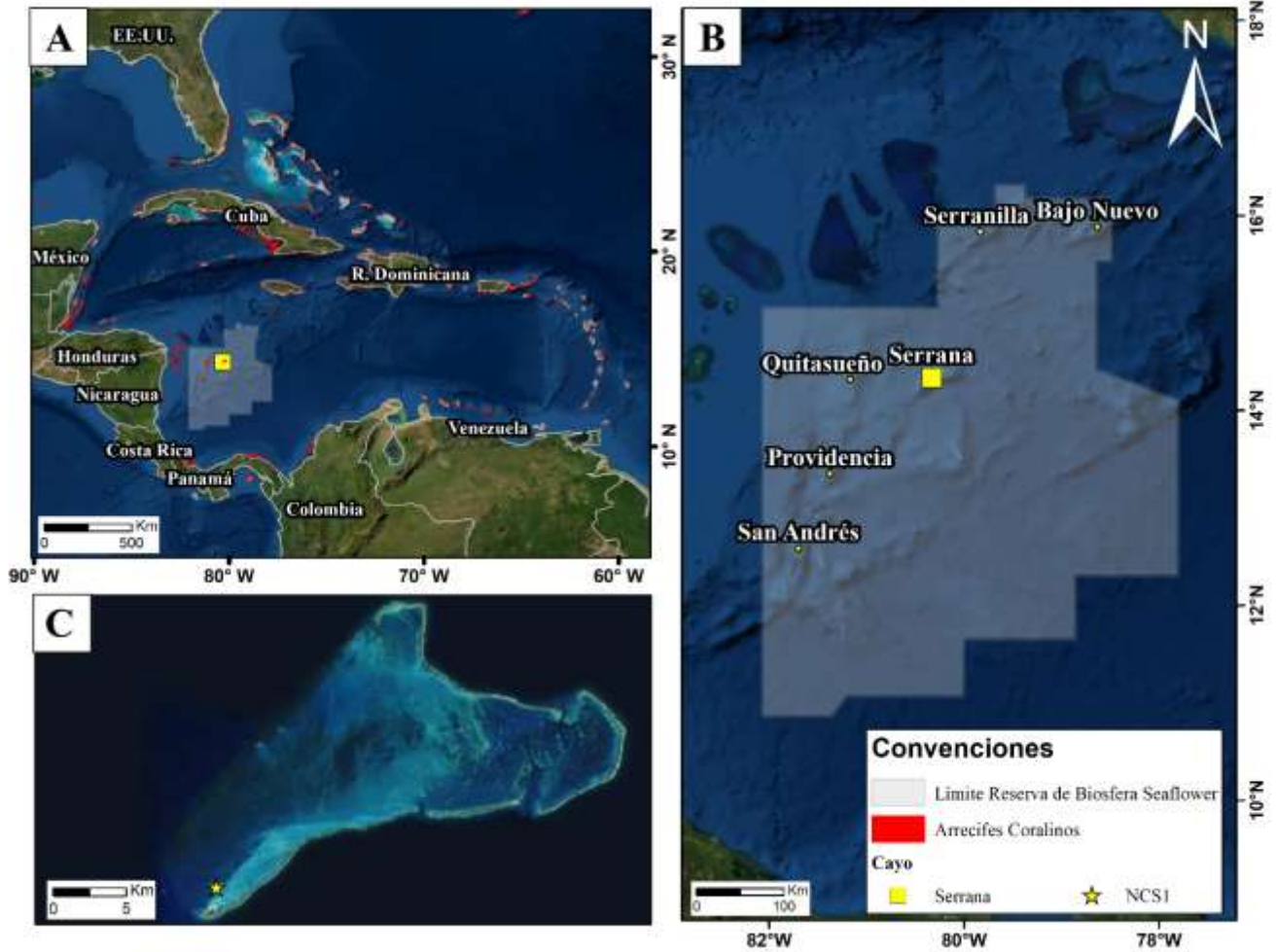
Aunque a menudo las anomalías de las conchas son asociadas a estrés ambiental también es posible asociarlas a una fuerte hidrodinámica, que genera traumas mecánicos como cicatrices y contornos irregulares y adicionalmente formas extrañas de las conchas, que resultan de la imposibilidad de reconstruirse según la arquitectura original (Bé & Spero, 1981; Geslin et al., 2000). Incluso se ha reportado variaciones en los foraminíferos frente a la presencia de trazas de metales pesados que ocasionan disminución en el tamaño de las conchas, declinación de la diversidad, modificación de las asociaciones, predominio de especies tolerantes u oportunistas, deformaciones como protuberancias, cámaras aberrantes o disposición distorsionada que afectan principalmente a porcelanáceos e hialinos y raramente a aglutinados (Alve, 1995; Bergin et al., 2006; Caruso et al., 2011; Badr-El Din et al., 2019).

Para el Caribe, existen reportes de anomalías en las conchas en regiones como Curazao donde Hofker (1971) encontró que en especímenes de *Triloculina tricarinata* la última cámara no seguía el enrollamiento triloculino si no que crecía a lo largo del eje de la concha asemejándose a las conchas de las *Articulina* spp., por su parte Cottey & Hallock (1988) registraron características degradacionales como la disolución, fragmentación y microperforaciones en *Archaias angulatus* de Key Largo, Florida y La Parguera, Puerto Rico. En esta misma especie junto a especies como *Cyclorbiculina compressa* y *Laevipeneroplis*

*proteus* de los arrecifes de florida, Crevison & Hallock ( 2007) reportan anomalías tales como microperforaciones, biopelículas microbianas, superficies picadas, disolución y anomalías en calcificación (superficies de reparación ) y crecimiento. En conclusión, la identificación, estudio y registro de estas variaciones ecofenotípicas pueden contribuir a la evaluación de los impactos ambientales a largo plazo en áreas costeras (Bergin et al., 2006; H. L. Souder, 2009) al igual que a las interpretaciones ecológicas de este (Boltovskoy et al., 1991)

### **3. Zona de Estudio**

El atolón de Cayo Serrana (*figura 8*) se encuentra localizado a los 14° 34' N y 80° 16' W (Geister & Díaz, 2007), en la reserva de Biósfera Seaflower (CCO, 2015), aproximadamente a 150 km al NE de Providencia (Geister & Díaz, 1997). De acuerdo a Díaz et al. (2000) presenta una morfología triangular-ameboide con un área emergida de 0.3 km<sup>2</sup> y un área ocupada por formaciones coralinas de 74.4 km<sup>2</sup>. Alcanzando una profundidad máxima de 1400 m y midiendo 37 km en dirección NNW - SSW y 30 km en sentido SW - NW, rodeado por un arrecife periférico con una longitud mayor a 50 km, encerrando una cuenca lagunar por el N, E y S, además al W se encuentra comunicado con mar abierto (Díaz et al., 1996; Invemar-Geo, 2016).

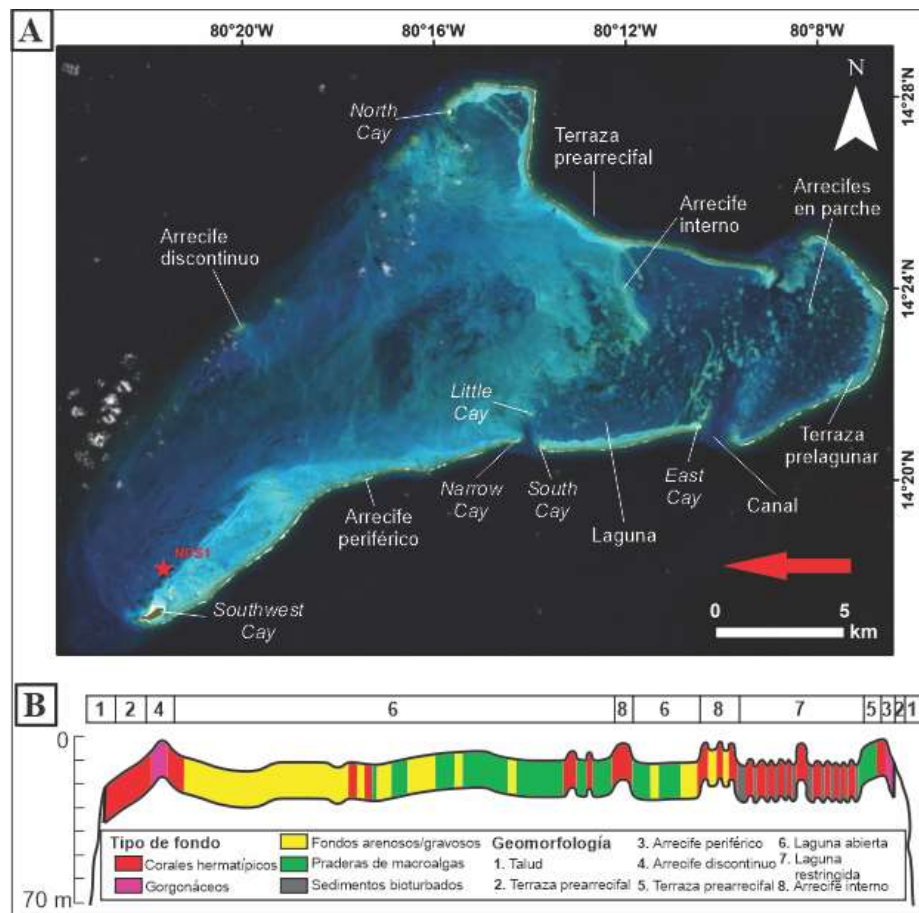


**Figura 8.** Localización zona de estudio. **A.** Contexto regional **B.** Archipiélago de San Andrés y Providencia y cayos del norte **C.** Cayo Serrana y localización de la extracción del núcleo NCS1.

Cayo Serrana se conforma de 6 cayos menores, de los cuales Southwest Cay es el único con vegetación arbustiva, además está constituido por: a) una terraza prearrecifal de sotavento y una terraza prearrecifal de barlovento que se extiende de 1- 1,5km entre el arrecife periférico y el margen exterior de la plataforma del banco; b) un arrecife periférico que bordea el



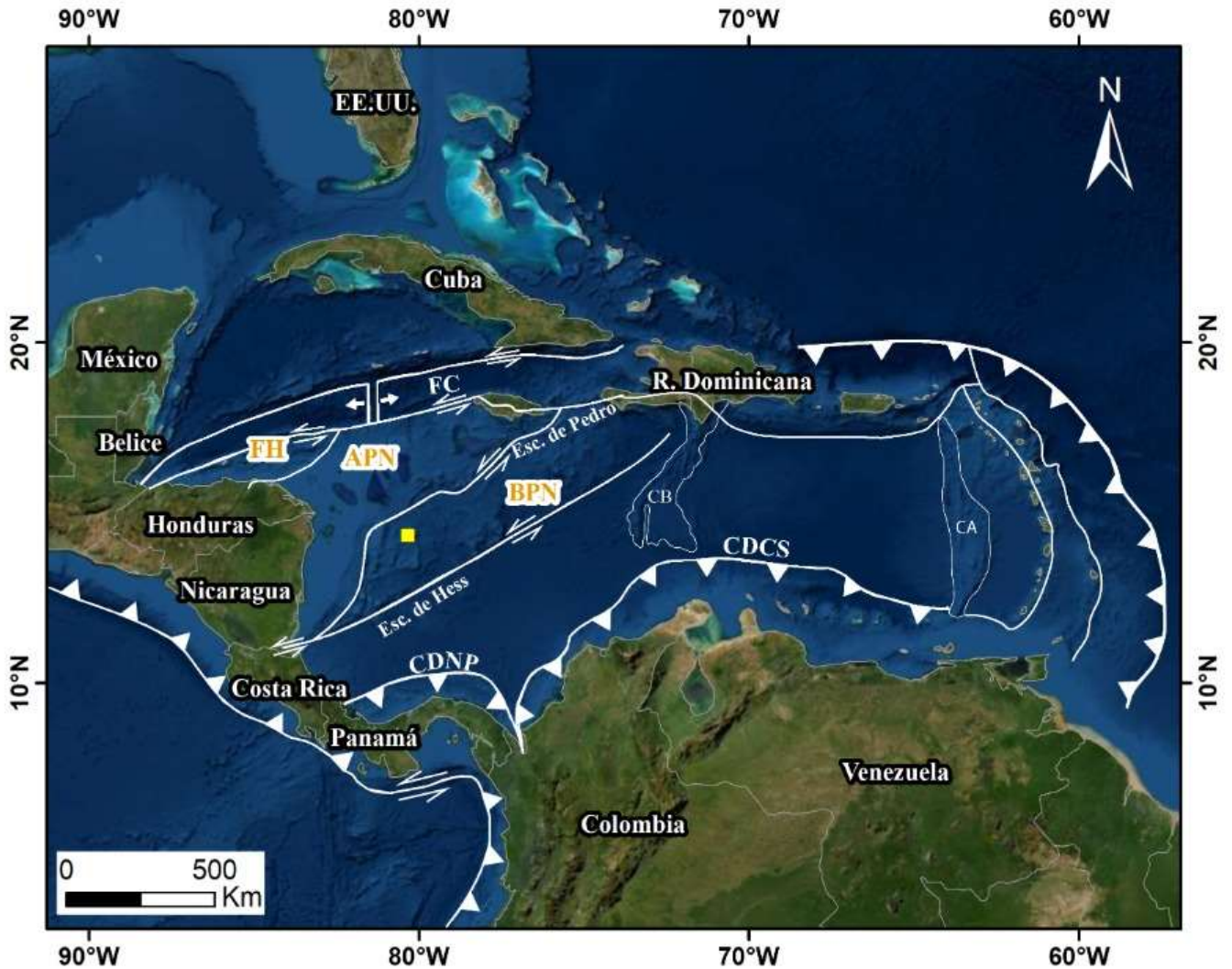
margen interno de la plataforma, interrumpido por 3 canales; c) una terraza lagunar y una laguna ( Díaz et al., 1996) (*Figura 9*). La zona lagunar se divide en 2 sectores, un sector oriental y un sector occidental que presenta amplias llanuras arenosas con pocos arrecifes de parche (Geister & Díaz, 2007), cuya extensión es de 237,1 km<sup>2</sup> representando el 74% del área total del atolón con una profundidad promedio de 12 m, superando localmente los 20 m, la cual presenta niveles altos de exposición al oleaje según la clasificación de fauna hermatípica de Geister (1977), con fondos de arena bioturbados, no bioturbados, fondos de escombros coralinos y vegetados por algas (Díaz, 2005).



**Figura 9.** Mapa geomorfológico de Serrana. **A.** Principales características geomorfológicas del atolón Cayo Serrana **B.** Perfil del atolón con orientación W-E ilustrando las comunidades ecológicas presentes. Tomado de Bernal - Garzón (2021).

### 3.1. Marco Geológico

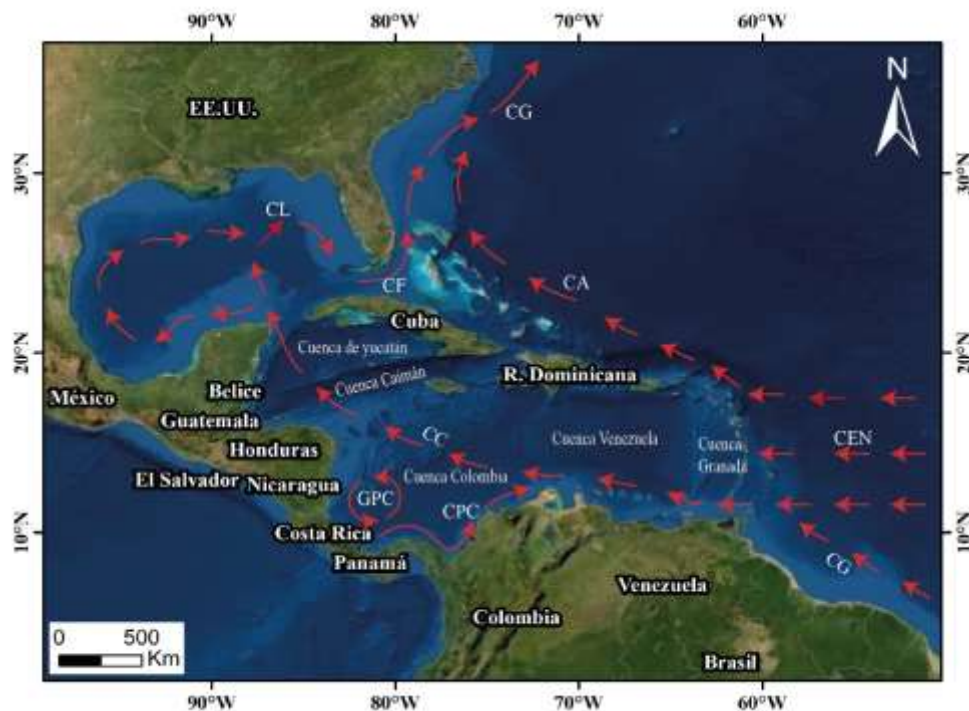
Cayo Serrana corresponde a una de las porciones emergidas de la cadena de edificios volcánicos que se extiende por el lecho marino del Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina, perteneciendo a la Provincia Volcánica Noroccidental del Caribe, la cual se compone de una corteza oceánica afectada por vulcanismo e intercalada por corteza continental (Promontorio Superior de Nicaragua) y un bloque subyacente de corteza oceánica (Cuenca de Colombia) como se observa en la *Figura 10* (Idárraga-García et al., 2021). De acuerdo a Munar, (2000) el atolón Serrana se encuentra dentro del promontorio inferior de Nicaragua, el cual es subyacido por un basamento de *plateau* oceánico engrosado de aproximadamente 15-20km de espesor según Mauffret & Leroy (1997); limitado por los escarpes de Hess y Pedro los cuales son paralelos y cuya génesis se atribuye a fallas de rumbo de tipo sinistral de edad Cretácica superior. Al oeste del banco hay presencia de bloques basculados que representan la formación de un sinclinorio con tendencia estructural NE-SW y donde además se ubica el sistema de fallas Serrana afectando con la misma orientación el edificio volcánico (Idárraga-García et al., 2021).



*Figura 10.* Contexto geológico regional del Caribe. El recuadro amarillo indica la localización de estudio. **BPN:** Bajo promontorio de Nicaragua, **APN:** Alto promontorio de Nicaragua. **FH:** Frontera Hondureña. **CDNP:** Cinturón deformado del Norte de Panamá **CDCS:** Cinturón deformado del Caribe Sur, **FC:** Fosa Caimán. **CA:** Cresta Alves. **CB:** Cresta de Beata. Con base en Gómez et al. (2015) y Torrado et al. (2019).

### 3.2 Oceanografía y Climatología regional

El Mar Caribe (*figura 11*), se encuentra rodeado por las masas continentales de América del Sur y América Central, está separado del Océano Atlántico por las dorsales asociadas al Arco de las Antillas (Andrade, 2001). La topografía de su fondo marino se divide en cinco cuencas: Granada, Venezuela, Colombia, Caimán y Yucatán (Lozano-Duque et al., 2010) como se observa en la *figura 11*. Presenta una diferenciación entre los sectores suroccidental y nororiental debido a las interacciones océano – atmósfera cuando hay predominancia de los vientos alisios del nororiente (Bernal et al., 2006). El sector suroccidental se caracteriza por presentar condiciones típicas de mares tropicales, este se extiende desde el Golfo de Urabá en límites con Panamá hasta la desembocadura del Río Magdalena, incluyendo la zona del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Lozano-Duque et al., 2010). Sus aguas presentan temperaturas que oscilan en promedio entre 26,8 °C y 30,2 °C con una salinidad de 34 y 36,3 ‰.



**Figura 11.** Cuencas del Caribe y trayectorias de corrientes. **CG:** Corriente de Guyana. **CEN:** Corriente Ecuatorial del Norte. **CA:** Corriente de las Antillas. **CF:** Corriente de la Florida. **CG:** Corriente del Golfo. **GPC:** Giro Panamá Colombia. **CPC:** Contracorriente Panamá Colombia. **CC:** Corriente del Caribe. **CL:** Corriente Lazo Tomado y modificado Wüst, (1964); Morrison & Nowlin (1982) y Lozano-Duque et al. (2010).

Las corrientes del Mar Caribe hacen parte del sistema de corrientes o giro del Atlántico Norte que está formado principalmente por la Corriente Ecuatorial Norte y la Corriente del Golfo, la primera se une con la corriente de Guyana y posterior a esto hace su camino hacia el Mar Caribe, al llegar a los límites externos de la Cuenca del Mar Caribe se divide en la Corriente de las Antillas y en la Corriente del Caribe; siendo esta última la responsable del transporte de grandes volúmenes de agua; se destaca que la entrada de aguas se realiza a través de varios pasajes ubicados entre las islas que componen el Arco de las Antillas, donde las Antillas Menores actúan como una barrera que impide el libre intercambio de las masas de aguas profundas entre el océano Atlántico y el Mar Caribe pasando únicamente las masas de aguas superficiales e intermedias del océano Atlántico, siendo así los flujos de agua variables a través de cada pasaje (Díaz et al., 1996; IDEAM, 2010)

En cuanto a los agentes climáticos, los principales que afectan la región del Caribe colombiano, según CIOH (2010) son los vientos alisios, los cuales provienen del NW y SE generados a partir del efecto Coriolis. Es así cómo se identifican 4 épocas climáticas en el litoral del Caribe colombiano durante todo el año, las cuales son:

- **Época seca o época de verano (diciembre-marzo):** Durante este periodo predominan los vientos fuertes del sector N-NE y la precipitación es muy escasa.

- **Época de transición (junio-julio) “Veranillo de San Juan”:** Marca el inicio de la temporada de huracanes que se extiende hasta el mes de noviembre, con la presencia de vientos fuertes en dirección N-NW.
- **Época húmeda o época de invierno (abril-junio):** Se origina el inicio del ascenso paulatino de la zona de convergencia intertropical a partir de los 8°N con la reactivación de la zona de baja presión, donde se presenta un régimen de lluvia abundante y vientos débiles provenientes de múltiples direcciones. Algunas veces se evidencia la formación de huracanes o ciclones tropicales los cuales incrementan las precipitaciones en todo el Caribe colombiano.
- **Época húmeda o época de invierno (agosto-noviembre):** Este periodo también presenta el ascenso paulatino de la ZCIT, localizada inicialmente a una latitud de 9°N a partir de la época húmeda de (abril-junio) donde normalmente se generan precipitaciones sobre todo en el litoral Caribe colombiano, con presencia de tormentas eléctricas durante su movilización a la latitud de 10°N hasta los 15°N aproximadamente, generando un evento de baja presión sobre el centro del litoral Caribe produciendo el aumento de las precipitaciones.

## 4. Metodología

### 4.1. Base de datos sobre eventos extremos en la zona de estudio

Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad del Archipiélago de San Andrés y Providencia a eventos extremos como tormentas tropicales, depresiones tropicales y huracanes, se rastrearon en la base de datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) las trayectorias de huracanes y tormentas más cercanos a Cayo Serrana, en un radio de 150 km, que fue utilizado para la zona insular como parámetro en la determinación de la

incidencia de ciclones tropicales según la propuesta metodológica para elaboración del mapa de amenaza de ciclones tropicales para Colombia de UNGRD (2018). Se encontraron un total de 85 eventos (*Anexo 1*), de los cuales sólo fueron considerados aquellos de categoría H4 y H5, obteniéndose un total de 18 huracanes, para los 18 eventos se realizó una búsqueda de información acerca de las condiciones climatológicas dominantes durante su tránsito entre ellas la fase ENOS y la altura de ola promedio máxima registrada por las boyas de la NOAA para las estaciones más próximas a la zona de estudio (*42057 - Western Caribbean - 195 NM WSW of Negril, Jamaica* y la estación *42058 - Central Caribbean - 210 NM SSE of Kingston, Jamaica*42058 - Central Caribbean).

#### **4.2. Extracción y muestreo núcleo NCS1**

La extracción del núcleo NCS1 se llevó a cabo por parte de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín durante la Expedición Seaflower realizada del 18 al 27 de agosto de 2016 en la isla Cayo Serrana. La extracción se realizó a partir de un *Piston Core* elaborado por el grupo de investigación OCEÁNICOS de dicha Universidad. Se extrajeron los núcleos NCS1 Y NCS2, siendo NCS1 el objeto de estudio para el desarrollo del presente trabajo. El NCS1, de 82 cm de longitud, se extrajo a 10,1m de profundidad en la zona lagunar del cayo (N14° 18' 07,5'' W 80° 21' 36,1''9). El núcleo fue muestreado cada dos centímetros para un total de 40 muestras con el objetivo de tener una buena resolución en los análisis.

#### **4.3. Granulometría**

Se realizaron análisis granulométricos para las 40 muestras del núcleo NCS1. Cada muestra se subdividió en las fracciones: >2000µm, 2000-1000µm, 1000-500µm, 500-250µm, 250-125µm, 125-63µm y <63 µm. Además, se realizó el método estadístico de los momentos

(Folk, 1974). El peso inicial seco fue proporcionado por la Universidad Nacional de Medellín y el peso final tamizado fue obtenido en la balanza de precisión del Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES). Los parámetros calculados fueron la media, la desviación estándar, la kurtosis y asimetría. Los cuales se categorizaron de acuerdo a Wentworth (1922), Folk & Ward (1957) y Folk (1974).

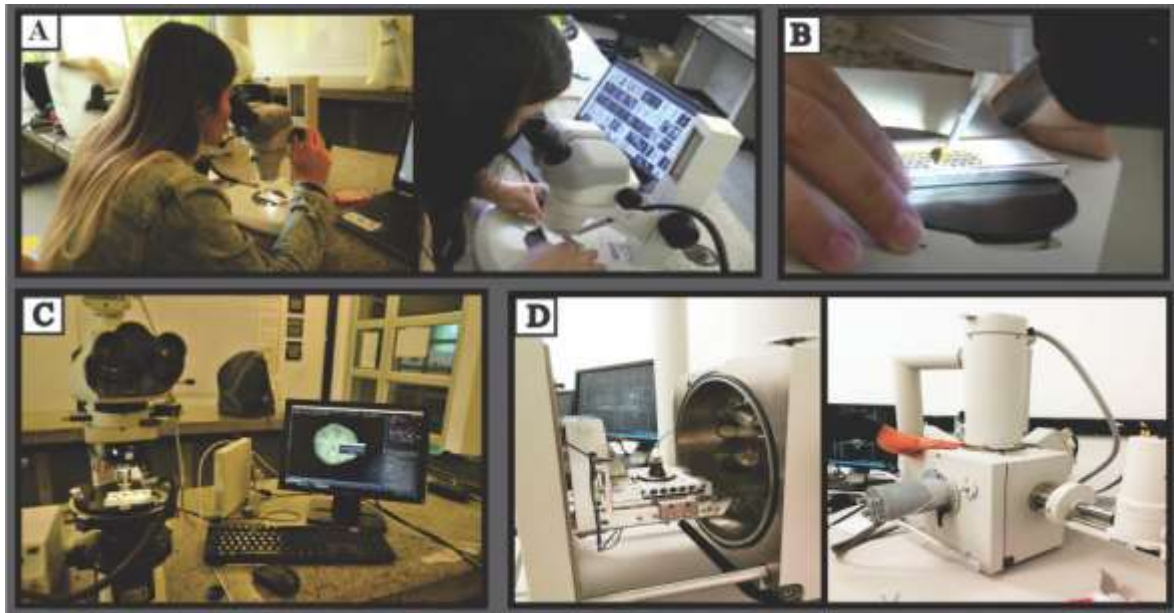
#### 4.4. Selección y clasificación de foraminíferos

El proceso de selección de foraminíferos se realizó bajo una lupa binocular Nikon SMZ64, a partir de la fracción  $>2000 \mu\text{m}$  hasta la fracción  $250-125 \mu\text{m}$  (*figura 12A*) las fracciones  $125-63 \mu\text{m}$  y  $<63 \mu\text{m}$  no fueron consideradas debido a que en esas fracciones los foraminíferos pueden estar en sus etapas juveniles lo que dificulta su clasificación taxonómica. Se extrajo un mínimo de 300 foraminíferos por muestra, con dicha cantidad se intentó representar un valor óptimo de especímenes necesarios para una interpretación confiable de las proporciones de las especies, reduciendo con ello la probabilidad de ignorar alguna de las especies a menos de un  $3,0 \times 10^{-5}\%$ . (Fatela & Taborda, 2002). La cantidad de foraminíferos extraídos para cada fracción de una muestra fue diferente, ya que en las fracciones  $>2000 \mu\text{m}$  y de  $2000-1000 \mu\text{m}$  se extrajo el total de foraminíferos presentes y para las fracciones restantes, se cuarteaba el sedimento y se distribuía la cantidad de individuos faltantes para completar los 300 de acuerdo al peso de sedimento de cada una de estas.

Los foraminíferos extraídos fueron organizados para cada fracción en placas micropaleontológicas (*figura 12B*), de acuerdo al género y especie según las características morfológicas tales como enrollamiento, ornamentación, número de cámaras, así como el tipo de pared y abertura. Aquellos especímenes cuyas características morfológicas eran de difícil distinción bajo la lupa binocular debido al tamaño pequeño y/o la disolución y



retrabajamiento de su concha, fueron dispuestos para la toma de micrografías en foco extendido con el microscopio de luz polarizada Nikon Eclipse IV100N POL mediante el software NIS-Elements (*figura 12C*) y adicionalmente fueron enviados para la obtención de imágenes utilizando el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) (*figura 12D*). La clasificación de taxonómica de los foraminíferos se hizo mediante el uso de bibliografía como Bermudez, 1952; Carman, 1933; Cushman, 1922, 1929, 1930, 1946; Debenay, 2012; Hofker, 1969, 1971; Holbourn et al., 2013; Javaux & Scott, 2003; Loeblich et al., 1964a, 1964b; Seiglie & Bermúdez, 1965; Triffleman et al., 1991, además del uso de catálogos digitales del registro de especies tales como *Foraminifera eu* y *WoRMS Editorial Board*.



**Figura 12.** Metodología aplicada en la investigación. **A.** Extracción de microfauna bentónica. **B.** Ubicación en placas micropaleontológicas. **C.** Toma de micrografías en foco extendido. **D.** Adquisición de imágenes al MEB.

#### 4.5. Diagrama ternario de ambiente según a la estructura de la pared

Con el fin de determinar cómo responden las asociaciones de los foraminíferos extraídos a las condiciones del entorno en base al tipo de concha, se plotearon los porcentajes de los 3 tipos de paredes (hialino, porcelanáceo y aglutinado) para cada muestra en un diagrama ternario (Culver, 1993; Armstrong & Brasier, 2005) en el programa PAST v 4,03.

#### 4.6. Determinación del índice de diversidad de Shannon-Weaver (H')

La diversidad puede variar por dos razones, ya sea el aumento de la riqueza de especies y/o la abundancia relativa de éstas (Carmona-Galindo & Carmona, 2013). La estimación de la diversidad en el núcleo NCS1 se efectuó mediante el índice de Shannon-Weaver (H') en el programa PAST v 4,03 (Hammer et al., 2001), a partir de la fórmula:

$$H = - \sum \frac{n_i}{n} \ln \frac{n_i}{n}$$

Dónde  $n_i$  representa el número de individuos en cada muestra y  $n$  el número de individuos total.

El índice de Shannon-Weaver (H') es un índice que evalúa la equitatividad de la diversidad, es decir, tiene en cuenta la abundancia de cada especie y qué tan uniforme es la distribución de dichas abundancias en las muestras. Asume que todas las especies están representadas en las muestras. Este índice puede adquirir valores entre cero (0) cuando hay una sola especie y  $\ln(S)$  -S= número de especies-, cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (Villarreal et al., 2004).

#### 4.7. Deformación en foraminíferos

Para la identificación de las conchas deformadas se realizó el conteo y la distinción cualitativa del tipo de deformaciones existentes de forma visual en las fracciones  $>2000 \mu\text{m}$ ,  $2000 \mu\text{m}-1000 \mu\text{m}$ ,  $1000 \mu\text{m}-500 \mu\text{m}$  y  $500 \mu\text{m}-250 \mu\text{m}$ . Los géneros que se tuvieron en cuenta para este análisis son: *Archaias*, *Cyclorbiculina* y *Laevipeneroplis*. Las deformaciones analizadas se basaron en Souder et al. (2010), en el que se distinguen y se categorizan las anomalías superficiales y físicas de la concha de *Archaias angulatus*. Para la evaluación de las deformaciones encontradas en el núcleo, se tuvieron en cuenta únicamente las 7 anomalías físicas descritas en Souder et al.(2010), las cuales son: 1) estructura profundamente deformada, 2) curvamiento, 3) asimetría, 4) desenrollamiento, 5) líneas de suturas irregulares, 6) protuberancias superficiales y 7) superficies de partición y reparación.

#### 4.8. Análisis de datos

Se realizó un diagrama de las abundancias relativas de las especies con un porcentaje de abundancia  $> 1\%$  en el programa Psimpoll v 4.27 (Bennett, 2009), además los diferentes análisis se realizaron en el software R v 4.0.2 (R Core Team, 2020). Para evaluar el grado de asociación entre las variables se usó una matriz de correlación utilizando el coeficiente de correlación de Spearman en el paquete “corrplot” (Wei & Simko, 2021). Posteriormente, teniendo en cuenta el coeficiente de correlación ( $r > 0.4$ ) y la significancia de las correlaciones ( $p < 0.05$ ), se realizaron Modelos Aditivos Generalizados (GAM, por sus siglas en inglés) en el paquete “mgcv” (Wood, 2011). Estos modelos permitieron evaluar la relación de la granulometría de los sedimentos con cuatro variables (abundancia total,

diversidad, abundancia de fragmentos y abundancia de deformaciones). En los modelos, los parámetros de media y desviación estándar se utilizaron como variables predictoras. La significancia y el porcentaje de varianza de los modelos se determinaron a partir del valor  $p$  ( $< 0.05$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los modelos se validaron a través de análisis gráfico. Los gráficos Q – Q comparan los residuos del modelo con una distribución normal. Los residuos de un modelo bien ajustado estarán cerca de una línea recta. La forma del histograma de residuos se aproximará a una campana simétrica. En el gráfico de residuales los valores se deben distribuir uniformemente alrededor del cero. Por último, en el gráfico de respuesta contra valores ajustados, el modelo perfecto formaría una línea recta. Se espera que el patrón en los modelos se agrupe alrededor de la línea (Wood, 2011) (*anexo 2*).

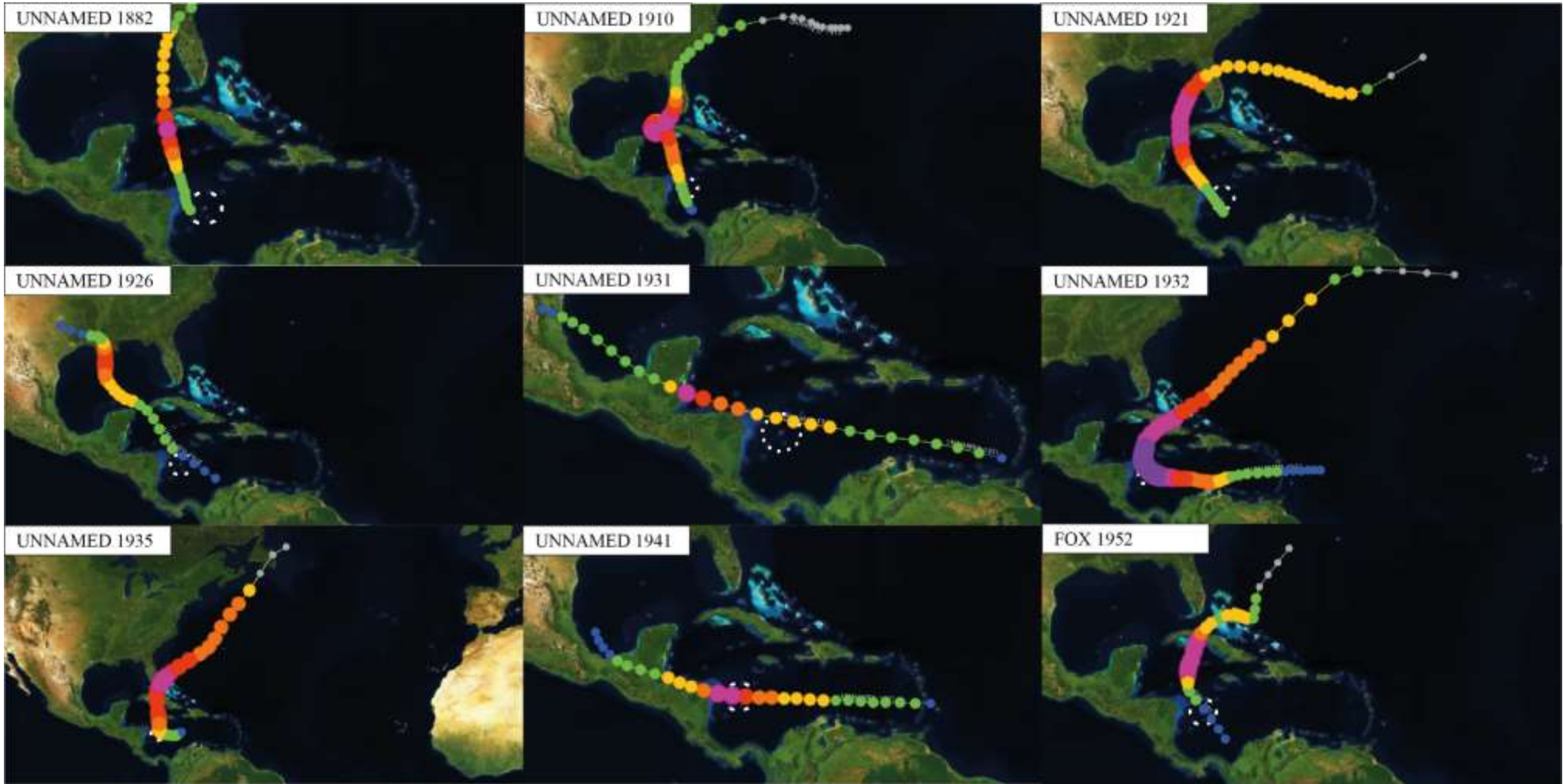
## **5. Resultados**

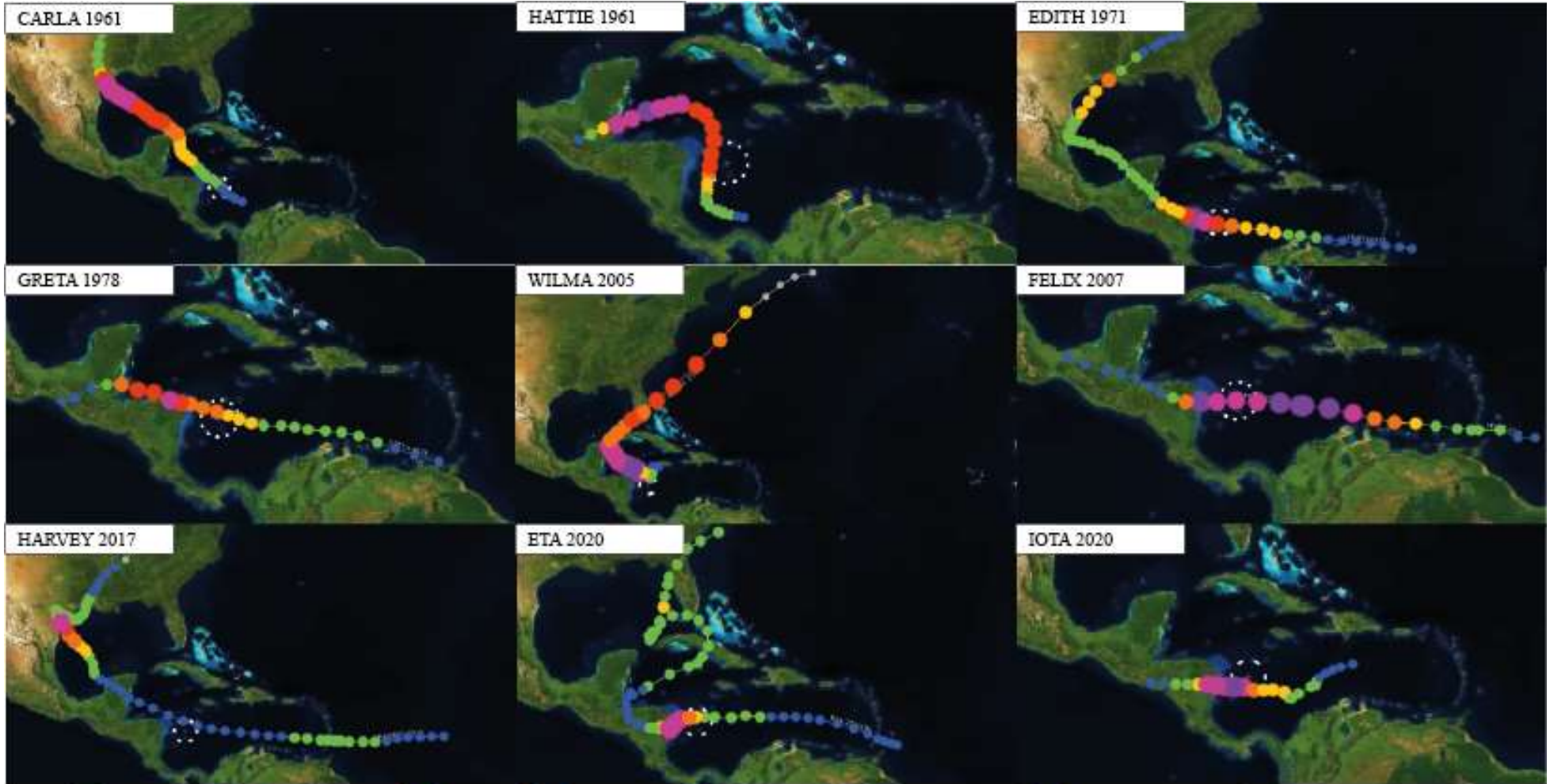
### **5.1. Eventos extremos en el área de estudio.**

La tabla 2 se enumera 18 huracanes históricos que han transitado cerca de Cayo Serrana, ocho de ellos se originaron en el trimestre de agosto-octubre y los otros diez en el trimestre de septiembre-noviembre en condiciones meteorológicas normales o Niña (ENOS).

**Tabla 2.** Eventos históricos de huracanes de categoría 4 y 5 que han influido en el área cercana a Cayo Serrana.

No.	Evento	Max. Velocidad del viento	Min. presión	Max. Categoría	Altura máx. de ola. (m)	Inicio y finalización del evento	Días de duración	Observaciones
1	UNNAMED 1882	120	-1	H4	-	05/10/1882 a 15/10/1882	10	-
2	UNNAMED 1910	130	924	H4	-	09/10/1910 a 23/10/1910	14	-
3	UNNAMED 1921	120	941	H4	-	20/10/1921 a 30/10/1921	10	-
4	UNNAMED 1926	130	934	H4	-	14/10/1926 a 28/10/1926	14	-
5	UNNAMED 1931	115	-1	H4	-	06/09/1931 a 13/09/1931	7	-
6	UNNAMED 1932	150	918	H5	-	30/10/1932 a 14/11/1932	15	-
7	UNNAMED 1935	120	955	H4	-	23/09/1935 a 02/10/1935	9	-
8	UNNAMED 1941	115	-1	H4	-	23/09/1941 a 30/09/1941	7	-
9	FOX 1952	125	934	H4	-	20/10/1952 a 28/10/1952	8	Fase ENOS en transición
10	CARLA 1961	125	927	H4	-	03/09/1961 a 18/09/1961	15	Fase ENOS en transición
11	HATTIE 1961	145	914	H5	-	26/10/1961 a 01/10/1961	6	Fase ENOS en transición
12	EDITH 1971	140	943	H5	-	05/09/1971 a 18/09/1971	13	Fase ENOS niña
13	GRETA 1978	115	947	H4	-	13/09/1978 a 20/09/1978	7	Fase ENOS en transición
14	WILMA 2005	160	882	H5	-	15/10/2005 a 26/10/2005	11	Fase ENOS en transición
15	FELIX 2007	150	929	H5	-	31/08/2007 a 06/09/2007	6	Fase ENOS niña
16	HARVEY 2017	115	937	H4	1,60 (estación 42057) 2,97 (estación 42058)	16/08/2017 a 02/09/2017	17	Fase ENOS niña
17	ETA 2020	130	923	H4	3,78 (estación 42057)	29/10/2020 a 13/10/2020	15	Fase ENOS niña
18	IOTA 2020	130	917	H5	4,01 (estación 42057)	12/11/2020 a 18/10/2020	6	Fase ENOS niña





Categoría 5
  Categoría 4
  Categoría 3
  Categoría 2
  Categoría 1
  Tormenta tropical
  Depresión tropical
  Tormenta extratropical

**Figura 13.** Trayectoria de huracanes con paso cercano a Cayo Serrana. El círculo blanco de línea punteada representa el radio tomado de referencia (150 km). Tomado y modificado de: NOAA (2021).

Los 18 eventos de categorías H4 y H5 tenían trayectoria cercana a Cayo Serrana (*Figura 13*). De los 8 eventos iniciales no fue posible conseguir información. El huracán Fox en 1952 fue catalogado como el último huracán de esa temporada y el más severo, se desarrolló a partir de una perturbación en la ZCIT al occidente del Mar Caribe norte, pasando por Cuba, Bahamas y Bermuda ocasionando daños materiales a su paso (Norton, 1953). El huracán Carla del año 1961 golpeó la costa de Texas en Port O'Connor, afectando la bahía de Red Fish causando efectos erosivos debido al movimiento del agua (Oppenheimer, 1964), además fue catalogado como un huracán grande e inusual reflejando variaciones en la presión superficial registradas a lo largo de su trayectoria irregular (Jordan, 1966). Adicionalmente en la Isla Padre, al sur de la costa del Golfo de Texas, el oleaje de la tormenta arrancó varios materiales del fondo como fragmentos de roca, macroinvertebrados y bloques de coral desde profundidades de los 15 a 20 metros transportándolos a la playa y eliminando un cinturón de dunas, redepositando parte del material en la región de la laguna al lado oeste de la isla (Hodge et al., 2018). El huracán Hattie también del año 1961 de acuerdo con Ortiz (2012), se encuentra entre los 7 eventos más significativos del Caribe colombiano hasta el 2010, estando a 60,1 km de la costa de San Andrés y presentando vientos de 101,1km/h, afectando principalmente los cayos y arrecifes de las Honduras Británicas; el grado de deterioro de los arrecifes producto de este evento fue muy variable para la zona del arrecife de Lighthouse, donde se reflejaron los mayores daños en la sección del arrecife con tendencia E-W, mientras que hacía el norte del Cayo Mauger se registraron daños en la cresta del arrecife y la parte superior del talud hacia al mar (Stoddart, 1963).

El huracán Edith de 1971, se convirtió en huracán al suroeste del Mar Caribe, generando mayores estragos en Honduras y Nicaragua, dejando 28 muertos y 2000 personas sin hogar



(Pardue & Hope, 1972), por tal razón fue catalogado como el huracán más severo de la temporada, siendo anómalo en diversas formas por su tamaño pequeño, gran furia y por desarrollarse más al SE que la mayoría de huracanes de la temporada de septiembre de ese año (Simpson & Hope, 1972).

El ojo del huracán Greta en 1978 cruzó sobre el extremo de la costa NE de Honduras durante el tiempo de máxima intensidad (Lawrence, 1979). La mayor furia de los vientos de Greta fue evidente por el número de árboles derribados a lo largo de la costa NE de Honduras y cerca al punto de llegada a tierra de Belice (Pelissier & Lawrence, 1979).

El huracán Wilma en el año 2005, afectó la zona de Cozumel, Cancún y la Península de Yucatán, teniendo un diámetro de 700 km y ráfagas de vientos de hasta 280 km/h (Oswald, 2012). Este huracán afectó la línea de costa de la laguna arrecifal de Puerto Morales y destruyó por completo una franja de 10-60 m de ancho de pastos marinos, generando la remoción y depositación de sedimento a una escala pequeña (metros) (van Tussenbroek et al., 2008).

El huracán Félix del año 2007 fue el único del cual se tiene registro que dirigió su trayectoria hacia los bancos de Serrana y Quitasueño, azotándolos con vientos huracanados de 160 millas mientras presentaba una categoría 4 y finalmente afectando las costas nicaragüenses al alcanzar categoría 5 (CIOH, 2007)

El huracán Harvey en 2017, se formó como tormenta tropical en el Océano Atlántico en Agosto del 2017, siendo un huracán significativo en términos de tamaño y velocidad del viento (van Oldenborgh et al., 2018). La tormenta se estancó con su centro sobre y cerca de

la costa de Texas durante cuatro días, dejando caer cantidades históricas de lluvia de más de 152,4 cm en el sureste de Texas (Blake & Zelinsky, 2018).

Los huracanes ETA e IOTA a pesar de ser posteriores a la extracción del núcleo fueron considerados debido a que proveen información sobre los efectos de este tipo de eventos. Corresponden a las tormentas más potentes del 2020 y la tercera y segunda más fuertes en el registro de tormentas de noviembre para el Atlántico (Shultz et al., 2021), dejando al menos 6,8 millones de personas afectadas (Unicef, 2020). Ambas tormentas asolaron Centroamérica con vientos de velocidad récord, lluvias torrenciales y desprendimientos de tierra desastrosos (Uddin et al., 2021), que causaron daños al estado de conservación de los sistemas boscosos (Bello & Peralta, 2021). Los fuertes vientos de IOTA en su paso por Providencia ocasionaron mortalidad en la vegetación por el desprendimiento y pérdida del follaje, además de cambios en la dinámica de los manglares y la posible salinización de suelos (HUMBOLT, 2021). Durante su paso los vientos alcanzaron velocidades de 22,8 m/s en un periodo menor a 12 horas. Adicionalmente se registró un incremento en el oleaje superior a 4 metros a su paso por Providencia, ocasionando efectos catastróficos sobre los ecosistemas y la infraestructura de las islas así como en áreas someras de coral donde se presentaron volcamientos, derrumbes, fracturas y desprendimiento de algunas colonias coralinas (INVEMAR, 2021).

## **5.2. Granulometría del núcleo NCS1.**

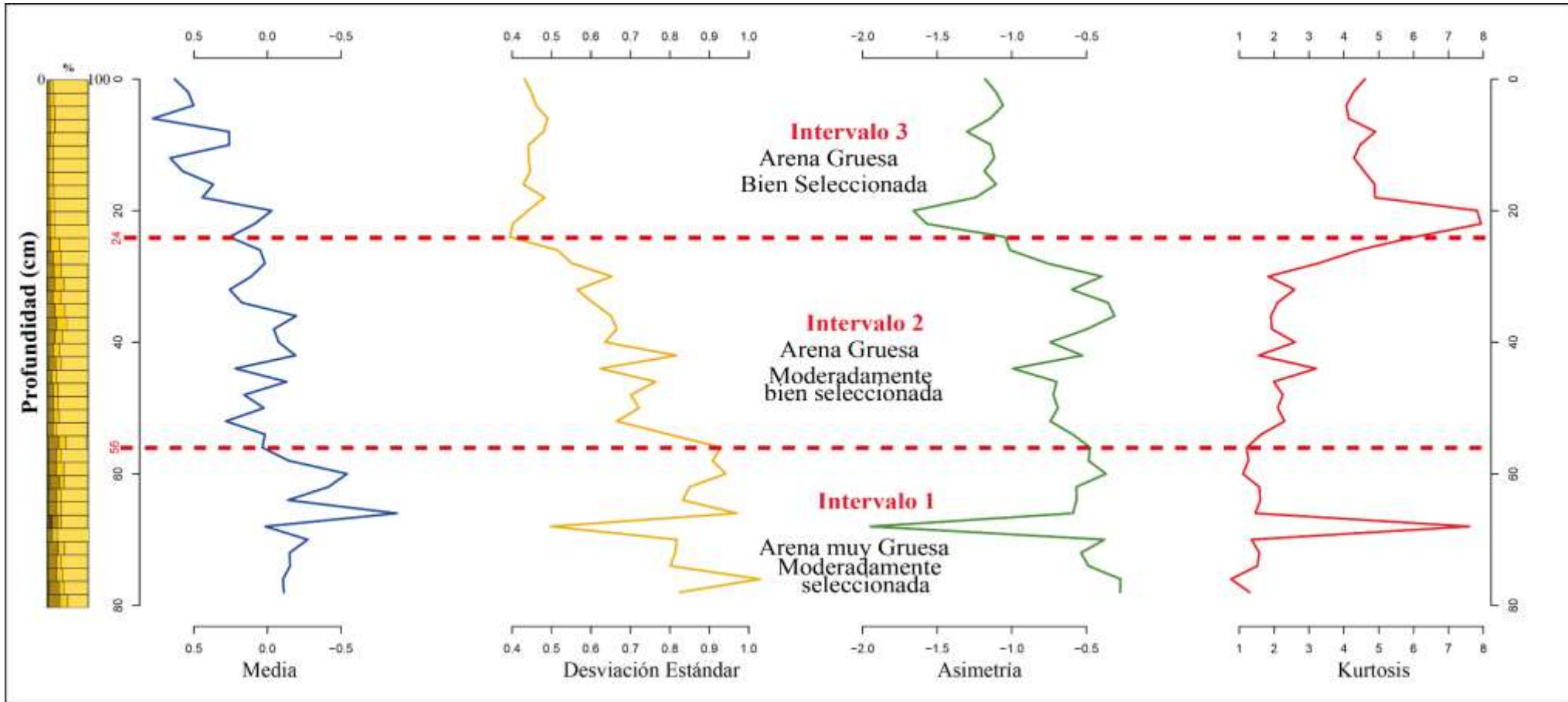
De acuerdo a las características granulométricas obtenidas para el núcleo NCS1 (*figura 14*) se realizó la distinción y subdivisión en 3 intervalos de base a techo como se enlista a continuación:

**Intervalo 1:** definido entre los 80 hasta los 56 cm del núcleo, constituida por arenas muy gruesas, moderadamente seleccionadas con distribución del tamaño de grano hacia lo grueso. Entre los centímetros 66-68 se observa un pico que puede estar ligado a la presencia de un fragmento de coral que excede el tamaño promedio de grano en comparación a todo el núcleo.

**Intervalo 2:** definido entre el centímetro 56 hasta el centímetro 24 del núcleo, se constituye mayoritariamente por arenas gruesas, presentando variaciones en el tamaño de grano como lo es el caso de un paquete de arena muy gruesa comprendido entre 34 – 46 cm, dichas variaciones en los tamaños de grano permite la categorización de la selección de la capa en moderadamente bien seleccionada.

**Intervalo 3:** establecido de 24 a 0 cm, el cual está constituido por un tamaño de grano uniforme de arena gruesa de buena selección.

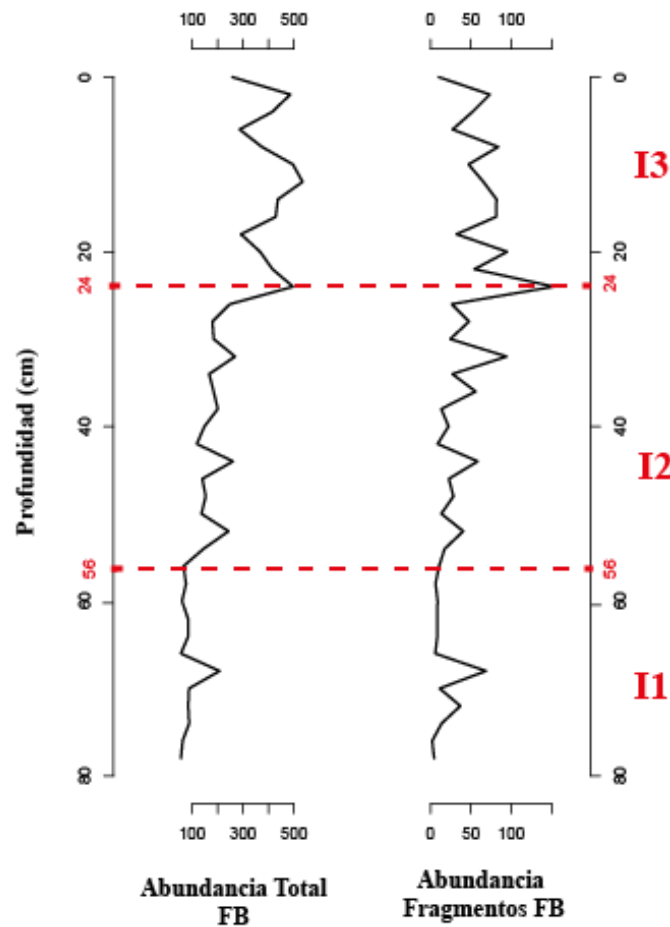
Los análisis de bimodalidad (*anexo 3*) mostraron que en el núcleo se presenta una fluctuación entre la unimodalidad y bimodalidad, siendo esta última más marcada en el intervalo 2 del núcleo. Dicho intervalo desde los 56 hasta 42 cm presenta una unimodalidad marcada y a partir del centímetro 40 el comportamiento es poco distinguible y variable.



**Figura 14.** Parámetros granulométricos del núcleo NCS1. La figura muestra las variaciones presentadas a lo largo del núcleo obtenidas mediante la estadística de parámetros como la media, desviación estándar, asimetría, kurtosis.

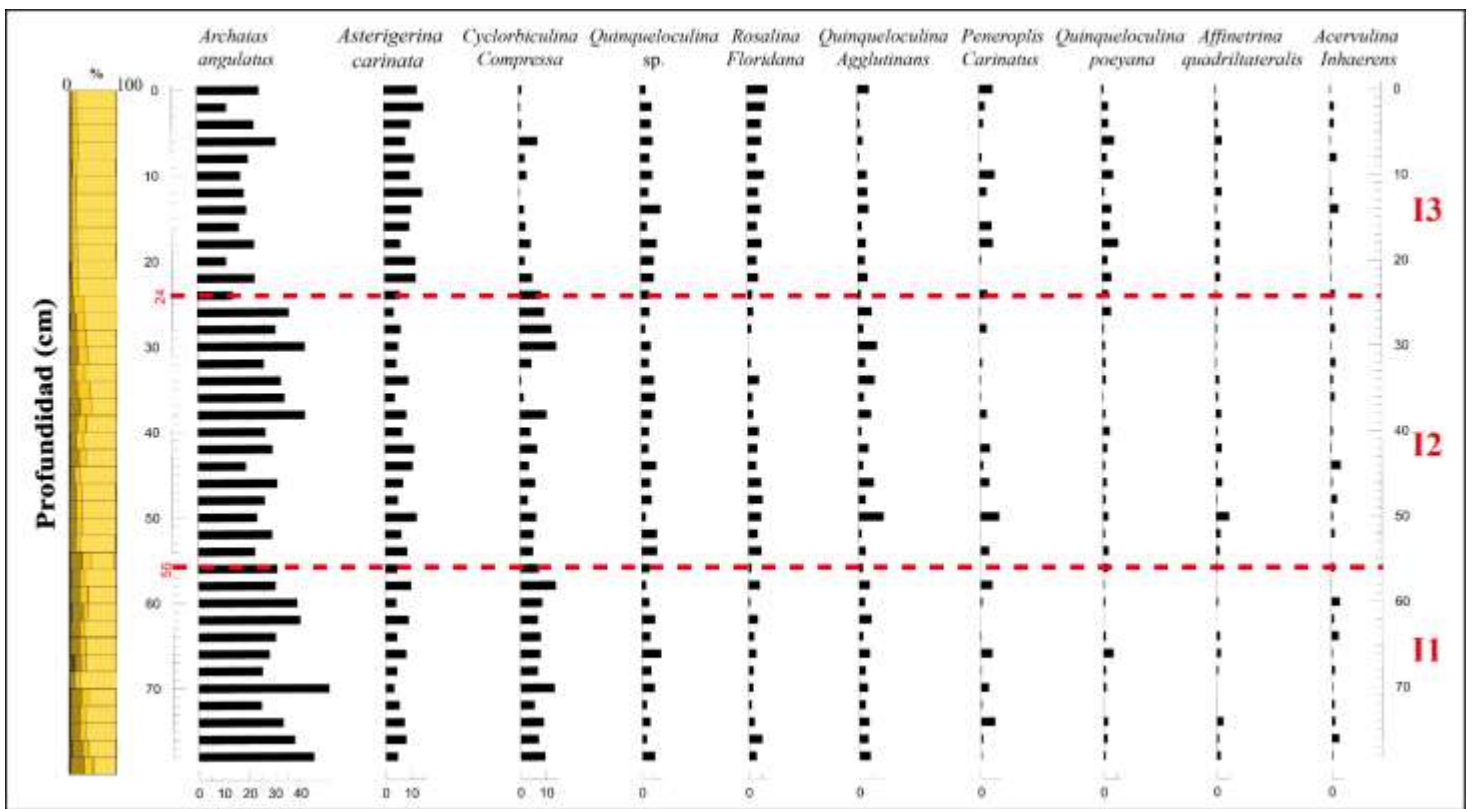
### 5.3. Análisis de foraminíferos

Se contabilizaron un total de 12.504 foraminíferos del núcleo NCS1 representado 79 géneros, 6 de estos géneros corresponden a foraminíferos planctónicos y 73 a foraminíferos bentónicos (*anexo 4*). La abundancia total muestra valores mayores hacia el tercer intervalo y los menores hacia el primer intervalo, reflejando una proporcionalidad con la gráfica de la abundancia de fragmentos como se ilustra en la *figura 15*, los cuales se encuentran en altos valores al igual que la presencia de especímenes con corrosión y disolución a lo largo de todo el núcleo, encontrándose incluso en una misma muestra foraminíferos con distintos grados de preservación.

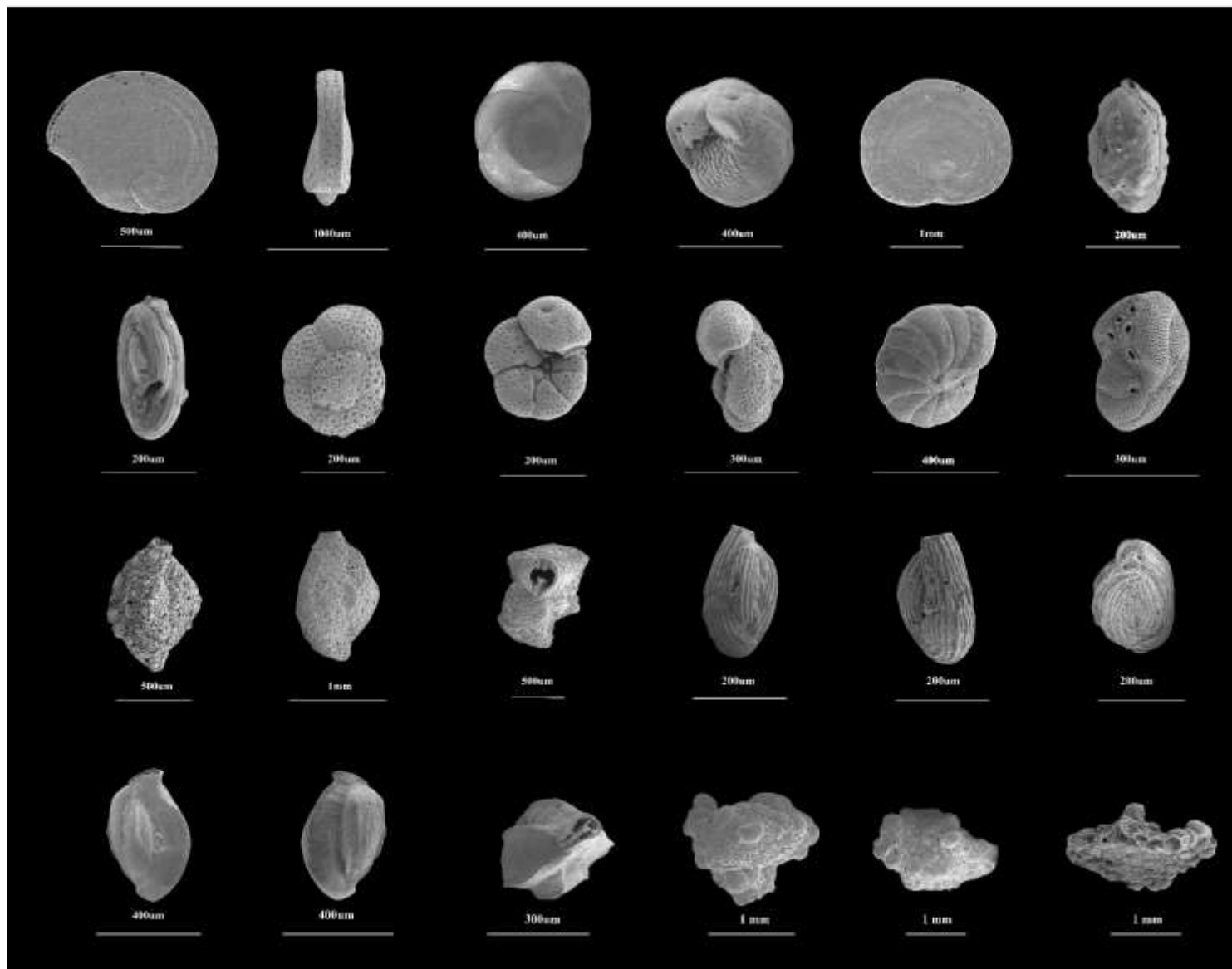


*Figura 15.* Distribución de los parámetros de abundancia y fragmentación de los foraminíferos bentónicos a lo largo del núcleo NSC1

Las especies dominantes fueron elegidas a partir del 1% de abundancia, obteniéndose así 10 especies las cuales son: *Archaias angulatus* (27,9%), *Asterigerina carinata* (8,2%), *Cyclorbiculina compressa* (6%), *Quinqueloculina* sp (4%), *Rosalina floridana* (3,6%), *Quinqueloculina agglutinans* (3,3%) y en menor porcentaje *Peneroplis carinatus* (2,00%), *Quinqueloculina poeyana* (1,8%), *Affinetrina Quadrilateralis* (1,2%) y *Acervulina inhaerens* (1,18%) como se identifica en la figura 16.

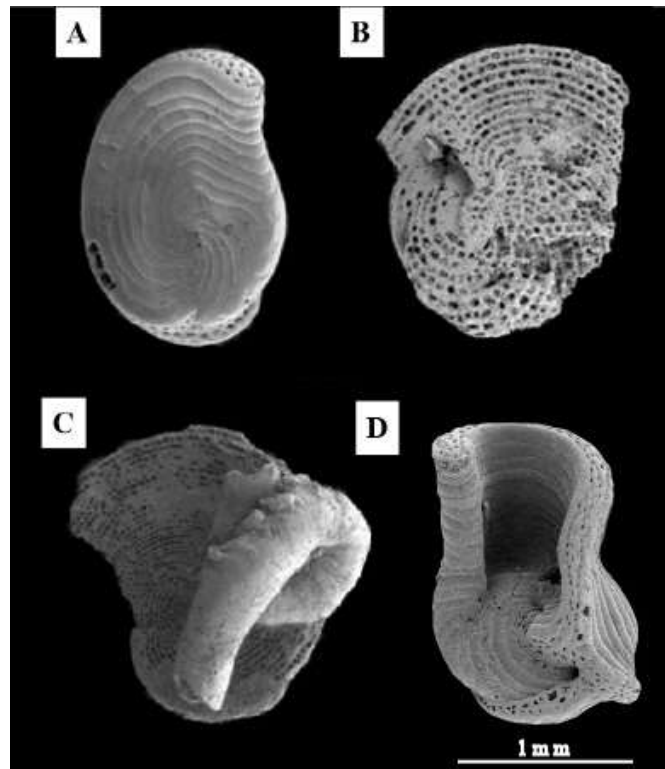


**Figura 16.** Abudancia porcentual de los foraminiferos bentónicos dominantes en el NCS1 vs. la litología.



*Figura 17.* Especies dominantes núcleo NCS1 en orden de abundancia.

Las especies más abundantes (*A. angulatus*, *A. carinata* y *C. compressa*) corresponden a foraminíferos simbioses de gran tamaño. La especie más abundante a lo largo del núcleo es *A. angulatus*. Esta especie prolifera a lo largo del núcleo y se presenta en mayor proporción en intervalo 1, en la muestra 70-72 cm registró el máximo porcentaje (50%), siendo el más alto entre todas las especies dominantes en el núcleo, hacia el intervalo 3 presenta los valores mínimos de abundancia en las muestras 2-4 cm y 20-22cm. En general su abundancia tiende a ser superior a un 20% a lo largo del núcleo (*Figura 16*). Los especímenes observados presentan diferentes grados de preservación encontrándose conchas de buena preservación combinadas con otras corroídas, fragmentadas, bioturbadas y en algunas ocasiones deformadas (*Figura 18*).



**Figura 18.** Variación en la preservación de conchas en *Archaia angulatus*. **A.** Especimen de mayor preservación. **B.** Especimen con abrasión, disolución y fragmentación. **C.** Concha con presencia de epibionte (bioturbación) **D.** Especimen deformado.



*Asterigerina carinata* es la segunda especie más abundante en el núcleo. Se identificó un comportamiento cíclico reflejado en el incremento y la disminución de la especie, en valores que fluctúan entre ~ 4 y 16%, siendo la muestra 2-4 cm, la que registra el mayor porcentaje para la especie (~ 15%) y la muestra 70 – 72 cm la que registra el menor (~ 3) (figura 16).

*Cyclorbiculina compressa* registra un incremento en la abundancia en los centímetros 58 – 60 y 30 – 32 cercanos a los límites de los intervalos 1 y 2. A partir de los 24-26 cm se registra una disminución en la abundancia de la especie, cuyo comportamiento se prolonga hacia el final del intervalo 3 presentando valores bajos en porcentaje de especie por muestra entre 1 y ~7%, registrando el menor valor de abundancia (0,32%) en la muestra 12 – 14 cm, (Figura 16).

Todas las quinqueloculinas (clasificadas como *Quinqueloculina* sp.) con 4,08% de abundancia, se caracterizan por presentar un alto grado de fracturamiento y/o disolución lo que imposibilita la distinción de una especie en particular. Su porcentaje fluctúa entre el 2% - 8% a lo largo de todo el núcleo (Figura 16), revelando el porcentaje más alto (8%) en la muestra 14 -16cm.

Con 3,64% de dominancia en el núcleo, *R. floridana* presentó ciclos de ascenso y descenso en la abundancia oscilando entre ~1 -8%, reflejando su mayor porcentaje (>8%) en la muestra 0-2cm (figura 16).

*Quinqueloculina agglutinans* presentó porcentajes por muestra que fluctúan en todo el núcleo entre ~1 y 9%, alcanzando el máximo porcentaje de abundancia (9,73%) en el intervalo 2 en la muestra 50 – 52 cm (figura 16).

*Peneroplis carinatus* no estuvo presente en todos los centímetros del núcleo, presentó su mayor abundancia hacia el intervalo 2 con un 7,38% en la muestra 50 – 52 cm.

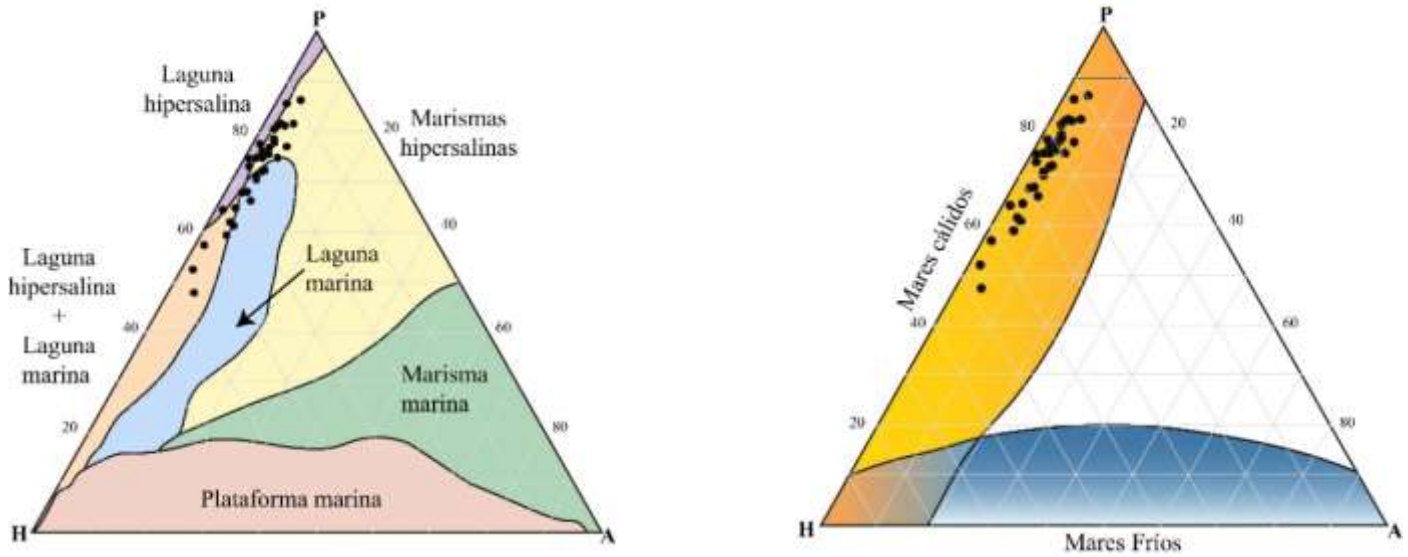
*Quinqueloculina poeyana* se encuentra entre las especies con el porcentaje más bajo de abundancia con 1,86%, la cantidad de especímenes es menor en el intervalo 1 y mayor hacia el intervalo 3, siendo el porcentaje de la muestra 18 – 20 cm el máximo registrado por esta especie (>6%) (figura 16).

*Affinetrina quadrilateralis* representa el 1,21% de las especies más abundantes en el núcleo, presenta porcentajes de abundancia fluctuantes (0 y ~3%), siendo 5% el máximo porcentaje registrado de esta especie en el núcleo (intervalo 2) (figura 16).

*Acervulina inhaerens* es la especie con menor porcentaje de abundancia entre las 10 especies más abundantes en el núcleo. Su porcentaje por muestra fluctúa entre ~ 0,5% y ~ 4%, siendo mayor en la muestra de 44 – 46 cm con un 3,83% (figura 16).

#### **5.4. Ambiente según la estructura de la pared**

El ploteo de los porcentajes de cada tipo de pared en el diagrama ternario muestra una predominancia de los individuos de conchas de composición porcelanácea e hialina reflejando 2 condiciones: de laguna hipersalina y de laguna hipersalina + laguna arrecifal (figura 19A) de aguas cálidas (figura 19B). Sin embargo, se observa una mayor concentración de muestras en condiciones típicas de laguna hipersalina como se observa en la figura 19 A.

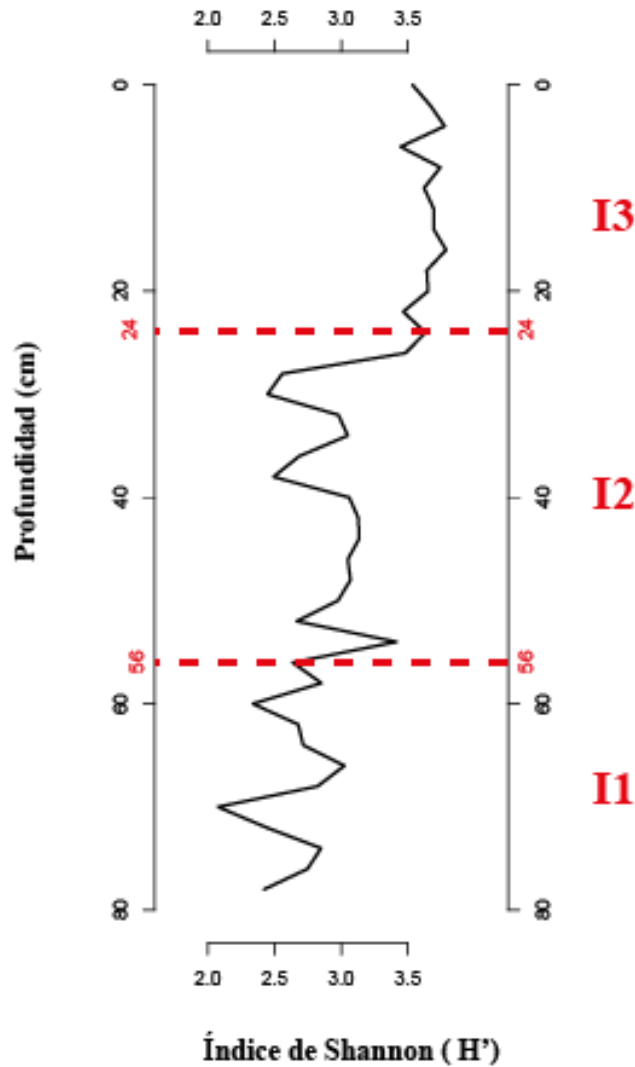


**Figura 19.** Diagrama ternario de asignación de ambiente de acuerdo a la estructura de pared dominante. En el grafico ternario de la derecha se identifica el tipo de ambiente asociado a la abundancia de paredes, **P**: porcelanáceas, **A**: aglutinadas o **H**: hialinas de los foraminíferos en cuestión y en el diagrama derecho la temperatura asociada al ambiente determinado. Tomado y modificado de Loeblich & Tappan, 1984; Bellier et al., 2010.

De acuerdo al ploteo de las muestras en los diferentes triángulos se establece un ambiente de laguna hipersalina de mar cálido.

### 5.5. Índice de diversidad de Shannon – Wiener (H')

La diversidad en el núcleo NCS1 (*figura 20*) en los intervalos 1 y 2 registró oscilaciones en los valores, siendo entre los centímetros 60 – 80 donde se presentaron los menores valores. Hacia el intervalo 3 se observó una tendencia de aumento en los valores de diversidad (>3).

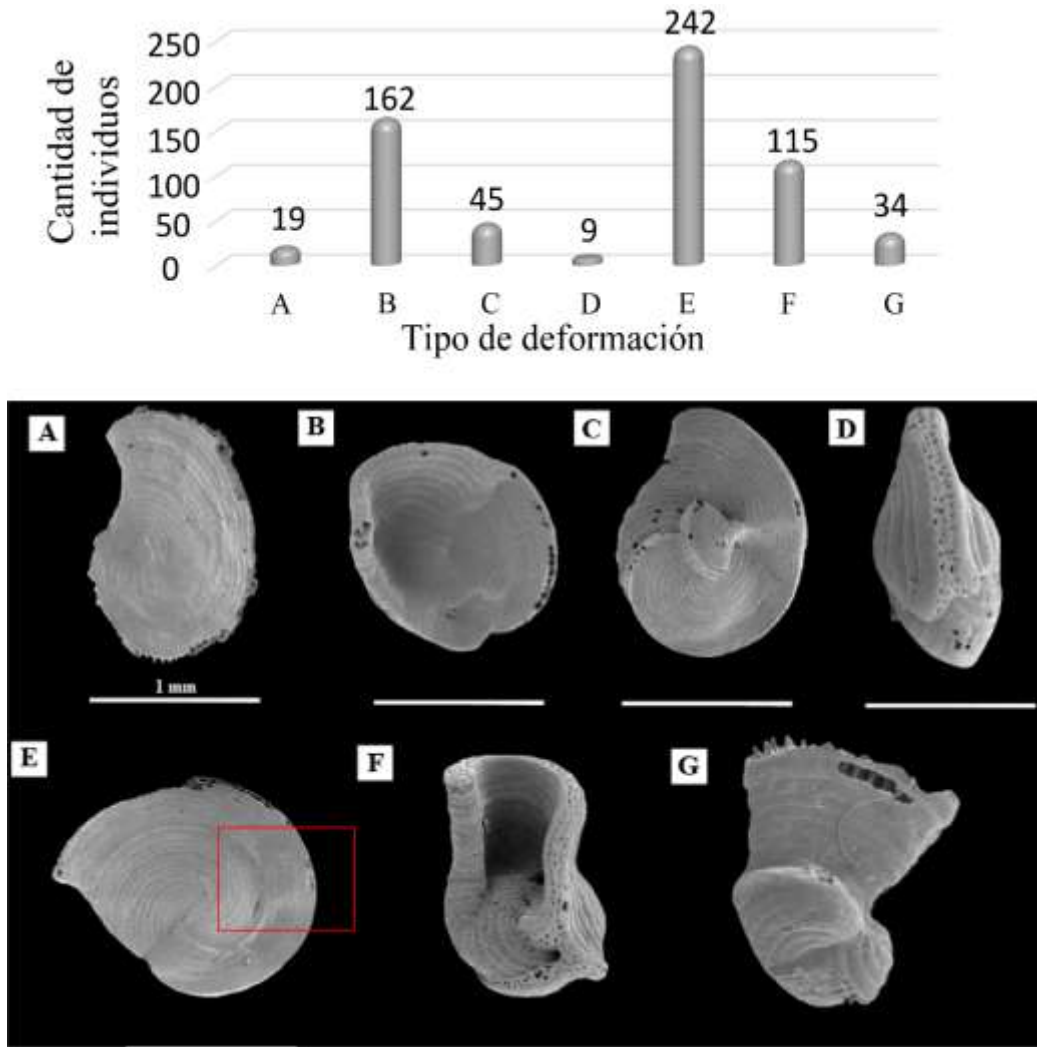


**Figura 20.** Diversidad ( $H'$ ) en el núcleo NCS1.

### 5.6. Deformación en Foraminíferos

Se obtuvo un total de 419 especímenes que presentaban algún tipo de deformación, de las cuales se identificaron 260 con una sola deformación, 139 con 2 deformaciones y 21 con 3 deformaciones. Una característica adicional observada en las conchas de las especies de géneros *Archaias*, *Laevipeneroplis* y *Cyclorbiculina* fue la presencia de anomalías físicas, las

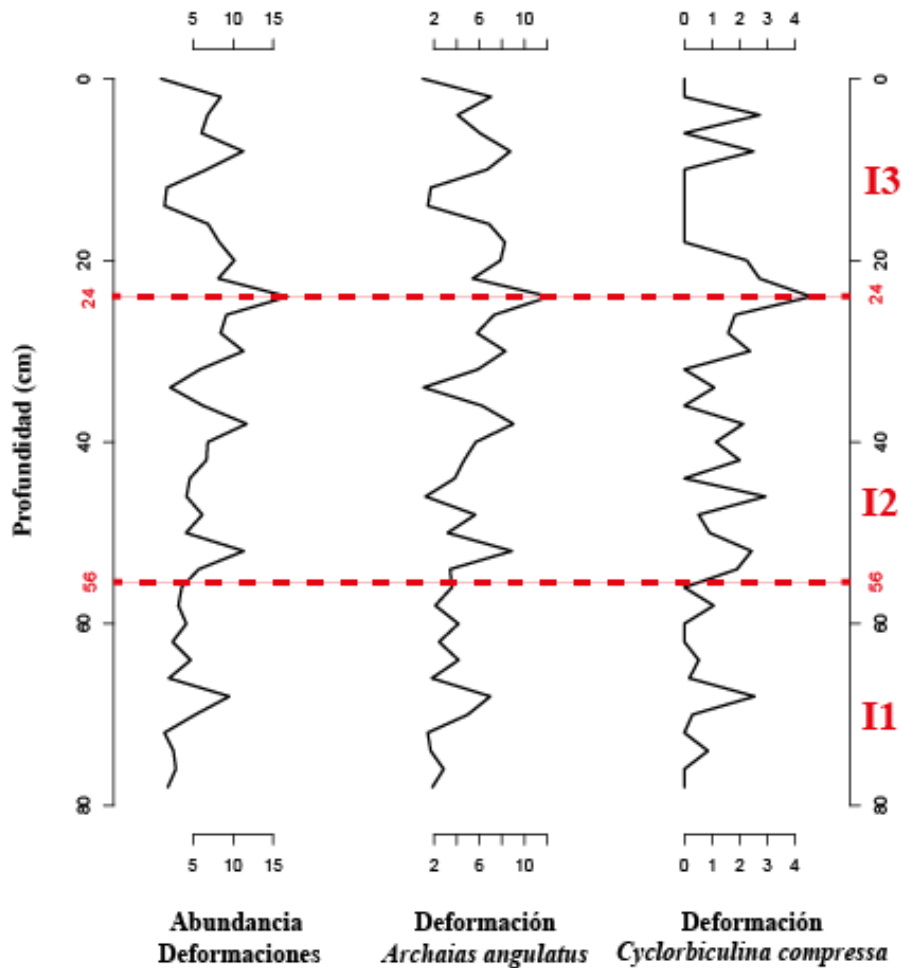
cuales de mayor a menor abundancia son: líneas de suturas irregulares (*Figura 21A*), curvamiento de la concha (*Figura 21B*), protuberancias superficiales (*Figura 21C*), asimetría (*Figura 21D*), superficies de partición y reparación (*Figura 21E*), deformación profunda (*Figura 21F*) y desenrollamiento (*Figura 21G*).



**Figura 21.**Conteo por tipo de deformación en los 3 géneros analizados. En la parte superior se observa el conteo de los diferentes tipos de deformación registrados en este estudio. En la parte inferior las microfografías de las diferentes deformaciones.

La abundancia de deformaciones en el núcleo presenta comportamientos oscilatorios en los intervalos distinguidos, siendo la muestra 24 – 26 cm la que presenta mayor deformación. (figura 22).

El género que presentó mayor cantidad de especímenes deformados (figura 22) fue la *Archaias*, seguido por la *Cyclorbulina*, dos géneros de los más dominantes en el núcleo; y en menor cantidad el género *Laevipeneroplis* el cual debido a su baja abundancia y poca cantidad de especímenes deformados no fue incluido en la *Figura 22*.

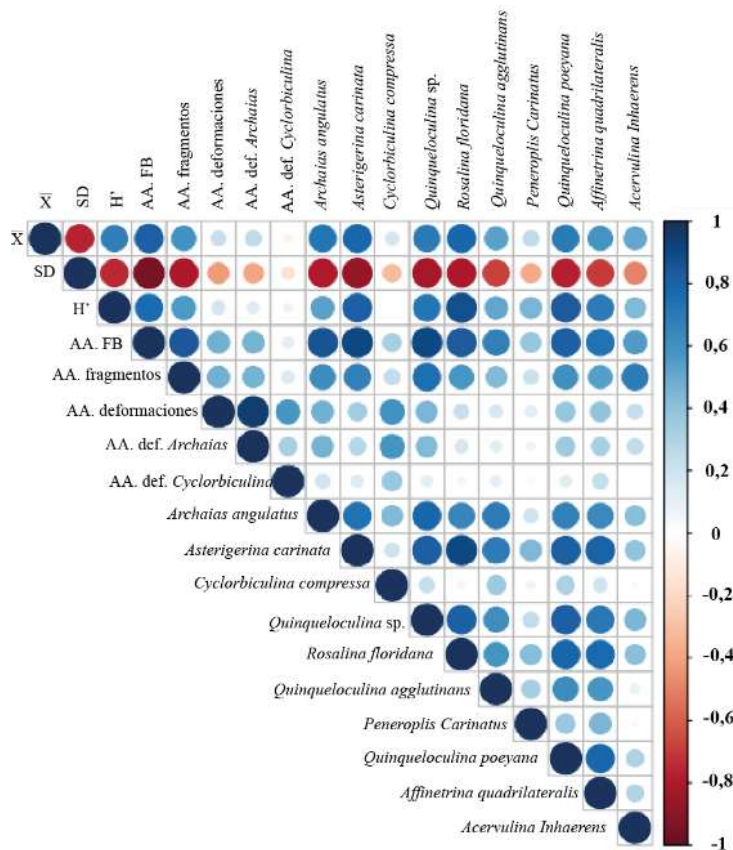


**Figura 22.** Gráfica de abundancia de deformación general para el núcleo NCS1 y de los dos géneros más deformados (*Archaias* y *Cyclorbulina*).

Cabe resaltar que en varios especímenes se llegaron a presentar hasta 3 tipos de deformaciones, pero en general predominaron los especímenes con una sola deformación.

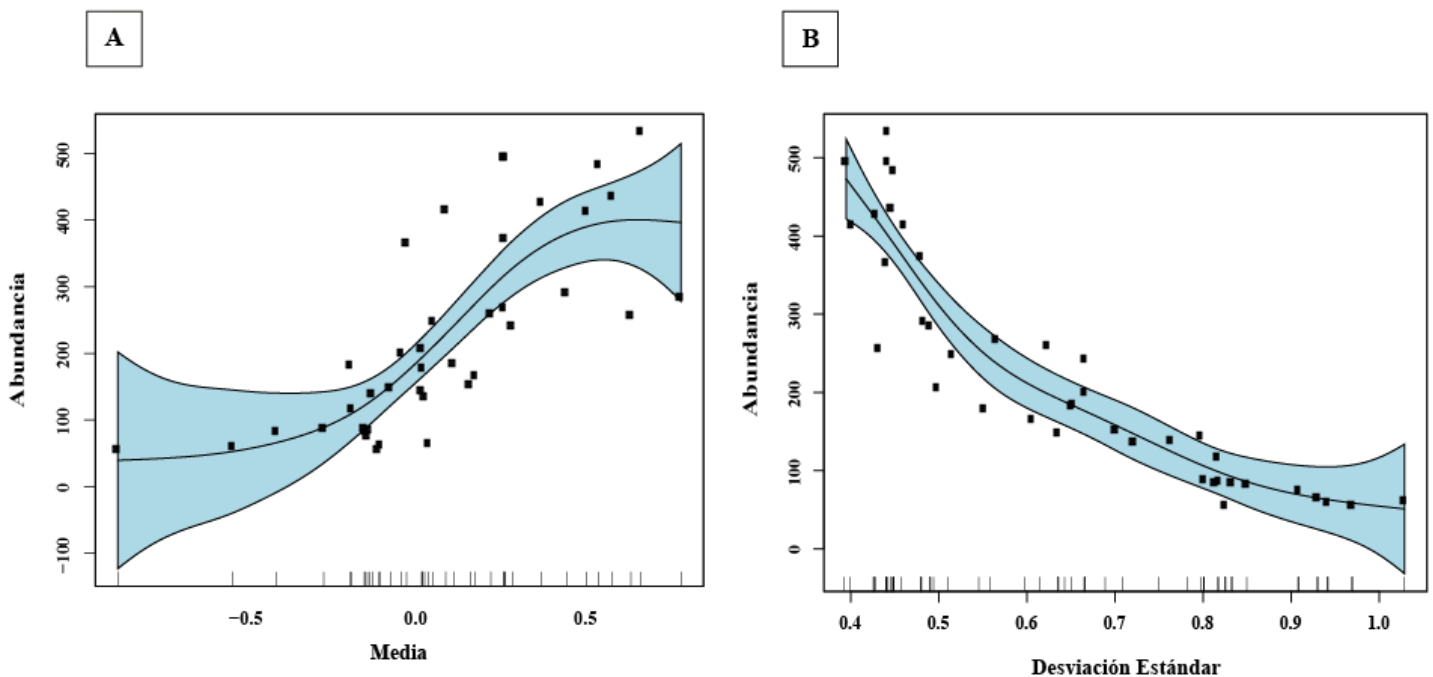
### 5.7. Foraminíferos y variables indicadoras de energía

La matriz de correlación (*anexo 5*) arrojó una relación positiva de la media con la abundancia total de foraminíferos ( $r = 0,817$ ,  $p = 6,635e-09$ ), la abundancia de fragmentos ( $r = 0,597$ ,  $p = 6,55e-05$ ) y la abundancia de deformaciones ( $r = 0,229$ ,  $p = 0,1536$ ), así como con el índice de diversidad ( $r = 0,683$ ,  $p = 1,194e-06$ ) (*Figura 23*). De igual forma, también arrojó una correlación negativa entre la desviación estándar y las variables de abundancia total de foraminíferos ( $r = -0,947$ ,  $p = 2,2e-16$ ), abundancia de fragmentos ( $r = -0,807$ ,  $p = 2,229e-08$ ), la abundancia de deformaciones ( $r = -0,429$ ,  $p = 0,006029$ ) y el índice de diversidad ( $r = -0,748$ ,  $p = 2,843e-08$ ), tal como se observa en la figura 23.



**Figura 23.** Matriz de correlación de las variables El color rojo indica correlaciones negativas mientras que el color azul indica correlaciones positivas, el diámetro de los círculos indica el grado de asociación (valores de r) (*anexo 5*).

Los modelos aditivos generalizados para explicar la relación de la abundancia total de foraminíferos respecto a las variables granulométricas exhibieron una relación significativa. Como se observa en la figura 24A, la media tuvo un efecto no lineal creciente en la abundancia total de foraminíferos, explicando el 59,9 % de las variaciones en la abundancia. En cuanto a la desviación estándar, presentó un efecto no lineal decreciente sobre la abundancia total de foraminíferos (*Figura 24B*), donde la desviación estándar explica el 85,5% de las variaciones en la abundancia. El comportamiento general de la abundancia respecto a cada variable granulométrica (*Figura 24*) indica que a mejor selección de las partículas y a menor tamaño de grano se tienen mayores valores de abundancia.

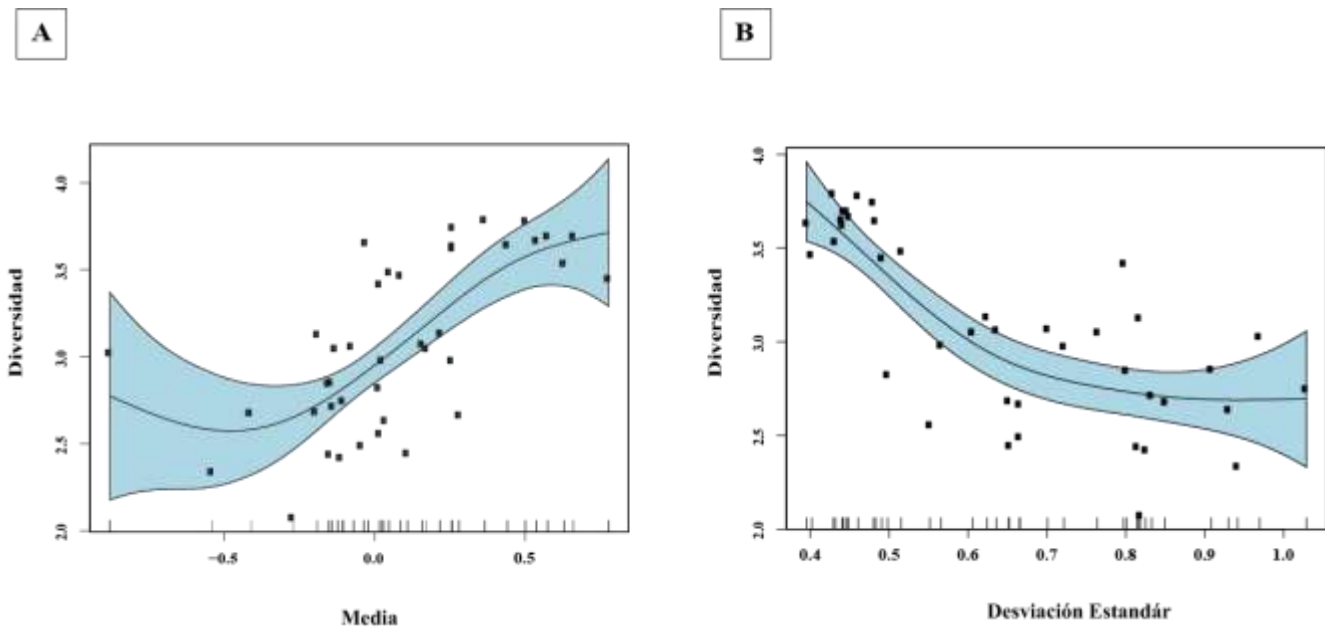


**Figura 24.** Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la abundancia total de foraminíferos. **A.** Abundancia total de foraminíferos ~ media ( $p=$



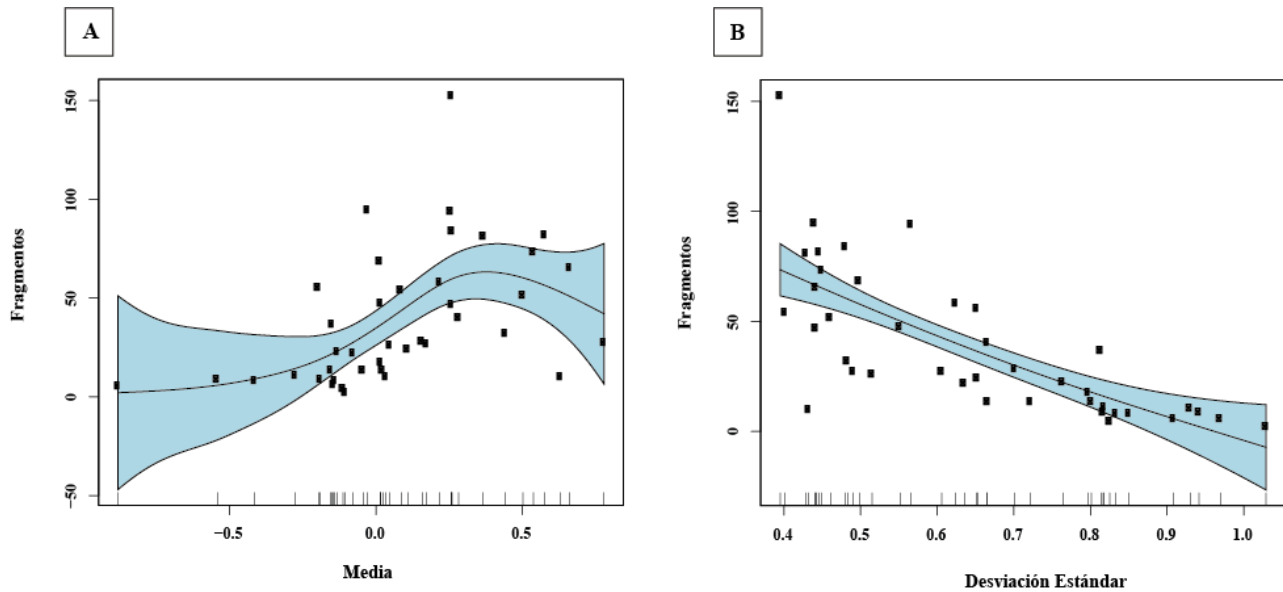
$<2e-16$ ,  $R^2 = 0,599$ ). **B.** Abundancia de foraminíferos ~ desviación estándar ( $p=<2e-16$ ,  $R^2 = 0,855$ ).

También se presenta una relación significativa que explica la diversidad en función a los parámetros de media y desviación estándar. La media tuvo un efecto no lineal creciente en la diversidad de los foraminíferos, explicando el 48,5% de las variaciones en esta (*Figura 25A*). Mientras que la desviación estándar presentó un efecto no lineal decreciente sobre la diversidad explicando el 61,8% de su variación (*Figura 25B*). Lo anterior indica que la diversidad incrementa a menor tamaño de grano y una buena selección de las partículas de sedimento.



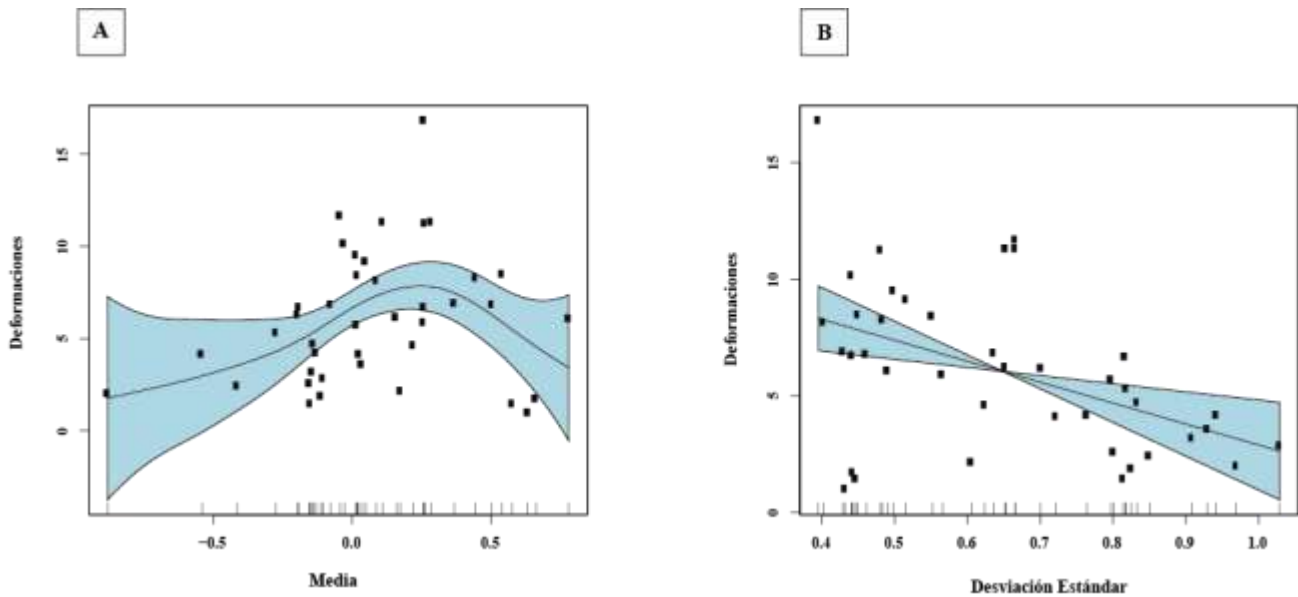
**Figura 25.** Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la diversidad total de foraminíferos. **A.** Diversidad de foraminíferos ~ media ( $p=<2e-16$ ,  $R^2 = 0,485$ ). **B.** Diversidad de foraminíferos ~ desviación estándar ( $p=<2e-16$ ,  $R^2 = 0,618$ ).

En un tercer modelo (*figura 26*) se explica la relación de la abundancia de fragmentos con las mismas variables evaluadas en los modelos anteriores. La media tuvo un efecto no lineal creciente sobre la abundancia de fragmentos, explicando en un 30% las variaciones en la abundancia de fragmentos (*figura 26A*). Por su parte la desviación estándar presentó un comportamiento casi lineal sobre la abundancia de foraminíferos que explica en un 51,9% las variaciones en la abundancia de fragmentos (*figura 26B*). El comportamiento general respecto a ambas variables indica que a mejor selección y menor tamaño de grano mayor abundancia de fragmentos.



**Figura 26.** Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la abundancia de fragmentos. **A.** Abundancia de fragmentos ~ media ( $p=2,23e-10$ ,  $R^2 = 0,3$ ). **B.** Abundancia de fragmentos ~ desviación estándar ( $p=<9,02e-13$ ,  $R^2 = 0,519$ ).

La última relación con significancia fue aquella en la que se relacionó la variación en la abundancia de deformaciones en función de la media y desviación estándar. La media tuvo un efecto no lineal creciente en la abundancia de deformaciones que la explica en un 20% (figura 27A). Mientras que la desviación estándar presentó un efecto lineal decreciente sobre las variaciones en la abundancia de deformaciones que se explican en un 19,9% (figura 27 B). De la relación con ambos parámetros se obtiene que la abundancia de fragmentos y deformaciones son mayores cuando se tienen tamaños de grano grueso con buena selección.

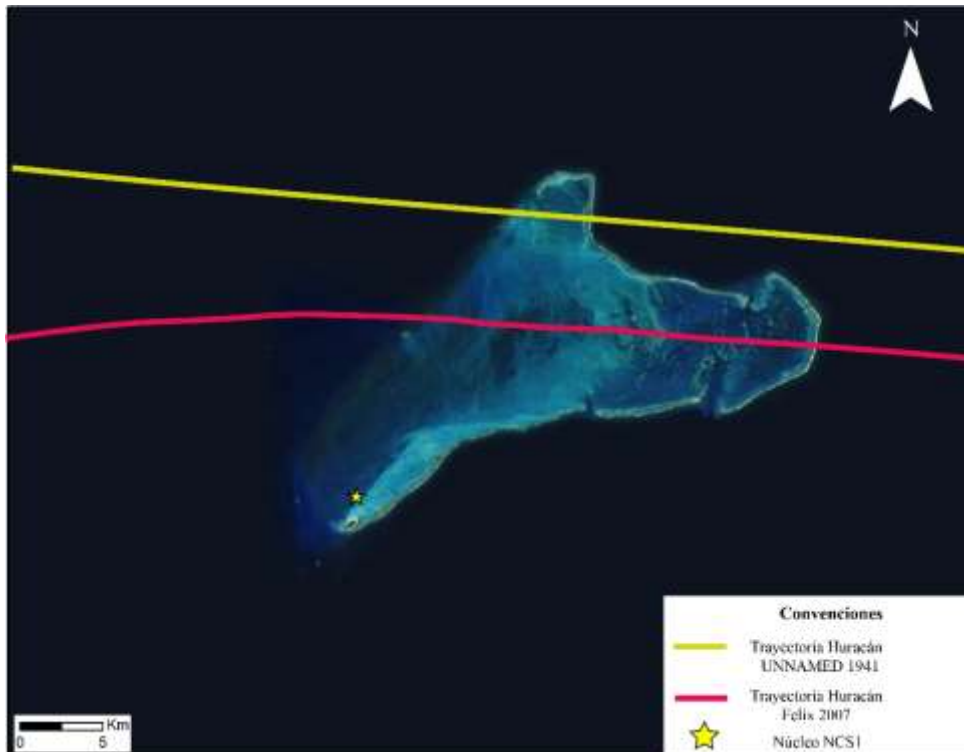


**Figura 27.** Modelo aditivo generalizado: los parámetros granulométricos como predictores de la abundancia de deformaciones. **A.** Abundancia de deformaciones ~ media ( $p=2,23e-10$ ,  $R^2 = 0,3$ ). **B.** Abundancia de deformaciones ~ desviación estándar ( $p=<9,02e-13$ ,  $R^2 = 0,519$ ).

## 6. Discusión

### 6.1. Influencia de eventos oceánicos extremos en el Atolón Cayo Serrana

Se han reconocido 18 huracanes de categoría 4 y 5 en un radio de 150 km en la zona de estudio (*Tabla 2, sección 5.1*). Dos de ellos con trayectorias sobre el atolón de Cayo Serrana en 1941 y en 2007 (huracán Félix) (*figura 28*). Estos eventos hidrodinámicos pudieron ocasionar mezcla y removilización de sedimentos a 10,1 m de profundidad, donde fue extraído el núcleo NCS1. En el caso del Huracán Carla en Isla Padre (Golfo de Texas) en el año 1961, el huracán logró remover y arrastrar materiales de fondo como bloques de coral, macroinvertebrados y fragmentos de roca a una profundidad de 15 a 20 m de columna de agua.



**Figura 28.** Huracanes con trayectoria sobre Cayo Serrana. Tomado y modificado: NOAA (2021).

Lo anterior también puede ser sustentando a partir de la presencia de un fragmento de coral (1.81 mm) encontrado en el intervalo 1 en la muestra 66 – 68 cm. Este fragmento excede el tamaño promedio de las partículas encontradas en todo el núcleo y puede indicar corrientes energéticas de flujo turbulento que son capaces de transportar y depositar partículas de gran tamaño (Cochran et al., 2005; Toomey et al., 2013). Yu et al. (2009) proponen que la presencia de tamaños gruesos en una laguna de atolón, usualmente se debe a fuertes dinámicas sedimentarias asociadas a huracanes o tsunamis, así como se observa en los intervalos 1 y 2 del núcleo estudiado, las cuales se constituyen de arenas gruesas y muy gruesas (*Figura 14, sección 5.2*). Adicionalmente, el intervalo 2 mostró oscilaciones en la variación del tamaño de grano que puede estar indicando cambios continuos y recurrentes en la energía que pueden interpretarse como una posible evidencia de impactos de eventos energéticos intensos de poca duración. No es posible afirmar que éstas variaciones sean registros del paso de huracanes como reporta Woodruff et al. (2008) en su trabajo, ya que en ésta investigación no se cuenta con dataciones que nos permitan ajustar un modelo de edad para el núcleo y así poder asociar tales eventos. El intervalo 3 mostró tamaños de grano menores, con buena selección a diferencia de los intervalos 1 y 2, lo que puede estar indicando condiciones de energía menor, siendo posible que dicho intervalo sea material depositado en la última etapa de sedimentación del material constantemente re movilizado por los eventos de alta energía en la zona. Apoyando lo planteado anteriormente, el material encontrado en el núcleo presentó diferentes grados de preservación que evidencian la mezcla de material antiguo y reciente y que sumado con la abundancia de fragmentos de foraminíferos bentónicos, podrían estar hablando de una historia de transporte y disolución

ocasionada por este tipo de eventos como lo reportan Dawson et al. (2014), Fellowes et al. (2017), Kosciuch et al. (2018) y Bramante et al. (2019).

Según lo anterior, las evidencias nos permiten inferir que el núcleo NCS1 ha estado sometido al paso de constantes eventos oceánicos energéticos a través del tiempo y que tiene una alta probabilidad de tener un registro temporal con edades invertidas al igual que el núcleo estudiado en la Laguna Pajarales en las Islas del Rosario (Puerres et al., 2018), dónde se hace referencia a facies con material mezclado producto de la constante removilización ocasionada por este tipo de eventos energéticos. En el capítulo siguiente se soportará esta hipótesis a partir de la respuesta de los foraminíferos bentónicos.

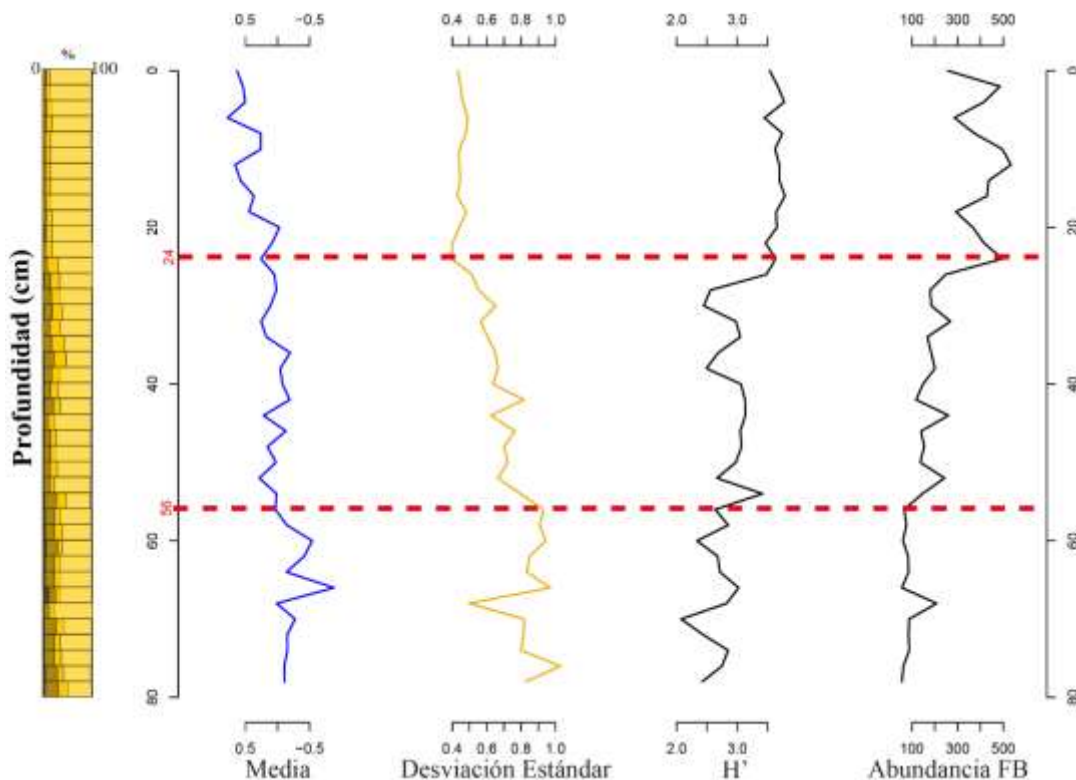
## ***6.2. Respuesta de foraminíferos bentónicos ante eventos oceánicos extremos.***

La laguna de Cayo Serrana se compone de especies de foraminíferos bentónicos que han sido reportadas en otras zonas del Caribe como Puerto Rico (Brooks, 1973), Indias Occidentales (Hofker, 1956), Antillas Neerlandesas (Hofker, 1964), Barbados (Hofker, 1969), Curazao (Hofker, 1971) Serranilla (Triffleman et al., 1991) entre otros. Los foraminíferos bentónicos encontrados fueron indicadores de ambiente de laguna hipersalina de aguas cálidas (*Figura 19, sección 5,4*), con una dominancia de especies con algas simbiotes, porcelanáceas y calcáreas hialinas similares a las condiciones reportadas por Patarroyo (2019) y Patarroyo & Gomez (2020) en Cayo Albuquerque al sur del Archipiélago de San Andrés y Providencia.

Las especies de foraminíferos bentónicos dominantes encontradas en el núcleo NCS1 mostraron un comportamiento que responde a condiciones de energía y transporte altas, lo cual puede observarse en la reducción de la abundancia de la mayoría de especies dominantes en los intervalos 1 y 2. Esto contrasta con la asociación de especies simbiotes como *A.*

*angulatus*, *C. compressa* y *A. carinata* las cuales aumentan sus abundancias en dichos intervalos. Estas especies simbiotes son típicas de ambientes de alta energía sometidos a olas y corrientes (Brasier, 1975; Hallock & Peebles, 1993). La dominancia de esta asociación de especies permite apoyar la hipótesis de que el núcleo NCS1 ha estado en un ambiente de alta energía y que los diferentes intervalos encontrados pudieron registrar la ocurrencia de eventos hidrodinámicos de alta energía como pueden ser huracanes, tormentas, frentes fríos, mares de leva, etc. *A. angulatus* se caracteriza por ser la especie más dominante en NCS1 ya que es uno de los principales constituyentes de los sedimentos en ambientes arrecifales del Caribe ( Triffleman et al., 1991; Crevison & Hallock, 2007); en el intervalo 3 ésta especie presentó una disminución en la abundancia, lo cual puede explicarse según dos hipótesis: la primera, y como fue planteado en el capítulo 6.1, las condiciones energéticas fueron menores en éste intervalo. La segunda, que después del paso de un evento energético fuerte se pueden ver modificados los procesos físico – químicos resultando posiblemente en un aumento en la nitrificación que afecta la relación con su simbiote, lo que podría ocasionar cambios en su crecimiento y abundancia ( Hallock, 2000; Uthicke & Altenrath, 2010), un ejemplo de este proceso se vio posterior al paso de los huracanes Iván y Dennis en la Bahía de Escambia en Florida (Smith & Caffrey, 2009). Por otro lado, en el intervalo 3 se registró la proliferación de otras especies como *A. carinata*, *R. floridana* y *Q. poeyana*, el cual puede ser explicado por las dinámicas ecológicas subsecuentes al paso de eventos extremos (Atwater et al., 2012; Bouchet et al., 2012; Engel et al., 2012) como descensos en la temperatura del agua y disminución del pH y salinidad, favoreciendo el aumento de especies que son capaces de tolerar bajas temperaturas o condiciones de salinidad y pH diferentes (Javaux & Scott, 2003; Dong et al., 2020; Kowalski et al., 2018) Adicionalmente, la presencia de mayor diversidad

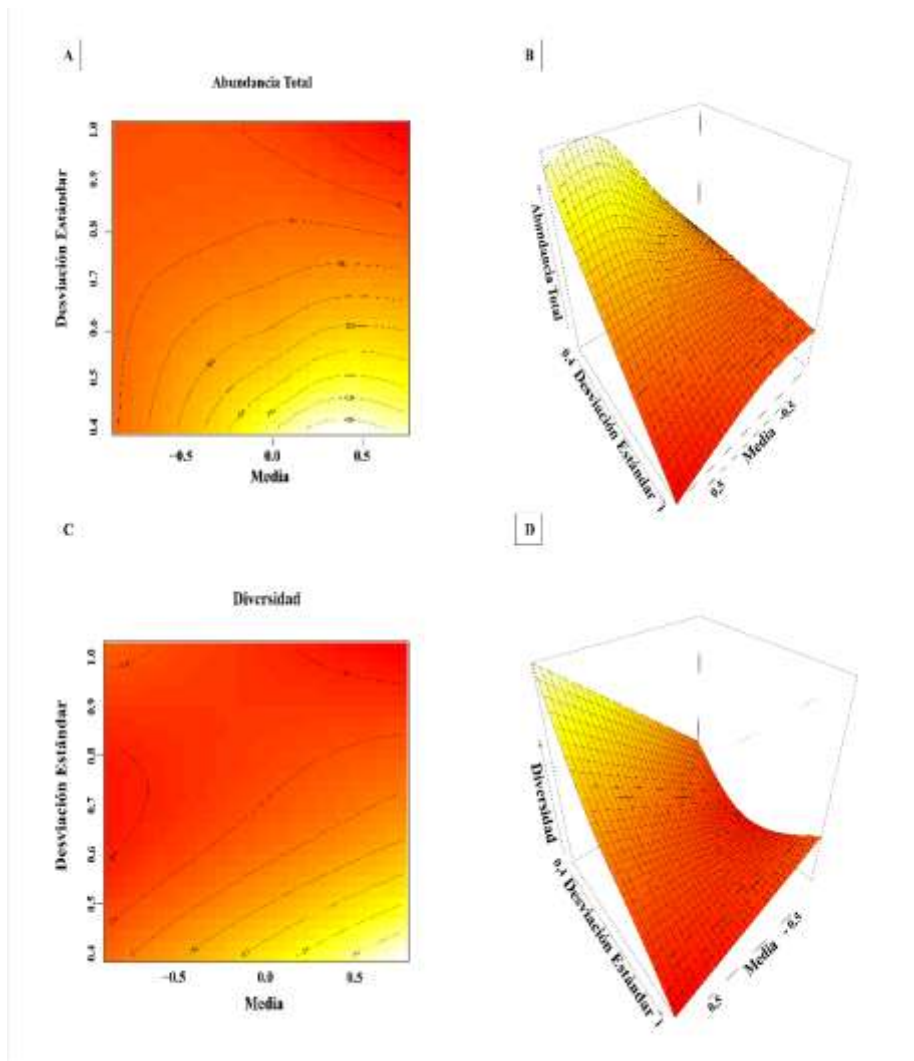
y abundancia de foraminíferos bentónicos en este último intervalo puede justificarse por la depositación de materiales en la laguna que contienen microfauna bentónica que ha sido removida y transportada desde otros entornos del atolón Serrana (terrace prearrecifal, el arrecife periférico y terraza lagunar) con el paso de tormentas y del alto oleaje recurrente en la zona. Para el caso del núcleo NCS1 las especies *R. rosea* (vista en los 12 – 14 cm) y *A. carinata* y *A. inhaerens* son evidencia de éste transporte de microfauna ya que son raras en zonas lagunares, la primera es típica de terrazas arrecifales, la segunda típica de zonas prearrecifales (Li et al., 1997) y la tercera típica en barreras arrecifales, además la reducción del tamaño de grano en este intervalo y condiciones de bajas energías hacen un ambiente muy apto para el crecimiento y desarrollo de especies de foraminíferos bentónicos. Esto coincide con lo registrado por Sadough et al. (2013), quien atribuye mayores abundancias de foraminíferos a menores tamaños de partícula, que para ciertas especies dicha preferencia es un reflejo adaptativo a las condiciones del medio (Celia Magno et al., 2012) (Figura 29).





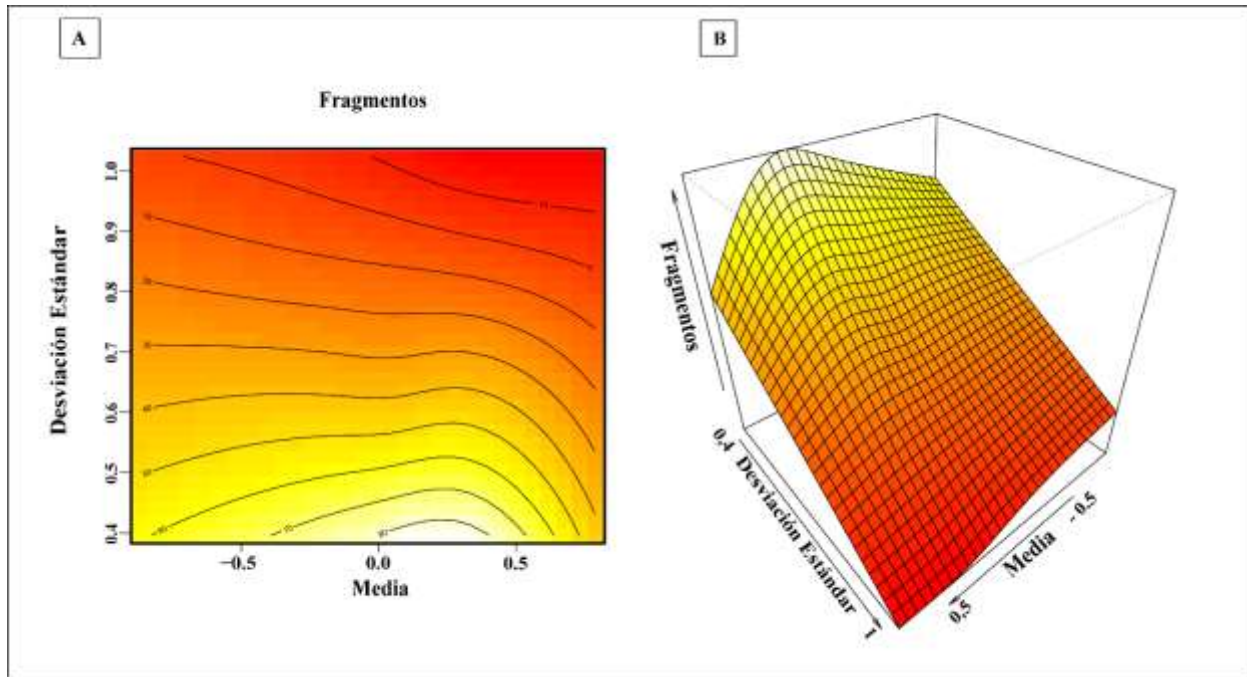
**Figura 29.** Variables indicadoras de energía vs. Abundancia y diversidad de foraminíferos bentónicos.

La hipótesis anteriormente planteada es soportada a partir de los modelos de interacción donde las variables granulométricas como indicadores de energía y transporte influyen en un 86,1% la abundancia de foraminíferos bentónicos (Figura 30A, B) y en un 62,4% la diversidad (Figura 31C, D), lo que permite apoyar la baja abundancia y diversidad en los intervalos 1 y 2.



**Figura 30.** Modelos Aditivos Generalizados con interacción de parámetros granulométricos como variables predictoras. **A.** Mapa de calor abundancia FB ~ media \* desviación estándar ( $p = <2e-16$ ;  $R^2=0,861$ ). **B.** Modelo 3D. **C.** Mapa de calor Diversidad ~ media \* desviación estándar ( $p = 4e-7$ ;  $R^2=0,624$ ). **D.** Modelo 3D.

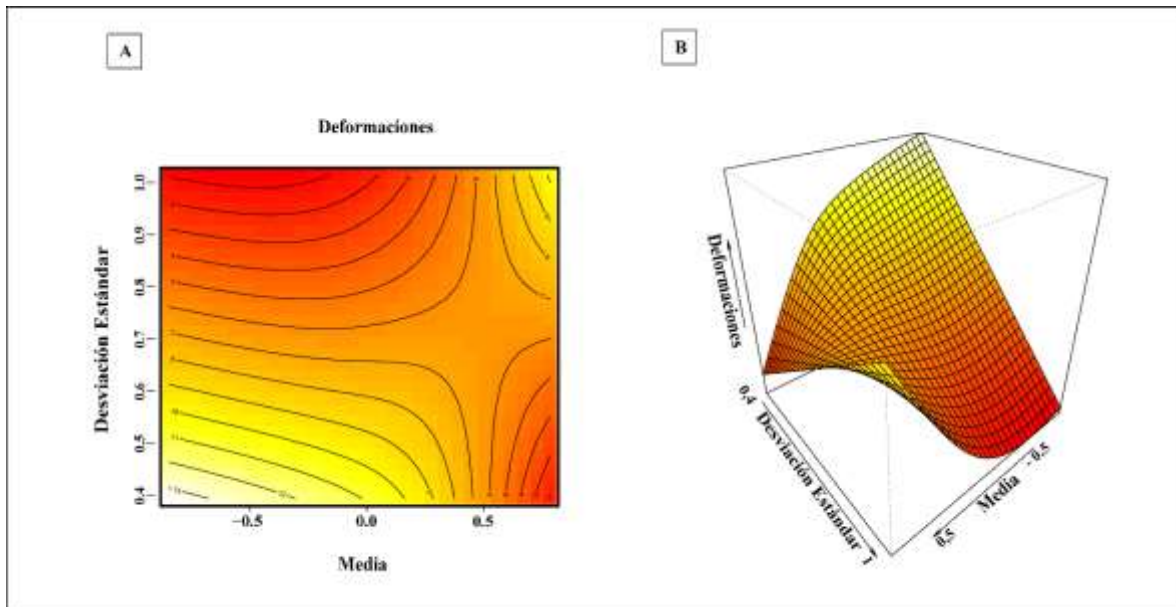
Otra de las variables usadas para medir energía fue la abundancia de fragmentos de foraminíferos bentónicos, observándose que en los intervalos 1 y 2 se tuvieron bajos valores y en el intervalo 3 éste valor aumentó, éste comportamiento podría no sólo atribuirse a la relación abundancia/diversidad sino también al tamaño de los fragmentos, es decir, los fragmentos generados durante el paso de eventos energéticos llegan a depositarse en los intervalos finales y en bajas condiciones energéticas por su peso y tamaño (intervalo 3). De igual forma esto fue corroborado por una interacción significativa de la abundancia de fragmentos con las variables indicadoras de energía y transporte en el modelo GAM, donde se explica la presencia de fragmentos en un 55,7% (*Figura 31A, B*), ya que las altas condiciones de energía y transporte pueden ser los responsables de una mayor fragmentación en la microfauna bentónica de foraminíferos. Este efecto es frecuente en los depósitos sedimentarios resultantes al paso de huracanes como los registrados por Bramante et al. (2019) y Kosciuch et al. (2018) en el atolón de Jaluit (Islas Marshall) y en las islas Efate y Tanna en Vanuatu (Pacífico sur).



**Figura 31.** Modelos Aditivos Generalizados con interacción de parámetros granulométricos como variables predictoras. abundancia de fragmentos  $\sim$  media \* desviación estándar ( $R^2=0,557$ ,  $p= 1,37e^{-5}$ ) **A.** Mapa de calor **B.** Modelo 3D.

En cuanto a deformaciones, la especie *A. angulatus* fue la que mostró mayor variedad en deformaciones y en abundancia a comparación de los géneros *Cyclorbiculina* y *Laevipeneroplis* que también presentaron deformaciones. La abundancia de deformaciones es explicada según el modelo GAM en solo un 38,5% por las variables indicadoras de energía y transporte (media y selección) (Figura 32A, B). Lo anterior permite inferir que los cambios abruptos en las condiciones físico-químicas (Boltovskoy et al., 1991) sean los posibles responsables de estas. Se ha identificado que los foraminíferos modifican su concha en respuesta a las altas salinidades y temperaturas (Fiorini & Lokier, 2020) como reportó Debenay et al. (2001) en lagunas hipersalinas de Araurama (Brasil). También se ha

evidenciado que una causa de las variaciones morfológicas y de la abundancia y diversidad de foraminíferos puede atribuirse a la presencia de metales pesados (Bergin et al., 2006; Badr-El Din et al., 2019; Caruso et al., 2011). En el caso específico de *A. angulatus* Souder et al. (2010) ha reportado que la especie es afectada por la eutrofización, reflejando microperforaciones en las conchas, además de disolución, indicando variaciones en el pH. Para Cayo Serrana se especula que la deformación de esta especie a pesar de presentarse en un ambiente propicio para su proliferación, es dada por el cambio de las condiciones del medio generadas posterior al paso de eventos extremos y no durante su paso, ya que condiciones de alta hidrodinámica se han asociado a traumas mecánicos (abrasión y fragmentación) en las conchas (Bé & Spero, 1981; Cottey & Hallock, 1988; Geslin et al., 2000).



**Figura 32.** Modelos Aditivos Generalizados con interacción de parámetros granulométricos como variables predictoras. Abundancia de deformaciones  $\sim$  media \* desviación estándar ( $p= 0,000717$ ;  $R^2=0,385$ ). **A.** Mapa de calor **B.** Modelo 3D

Las anteriores evidencias explican que los foraminíferos bentónicos del núcleo NCS1 han logrado responder a los eventos energéticos extremos que han impactado la zona y pueden ser buenos indicadores para estudiar más a fondo los registros de tormentas, huracanes, frentes fríos etc. No obstante, en un trabajo sincrónico con ostrácodos en el núcleo NCS1 se reportó lo opuesto a lo encontrado con foraminíferos bentónicos. Bernal - Garzón (2021), propone a través de ostrácodos extraídos del núcleo NCS1 condiciones lagunares calmas que propiciaron una depositación *in situ* y poco retrabajamiento en sus conchas, lo que llevó también a plantear una posible edad para el núcleo. Barbieri et al. (2021) planteó que los ostrácodos brindan distinta información paleo – ambiental a la de los foraminíferos bentónicos, como fue el caso de la laguna de Romagna en Italia, en donde los foraminíferos fueron indicadores de condiciones de estrés ambiental, mientras que los ostrácodos fueron utilizados para indicar composición y estructura ecológica del medio (Barbieri & Vaiani, 2018). En un estudio realizado en depósitos de gran oleaje en una laguna costera de Jamaica los ostrácodos se han utilizado para indicar fluctuaciones de salinidad posterior al paso de huracanes (Palmer et al., 2020), dejando de lado la descripción de la tafonomía de las conchas en respuesta a estos eventos. Sin embargo, en otros estudios se ha identificado una correlación entre la resistencia a la fragmentación y las características de las valvas de los ostrácodos como la forma, tamaño, grosor, ancho, y ornamentación (Kontrovitz et al., 1998). Por ejemplo, en el experimento realizado en un agitador de sedimentos por Kontrovitz (1966) en ostrácodos de la bahía de Florida, se evidenció que especies con ornamentación moderada (*Loxicorniculum postdorsalatum*) y una ornamentación más fuerte (*Radimella confragosa*) a la semana de exposición frente a un movimiento de agitación, exhiben pulimiento, pero no daños en la superficie del caparazón. Este experimento podría asemejarse a las condiciones

generadas por la removilización causada durante el tránsito de un evento de alta energía. Debido a lo anterior es posible que esto justifique el hecho de que se presente una mejor preservación de los ostrácodos a la presentada por los foraminíferos en este estudio. Además, es posible considerar que la microfauna de ostrácodos pudo haber estado en suspensión durante al paso de estos eventos, lo cual propició una menor afectación de sus caparazones. Por otro lado, la inferencia de una depositación *in situ* y poco retrabajamiento en un ambiente altamente energético como lo es Cayo Serrana puede ser poco probable.

En síntesis, la respuesta divergente de estos dos grupos de microfauna bentónica, nos muestran dos perspectivas diferentes para los análisis en las condiciones de energía en la laguna de Cayo Serrana. Es por esto que surge la necesidad de realizar a futuro dataciones que proporcionen un modelo de edad para poder ajustar los resultados de cada una de estas herramientas correlacionar las variaciones registradas en los intervalos descritos con eventos oceánicos extremos, ya que todas las evidencias aquí aportadas conducen a concluir que la laguna del Atolón de Serrana está expuesta a alta energía (i.e. una granulometría de tamaños gruesos, alta fragmentación, diferentes grados de preservación, deformaciones, especies típicas de ambientes de alta energía).

## **7. Conclusiones y recomendaciones.**

El desarrollo de este estudio permitió la identificación de las respuestas ecológicas y morfológicas que pueden presentar los foraminíferos bentónicos al paso de eventos de alta energía que no solo involucran daños asociados a la abrasión de la microfauna, sino también una influencia en la distribución de la granulometría, la redistribución de las especies y las variaciones morfológicas de estas, así como predominio de especies de asociaciones de foraminíferos de condiciones de alta energía.

La identificación de 18 huracanes con trayectoria cercana a Cayo serrana y dos de estos cuya trayectoria tuvo paso directo sobre el atolón (UNNAMED 1941 y Félix 2007), permiten corroborar la alta vulnerabilidad que presenta la zona frente al paso de este tipo eventos.

Los cambios energéticos que pudieron haber causado algún tipo de perturbación en el medio fueron posiblemente distinguidos a partir de las variaciones en la granulometría del núcleo, donde se evidenciaron cambios en los tamaños de grano, así como oscilaciones que no coinciden con una condición de laguna de aguas calmas. Adicionalmente la identificación de las especies de foraminíferos bentónicos pertenecientes al núcleo NCS1, posibilitaron caracterizar a partir de la estructura de su concha el tipo de ambiente como una laguna hipersalina de aguas cálidas. Además, especies dominantes como *Archaias angulatus*, *Asterigerina carinata* y *Cyclorbiculina compressa*, que en conjunto con la presencia de especies alóctonas del entorno arrecifal como *Rotorbinella Rosea* y *Acervulina inhaerens* indicaron condiciones de alta energía y transporte asociadas a la fuerte hidrodinámica que pudo haber sido ocasionada por los eventos oceánicos extremos comprendidos en los intervalos del núcleo NCS1. Asimismo, las fluctuaciones y cambios abruptos de las variables físico – químicas del medio como salinidad, temperatura, nitrificación entre otras, posterior al paso de estos eventos pudieron haber inducido a la generación de las variaciones morfológicas evidenciadas en los géneros *Archaias*, *Cyclorbiculina* y *Laevipeneroplis*.

Todas las evidencias expuestas en este trabajo junto con el soporte brindado por los modelos GAM, establecen indicios de que la microfauna bentónica del Caribe responde a la exposición frente a eventos extremos oceánicos que han incrementado en magnitud e intensidad con el cambio climático en curso, por lo cual se recomienda realizar análisis complementarios como dataciones  $^{137}\text{Cs}$  en sedimentos para establecer un modelo de edad

debido a que las dataciones con  $^{14}\text{C}$  se imposibilitan al no tener cantidades óptimas de microfauna bien preservada y de material orgánico vegetal como fue implementado para la datación del núcleo de laguna pajarales por Puerres et al. (2018). Con la obtención de un modelo de edad se tendría una herramienta adicional que permita correlacionar los cambios en los intervalos 1 y 2 con los eventos que tuvieron incidencia sobre el Atolón Serrana. Adicionalmente comprobar si se tiene como se plantea para el núcleo edades invertidas producto de la removilización que puede ser generada por estos eventos.

De igual forma se recomienda realizar estudios de las condiciones físico – químicas del medio lagunar durante diferentes estaciones del año que permitan evidenciar las variaciones en las condiciones y poder correlacionarlas con las anomalías ecofenotípicas encontradas en las conchas de los foraminíferos bentónicos.

## 8. Referencias

- Accary, F., & Roger, J. (2010). Tsunami catalog and vulnerability of martinique (Lesser Antilles, France). *Journal of Tsunami Society International*, 29(3), 148–170.
- Acosta Herrera, N. (2004a). Biología de los foraminíferos. In *Compendio de foraminíferos de Colombia* (1 edición, pp. 3–8). Universidad Nacional de Colombia Unibiblos.
- Acosta Herrera, N. (2004b). *Compendio Foraminíferos de Colombia*. (Primera ed).
- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). (2021). *Historical Hurricane Tracks*. <https://bit.ly/3z4LtZP>
- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). (2021). *National Data Buoy Center*. <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- Altwegg, R., Visser, V., Bailey, L. D., & Erni, B. (2017). Learning from single extreme events. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160141. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0141>
- Alvarez-Yela, A. C., Mosquera-Rendón, J., Noreña-P, A., Cristancho, M., & López-Alvarez, D. (2019). Microbial Diversity Exploration of Marine Hosts at Serrana Bank, a Coral Atoll of the Seaflower Biosphere Reserve. *Frontiers in Marine Science*, 6(Junio), 1–15.



<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00338>

- Alve, E. (1995). Benthic foraminiferal responses to estuarine pollution; a review. *The Journal of Foraminiferal Research*, 25(3), 190–203. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.25.3.190>
- Andrade, C. A. (2001). Las corrientes superficiales en la cuenca de Colombia Observadas con Boyas de Deriva. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 25(96), 321–335.
- 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>
- Arenillas Sierra, I., Molina Martínez, E., & Alegret Badiola, L. (2000). El uso didáctico de los foraminíferos en al enseñanza de las Ciencias de la Tierra: su distribución paleoceanográfica en el tránsito cretácico-terciario. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 8(2), 108–118.
- Armstrong, H. A., & Brasier, M. D. (2005). Chapter 15: Foraminifera. In *Microfossils* (p. 305). Blackwell publishing.
- Atwater, B. F., ten Brink, U. S., Buckley, M., Halley, R. S., Jaffe, B. E., López-Venegas, A. M., Reinhardt, E. G., Tuttle, M. P., Watt, S., & Wei, Y. (2012). Geomorphic and stratigraphic evidence for an unusual tsunami or storm a few centuries ago at Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards*, 63(1), 51–84. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9622-6>
- Ayers, J. F. (1984). Geologic construction of atolls. In *Water Resources of Small Islands* (pp. 69–78).
- Badr-El Din, A. M., El-Badry, A. A., & Orabi, O. H. (2019). Factors controlling the deformation of benthic foraminifera in the Manzala lagoon, Egypt. *Revue de Micropaléontologie*, 63(July), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2019.01.002>
- Bailey, L. D., & van de Pol, M. (2016). Tackling extremes: challenges for ecological and evolutionary research on extreme climatic events. *Journal of Animal Ecology*, 85(1), 85–96. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12451>
- Barbieri, G., Rossi, V., Vaiani, S. C., Dasgupta, U., & Amorosi, A. (2021). Quantitative paleoecology in shallow-marine settings: The value of ostracods and foraminifers from the Holocene North Adriatic record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 572(March), 110408. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110408>
- Barbieri, G., & Vaiani, S. C. (2018). Benthic foraminifera or Ostracoda? Comparing the accuracy of palaeoenvironmental indicators from a Pleistocene lagoon of the Romagna coastal plain (Italy). *Journal of Micropalaeontology*, 37(1), 203–230. <https://doi.org/10.5194/jm-37-203-2018>
- Bé, A. W. H., & Spero, H. J. (1981). Shell Regeneration and Biological Recovery of Planktonic Foraminifera after Physical Injury Induced in Laboratory Culture. *Micropaleontology*, 27(3), 305. <https://doi.org/10.2307/1485240>

- Beccari, V., Spezzaferri, S., Stainbank, S., Hallock, P., Basso, D., Caragnano, A., Pisapia, C., Adams, A., Angeloz, A., Del Piero, N., Dietsche, P., Eymard, I., Farley, N., Fau, M., Foubert, A., Lauper, B., Lehmann, A., Maillet, M., Negga, H., ... Vimpere, L. (2020). Responses of reef bioindicators to recent temperature anomalies in distinct areas of the North Ari and Rasdhoo atolls (Maldives). *Ecological Indicators*, 112(January), 106128. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106128>
- Bellier J., Mathieu, R., & Granier, B. (2010). Short Treatise on Foraminiferology (Essential on modern and fossil Foraminifera). In *Carnets de Geologie* (Issue July).
- Bello, O., & Peralta, L. (coords. . (2021). *Evaluación de los efectos e impactos de las depresiones tropicales Eta y Iota en Guatemala*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46681-evaluacion-efectos-impactos-depresiones-tropicales-eta-iota-guatemala>
- Bennett, K. D. (2009). "Psimpoll 4.27." *C Program for Plotting Pollen Diagrams and Analyzing Pollen Data*. (v 4.27). <http://www.chrono.qub.ac.uk/psimpoll/psimpoll.html>
- Bergin, F., Kucuksezgin, F., Uluturhan, E., Barut, I. F., Meric, E., Avsar, N., & Nazik, A. (2006). The response of benthic foraminifera and ostracoda to heavy metal pollution in Gulf of Izmir (Eastern Aegean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66(3–4), 368–386. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.09.013>
- Bermudez, P. (1952). Estudio sistemático de los foraminíferos rotaliformes. *Boletín de Geología*, 11(4), 116.
- Bernal - Garzón, L. (2021). *Diversidad de ostrácodos de la laguna del atolón de Serrana ( Archipiélago de San Andrés y Providencia) y su posible relación con los cambios climáticos de los últimos ~ 400 años*. <https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/17097>
- Bernal, G., Osorio, A. F., Urrego, L., Peláez, D., Molina, E., Zea, S., Montoya, R. D., & Villegas, N. (2016). Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 164, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.007>
- Bernal, G. R., Poveda, G., Andrade, C., & Roldán, P. A. (2006). Patrones de variabilidad espacio-temporal de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115), 195–208.
- Bicchi, E., Debenay, J.-P., & Pagès, J. (2002). Relationship between benthic foraminiferal assemblages and environmental factors in atoll lagoons of the central Tuamotu Archipelago (French Polynesia). *Coral Reefs*, 21(3), 275–290. <https://doi.org/10.1007/s00338-002-0245-6>
- Blake, E. S., & Zelinsky, D. A. (2018). *National Hurricane Center Tropical Cycle Report: Hurricane Harvey. 2005, 1–77*. [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092017\\_Harvey.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092017_Harvey.pdf)
- Boltovskoy, E., Scott, D. B., & Medioli, F. S. (1991). Morphological Variations of Benthic

- Foraminiferal Tests in Response to Changes in Ecological Parameters: A Review. *Journal of Paleontology*, 65(2), 175–185. <https://www.jstor.org/stable/1305752>
- Bouchet, V. M. P., Alve, E., Rygg, B., & Telford, R. J. (2012). Benthic foraminifera provide a promising tool for ecological quality assessment of marine waters. *Ecological Indicators*, 23(2012), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.011>
- Bramante, J. F., Ashton, A. D., & Donnelly, J. P. (2019). Foraminifera taphonomy as proxy for large wave events: A Case study in the Marshall islands. *Coastal Sediments*, 894–902. [https://doi.org/10.1142/9789811204487\\_0078](https://doi.org/10.1142/9789811204487_0078)
- Brasier, M. D. (1975). The ecology and distribution of Recent foraminifera from the reefs and shoals around Barbuda, West Indies. *The Journal of Foraminiferal Research*, 5(3), 193–210. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.5.3.193>
- Brooks, W. W. (1973). Distribution of Recent Foraminifera from the Southern Coast of Puerto Rico. *Micropaleontology*, 19(4), 385. <https://doi.org/10.2307/1484904>
- Broska, L. H., Poganietz, W.-R., & Vögele, S. (2020). Extreme events defined—A conceptual discussion applying a complex systems approach. *Futures*, 115(September 2019), 102490. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2019.102490>
- Caicedo, J. ., Martinelli, B., Meyer, H., & Steer, R. (1996). Efecto de tsunami del Mar Caribe en la costa de Colombia. *Memorias Del Seminario Nacional de Ciencia y Tecnologías Del Mar*, 1.
- Carman, K. W. (1933). Dentostomina, A new genus of the Miliolidae. In *Contributions From the Cushman laboratory for foraminiferal research (part 2)* (pp. 31–32).
- Carmona-Galindo, V. D. Carmona, T. V. (2013). La Diversidad De Los Análisis De Diversidad. *Bioma*, 14(November), 20–28.
- Caruso, A., Cosentino, C., Tranchina, L., & Brai, M. (2011). Response of benthic foraminifera to heavy metal contamination in marine sediments (Sicilian coasts, Mediterranean Sea). *Chemistry and Ecology*, 27(1), 9–30. <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.529076>
- Celia Magno, M., Bergamin, L., Finoia, M. G., Pierfranceschi, G., Venti, F., & Romano, E. (2012). Correlation between textural characteristics of marine sediments and benthic foraminifera in highly anthropogenically-altered coastal areas. *Marine Geology*, 315–318, 143–161. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.04.002>
- Chen, C., & Lin, H. L. (2017). Applying benthic foraminiferal assemblage to evaluate the coral reef condition in dongsha atoll lagoon. *Zoological Studies*, 56(October). <https://doi.org/10.6620/ZS.2017.56-20>
- CIOH. (2007). *Boletín Meteorológico mensual del Caribe Colombiano*.
- CIOH. (2010). *Circulación general de la atmósfera en Colombia*.
- Cochran, U. A., Berryman, K. R., Mildenhall, D. C., Hayward, B. W., Southall, K., & Hollis, C. J. (2005). Towards a record of holocene tsunami and storms for northern hawke's

- bay, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48(3), 507–515.  
<https://doi.org/10.1080/00288306.2005.9515129>
- Collins, L. S. (1989). Relationship of environmental gradients to morphologic variation within *Bulimina aculeata* and *Bulimina marginata*, Gulf of Maine area. *The Journal of Foraminiferal Research*, 19(3), 222–234. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.19.3.222>
- Comisión Colombiana del Océano (CCO). (2015). *Aportes al conocimiento de la reserva de Biósfera Seaflower*. Comisión Colombiana Del Océano.
- Cotilla Rodríguez, M. O. (2011). ¿Tsunamis en Cuba? *Física de La Tierra*, 23, 173–197.  
[https://doi.org/10.5209/rev\\_FITE.2011.v23.36918](https://doi.org/10.5209/rev_FITE.2011.v23.36918)
- Cottey, T. L., & Hallock, P. (1988). *Test surface degradation in Archaias Angulatus*. 18(3), 187–202.
- Crevison, H., & Hallock, P. (2007). Anomalous features observed on tests of live Archaiasine foraminifers from the Florida Keys, Usa. *The Journal of Foraminiferal Research*, 37(3), 223–233. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.37.3.223>
- Cruz-Palacios, V., & van Tussenbroek, B. I. (2005). Simulation of hurricane-like disturbances on a Caribbean seagrass bed. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 324(1), 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.04.002>
- Cuculeanu, V., & Pavelescu, M. (2013). Climate Change and Extreme Events. *Annals of the Academy of Romanian Scientists Physics Series*, 2(1), 64–75.
- Culver, S. J. (1993). Chapter 12: Foraminifera. In *Fossil Prokaryotes and Protists* (pp. 203–247).
- Cushman, J. A. (1946). The genus *Hauerina* and Its species. In *Contributions from the Cushman laboratory for foraminiferal research* (Vol. 22, Issue Part 1, pp. 2–15).
- Cushman, Joseph A. (1922). *Shallow - water foraminifera of the tortugas region* (311th ed.). Carnegie institution of Washington.
- Cushman, Joseph A. (1930). The Foraminifera of the Atlantic Ocean pt. 7: Nonionidae, Camerinidae, Peneroplidae, and Alveolinellidae. *Bulletin of the United States National Museum*, 104, 112. <https://doi.org/10.5479/si.03629236.104.6>
- Cushman, Joseph A. (1929). The foraminifera of the Atlantic Ocean: Part 6 Miliolidae, Ophthalmitidae and Fischerinidae. *Bulletin of the United States National Museum*, 104, 172.
- Darwin, C. (1842). Theory of the formation of the different classes of coral- reefs. In *The structure and distribution of coral reefs* (Vol. 2, pp. 88–118).
- Dawson, J. L., Smithers, S. G., & Hua, Q. (2014). Geomorphology The importance of large benthic foraminifera to reef island sediment budget and dynamics at Raine Island , northern Great Barrier Reef. *Geomorphology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.023>

- Debenay, J.-P. (2012). a Guide To 1,000 Foraminifera From Southwestern Pacific, New Caledonia. In *The Journal of Foraminiferal Research*. IRD Editions.
- Debenay, J. P., Geslin, E., Eichler, B. B., Duleba, W., Sylvestre, F., & Eichler, P. (2001). Foraminiferal assemblages in a hypersaline lagoon, Araruama (R.J.) Brazil. *Journal of Foraminiferal Research*, 31(2), 133–151. <https://doi.org/10.2113/0310133>
- Díaz-pulido, G., Sánchez, J. A., Zea, S., Díaz, J. M., & Garzón-Ferreira, J. (2004). Esquemas de Distribución espacial en la comunidad bentónica de arrecifes coralinos continentales y oceánicos del Caribe Colombiano. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 28(108), 337–347.
- Díaz, J. M. (2005). Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia). *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, V.29 fasc.(ISSN: 0370-3908), p.357-369. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00038/full>
- Díaz, J. M., & Acero, A. (2003). Marine Biodiversity in Colombia: Achievements, Status of Knowledge, and Challenges (Biodiversidad Marina En Colombia: Estado Actual Del Conocimiento Y Desafios Futuros). *Actas Del Primer Taller Sudamericano de Biodiversidad Marina*, 67(July), 261–274.
- Díaz, J. M., Barrios, L. M., Cendales, M. H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., Ospina, G. H., Parra-Velandia, F., Pinzón, J., Vargas-Angel, B., Zapata, F. A., Zea, S., Díaz, J., Barrios, L. M., Cendales, M. H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., Ospina, G. H., ... INVEMAR. (2000). Áreas coralinas de Colombia. *Serie Publicaciones Especiales*, 5, 178.
- Díaz, J. M., Díaz-Pulido, G., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., Sánchez, J. A., & Zea, S. (1996). *Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe Colombiano I. Complejos arrecifales oceánicos*. INVEMAR.
- Díaz Merlano, J. M. (2005). Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia). *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, V.29 fasc.(ISSN: 0370-3908), p.357-369. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00038/full>
- Dong, S., Lei, Y., Li, T., & Jian, Z. (2019). Responses of benthic foraminifera to changes of temperature and salinity: Results from a laboratory culture experiment. *Science China Earth Sciences*, 62(2), 459–472. <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9269-3>
- Dong, S., Lei, Y., Li, T., & Jian, Z. (2020). Response of benthic foraminifera to pH changes: Community structure and morphological transformation studies from a microcosm experiment. *Marine Micropaleontology*, 156(November 2019), 101819. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.101819>
- Duvat, V. K. E., Pillet, V., Volto, N., Terorotua, H., & Laurent, V. (2020). Contribution of moderate climate events to atoll island building (Fakarava Atoll, French Polynesia).

- Geomorphology*, 354, 107057. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107057>
- Dysthe, K., Krogstad, H. E., & Müller, P. (2008). Oceanic Rogue Waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40(1), 287–310. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102203>
- Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E., & Ambenje, P. (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(Marzo), 417–425.
- Easterling, David R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science*, 289(5487), 2068–2074. <https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>
- Ebi, K. L., & Bowen, K. (2016). Extreme events as sources of health vulnerability: Drought as an example. *Weather and Climate Extremes*, 11, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.001>
- Engel, M., Brückner, H., Messenzehl, K., Frenzel, P., May, S. M., Scheffers, A., Scheffers, S., Wennrich, V., & Kelletat, D. (2012). Shoreline changes and high-energy wave impacts at the leeward coast of Bonaire (Netherlands Antilles). *Earth, Planets and Space*, 64(10), 905–921. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.08.011>
- Fairbridge, R. W. (1961). Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4(C), 99–185. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(61\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0)
- Fajemila, O. T., Langer, M. R., & Lipps, J. H. (2015). Spatial patterns in the distribution, diversity and abundance of benthic foraminifera around Moorea (Society Archipelago, French Polynesia). *PLoS ONE*, 10(12), 1–25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145752>
- Falkland, A. C. (1993). Hydrology and water management on small tropical islands. *Hydrology of Warm Humid Regions. Proc. International Symposium, Yokohama, 1993*, 216, 263–303.
- Falkland, A., & Diaz, A. (1991). Geology and geomorphology: Common geological situations in small islands. In *Hydrology and water resources of small islands: A practical guide*.
- Farazmand, M., & Sapsis, T. P. (2018). Extreme Events: Mechanisms and Prediction. *Applied Mechanics Reviews*, 71(5). <https://doi.org/10.1115/1.4042065>
- 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)
- Fellowes, T. E., Gacutan, J., Harris, D. L., Vila-Concejo, A., Webster, J. M., & Byrne, M. (2017). Patterns of Sediment Transport Using Foraminifera Tracers across Sand Aprons on the Great Barrier Reef. *Journal of Coastal Research*, 33(4), 864–873. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00082.1>
- Fiorini, F., & Lokier, S. W. (2020). Abnormal test growth in Larger Benthic Foraminifera

- from hypersaline coastal ponds of the United Arab Emirates. *Micropaleontology*, 66(2), 151–156.
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3–26.
- Foraminifera eu. (2021). *Foraminifera eu Project Database*.  
<https://foraminifera.eu/about.html>
- Fujita, K., Nagamine, S., Ide, Y., Umezawa, Y., Hosono, T., Kayanne, H., & Yamano, H. (2014). Distribution of large benthic foraminifers around a populated reef island: Fongafale Island, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Marine Micropaleontology*, 113, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2014.08.008>
- Garzon, J., & Diaz, J. M. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia. *Elsevier*, 27.
- Geister, J. (1977). The influence of wave exposure on the ecological zonation of caribbean coral reefs. *Third International Coral Reef Symposium*, 23–30.
- Geister, J., & Díaz, J. M. (1997). A field guide to the oceanic barrier reefs and atolls of the southwestern Caribbean (Archipelago of San Andrés and Providencia, Colombia). In *Proc 8th Int Coral Reef Sym 1* (Vol. 8, Issue 1, pp. 235–262).
- Geister, J., & Díaz, J. M. (2007). *Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Mar Caribe, Colombia) con guía de campo*.
- Geslin, E., Stouff, V., Debenay, J.-P., & Lesourd, M. (2000). *Environmental Variation and Foraminiferal Test Abnormalities* (Vol. 15, pp. 191–215). [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4167-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4167-7_10)
- Goldstein, S. T. (1999). Foraminifera: A biological overview. In *Modern Foraminifera* (pp. 37–55). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/0-306-48104-9\\_3](https://doi.org/10.1007/0-306-48104-9_3)
- Goldstein, S. T., & Corliss, B. H. (1994). Deposit feeding in selected deep-sea and shallow-water benthic foraminifera. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41(2), 229–241. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90001-9)
- Gómez, J., Montes, N. E., Nivia, A., Diederix, H., & Compiladores. (2015). Mapa Geológico de Colombia y Atlas Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1.000.000. Producto. In *Servicio Geológico Colombiano*. <https://doi.org/10.32685/10.143.2015.935>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio (IPCC). (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. In *IPCC*. [www.ipcc-wg2.gov/AR5](http://www.ipcc-wg2.gov/AR5)
- Hallock, P. (2000). Symbiont-bearing foraminifera: Harbingers of global change? *Micropaleontology*, 46(SUPPLEMENT 1), 95–104.
- Hallock, P., Talge, H. K., Cockey, E. M., & Muller, R. G. (1995). A new disease in reef-

- dwelling Foraminifera; implications for coastal sedimentation. *The Journal of Foraminiferal Research*, 25(3), 280–286. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.25.3.280>
- Hallock, Pamela. (2016). *Symbiont-Bearing Foraminifera : Harbingers of Global Change ? Author ( s ) : Pamela Hallock Stable URL : http://www.jstor.org/stable/1486183 Symbiont-bearing foraminifera : harbingers of global change ? 46(2000), 95–104.*
- Hallock, Pamela, & Peebles, M. W. (1993). Foraminifera with chlorophyte endosymbionts: Habitats of six species in the Florida Keys. *Marine Micropaleontology*, 16. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(93\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0377-8398(93)90037-X)
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST : Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaentologia Electronica*. [https://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)
- Harley, C. D. G., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., & Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2), 228–241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>
- Haynes, J. R. (1981). Test Morphology and Composition. In *Foraminifera* (pp. 40–59). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1007/978-1-349-05397-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-349-05397-1_4)
- Herold, J. W. (1959). Atoll Development and Morphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 49 No.1(Mar., 1959), 31–54. [https://www.jstor.org/stable/2561287?seq=1&cid=pdf-reference#references\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/2561287?seq=1&cid=pdf-reference#references_tab_contents)
- Herring, D. (2020). *What is an “extreme event” ? is there evidence that global warming has caused or contributed to any particular extreme event?* NOAA. <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/what-extreme-event-there-evidence-global-warming-has-caused-or-contributed>
- Hodge, J. B., Anzah, F., & Dixon, R. W. (2018). Miles O. Hayes, Hurricanes as Geological Agents: Case studies of Hurricanes Carla, 1961, and Cindy, 1963 , 1967. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 42(2), 257–264. <https://doi.org/10.1177/0309133318765087>
- Hofker, J. (1969). Recent Foraminifera from Barbados. *Studies on the Fauna of Curaçao and Other Caribbean Islands*., 31(No. 115), 158.
- Hofker, J. (1971). *Studies on the fauna of curaçao and other caribbean islands: No. 83 Foraminifera from tidal zone in the Netherlands Antilles and other West Indian islands.*
- Holbourn, A., Henderson, A., & MacLeod, N. (2013). *Atlas of Benthic Foraminifera*. John Wiley & Sons.
- Hottinger, L. (2006). Illustrated glossary of terms used in foraminiferal research. *Carnets de Géologie (Notebooks on Geology)*, 02(Mémoires). <https://doi.org/10.4267/2042/5832>
- Huggett, R. J. (2011). Fundamentals of Geomorphology. In *Fundamentals of Geomorphology* (Third edit). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203860083>



- I. de investigación de recursos biológicos A. V. H. ( I. HUMBOLT) (2021). *Expedición Cangrejo Negro*.
- Idárraga-García, J., García-Varón, J., & León, H. (2021). Submarine geomorphology, tectonic features and mass wasting processes in the archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (western Caribbean). *Marine Geology*, 435(December 2020), 106458. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106458>
- IDEAM. (2010). *Estudio Sobre La Variabilidad De La Temperatura Superficial Del Mar En El Caribe Colombiano* (Vol. 4, Issue 1). [http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/E\\_Portal\\_VARIABILIDAD+DE+LA+TEMPERATURA+SUPERFICIAL+DEL+MAR+EN+EL+CARIBE+COLOMBIANO\[1\].pdf/c3b0a31f-0e02-47e5-b6ff-109c92fd8b20](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/E_Portal_VARIABILIDAD+DE+LA+TEMPERATURA+SUPERFICIAL+DEL+MAR+EN+EL+CARIBE+COLOMBIANO[1].pdf/c3b0a31f-0e02-47e5-b6ff-109c92fd8b20)
- INVEMAR-GEO, 2016. (2016). *Evaluación física y biológica de los ambientes profundos de la isla Cayo Serrana en la reserva de biósfera-Seaflower*.
- INVEMAR. (2002). *Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia año 2002*.
- INVEMAR. (2021). *Capitulo VI: Operación cangrejo negro. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en colombia, 2020*.
- Jaramillo-González, J., & Acosta, A. (2009). Comparación temporal en la estructura de una comunidad coralina en primeros estados de sucesión, Isla de San Andrés, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 38(2), 29–53.
- Javaux, E. J., & Scott, D. B. (2003). Illustration of modern benthic foraminifera from Bermuda and Remarks on Distribution in other subtropical/ tropical areas. *Paleontologia Electronica*, 6(4), 29.
- Jones, R. W. (2013). Foraminifera and their Applications. In *Foraminifera and their Applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139567619>
- Jordan, C. L. (1966). Surface pressure variations at coastal stations during the period of irregular motion of hurricane Carla of 1961. *Monthly Weather Review*, 94(7), 454–458.
- 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 Paleooceanographical 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)
- Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation. (2014). *Coral Reef Ecology Curriculum Unit 11: Reef Zonation* (Issue 2014). <https://www.livingoceansfoundation.org/education/portal/>
- Klostermann, L., Gischler, E., Storz, D., & Hudson, J. H. (2014). Sedimentary record of late

- Holocene event beds in a mid-ocean atoll lagoon, Maldives, Indian Ocean: Potential for deposition by tsunamis. *Marine Geology*, 348, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.014>
- Kontrovitz, M. (1966). An investigation of ostracode preservation. *Quarterly Journal of the Florida Academy of Sciences*, 29(3), 171–177. <https://www.jstor.org/stable/24315155>
- Kontrovitz, M., Eric A, P., & Hollis, B. (1998). Experimental Crushing of Some Podocopid Ostracode Valves : An Aspect of Taphonomy. *SEPM Society for Sedimentary Geology*, 13(5), 500–507.
- Kosciuch, T. J., Pilarczyk, J. E., Hong, I., Fritz, H. M., Horton, B. P., Rarai, A., Harrison, M. J., & Jockley, F. R. (2018). Foraminifera reveal a shallow nearshore origin for overwash sediments deposited by Tropical Cyclone Pam in Vanuatu (South Pacific). *Marine Geology*, 396(May 2017), 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.06.003>
- Kowalski, J. L., DeYoe, H. R., & Boza, G. H. (2018). A Comparison of Salinity Effects from Hurricanes Dolly (2008) and Alex (2010) in a Texas Lagoon System. *Journal of Coastal Research*, 34(6), 1429. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00011.1>
- Kucera, M. (2007). Chapter Six Planktonic Foraminifera as Tracers of Past Oceanic Environments. In *Developments in Marine Geology* (Vol. 1, Issue December 2007, pp. 213–262). [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01011-1](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01011-1)
- Lander, J. F., Whiteside, L. S., & Lockridge, P. A. (2002). A brief history of the tsunamis in the caribbean sea. *The International Journal of the Tsunami Society*, 20(1), 57–94.
- Lawrence, M. (1979). *Atlantic Hurricane Season of 1978*. 477–492.
- Li, C., Jones, B., & Blanchon, P. (1997). Lagoon-Shelf Sediment Exchange by Storms-- Evidence from Foraminiferal Assemblages, East Coast of Grand Cayman, British West Indies. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 67(1), 17–25. <https://doi.org/10.1306/D42684DC-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Lizano Rodríguez, O. G., & Mora Escalante, R. E. (2019). Simulación de las condiciones oceanográficas de los huracanes que han pasado más cerca de Costa Rica. *En Torno a La Prevención*, 22, 21–32.
- Lizcano-Sandoval, L. D., Marulanda-Gómez, Á., López-Victoria, M., & Rodriguez-Ramirez, A. (2019). Climate Change and Atlantic Multidecadal Oscillation as Drivers of Recent Declines in Coral Growth Rates in the Southwestern Caribbean. *Frontiers in Marine Science*, 6(Febrero), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00038>
- Loeblich, A. R., Moore, R. C., & Tappan, H. (1964a). *Treatise on Invertebrate Paleontology* (Vol. 1, p. 543). <https://doi.org/10.2307/2406301>
- Loeblich, A. R., Moore, R. C., & Tappan, H. (1964b). *Treatise on invetebrate paleontology: Protista 2.Sarcodina Chiefly Thecamoebians and Foraminiferida* (p. 393).
- Loeblich, A. R., & Tappan, H. (1984). Suprageneric Classification of the Foraminiferida (Protozoa). *Micropaleontology*, 30(1), 1. <https://doi.org/10.2307/1485456>

- Lozano-Duque, Y., Medellín-Mora, J., & Navas, G. . (2010). Contexto Climatológico y Oceanográfico del Mar Caribe Colombiano. In *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano* (pp. 53–84). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1293.8329>
- Martínez-Clavijo, S., Correa-Ramirez, M., Paramo, J., & Ricaurte-Villota, C. (2019). Methodological approach for hydroacoustic seabed characterization in Serrana Bank (Seaflower Biosphere Reserve). *Continental Shelf Research*, 187(August), 103961. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103961>
- Martins, M. V. A., Yamashita, C., e Sousa, S. H. D. M., Koutsoukos, E. A. M., Disaró, S. T., Debenay, J. P., & Duleba, W. (2019). Response of Benthic Foraminifera to Environmental Variability: Importance of Benthic Foraminifera in Monitoring Studies. In *Monitoring of Marine Pollution* (pp. 1–26). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81658>
- Mauffret, A., & Leroy, S. (1997). Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province. *Tectonophysics*, 283(1–4), 61–104. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00103-0)
- Meehl, G. A., Karl, T., Easterling, D. R., Changnon, S., Pielke, R., Changnon, D., Evans, J., Groisman, P. Y., Knutson, T. R., Kunkel, K. E., Mearns, L. O., Parmesan, C., Pulwarty, R., Root, T., Sylves, R. T., Whetton, P., & Zwiers, F. (2000). An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections \*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 413–416. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0413:AITTIE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0413:AITTIE>2.3.CO;2)
- Meng, M., Yu, K., Hallock, P., & Qin, G. (2020). Distribution of recent Foraminifera as depositional indicators in Yongle Atoll, Xisha Islands, South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 158, 101880. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101880>
- Mercado, A., & McCann, W. (1998). Numerical Simulation of the 1918 Puerto Rico Tsunami. *Natural Hazards*, 18, 57–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1008091910209>
- Mikhalevich, V., & Debenay, J.-P. (2001). The main morphological trends in the development of the foraminiferal aperture and their taxonomic significance. *Journal of Micropalaeontology*, 20(1), 13–28. <https://doi.org/10.1144/jm.20.1.13>
- Milliman, J. D. (1969). Four Southwestern Caribbean Atolls: Courtown Cays, Albuquerque Cays, Roncador Bank and Serrana Bank. *Atoll Research Bulletin*, 129(129), 1–26. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.129.1>
- Monticelli Petró, S. (2018). *Introdução ao estudo dos foraminíferos*.
- Morrison, J. M., & Nowlin, W. D. (1982). General distribution of water masses within the eastern Caribbean Sea during the winter of 1972 and fall of 1973. *Journal of Geophysical Research*, 87(C6), 4207. <https://doi.org/10.1029/JC087iC06p04207>
- Munar, F. (2000). Interpretación estructural del área alrededor de los cayos quitasueño y Serrana, en el Caribe, costa afuera de Colombia. *CT y F - Ciencia, Tecnología y Futuro*,

2(1), 83–93.

- Narváez, G., & León, G. (2003). Intrusión De Aire Frío En Áreas Tropicales Estudio De Caso Del 5 Al 8 De Enero Del 2002. *Metereología Colombiana*, 99–108. METEOROLOGÍA COLOMBIANA N°7, MARZO 2003%0AEs
- Nikolkina, I., Zahibo, N., & Pelinovsky, E. (2010). Tsunami in Guadeloupe (Caribbean Sea). *The Open Oceanography Journal*, 4(1), 44–49. <https://doi.org/10.2174/1874252101004010044>
- Norton, G. (1953). Hurricanes of 1952. *Weather Bureau Office, Miami, Fl, January*, 21–24.
- Nurse, L. A., McLean, R. F., Agard, J., Briguglio, L. P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., Tompkins, E., & Webb, A. (2014). Small Islands. In K. Y. (Japan) Thomas Spencer (UK) (Ed.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects: Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 42).
- O'loughlin, K. F., & Lander, J. F. (2003). *Caribbean Tsunamis: a 500- year history from 1948-1998* (Vol. 20). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0321-5>
- Oppenheimer, C. H. (1964). Effects of Hurricane Carla on the ecology of Redfish Bay, Texas. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 11(6), 961. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(64\)90429-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(64)90429-2)
- Ortiz-Royero, J. C. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el Mar Caribe colombiano desde 1900. *Boletín Científico CIOH*, 60(25), 54–60.
- Ortiz-Royero, J. C. (2012). Exposure of the Colombian Caribbean coast, including San Andrés Island, to tropical storms and hurricanes, 1900–2010. *Natural Hazards*, 61(2), 815–827. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0069-1>
- Ortiz-Royero, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J., & Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2797–2804. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2797-2013>
- Osawa, Y., Fujita, K., Umezawa, Y., Kayanne, H., Ide, Y., Nagaoka, T., Miyajima, T., & Yamano, H. (2010). Human impacts on large benthic foraminifers near a densely populated area of Majuro Atoll, Marshall Islands. *Marine Pollution Bulletin*, 60(8), 1279–1287. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.014>
- Oswald, Ú. (2012). *Vulnerabilidad Social En Eventos Hidrometeorológicos Extremos : Una Comparación entre los huracanes Stan y Wilma en México*. 22, 125–146.
- Palmer, S. E., Burn, M. J., & Holmes, J. (2020). A multiproxy analysis of extreme wave deposits in a tropical coastal lagoon in Jamaica, West Indies. *Natural Hazards*, 104(3), 2531–2560. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04284-2>
- Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio Climático (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007 Base de ciencia física*.

- Pardue, L. G., & Hope, J. R. (1972). The Hurricane Season of 1971. *Weatherwise*, 25(1), 11–19. <https://doi.org/10.1080/00431672.1972.9931571>
- Parker, J. H., & Gischler, E. (2011). Modern foraminiferal distribution and diversity in two atolls from the Maldives, Indian Ocean. *Marine Micropaleontology*, 78(1–2), 30–49. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2010.09.007>
- Patarroyo, G. D. (2019). El presente es la clave del pasado : Un estudio actualista de las asociaciones de foraminíferos del Cayo Albuquerque ( Reserva de la Biosfera Seaflower , Colombia ). *XVII Congreso Colombiano de Geología, September*. [https://www.researchgate.net/publication/335590349\\_El\\_presente\\_es\\_la\\_clave\\_del\\_pasado\\_Un\\_estudio\\_actualista\\_de\\_las\\_asociaciones\\_de\\_foraminiferos\\_del\\_Cayo\\_Albuquerque\\_Reserva\\_de\\_la\\_Biosfera\\_Seaflower\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/335590349_El_presente_es_la_clave_del_pasado_Un_estudio_actualista_de_las_asociaciones_de_foraminiferos_del_Cayo_Albuquerque_Reserva_de_la_Biosfera_Seaflower_Colombia)
- Patarroyo, G., & Gomez, D. F. (2020). *FORAMINIFERAL ASSEMBLAGES AS BIODINDICATORS IN AN ISOLATED REEF SETTING OF THE CARIBBEAN REALM (ALBUQUERQUE CAY, COLOMBIAN CARIBBEAN)*. October. <https://doi.org/10.1130/abs/2020AM-357413>
- Pelinovsky, E., Zahibo, N., Dunkley, P., Edmonds, M., Herd, R., Talipova, T., Kozelkov, A., & Nikolchina, I. (2004). Tsunami Generated By the Volcano Eruption on July 12–13, 2003 At Montserrat, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, 22(1), 44–57. <http://library.lanl.gov/tsunami/221/empel.pdf>
- Pelissier, J. M., & Lawrence, M. B. (1979). The Hurricane Season of 1978. *Weatherwise*, 32(1), 38–41. <https://doi.org/10.1080/00431672.1979.9930070>
- Peñaloza - Murillo, M. A. (2016). Relación histórica de tsunamis en Venezuela. *Nuestro Sur Historia. Memoria y Patrimonio*, 9(Enero-Abril), 127–157.
- Perkins-Kirkpatrick, S., & Pitman, A. (2018). Extreme events in the context of climate change. *Public Health Research & Practice*, 28(4), 2–5. <https://doi.org/10.17061/phrp2841825>
- Prazeres, M., Martínez-Colón, M., & Hallock, P. (2020). Foraminifera as bioindicators of water quality: The FoRAM Index revisited. *Environmental Pollution*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113612>
- Puerres, L. Y., Bernal, G., Brenner, M., Restrepo-Moreno, S. A., & Kenney, W. F. (2018). Sedimentary records of extreme wave events in the southwestern Caribbean. *Geomorphology*, 319, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.002>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Ricaurte-Villota, C., & Bastidas-Salamanca, M. L. (2017). Regionalización oceanográfica, una visión dinámica del Caribe. In *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés (INVEMAR). Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 14*.
- Rings, T., Mazarei, M., Akhshi, A., Geier, C., Tabar, M. R. R., & Lehnertz, K. (2019).

Traceability and dynamical resistance of precursor of extreme events. *Scientific Reports*, 9(1), 1744. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38372-y>

- Rodríguez-Ramírez, A., Bastidas, S., Rodríguez, S., Leão, Z., Kikuchi, R., Oliveira, M., Gil, D., Garzón-Ferreira, J., Reyes-Nivia, M., Navas-Camacho, R. Santodomingo, N., Díaz-Pulido, G., Venera-Ponton, D., Florez-Leiva, L., Rangel-Campo, A., Orozco, C., Márquez, J. C., Armando, J., & Hurtado, M. (2005). The Effects of Coral Bleaching in Southern Tropical America: Brazil, Colombia, and Venezuela. *Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in 2005, November*, 105–114.
- Romero, D. A., Bernal, G., & Zea, S. (2014). Variables ambientales durante blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(149), 347. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.49>
- Sadough, M., Fatemeh, G., Hamed, M., Babak, M., & Hour, B. (2013). Identification and Abundance of Benthic Foraminifera in the Sediments from Fereidoonkenar to Babolsar of Southern Caspian Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 13(1), 79–86. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v13\\_1\\_10](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v13_1_10)
- Salazar-Ríos, A., & Bernal, L. (2020). Paracytheridea pucketti nom. nov. for Paracytheridea inflata Puckett, 2008 (Ostracoda, Crustacea). *Revista Brasileira de Paleontologia*, 23(3), 222–223. <https://doi.org/10.4072/rbp.2020.3.06>
- Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Calafat, A. M., Lastras, G., Pedrosa-Pàmies, R., Menéndez, M., Medina, R., Company, J. B., Hereu, B., Romero, J., & Alcoverro, T. (2012). Impacts on the Deep-Sea Ecosystem by a Severe Coastal Storm. *PLoS ONE*, 7(1), e30395. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030395>
- Sánchez, J. A., Gómez-Corrales, M., Gutierrez-Cala, L., Vergara, D. C., Roa, P., González-Zapata, F. L., Gnecco, M., Puerto, N., Neira, L., & Sarmiento, A. (2019). Steady Decline of Corals and Other Benthic Organisms in the SeaFlower Biosphere Reserve (Southwestern Caribbean). *Frontiers in Marine Science*, 6(Febrero), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00073>
- Sanchez, J. A., Pizarro, V., Acosta-De-Sanchez, A. R., Castillo, P. A., Herron, P., Martinez, J. C., Montoya, P., & Orozco, C. (2005). Evaluating coral reef benthic communities in remote atolls (Quitassueno, Serrana, and Roncador Banks) to recommend marine-protected areas for the Seaflower Biosphere Reserve. *Atoll Research Bulletin*, 531(531–542), 1–66. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.531.1>
- Schultz, S., Gischler, E., & Oschmann, W. (2010). Holocene trends in distribution and diversity of benthic foraminifera assemblages in atoll lagoons, Belize, Central America. *Facies*, 56(3), 323–336. <https://doi.org/10.1007/s10347-010-0217-1>
- Scott, D. B., Schafer, C. T., & Medioli, F. S. (2007). Chapter 1: Some perspectives on testate Rhizopods. In *Monitoring in coastal environments using foraminifera and thecamoebian indicators* (p. 4). Cambridge University Press.
- Seiglie, G. A., & Bermúdez, P. J. (1965). Monografía de la familia de foraminíferos Glabratellidae. *Geos*, 1965, 15–65.

- Shultz, J. M., Berg, R. C., Kossin, J. P., Burkle Jr, F., Maggioni, A., Pinilla Escobar, V. A., Castillo, M. N., Espinel, Z., & Galea, S. (2021). Convergence of climate-driven hurricanes and COVID-19: The impact of 2020 hurricanes Eta and Iota on Nicaragua. *The Journal of Climate Change and Health*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2021.100019>
- Simpson, R. H., & Hope, R. H. (1972). *Atlantic hurricane season of 1997*. 100(4), 256–268. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2012:AHSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2012:AHSO>2.0.CO;2)
- Smith, K. A., & Caffrey, J. M. (2009). The effects of human activities and extreme meteorological events on sediment nitrogen dynamics in an urban estuary, Escambia Bay, Florida, USA. *Hydrobiologia*, 627(1), 67–85. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9716-x>
- Souder, H. C., McCloskey, B., Hallock, P., & Byrne, R. (2010). Shell anomalies observed in a population of *Archaias angulatus* (Foraminifera) from the Florida Keys (USA) sampled in 1982–83 and 2006–07. *Marine Micropaleontology*, 77(1–2), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2010.07.005>
- Souder, H. L. (2009). Shell abnormalities in *Archaias angulatus* (Foraminifera) from the Florida Keys: An indication of increasing environmental stress? *ProQuest Dissertations and Theses*, 127. <http://eres.library.manoa.hawaii.edu/login?url=https://www.proquest.com/dissertations-theses/shell-abnormalities-i-archaias-angulatus/docview/304996411/se-2?accountid=27140%0Ahttps://libkey.io/libraries/2283/openurl/?genre=dissertations+%26+theses&issn=&t>
- Spalding, M. D., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). World atlas of coral reefs. *Choice Reviews Online*, 39(05), 39-2540-39–2540. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.39-2540>
- Stoddart, D. R. (1963). Effects of Hurricane Hattie on the British Honduras reefs and cays. *Atoll Research Bulletin*, 95.
- Stoddart, D. R. (1969). ECOLOGY AND MORPHOLOGY OF RECENT CORAL REEFS. *Biological Reviews*, 44(4), 433–498. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1969.tb00609.x>
- Storlazzi, C. D., Elias, E. P. L., & Berkowitz, P. (2015). Many Atolls May be Uninhabitable Within Decades Due to Climate Change. *Scientific Reports*, 5, 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep14546>
- Strotz, L. C., Mamo, B. L., & Dominey-Howes, D. (2016). Effects of cyclone-generated disturbance on a tropical reef foraminifera assemblage. *Scientific Reports*, 6(1), 24846. <https://doi.org/10.1038/srep24846>
- Tanner, E. V. J., Kapos, V., & Healey, J. . (1991). Hurricane Effects on Forest Ecosystems in the Caribbean. *Biotropica*, 23(4), 513–521.
- Tappan, H., & Loeblich, A. R. (1988). Foraminiferal Evolution , Diversification , and Extinction. *Journal of Paleontology*, 62(5), 695–714.

- Terry, J. P., & Goff, J. (2013). One hundred and thirty years since Darwin: 'Reshaping' the theory of atoll formation. *The Holocene*, 23(4), 615–619. <https://doi.org/10.1177/0959683612463101>
- Thomas, Y., Nicolae-Lerma, A., & Posada, B. (2012). Atlas climatológico del Mar Caribe Colombiano. Convenio especial de Cooperación Colciencias - Gobernación del Magdalena - Invemar. In *Serie de Publicaciones especiales* (Issue 25).
- Toomey, M. R., Donnelly, J. P., & Woodruff, J. D. (2013). Reconstructing mid-late Holocene cyclone variability in the Central Pacific using sedimentary records from Tahaa, French Polynesia. *Quaternary Science Reviews*, 77, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.019>
- Torrado, L., Carvajal-Arenas, L. C., Sanchez, J., Mann, P., & Silva-Tamayo, J. C. (2019). Late Cretaceous–Cenozoic sequence stratigraphic and paleogeographic controls on petroleum system elements of the Nicaraguan platform, western Caribbean Sea. *AAPG Bulletin*, 103(8), 1925–1962. <https://doi.org/10.1306/12191817068>
- Triffleman, N. J., Hallock, P., Hine, A. C., & Peebles, M. W. (1991). Distribution of Foraminiferal Tests in Sediments of Serranilla Bank, Nicaraguan Rise, Southwestern Caribbean. *Journal of Foraminiferal Research*, 21(1), 39–47.
- Uddin, R., Philipsborn, R., Smith, D., Mutic, A., & Thompson, L. M. (2021). A global child health perspective on climate change, migration and human rights. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.cppeds.2021.101029>
- Ummenhofer, C. C., & Meehl, G. A. (2017). Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160135. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0135>
- UNGRD. (2018a). *Ciclones Tropicales*.
- UNGRD. (2018b). *Propuesta metodológica para elaborar mapa de amenaza de ciclones tropicales para Colombia*. 46. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27227>
- Unicef. (2020). *Central America Hurricanes Eta and Iota* (Issue 4). [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/UNICEF\\_Central\\_America\\_Humanitarian\\_Situation\\_Report\\_No.4\\_Hurricanes\\_ETA\\_and\\_Iota\\_29-21\\_November\\_-\\_1\\_December\\_2020.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/UNICEF_Central_America_Humanitarian_Situation_Report_No.4_Hurricanes_ETA_and_Iota_29-21_November_-_1_December_2020.pdf)
- Uribe, E. S., Luna-Acosta, A., & Etter, A. (2020). Red List of Ecosystems: Risk assessment of coral ecosystems in the Colombian Caribbean. *Ocean & Coastal Management*, 199(November 2020), 105416. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105416>
- Uthicke, S., & Altenrath, C. (2010). Water column nutrients control growth and C:N ratios of symbiont-bearing benthic foraminifera on the Great Barrier Reef, Australia. *Limnology and Oceanography*, 55(4), 1681–1696. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.4.1681>



- van Oldenborgh, G. J., van der Wiel, K., Sebastian, A., Singh, R., Arrighi, J., Otto, F., Haustein, K., Li, S., Vecchi, G., & Cullen, H. (2018). Corrigendum: Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017 (2017 Environ. Res. Lett. 12 124009). *Environmental Research Letters*, 13(1), 019501. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa343>
- van Tussenbroek, B. I., Barba Santos, M. G., van Dijk, J. K., Sanabria Alcaraz, S. N. M., & Téllez Calderón, M. L. (2008). Selective Elimination of Rooted Plants from a Tropical Seagrass Bed in a Back-Reef Lagoon: A Hypothesis Tested by Hurricane Wilma (2005). *Journal of Coastal Research*, 24(1), 278–281. <https://doi.org/10.2112/06-0777.1>
- Vega Sequeda, J., Díaz Sánchez, C. M., Gómez Campo, K., López Londoño, T., Díaz Ruiz, M., & Gómez-López, D. I. (2015). BIODIVERSIDAD MARINA EN BAJO NUEVO, BAJO ALICIA Y BANCO SERRANILLA, RESERVA DE BIOSFERA SEAFLOWER. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 44(1), 199–224. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2015.44.1.27>
- Villarreal, 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. In *Programa de Inventarios de Biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Waide, R. B. (1991). The Effect of Hurricane Hugo on Bird Populations in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Biotropica*, 23(4), 475–480.
- Wei, T., & Simko, V. (2021). *R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.90)*. <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments Author (s): Chester K. Wentworth Published by : The University of Chicago Press Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/30063207> . *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392.
- Werner, A. D., Sharp, H. K., Galvis, S. C., Post, V. E. A., & Sinclair, P. (2017). Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs. *Journal of Hydrology*, 551, 819–844. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.047>
- Wood, S. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. In *Journal of the Royal Statistical Society* (Vol. 1, pp. 3–36). <https://doi.org/10.7538/yzk.2014.48.11.1969>
- Woodroffe, C. D. (2008). Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise. *Global and Planetary Change*, 62(1–2), 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.001>
- Woodruff, J. D., Donnelly, J. P., Emanuel, K., & Lane, P. (2008). Assessing sedimentary records of paleohurricane activity using modeled hurricane climatology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(9), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008GC002043>
- WoRMS Editorial Board. (2021). *World Register of Marine Species WoRMS*. <https://doi.org/https://doi.org/10.14284/170>

- Wüst, G. (1964). *Stratification and circulation in the Antillean Caribbean Basin. Part 1. Spreading and mixing of water types with an oceanographic atlas*. Columbia University Press.
- Yu, K.-F., Zhao, J.-X., Shi, Q., & Meng, Q.-S. (2009). Reconstruction of storm/tsunami records over the last 4000 years using transported coral blocks and lagoon sediments in the southern South China Sea. *Quaternary International*, 195(1–2), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.05.004>
- Zahibo, N, Pelinovsky, E., Okal, E., Yalciner, a C., Kharif, C., Talipova, T., & Kozelkov, A. (2005). the Earthquake and Tsunami of November 21, 2004 At Les Saintes, Guadeloupe, Lesser Antilles. *Science of Tsunami Hazards*, 23(1), 25–39. [p:%5CIntern%5CFagansvarlig%5CFlodb?lge%5CLitteraturdatabase%5CTSL\\_Zahibo etal\\_EQTsunami2004\\_SciTsuHaz\\_2005.pdf](http://p:%5CIntern%5CFagansvarlig%5CFlodb?lge%5CLitteraturdatabase%5CTSL_Zahibo%5Cetal_EQTsunami2004_SciTsuHaz_2005.pdf)
- Zahibo, Narcisse, Pelinovsky, E., Yalciner, A., Zaitsev, A., Talipova, T., Nikolkina, I., Chernov, A., Insel, I., Dilmen, D. I., & Ozer, C. (2011). Trans-Atlantic Propagation of 1755 Tsunami and Its Effects on the French West Indies. *The Open Oceanography Journal*, 5(1), 30–41. <https://doi.org/10.2174/1874252101105010030>
- Zambrano, J. A., & Andrade, C. A. (2011). Variation of the Serrana Cay coastline and strategies to protect it from natural threats. *CIOH Scientific Bulletin*, 29, 75–89.
- Zedler, S. E., Dickey, T. D., Doney, S. C., Price, J. F., Yu, X., & Mellor, G. L. (2002). Analyses and simulations of the upper ocean's response to Hurricane Felix at the Bermuda Testbed Mooring site: 13–23 August 1995. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C12), 25-1-25–29. <https://doi.org/10.1029/2001JC000969>
- Zeppilli, D., Sarrazin, J., Leduc, D., Arbizu, P. M., Fontaneto, D., Fontanier, C., Gooday, A. J., Kristensen, R. M., Ivanenko, V. N., Sørensen, M. V., Vanreusel, A., Thébault, J., Mea, M., Allio, N., Andro, T., Arvigo, A., Castrec, J., Danielo, M., Foulon, V., ... Fernandes, D. (2015). Is the meiofauna a good indicator for climate change and anthropogenic impacts? *Marine Biodiversity*, 45(3), 505–535. <https://doi.org/10.1007/s12526-015-0359-z>
- Zhu, Y., & Toth, Z. (2013). *Extreme Weather Events and their Probabilistic Prediction by the NCEP Ensemble Forecast System*. [www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/target/ens/albapr/albapr.html](http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/target/ens/albapr/albapr.html)

## 9. Anexos

### *Anexo 1.* Base de datos de eventos con trayectoria cercana a cayo serrana.

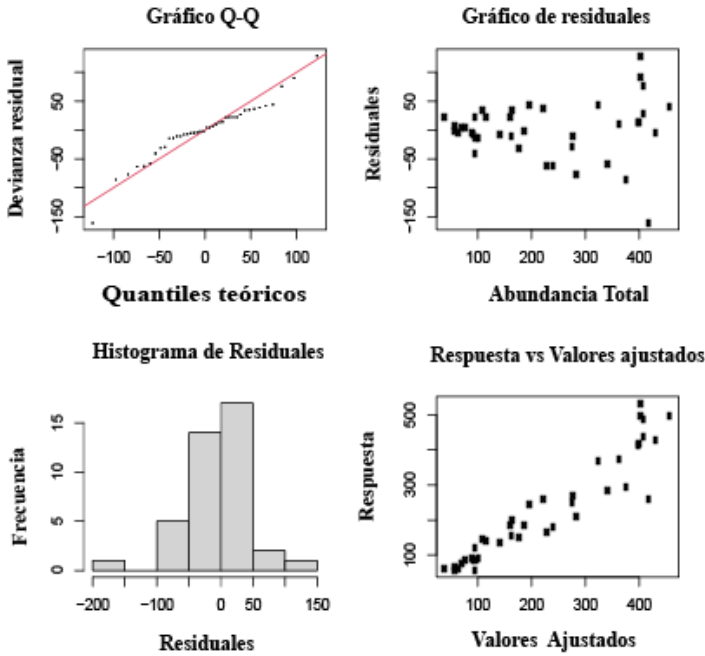
No	Nombre	Maxima velocidad del viento	Mínima presión	Maxima categoría	Inicio y Finalización del evento
1	NOT_NAMED 1852	45	-1	TS	Sep 28, 1852 a Oct 03, 1852
2	NOT_NAMED 1857	55	-1	TS	Sep 07, 1857 a Sep 16, 1857
3	NOT_NAMED 1876	95	1002	H2	Sep 24, 1876 to Oct 02, 1876
4	UNNAMED 1876	100	958	H3	Oct 12, 1876 to Oct 23, 1876
5	UNNAMED 1877	100	-1	H3	Sep 21, 1877 to Oct 05, 1877
<b>6</b>	<b>UNNAMED 1882</b>	<b>120</b>	<b>-1</b>	<b>H4</b>	<b>Oct 05, 1882 a Oct 15, 1882</b>
7	UNNAMED 1887	85	-1	H2	Jul 20, 1887 to Jul 28, 1887
8	NOT_NAMED 1887	55	-1	TS	Sep 15, 1887 to Sep 16, 1887
9	NOT_NAMED 1890	35	-1	TS	Jun 01, 1890 to Jun 05, 1890
10	UNNAMED 1890	80	-1	H1	Oct 31, 1890 to Nov 01, 1890
11	UNNAMED 1891	45	1004	TS	Oct 04, 1891 to Oct 10, 1891
12	NOT_NAMED 1891	55	-1	TS	Oct 23, 1891 to Oct 29, 1891
13	UNNAMED 1892	85	-1	H2	Oct 05, 1892 to Oct 16, 1892
14	UNNAMED 1893	85	-1	H2	Jul 04, 1893 to Jul 07, 1893
15	UNNAMED 1894	105	-1	H3	Oct 01, 1894 to Oct 12, 1894
16	NOT_NAMED 1895	75	-1	H1	Oct 17, 1895 to Oct 19, 1895
17	UNNAMED 1897	70	-1	H1	Oct 09, 1897 to Oct 22, 1897
18	NOT_NAMED 1898	75	-1	H1	Sep 02, 1898 to Sep 13, 1898
19	UNNAMED 1898	50	-1	TS	Sep 12, 1898 to Sep 22, 1898
20	NOT_NAMED 1898	85	-1	H2	Oct 27, 1898 to Nov 03, 1898
21	UNNAMED 1901	45	-1	TS	Sep 21, 1901 to Oct 02, 1901
22	UNNAMED 1904	70	-1	H1	Jun 10, 1904 to Jun 14, 1904
23	UNNAMED 1904	70	-1	H1	Sep 28, 1904 to Oct 04, 1904
24	UNNAMED 1906	105	953	H3	Sep 19, 1906 to Sep 30, 1906
<b>25</b>	<b>UNNAMED 1910</b>	<b>130</b>	<b>924</b>	<b>H4</b>	<b>Oct 09, 1910 a Oct 23, 1910</b>
26	UNNAMED 1912	100	965	H3	Nov 11, 1912 to Nov 21, 1912
27	UNNAMED 1915	85	982	H2	Aug 31, 1915 to Sep 06, 1915
28	UNNAMED 1917	45	-1	TS	Jul 06, 1917 to Jul 14, 1917
29	UNNAMED 1918	90	968	H2	Aug 22, 1918 to Aug 26, 1918
30	UNNAMED 1920	85	975	H2	Sep 16, 1920 to Sep 23, 1920
<b>31</b>	<b>UNNAMED 1921</b>	<b>120</b>	<b>941</b>	<b>H4</b>	<b>Oct 20, 1921 a Oct 30, 1921</b>
32	UNNAMED 1922	95	-1	H2	Oct 11, 1922 to Oct 22, 1922
33	UNNAMED 1924	70	-1	H1	Nov 05, 1924 to Nov 14, 1924
34	UNNAMED 1926	100	955	H3	Aug 20, 1926 to Aug 27, 1926
35	UNNAMED 1926	35	-1	TS	Oct 03, 1926 to Oct 05, 1926
<b>36</b>	<b>UNNAMED 1926</b>	<b>130</b>	<b>934</b>	<b>H4</b>	<b>Oct 14, 1926 a Oct 28, 1926</b>
37	UNNAMED 1926	35	-1	TS	Nov 12, 1926 to Nov 16, 1926
<b>38</b>	<b>UNNAMED 1931</b>	<b>115</b>	<b>-1</b>	<b>H4</b>	<b>Sep 06, 1931 a Sep 13, 1931</b>
39	UNNAMED 1931	45	-1	TS	Nov 11, 1931 to Nov 16, 1931
<b>40</b>	<b>UNNAMED 1932</b>	<b>150</b>	<b>918</b>	<b>H5</b>	<b>Oct 30, 1932 a Nov 14, 1932</b>
41	UNNAMED 1933	80	982	H1	Oct 25, 1933 to Nov 07, 1933
<b>42</b>	<b>UNNAMED 1935</b>	<b>120</b>	<b>955</b>	<b>H4</b>	<b>Sep 23, 1935 a Oct 02, 1935</b>
43	UNNAMED 1935	75	988	H1	Oct 18, 1935 to Oct 27, 1935
<b>44</b>	<b>UNNAMED 1941</b>	<b>115</b>	<b>-1</b>	<b>H4</b>	<b>Sep 23, 1941 a Sep 30, 1941</b>
45	UNNAMED 1945	60	990	TS	Aug 29, 1945 to Sep 01, 1945

Continuación *anexo 1*

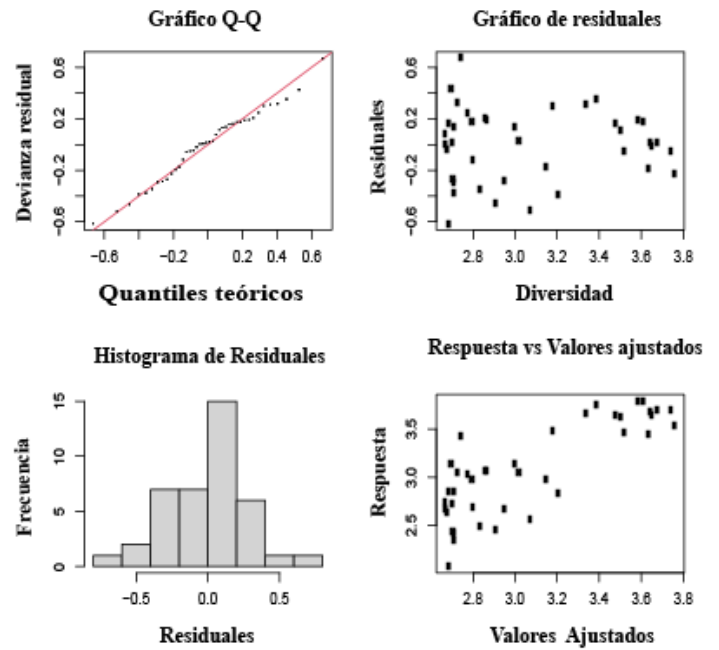
46	UNNAMED 1945	80	982	H1	Oct 02, 1945 to Oct 07, 1945
47	UNNAMED 1947	95	977	H2	Aug 09, 1947 to Aug 16, 1947
48	DOG 1951	80	992	H1	Aug 27, 1951 to Sep 05, 1951
49	ITEM 1951	55	998	TS	Oct 12, 1951 to Oct 17, 1951
<b>50</b>	<b>FOX 1952</b>	<b>125</b>	<b>934</b>	<b>H4</b>	<b>Oct 20, 1952 a Oct 28, 1952</b>
51	GILDA 1954	60	998	TS	Sep 24, 1954 to Sep 30, 1954
52	JUDITH 1959	75	988	H1	Oct 14, 1959 to Oct 22, 1959
53	ABBY 1960	70	995	H1	Jul 09, 1960 to Jul 17, 1960
54	ANNA 1961	90	976	H2	Jul 17, 1961 to Jul 25, 1961
<b>55</b>	<b>CARLA 1961</b>	<b>125</b>	<b>927</b>	<b>H4</b>	<b>Sep 03, 1961 a Sep 18, 1961</b>
<b>56</b>	<b>HATTIE 1961</b>	<b>145</b>	<b>914</b>	<b>H5</b>	<b>Oct 26, 1961 a Nov 01, 1961</b>
57	UNNAMED 1964	60	997	TS	Nov 05, 1964 to Nov 10, 1964
58	GLADYS 1968	75	965	H1	Oct 13, 1968 to Oct 21, 1968
59	ALMA 1970	70	993	H1	May 17, 1970 to May 27, 1970
60	CHLOE 1971	55	1004	TS	Aug 18, 1971 to Aug 25, 1971
<b>61</b>	<b>EDITH 1971</b>	<b>140</b>	<b>943</b>	<b>H5</b>	<b>Sep 05, 1971 a Sep 18, 1971</b>
62	LAURA 1971	60	994	TS	Nov 12, 1971 to Nov 22, 1971
<b>63</b>	<b>GRETA 1978</b>	<b>115</b>	<b>947</b>	<b>H4</b>	<b>Sep 13, 1978 a Sep 20, 1978</b>
64	HERMINE 1980	60	993	TS	Sep 20, 1980 to Sep 26, 1980
65	UNNAMED 1980	30	-1	TD	Nov 12, 1980 to Nov 18, 1980
66	UNNAMED 1987	30	-1	TD	Sep 06, 1987 to Sep 08, 1987
67	UNNAMED 1988	30	-1	TD	Aug 20, 1988 to Aug 24, 1988
68	KEITH 1988	60	945	TS	Nov 17, 1988 to Nov 26, 1988
69	DIANA 1990	85	980	H2	Aug 04, 1990 to Aug 09, 1990
70	LIU 1996	100	960	H3	Oct 14, 1996 to Oct 29, 1996
71	MARCO 1996	65	983	H1	Nov 13, 1996 to Nov 26, 1996
<b>72</b>	<b>WILMA 2005</b>	<b>160</b>	<b>882</b>	<b>H5</b>	<b>Oct 15, 2005 a Oct 26, 2005</b>
73	BETA 2005	100	962	H3	Oct 26, 2005 to Oct 31, 2005
74	GAMMA 2005	45	1002	TS	Nov 14, 2005 to Nov 22, 2005
<b>75</b>	<b>FELIX 2007</b>	<b>150</b>	<b>929</b>	<b>H5</b>	<b>Aug 31, 2007 a Sep 06, 2007</b>
76	MATTHEW 2010	50	998	TS	Sep 23, 2010 to Sep 26, 2010
77	RINA 2011	100	966	H3	Oct 22, 2011 to Oct 29, 2011
78	ERNESTO 2012	85	973	H2	Aug 01, 2012 to Aug 10, 2012
79	HELENE 2012	40	1004	TS	Aug 09, 2012 to Aug 19, 2012
<b>80</b>	<b>HARVEY 2017</b>	<b>115</b>	<b>937</b>	<b>H4</b>	<b>Aug 16, 2017 a Sep 02, 2017</b>
81	MARCO 2020(P)	65	991	H1	Aug 15, 2020 to Aug 25, 2020
82	GAMMA 2020(P)	60	980	TS	Sep 30, 2020 to Oct 06, 2020
83	ZETA 2020(P)	90	973	H2	Oct 20, 2020 to Oct 29, 2020
<b>84</b>	<b>ETA 2020(P)</b>	<b>130</b>	<b>923</b>	<b>H4</b>	<b>Oct 29, 2020 a Nov 13, 2020</b>
<b>85</b>	<b>NOTA 2020(P)</b>	<b>140</b>	<b>917</b>	<b>H5</b>	<b>Nov 12, 2020 a Nov 18, 2020</b>

**Anexo 2.** Análisis gráfico de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los Modelos Aditivos Generalizados (GAM).

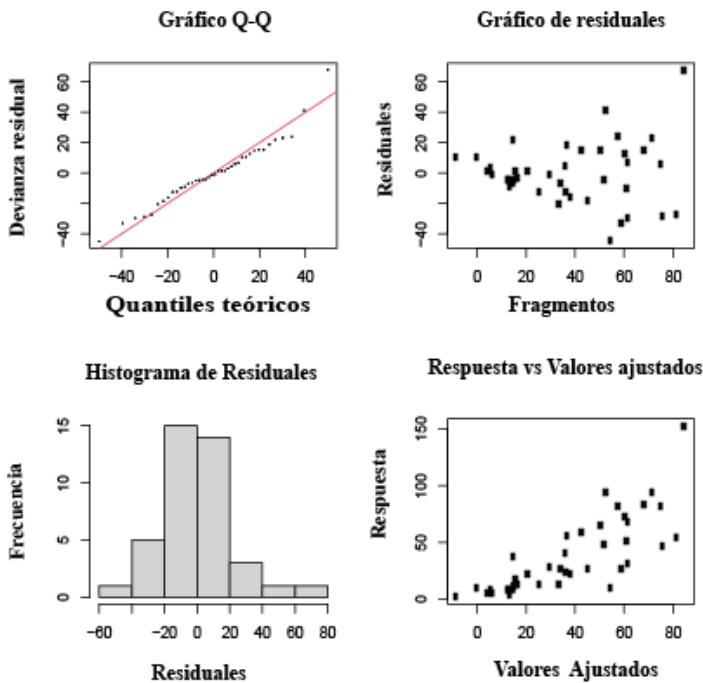
**Check Model de Abundancia Total**



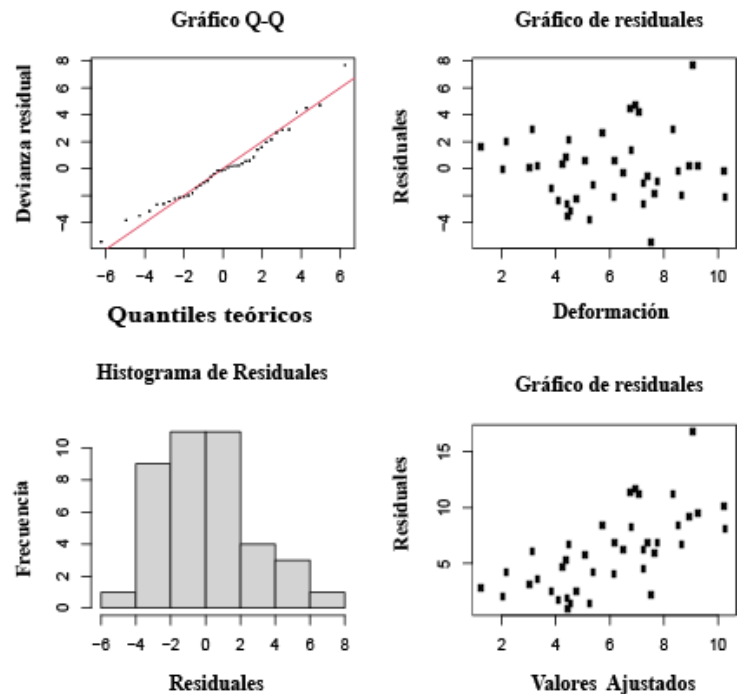
**Check Model de Diversidad**



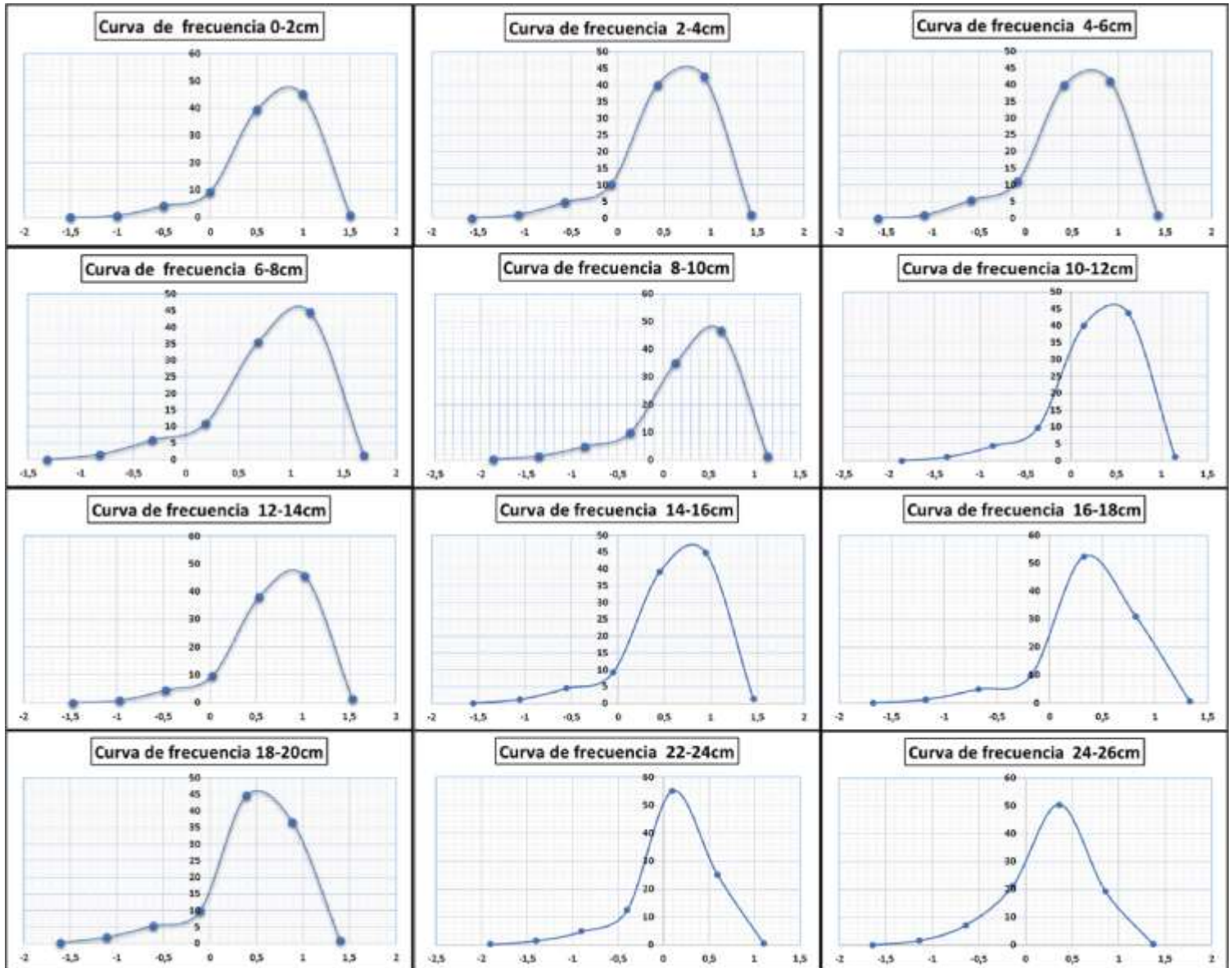
**Check Model de Abundancia de Fragmentos**

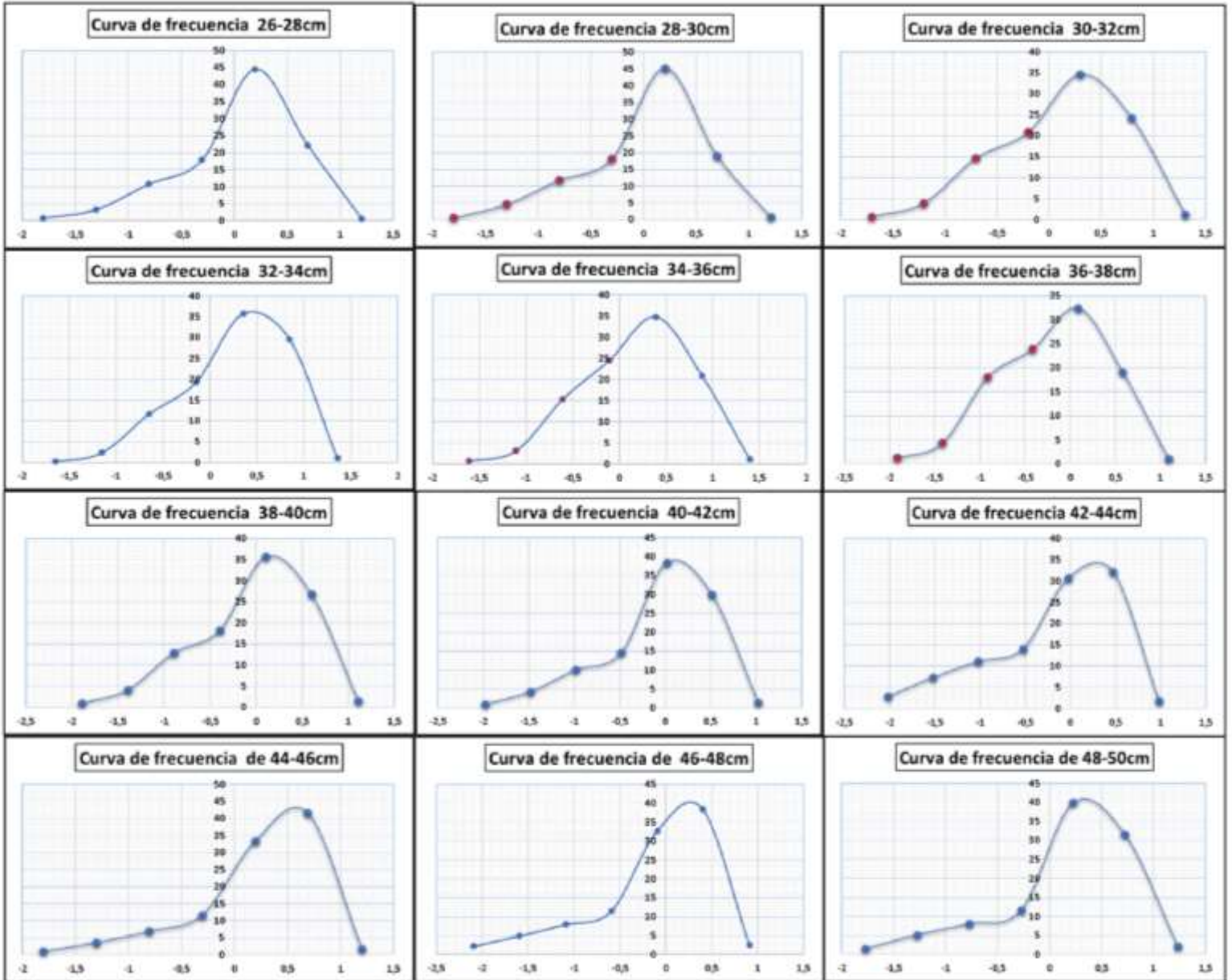


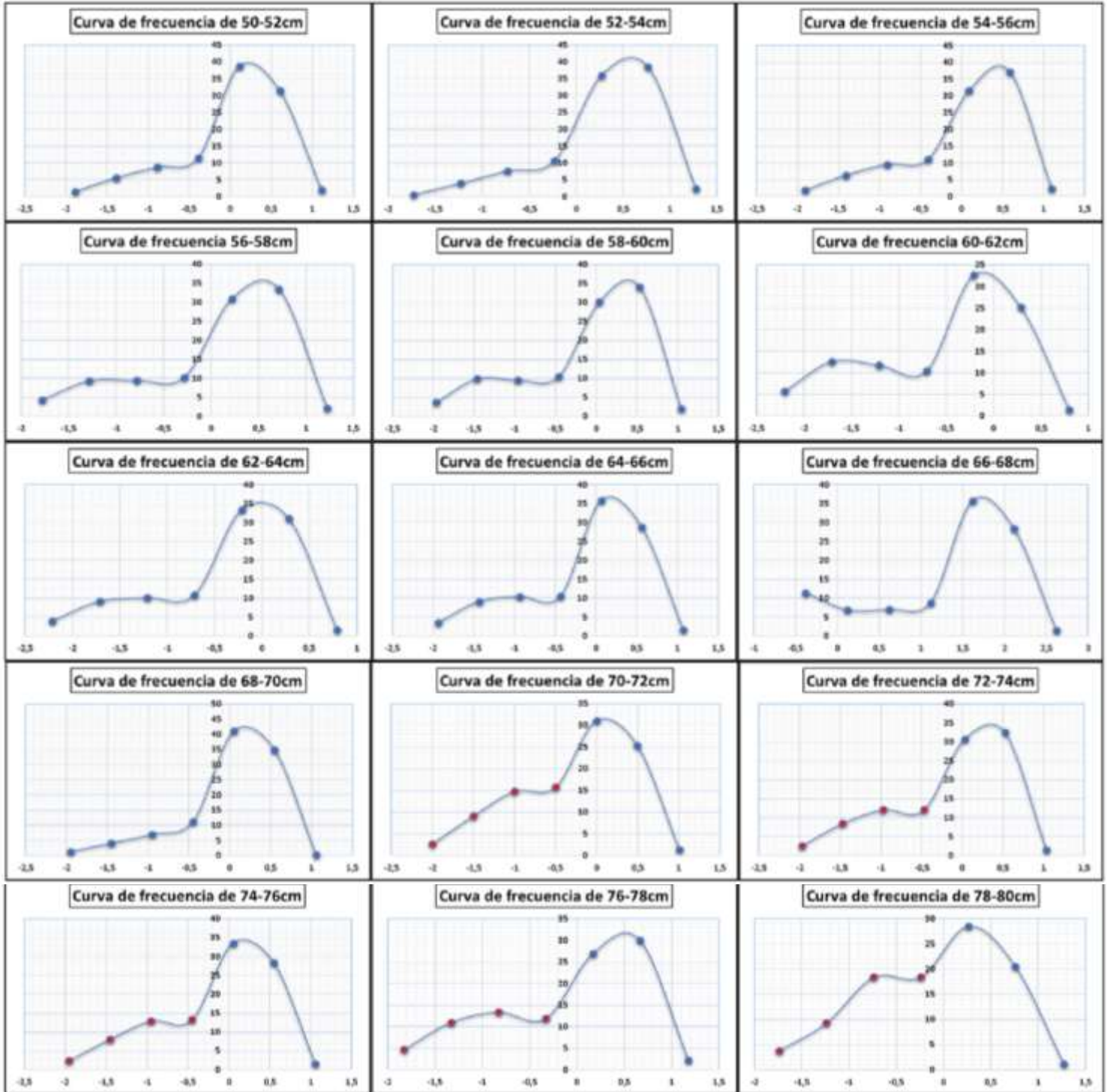
**Check Model de Abundancia de Deformaciones**



*Anexo 3.* Curvas de frecuencia muestras núcleo NCS1.









**Anexo 4.** Listado de especies encontradas en el núcleo NCS1.

<b>Miliolida</b>			
<i>Archaias angulatus</i>	<i>Cornuspira</i> sp.	<i>Nummuloculina contraria</i>	<i>Pyrgo</i> sp.
<i>Affinetrina quadrilateralis</i>	<i>Cyclorbiculina compressa</i>	<i>Ptychomiliola separans</i>	<i>Pyrgo</i> sp1.
<i>Affinetrina Cf. quadrilateralis</i>	<i>Cycloputeolina discoidea</i>	<i>Peneroplis carinatus</i>	<i>Pseudotriloculina linneiana</i>
<i>Affinetrina gualteriana</i>	<i>Dentostomina bermudiana</i>	<i>Peneroplis planatus</i>	<i>Pseudotriloculina</i> sp.
<i>Affinetrina planciana</i>	<i>Dentostomina bermudezi</i>	<i>Peneroplis pertusus</i>	<i>Pseudotriloculina rotunda</i>
<i>Affinetrina</i> sp.	<i>Edentostomina cultrata</i>	<i>Peneroplis</i> sp.	<i>Pseudotriloculina Cf. rotunda</i>
<i>Articulina pacifica</i>	<i>Edentostomina</i> sp.	<i>Pseudohauerina occidentalis</i>	<i>Quinqueloculina angularis</i>
<i>Articulina Cf. pacifica</i>	<i>Flintinoides labiosa</i>	<i>Pseudohauerina</i> sp.	<i>Quinqueloculina philipensis</i>
<i>Articulina atlantica</i>	<i>Laevipeneroplis proteus</i>	<i>Pyrgo williamsoni</i>	<i>Quinqueloculina agglutinans</i>
<i>Articulina mucronata</i>	<i>Laevipeneroplis bradyi</i>	<i>Pyrgo sarsi</i>	<i>Quinqueloculina Cf. agglutinans</i>
<i>Articulina</i> sp.	<i>Laevipeneroplis</i> sp.	<i>Pyrgo comata</i>	<i>Quinqueloculina seminulum</i>
<i>Articularia lineata</i>	<i>Laevipeneroplis</i> sp1.	<i>Pyrgo elongata</i>	<i>Quinqueloculina parkeri</i>
<i>Articularia Cf. lineata</i>	<i>Lachlanella carinata</i>	<i>Pyrgo denticulata</i>	<i>Quinqueloculina Cf. parkeri</i>
<i>Articularia sagra</i>	<i>Lachlanella Cf. carinata</i>	<i>Pyrgo inornata</i>	<i>Quinqueloculina candeiana</i>
<i>Articularia</i> sp.	<i>Miliolinella subrotunda</i>	<i>Pyrgo subsphaerica</i>	<i>Quinqueloculina Cf. candeiana</i>
<i>Borelis pulchra</i>	<i>Miliolinella circularis</i>	<i>Pyrgo depressa</i>	<i>Quinqueloculina lamarckiana</i>
<i>Borelis</i> sp.	<i>Miliolinella fitcheliana</i>	<i>Pyrgo Cf. depressa</i>	<i>Quinqueloculina Cf. lamarckiana</i>
<i>Amphisorus hemprichii</i>	<i>Miliolinella</i> sp.	<i>Pyrgo Cf. striolata</i>	<i>Quinqueloculina poeyana</i>
<i>Cornuspira involvens</i>	<i>Nodobaculariella cassis</i>		<i>Quinqueloculina subpoeyana</i>

## Miliolida

<i>Quinqueloculina polygona</i>	<i>Quinqueloculina bicarinata</i>	<i>Triloculina oblonga</i>
<i>Quinqueloculina tricarinata</i>	<i>Quinqueloculina Cf. bicarinata</i>	<i>Triloculina striatotrigonula</i>
<i>Quinqueloculina laevigata</i>	<i>Quinqueloculina subcuneata</i>	<i>Triloculina Cf. striatotrigonula</i>
<i>Quinqueloculina Cf. laevigata</i>	<i>Quinqueloculina Cf. subcuneata</i>	<i>Triloculina terquemiana</i>
<i>Quinqueloculina Cf. bidentata</i>	<i>Quinqueloculina akneriana</i>	<i>Triloculina bermudezi</i>
<i>Quinqueloculina vulgaris</i>	<i>Quinqueloculina goesi</i>	<i>Triloculina striata</i>
<i>Quinqueloculina tipswordi</i>	<i>Quinqueloculina striata</i>	<i>Triloculina Cf. striata</i>
<i>Quinqueloculina Cf. tipswordi</i>	<i>Quinqueloculina sp.</i>	<i>Triloculina sp.</i>
<i>Quinqueloculina carinatastriata</i>	<i>Sorites orbiculus</i>	<i>Wiesnerella auriculata</i>
<i>Quinqueloculina Cf. carinatastriata</i>	<i>Sorites marginalis</i>	
<i>Quinqueloculina adnata</i>	<i>Sorites sp.</i>	
<i>Quinqueloculina variolata</i>	<i>Sorites sp1.</i>	
<i>Quinqueloculina Cf. variolata</i>	<i>Spiroloculina depressa</i>	
<i>Quinqueloculina cuvieriana</i>	<i>Spiroloculina robusta</i>	
<i>Quinqueloculina jugosa</i>	<i>Spiroloculina sp .</i>	
<i>Quinqueloculina bradyana</i>	<i>Sigmoihauerina bradyi</i>	
<i>Quinqueloculina Cf. bradyana</i>	<i>Triloculina trigonula</i>	
<i>Quinqueloculina costata</i>	<i>Triloculina tricarinata</i>	
<i>Quinqueloculina subarenaria</i>	<i>Triloculina oblongoides</i>	

## Rotaliida

<i>Asterigerina carinata</i>	<i>Baggina bradyi</i>	<i>Criboelphidium</i> sp.	<i>Gypsina vesicularis</i>
<i>Asterigerina</i> sp.	<i>Cymbaloporeta squamosa</i>	<i>Dyocibicides uniserialis</i>	<i>Gypsina</i> Cf. <i>discus</i>
<i>Ammonia beccarii</i>	<i>Cymbaloporeta bradyi</i>	<i>Dyocibicides biserialis</i>	<i>Glabratella mirabilis</i>
<i>Ammonia tepida</i>	<i>Cymbaloporeta</i> Cf. <i>bradyi</i>	<i>Dyocibicides</i> sp.	<i>Glabratella testigoensis</i>
<i>Ammonia parkinsoniana</i>	<i>Cymbaloporeta</i> sp.	<i>Discorbinella bertheloti</i>	<i>Glabratella erecta</i>
<i>Amphistegina lessonii</i>	<i>Cibicidoides mundulus</i>	<i>Discorbinella</i> sp.	<i>Glabratella hexacamerata</i>
<i>Amphistegina gibbosa</i>	<i>Cibicidoides wuellerstorfi</i>	<i>Discorbis vilardeboanus</i>	<i>Glabratella</i> sp.
<i>Amphistegina</i> sp.	<i>Cibicidoides</i> sp.	<i>Elphidium crispum</i>	<i>Globigerinita glutinata</i>
<i>Acervulina inhaerens</i>	<i>Criboelphidium excavatum</i>	<i>Elphidium</i> Cf. <i>crispum</i>	<i>Globorotalia menardii</i>
<i>Anomalinoides globulosus</i>	<i>Criboelphidium poeyanum</i>	<i>Elphidium</i> Cf. <i>aculeatum</i>	<i>Globigerinoides extremus</i>
<i>Bolivina</i> Cf <i>pseudoplicata</i>	<i>Criboelphidium williamsoni</i>	<i>Elphidium sagra</i>	<i>Globigerinoides ruber albus</i>
<i>Bolivina lowmani</i>	<i>Criboelphidium</i> Cf. <i>williamsoni</i>	<i>Elphidium</i> sp.	<i>Globigerinoides</i> Cf. <i>ruber albus</i>
<i>Bolivina</i> sp.	<i>Criboelphidium gunteri</i>	<i>Globocasadulina subglobosa</i>	<i>Globigerinoides ruber ruber</i>

## Rotaliida

<i>Globigerinoides Cf. ruber ruber</i>	<i>Planorbulina mediterraneensis</i>	<i>Siphonina sp.</i>
<i>Globoturborotalia woodi</i>	<i>Rotorbis auberii</i>	<i>Siphonina reticulata</i>
<i>Globoturborotalia sp.</i>	<i>Rotorbis sp.</i>	<i>Sagrina pulchella</i>
<i>Globigerinella siphoniphora</i>	<i>Rotorbinella rosea</i>	<i>Tortoplectella rhomboidalis</i>
<i>Homotrema rubrum</i>	<i>Rosalina valvulata</i>	<i>Trifarina angulosa</i>
<i>Heterostegina depressa</i>	<i>Rosalina eximia</i>	<i>Tetromphaloides concinnus</i>
<i>Lobatula lobatula</i>	<i>Rosalina floridana</i>	<i>Tetromphaloides sp.</i>
<i>Neoconorbina terquemi</i>	<i>Rosalina floridensis</i>	<i>Trilobatus sacculifer</i>
<i>Neoconorbina sp.</i>	<i>Rosalina globularis</i>	<i>Trilobatus sp.</i>
<i>Neoconorbina sp1.</i>	<i>Rosalina subaraucana</i>	<i>Valvulineria araucana</i>
<i>Nonionoides grateloupi</i>	<i>Rosalina sp.</i>	
<i>Neoglobocadrina acostaensis</i>	<i>Sphaerogypsina globulus</i>	
<i>Planogypsina acervalis</i>	<i>Siphonina pulchra</i>	



Universidad de Caldas



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLIN



<b>Textularia</b>	<b>Spirilina</b>	<b>Lituolida</b>	<b>Polymorphinida</b>	<b>Loftusiida</b>	<b>Robertinida</b>
<i>Bigenerina nodosaria</i>	<i>Patelina corrugata</i>	<i>Spirotextularia floridana</i>	<i>Sigmoidella</i> sp.	<i>Verneulinulla propinqua</i>	<i>Hoeglundina elegans</i>
<i>Clavulina angularis</i>	<i>Spirulina decorata</i>				
<i>Eggerella Cf. bradyi</i>					
<i>Sahulina conica</i>					
<i>Textularia agglutinans</i>					
<i>Textularia oviedoiana</i>					
<i>Textularia earlandi</i>					
<i>Textularia candeiana</i>					
<i>Textularia lateralis</i>					
<i>Textularia calva</i>					
<i>Textularia</i> sp.					
<i>Textularia</i> sp1.					

Anexo 5. Base de datos de Matriz de correlación.

Shannon	Ab_forams	Ab_frag	A_def	Archa_def	Cyclo_def	Archa_ang	Aster_car	Cyclo_comp	Quinque_sp	Rosa_flor	Quinque_ag	Pen_car	Quinque_po	Affin_quad	Acer_inha
0,68308472	0,81744841	0,59756098	0,22964353	0,25046904	-0,06891921	0,72307692	0,78123827	0,17636023	0,70037523	0,78517824	0,53846154	0,25207951	0,70575543	0,58601602	0,51994375
-0,74828784	-0,9478424	-0,80731707	-0,42983114	-0,39230769	-0,15345751	-0,79437148	-0,86247655	-0,31181989	-0,82551595	-0,80187617	-0,68236398	-0,37208143	-0,77836672	-0,69798224	-0,49385271
1	0,76573788	0,5661882	0,18416362	0,13519092	0,0724403	0,53072521	0,81152078	0,00206398	0,72323858	0,87681772	0,5128999	0,45448388	0,83689075	0,69222832	0,43514176
0,76573788	1	0,84277674	0,4793621	0,46941839	0,11909552	0,85891182	0,90168856	0,32382739	0,90412758	0,8358349	0,67804878	0,38887415	0,81551668	0,73758807	0,55701555
0,5661882	0,84277674	1	0,47898687	0,46622889	0,15306703	0,62851782	0,6750469	0,24015009	0,75853659	0,57560976	0,43677298	0,21622988	0,60181059	0,54171756	0,69131871
0,18416362	0,4793621	0,47898687	1	0,94015009	0,57888232	0,47954972	0,34071295	0,59831144	0,45065666	0,22382739	0,16604128	0,12264347	0,3851963	0,39502585	0,22900049
0,13519092	0,46941839	0,46622889	0,94015009	1	0,3225341	0,46003752	0,28086304	0,58574109	0,43902439	0,17560976	0,12288931	0,07415213	0,35827196	0,32247775	0,24213987
0,0724403	0,11909552	0,15306703	0,57888232	0,3225341	1	0,19992428	0,14701463	0,37544375	0,11890028	0,0536906	0,11245741	0,03848398	0,12632527	0,23976782	-0,01396611
0,53072521	0,85891182	0,62851782	0,47954972	0,46003752	0,19992428	1	0,73320826	0,43545966	0,78874296	0,65440901	0,69643527	0,19736165	0,67329612	0,63697801	0,41539188
0,81152078	0,90168856	0,6750469	0,34071295	0,28086304	0,14701463	0,73320826	1	0,20037523	0,82964353	0,90281426	0,69624765	0,44189387	0,82170834	0,80900994	0,39033322
0,00206398	0,32382739	0,24015009	0,59831144	0,58574109	0,37544375	0,43545966	0,20037523	1	0,22626642	0,05028143	0,35609756	0,06566143	0,31464891	0,19352419	-0,04608166
0,72323858	0,90412758	0,75853659	0,45065666	0,43902439	0,11890028	0,78874296	0,82964353	0,22626642	1	0,81857411	0,61050657	0,24509827	0,81260847	0,71797286	0,45293295
0,87681772	0,8358349	0,57560976	0,22382739	0,17560976	0,0536906	0,65440901	0,90281426	0,05028143	0,81857411	1	0,5891182	0,42095014	0,79356443	0,77250126	0,41267015
0,5128999	0,67804878	0,43677298	0,16604128	0,12288931	0,11245741	0,69643527	0,69624765	0,35609756	0,61050657	0,5891182	1	0,33151474	0,62517004	0,57691231	0,089817
0,45448388	0,38887415	0,21622988	0,12264347	0,07415213	0,03848398	0,19736165	0,44189387	0,06566143	0,24509827	0,42095014	0,33151474	1	0,37615574	0,4555984	0,03341244
0,83689075	0,81551668	0,60181059	0,3851963	0,35827196	0,12632527	0,67329612	0,82170834	0,31464891	0,81260847	0,79356443	0,62517004	0,37615574	1	0,78642834	0,30672489
0,69222832	0,73758807	0,54171756	0,39502585	0,32247775	0,23976782	0,63697801	0,80900994	0,19352419	0,71797286	0,77250126	0,57691231	0,4555984	0,78642834	1	0,29065728
0,43514176	0,55701555	0,69131871	0,22900049	0,24213987	-0,01396611	0,41539188	0,39033322	-0,04608166	0,45293295	0,41267015	0,089817	0,03341244	0,30672489	0,29065728	1