



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

**Patrones de diversidad taxonómica
de poliquetos (Annelida) en la
plataforma continental del sur del
Golfo de México, México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B i ó l o g o

P R E S E N T A :

Ivan Josiel Araujo Quintana



DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Benjamín Quiroz Martínez

CDMX, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres y hermanos

Agradecimientos

A mis padres y hermanos por todo el apoyo y amor incondicional

A la UNAM por formarme académicamente

A todos los profesores que me enseñaron y guiaron

A todos mis amigos por ser parte de mi vida

A todo lo que me influyó para ser lo que ahora soy

Agradecimiento a todos los participantes (estudiantes, investigadores y tripulantes) de las expediciones de investigación "IMCA" y "DINAMO", realizadas a bordo del B/O "Justo Sierra" (propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México) donde se recopilaron los datos biológicos utilizados en este estudio.

También agradezco al Dr. Benjamin Quiroz Martínez por aceptarme en el laboratorio de Ecología Numérica y Análisis de Datos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML), UNAM, al igual por todo el conocimiento y guía en el proceso de esta tesis.

Al Dr. Isaías Hazarmabeth Salgado Ugarte y la Dra. Veronica Mitsui Saito Quesada por el acercamiento y conocimiento de este campo de la Biología a través del Laboratorio de Biometría y Biología Pesquera, FES Zaragoza, y por el apoyo en el proceso de esta tesis.

Al profesor Genaro Montaña Arias y la profesora Gabriela Selene Ortiz Burgos por las revisiones y sugerencias de esta tesis.

Índice

Resumen	3
Introducción	4
Justificación	10
Hipótesis	11
Objetivo general	12
Objetivos particulares	12
Metodología	13
Zona de estudio	13
Datos biológicos	13
Análisis de datos	14
Exploración de datos	14
Beta Diversidad (Disimilitud de Sorensen) y Clusters (Método Ward)	15
Análisis de Redundancia Basado en la Distancia (db-RDA)	17
Resultados	19
Exploración de datos	19
Riqueza de especies	19
Curva de acumulacion de especies	22
Beta de Sorensen y Dendrogramas (Clusters)	24
Bases de datos	31
IMCAs	31
db-RDA	33
IMCAs-oeste	38
db-RDA	40
DINAMO 2	44
db-RDA	46
DINAMO 1	50
db-RDA	50
Discusión	53
Riqueza de especies	53
Beta de Sorensen (Dendrogramas y clusters)	53
db-RDA	55
IMCAs	55
IMCAs-oeste	57
DINAMO	59
Conclusiones	60
Referencias	62

Resumen

Con la base de datos de incidencia (presencia/ausencia) recopilada de las campañas oceanográficas IMCA (1-4) y DINAMO (1,2) constituida por 133 estaciones, 245 especies y 9 variables ambientales/espaciales, se determinaron y analizaron los patrones de diversidad taxonómica de poliquetos en la plataforma continental del sur del Golfo de México (sGM). Con la aplicación de métodos multivariados provenientes de la Ecología Numérica, tales como la riqueza de especies con números de Hill, su extrapolación y ajuste con el modelo asintótico de Clench, definiendo los patrones de diversidad por medio del índice de disimilitud beta de Sorensen en donde en conjunto con la aplicación de dendrogramas, clusters y mapas geográficos se visualizaron en escalas espaciales su distribución a lo largo de la zona de estudio. Para un detallado análisis de las variables se usó el método de ordenamiento Análisis de Redundancia Basado en la Distancia (db-RDA), donde se mostró las correlaciones entre la matriz respuesta (especies) y la matriz explicativa (variables), por medio de la especificación de las variables correlacionadas que determinan las estaciones y la disimilitud en los clusters de la composición de poliquetos, lo que permitió la diferenciación de las zonas terrígena, transicional y carbonatada, con las especies con un mejor ajuste de bondad y más abundantes, visualizándolo en un triplot. Todo esto por medio de tópicos y métodos de Ecología Numérica por medio del lenguaje R.

Se encontró que la composición de las especies de poliquetos está bien marcada entre las provincias que componen al sGM (terrígena, transición y carbonatada), así como de la zona oeste (Tamaulipas-Veracruz), se observaron gradientes longitudinales y latitudinales en la dispersión de las estaciones miembro de los clusters. El análisis de variables para los patrones de diversidad de las especies de poliquetos mostró que el efecto combinado de los procesos espaciales y las características de los sedimentos explican un mayor porcentaje de varianza. Los patrones de diversidad taxonómicas de poliquetos son marcados principalmente

por las diferencias entre la región terrígena, transición y carbonatada que son el resultado de la influencia geográfica, los cambios en la composición de sedimentos y la cantidad de Materia Orgánica (MO) en el sustrato y en menor medida pero también determinantes son la profundidad y la temperatura.

La riqueza de especies está marcada por el tipo de sustrato, siendo la heterogeneidad en su tamaño de grano y factores fisicoquímicos sus principales características, siendo los sustratos calcáreos (arena-grava) los que permiten el establecimiento de múltiples especies de poliquetos. La abundancia de especies está determinada por la cantidad de MO presente en el sustrato, el aporte de éste es principalmente por las masas de agua continentales arrastradas y depositadas en la plataforma de la zona terrígena (lodo). La zona de transición (lodo-arenosa) es una zona intermedia entre estas dos provincias y también de abundancia y riqueza de especies de poliquetos.

Introducción

Comprender los patrones biogeográficos de la biodiversidad a lo largo de gradientes espaciales, es uno de los objetivos más importantes de la ecología (Gaston, 2000; Zintzen et al., 2017). Así como el conjunto de variables ambientales como potenciales impulsores y determinantes de la variación en las comunidades de organismos (Wu, et al., 2000). El estudio de los patrones de la biodiversidad se ha incrementado notablemente en los últimos años, en los sedimentos marinos blandos, la distribución espacial de las especies es crucial para comprender las interacciones de las especies entre sí y con el medio ambiente (Checon y Amaral, 2017).

Los estudios biológicos se han centrado principalmente en la realización de listados faunísticos y descripción de nuevas especies dejando en segundo plano la Ecología Numérica que en la actualidad es un campo de la Biología que con la utilización de los lenguajes computacionales y estudios en análisis multivariados se pueden realizar grandes estudios y análisis de datos biológicos, que dan otro

punto de vista a cómo conceptualizamos a los organismos y al medio ambiente. Los ecologistas han necesitado durante mucho tiempo métodos para analizar los datos de composición de la comunidad en un marco multivariado, la necesidad era particularmente aguda en experimentos ecológicos, como el uso de análisis de ordenamiento para particionar la varianza de diferentes conjuntos de variables, que consiste en evaluar variables ambientales/espaciales y correlacionarse con una matriz respuesta (estaciones), así como caracterizar esta contribución individual y compuesta de las variables a la estructura de la comunidad. Los análisis multivariados se han convertido en una herramienta exploratoria importante, ya que puede proporcionar una comprensión de los procesos regionales y locales que estructuran las comunidades (Borcard et al., 2018; Gilbert et al., 2010; Legendre, 2012). Las variables ambientales como impulsores potencialmente importantes de la variación en los ensamblajes de poliquetos, la relación entre la composición de las especies y las variables ambientales pueden actuar como filtro para la aparición de especies (Benedetti-Cecchi, 2010; McLachlan et al., 2005). Muchos de los estudios sobre los factores que influyen en la distribución de las especies, especialmente en los ecosistemas marinos, no incluyen el componente espacial dentro del análisis (Heino et al., 2015). La adición de esta estructura en el análisis da cuenta de la organización espacial dependiente que pueden exhibir las especies (Borcard y Legendre, 1994; Legendre et al. 2005). Las estructuras locales de las comunidades pueden estar fuertemente influenciadas por procesos espaciales, principalmente por la dinámica de dispersión y las interacciones entre especies (Borcard et al., 2004; Cottenie, 2005).

Los anélidos poliquetos son de los macroorganismos más importantes de la zona bentónica, con una gran diversidad biológica, reproductiva y alimentaria, también cumplen funciones en procesos de bioerosión, así como ser componentes de las redes tróficas de especies explotadas comercialmente (Defeo y Rueda, 2002; Solís-Weiss et al., 2014). Ecológicamente los poliquetos son uno de los organismos más importantes en los sistemas bénticos, sobre todo en ambientes de fondos blandos. Su importancia está asociada a su gran abundancia y

diversidad, son capaces de ocupar diferentes niveles tróficos y entre ellos se encuentran prácticamente todas las modalidades de alimentación y reproducción. Contribuyen a la descomposición, incorporación y re-mineralización de la materia orgánica, favoreciendo el reciclaje de nutrientes en la columna de agua (Hutchings, 1998). Ayudan a la bioerosión de sustratos, así como de la remoción y por ende de la oxigenación de éste, ayudando al movimiento de partículas orgánicas en los sedimentos (Glasby et al., 2000; 2009). Además, forman parte de los grupos pioneros en áreas cuyo ambiente ha sido perturbado, actuando como bioindicadores de contaminación debido a su movilidad limitada y buena esperanza de vida, rasgos que permiten detectar perturbaciones locales en el lecho marino (Huong et al., 2017; Solís-Weiss et al., 2014; Van der Linden et al., 2016).

En el sur del Golfo de México (sGM) las características batimétricas y sedimentarias (sustratos terrígenos y calcáreos) de la cuenca, así como la dinámica de las masas de agua, determina en gran medida la estructura de la macrofauna y sus variaciones en su composición, abundancia y diversidad de especies (Granados-Barba et al., 2009; Hernández-Arana et al., 2003; 2005).

Estos son las bases que impulsan la elaboración y análisis de los patrones de diversidad, el cual tiene como principal objetivo el poder explicar las causas de la variación de la biodiversidad en escalas espaciales, la capacidad de relacionar estas fluctuaciones impulsados por variables ambientales se está volviendo cada vez más importante, así como comprender las consecuencias antropogénicas en el dominio de la biosfera (Halpern et al., 2008; Worm et al., 2006).

Antecedentes

La información colectada de las campañas IMCA (1-4) y DINAMO (1 y 2) fue concentrada en un Atlas de anélidos poliquetos de la plataforma continental del Golfo de México por (Solis-Weiss, 1998). Con la preocupación y el interés por evaluar los recursos marinos en México, así como por la necesidad de conocer la riqueza biológica en nuestro país la CONABIO apoyó el desarrollo de este proyecto que culminó con la entrega de una base de datos que reúne la información en un inventario faunístico de 2,566 ejemplares correspondientes a 298 especies de anélidos poliquetos que se distribuyen en la plataforma continental del Golfo de México.

En estudios realizados dentro del sur del Golfo de México (Hernández-Arana et al., 2003; 2005) investigó y determinó la estructura de la comunidad macrobentónica del sur del Golfo de México en ambientes sedimentarios, definiendo y marcando énfasis en las provincias carbonatada, transicional y terrígena. Donde analizó muestras de la infauna en tres temporadas de 13 estaciones de dos transectos de 250 km a lo largo de 80–170 y 20–50 m de profundidad del agua. Los patrones espaciales de la composición de la macrofauna variaron a lo largo de la plataforma como respuesta a los ambientes sedimentarios y la profundidad. Las técnicas estadísticas univariadas y multivariadas demostraron que las bajas densidades y el número de taxones estaban asociados con el tipo de sedimento. El análisis de regresión lineal múltiple y el análisis BIOENV indicaron que el tamaño de grano medio del sedimento, el porcentaje de arcilla y materia orgánica explican mejor los patrones espaciales de la macrofauna. En estudios sedimentológicos y de variables en comunidades bentónicas en el sur del Golfo de México (Santibañes-Aguascalientes, 2018; 2020) establece condiciones de referencia para evaluar el estado ecológico del sublitoral y comunidades bénticas batiales del sur del Golfo de México, donde evaluó con precisión la calidad del fondo marino heterogéneo en las zonas sublitoral y bentónica profunda por medio de análisis multivariados (M-AMBI) de AZTI, estableciendo las condiciones de referencia que

mejoran la comprensión de la variabilidad natural de las variables clave, ayudando a identificar el estado ecológico del fondo marino del sGM.

(Hernández-Alcantara, 2002; 2011; 2013) ha escrito y colaborado en múltiples estudios de poliquetos en todo el territorio mexicano, donde ha descrito nuevas especies, así como múltiples estudios en su distribución, alimentación, ciclos de vida, diversidad etc., centrándose en el Golfo de México, aquí los cambios espaciales en la distribución de especies y la superposición de los rangos de las especies entre transectos hacia el centro del Golfo. Para probar si el efecto de dominio medio (MDE) podría explicar un pico de dominio medio esperado en la riqueza de especies se analizó la composición faunística de especies de poliquetos registrados a lo largo de la plataforma continental del Golfo de México, se encontró un alto valor de similitud entre los transectos, pero la distribución de cada especie fue muy irregular, lo que a su vez provocó una disminución en la similitud entre estaciones en cada transecto, excepto entre las estaciones intermedias del transecto occidental, donde el componente de anidamiento representó todo el valor de diversidad beta, el recambio de especies fue el factor dominante de la disimilitud total entre los poliquetos.

(Legendre y Legendre, 2012) desde 1979 publicaron libros y artículos de métodos estadísticos y multivariados aplicados a la Ecología, unificado bajo un mismo libro una amplia gama de métodos, modelos y técnicas multivariadas en tópicos de Ecología Numérica, no sólo para ayudar a los investigadores a comprender los métodos disponibles de análisis estadísticos, sino también explica cómo elegirlos y aplicarlos de manera ordenada y lógica para alcanzar sus objetivos de investigación, las explicaciones matemáticas no faltan y proporcionan un preciso vistazo interno a los diversos temas. La aplicación de dichos tópicos en la Ecología se vio favorecida por (Bocard et al., 2018), donde los autores aplicaron todos los métodos y análisis estadísticos multivariados descritos al lenguaje R, dando una herramienta a los Ecologistas en la aplicación y visualización de métodos de la Ecología Numérica, así como incorporación de nuevos temas y scripts dentro del lenguaje.

En estudios de poliquetos realizados con análisis multivariados tenemos a (Benedetti-Cecchi, 2010) donde probaron la hipótesis general de que el conjunto de variables ambientales emergen como impulsores potencialmente importantes de la variación en los ensamblajes de poliquetos donde dependen de la escala espacial considerada, usando análisis de redundancia encontró que la mayoría de las variables ambientales contribuyeron a explicar una proporción grande y significativa de variación del submodelo intercontinental tanto para géneros como para familia. Por lo tanto, estas variables deben ser consideradas preferentemente al pronosticar patrones espaciales a gran escala de ensamblajes de poliquetos en relación con cambios en curso o previstos en las condiciones ambientales. También (Checon y Amaral, 2017) utilizaron la partición de varianza como una herramienta importante para investigar la importancia de la estructura espacial en la distribución de especies en las comunidades, probando la importancia de los componentes espaciales y ambientales para la distribución de especies de una comunidad de poliquetos, los resultados variaron entre modelos con especies cada vez más raras (y métricas constantes) y entre modelos con distintos niveles taxonómicos, para todos los modelos evaluados, tanto los componentes espaciales como los ambientales explicó significativamente la estructura de distribución de las especies, sin embargo, los procesos espaciales explicaron un mayor porcentaje de varianza que los ambientales en casi todos los modelos. En estudios centrados en la Ecología Numérica (Quiroz-Martínez, 2007; 2021) ha realizado estudios utilizando múltiples métodos multivariados analizando datos biológicos, así como definiendo patrones de distribución y diversidad, probando la importancia relativa de los componentes espaciales y ambientales en la estructura de la comunidad de poliquetos en el sur del Golfo de México, examinando la distribución y relaciones entre los conjuntos de estos organismos y las variables ambientales a lo largo de una escala geográfica.

Justificación

Los poliquetos son uno de los grupos de invertebrados más importantes en los sistemas bénticos pueden llegar a representar entre el 36 y 70% del total de organismos, y entre el 25 y 65% de las especies (Hernández-Alcántara, 2002; Solis-Weiss, et al., 2014; Gerami et al., 2016). Su importancia está asociada con su elevada abundancia y diversidad (Prado-Navarro et al., 2016; Rehitha et al., 2019; Solis-Weiss et al., 2014).

Explicar las causas de la variación de la biodiversidad en múltiples escalas espaciales es de los objetivos principales de la Ecología, la capacidad de relacionar los patrones de diversidad taxonómica impulsados y determinados por variables ambientales se está volviendo cada vez más importante, así como comprender las consecuencias antropogénicas en el dominio de la biosfera (Halpern et al., 2008; Worm et al., 2006). Por tanto, los poliquetos son determinantes en la estructura, productividad y dinámica de las comunidades bentónicas, sin embargo, la mayoría de trabajos se han enfocado principalmente a la elaboración de listados faunísticos y en la descripción de nuevas especies, dejando a un lado los tópicos de la Ecología Numérica.

Dentro de este trabajo se encuentra el análisis detallado de la distribución taxonómica de poliquetos en la plataforma continental del sur del Golfo de México, profundizado en el análisis multivariado de datos biológicos que se requieren para dar una perspectiva de lo que son los patrones de diversidad taxonómica, teniendo en cuenta variables ambientales y espaciales, así como el tipo de sustrato y materia orgánica asociada a las provincias del sur del Golfo de México (carbonatada y terrígena) utilizando paquetes del lenguaje R. Contribuir a la aplicación de la Ecología Numérica y su análisis e interpretación biológica, así como para integrar una base de datos de la distribución taxonómica de los poliquetos en el sGM que permita el monitoreo y conservación ante desastres naturales, cambio climático o daño antropogénico, así como su posible explotación como recurso alimenticio y ornamental.

Hipótesis

Si se analiza la base de datos obtenidos de las distintas campañas a lo largo del sur del Golfo de México con el uso de tópicos y métodos de la Ecología Numérica (análisis multivariados), así como con la ayuda de programas y paquetes estadísticos del lenguaje R, entonces se obtendrán los patrones de diversidad taxonómica de poliquetos de la plataforma continental del sur del Golfo de México.

En la exploración de datos se podrá observar mejor la riqueza de especies con los muestreos (estaciones), así como con la extrapolación y uso del modelo asintótico de Clench se obtendrá la riqueza estimada (máximo de especies esperadas). Con la beta de Sorensen y la elaboración y análisis de clusters visualizados en dendrogramas y mapas geográficos se podrá observar claramente los patrones de diversidad generados por la disimilitud entre las especies de cada estación de muestreo, reflejando las agrupaciones de estaciones en clusters bien marcados en distancias cercanas. El análisis multivariado de ordenamiento (db-RDA) mostrará las variables que correlacionan y determinan estos clusters, siendo principalmente las variables: profundidad, el tipo de sustrato y la cantidad de materia orgánica las que determinarán dichos clusters, habrá mayor abundancia de poliquetos donde la Materia Orgánica (MO) sea más abundante y mayor riqueza donde el sustrato sea más heterogéneo. Las zonas calcárea y terrígena se verán bien diferenciadas por los patrones de diversidad taxonómica de los poliquetos.

Objetivo general

Determinar patrones de diversidad taxonómica de poliquetos del sur del Golfo de México mediante su análisis por métodos multivariados y explicar su relación con variables ambientales/espaciales y con la cantidad de materia orgánica en sustrato.

Objetivos particulares

- Elaborar matrices de datos con los registros de las campañas IMCA (1-4) y DINAMO (1, 2), así como explorar los datos por medio de métodos y modelos.
 - Rarefacción (presencia/ausencia)
 - Curvas de acumulación de especies (modelo asintótico de Clench)
- Elaborar y analizar los patrones de distribución taxonómica (clusters) a lo largo del sur del Golfo de México mediante:
 - Diversidad Beta de Sorensen (disimilitud)
 - Elaboración de clusters (Método Ward)
 - Elaboración de mapas geográficos-clusters
- Analizar las variaciones en las variables ambientales/espaciales, su correlación y especificar cuáles son las que determinan la variabilidad entre los patrones de diversidad taxonómica de los poliquetos a lo largo del Sur del Golfo de México, por medio del Análisis de Redundancia Basado en la Distancia (db-RDA).
- Verificar la existencia de similitud entre los patrones de distribución taxonómica de los poliquetos tomando en cuenta las provincias carbonatada y terrígena del sur del Golfo de México.

- Analizar la relación de la abundancia/dominancia de especies de poliquetos con la cantidad de materia orgánica en sustrato.

Metodología

Zona de estudio

Para nuestro país el Golfo de México representa un sistema ecológico de gran importancia biológica, pesquera e industrial, debido a su alta diversidad de especies, su enorme potencial pesquero y su gran explotación de hidrocarburos. Por esto, su zona costera es la más estudiada en nuestro país y una de las zonas más productivas del planeta (SIMAR, 2022).

El área de estudio (sGM), abarca a grandes rasgos, la plataforma continental mexicana de los estados de Tamaulipas y Veracruz, la de los estados de Tabasco, Campeche y Yucatán del Golfo de México. Esta última región, incluye, además cuatro arrecifes coralinos con características ambientales y faunísticas muy particulares, estos son: Arrecife Triángulos, Cayo Arcas y Cayo Arenas en Campeche y Arrecife Alacrán en Yucatán (Solís-Weiss et al., 1998).

La plataforma continental del sur del Golfo de México se caracteriza por ser una zona con 2 tipos de sustratos principales (terrígenos y calcáreos) así como de una zona de transición de estas dos grandes provincias caracterizadas principalmente por su cantidad de carbonato (CO), materia orgánica (MO) y tamaño de sedimentos (Hernández-Arana et al., 2005).

Datos biológicos

El material biológico y sedimentológico se recolectó en el marco de los proyectos institucionales denominados "IMCA" Determinación del impacto ambiental provocado por las actividades de extracción petrolera en la sonda de Campeche, a través de estudios biológicos, geoquímicos y sedimentológicos, en sus campañas IMCA 1 a 4; y "DINAMO" Dinámica oceánica y su relación con el deterioro

ambiental en la porción sur del Golfo de México, en sus campañas DINAMO 1 y 2; a bordo del B/O "Justo Sierra" de la UNAM.

Las campañas se realizaron de 1988 a 1990 en las siguientes fechas:

CAMPAÑA IMCA 1.- Realizada del 7 al 14 de marzo de 1988.

CAMPAÑA IMCA 2.- Realizada del 19 al 29 de septiembre de 1988.

CAMPAÑA IMCA 3.- Realizada del 7 al 17 de marzo de 1989.

CAMPAÑA IMCA 4.- Realizada del 25 de septiembre al 8 de octubre de 1989.

CAMPAÑA DINAMO 1.- Realizada del 7 al 22 de marzo de 1990.

CAMPAÑA DINAMO 2.- Realizada del 25 de octubre al 8 de noviembre de 1990.

Análisis de datos

Exploración de datos

Se generaron matrices de datos (data.frames, listas) de presencia/ausencia para cada una de las campañas y en su conjunto (sur del Golfo de México, IMCAs, IMCAs-oeste, DINAMO), se estandarizaron los datos para la exploración de estos, así como una revisión bibliográfica (WoRMS.org) de las especies presentes en la base de datos. Inicialmente para el análisis de nuestra base de datos se obtuvo la riqueza de especies de poliquetos presentes en cada campaña y en su conjunto, usando matrices de presencia/ausencia y a las estaciones de muestreo como variable comparable. Posteriormente para una comparación se realizaron gráficas de rarefacción, donde se interpolaron y extrapolaron los datos. Utilizando paquetes del lenguaje R (iNEXT, hillR, ggiNEXT).

La diversidad es definida como la variedad de organismos que forman parte de una comunidad (Carabias et al., 2009). La medida más simple de la diversidad es el número de especies; sin embargo, este componente por sí solo no es suficiente para describir la estructura de un ensamble de especies en un área determinada, debido a que el número de individuos por especie presenta

una amplia variabilidad en la mayoría de las comunidades (Chao et al., 2014). Por tal motivo, para tener un panorama más amplio de la variación de la diversidad a lo largo del sur del Golfo de México, se utilizaron los números de Hill (Hill, 1973). El análisis de las propiedades y alcance del modelo realizado por Jost (2006) se han vuelto ampliamente utilizados y aplicados. Esta medida de la diversidad (denominada diversidad verdadera) puede tener diferentes órdenes según la importancia que se le dé a las abundancias de las especies (denominado q) y sus unidades se conocen como números efectivos de especies. La riqueza de especies ($q=0$) son los números de especies con la misma abundancia que teóricamente pueden convivir en una comunidad con la máxima uniformidad. Por lo tanto, esta medida tiene sentido biológico y sus resultados son ampliamente comparables entre comunidades, además la aplicación de los números de Hill está fuertemente recomendada para bases de datos de presencia/ausencia. (Jost, 2006; Moreno et al., 2017; 2018)

Para evaluar la relación entre el esfuerzo de muestreo (Estaciones) y el número de especies observado, se elaboraron curvas de acumulación de especies. Para estimar la probabilidad de encontrar nuevas especies conforme se incrementa el esfuerzo de muestreo (extrapolación), se calculó ajustando mediante la función del modelo asintótico de Clench con paquetes del lenguaje R (vegan, stats, ggplot2). El modelo de Clench se deriva de la ecuación de Michaelis-Menten y estima la probabilidad de encontrar nuevas especies conforme se incrementa el esfuerzo de muestreo y permite calcular el esfuerzo necesario para alcanzar una determinada proporción de la biota (porcentaje del muestreo realizado) (Clench, 1979; Soberón, 1993).

Beta Diversidad (Disimilitud de Sorensen) y Clusters (Método Ward)

Para evaluar el grado de la disimilitud de cada una de las estaciones de muestreo así como en su conjunto (sGM), se cuantificó la diversidad beta por medio de la disimilitud de Sorensen, usando paquetes de R (vegdist, betapart, hillR),

obteniendo la disimilitud comparada (pareada) de cada una de las estaciones de muestreo generando valores de disimilitud (más cercano a 1 mayor la disimilitud). Este índice de Sorensen se centra en la varianza total de una matriz de composición de especies de una comunidad. (Legendre et al., 2005; 2012). Los métodos más útiles para evaluar la diversidad beta son los índices de disimilitud (1-similitud), que se puede calcular fácilmente con datos de incidencia (presencia/ausencia) (Magurran, 2004). La disimilitud es también una extensión del marco de la varianza (Chao et al., 2016). Dentro de los índices de diversidad beta el más usado en matrices de incidencia es la β -Sorensen (Moreno et. al., 2018). La disimilitud de Sorensen (β_S) da doble peso a el número 1 dobles y menor a los dobles cero (problema del doble-cero); su recíproco es equivalente a la diferencia porcentual (también conocida como Bray-Curtis) (Borcard et al., 2018; Legendre et al., 2012).

Para comprobar si existe algún patrón de agrupación (clusters) entre las estaciones de muestreo de acuerdo con su grado de disimilitud en base a su composición de especies y para una interpretación visual se utilizarán los métodos de cluster con paquetes del lenguaje R (hclust, dendextend, hcplot), obteniendo un dendrograma, donde se marcaron los clusters obtenidos de la disimilitud entre las estaciones de muestreo. Para la elaboración de dichos clusters se utilizó el método Ward; este método se basa en el criterio del modelo lineal de mínimos cuadrados. El objetivo es definir grupos tomando en cuenta el menor incremento de las distancias que hay entre los individuos contenidos en cada cluster (distancia Euclidiana) y el centro de gravedad al que pertenecen, de tal manera que la suma de cuadrados dentro del cluster (varianza que hay entre los individuos de cada cluster) se minimiza. Dentro de la elaboración de clusters se utilizaron funciones y paquetes del lenguaje R (drawmap, leaflet, ejecutables en Google Maps) para elaborar gráficos donde se visualicen los clusters obtenidos por la beta de Sorensen, adicionados a un mapa geográfico de la zona de estudio (sGM).

En esta técnica de ordenamiento en la que las muestras tienen un alto grado de similitud (miembras de un cluster), se encuentran cercanas entre sí. El objetivo de

la agrupación (cluster) es reconocer subconjuntos discontinuos en un entorno, que a menudo se percibe como continuo en Ecología. Esto requiere un cierto grado de abstracción, pero los ecologistas pueden decidir si los objetos son lo suficientemente similares para ser asignados a un grupo, e identificar las distinciones o separaciones entre grupos (Borcard et al., 2018; Legendre et al., 2012).

Análisis de Redundancia Basado en la Distancia (db-RDA)

Para evaluar las variables que determinan la variación en las estaciones/clusters de los poliquetos se realizó un Análisis de Redundancia Basado en la Distancia (db-RDA) con el fin de establecer las relaciones entre la disimilitud de la comunidad, así como identificar las variables espaciales/ambientales y especies con mayor correlación y abundancia.

Para el análisis db-RDA, se utilizaron las bases de datos de presencia/ausencia como matriz de datos respuesta centrados (Y, especies) estandarizados por el método Hellinger, así como una matriz de datos explicativos centrados (X, variables) igualmente estandarizados, lo que permitió trabajar con escalas comparables y adimensionales. Así se evitaron sesgos provocados por la diferencia de escalas de las distintas variables. La influencia de las especies raras estuvo relacionada con la métrica aplicada al análisis; si el peso de las especies raras no es deseable, el uso de unas pocas especies dominantes junto con Hellinger puede proporcionar un buen sustituto para toda la comunidad muestreada en el análisis de partición de varianza (Checon y Amaral, 2017). Posteriormente se usó la Beta de Sorensen para el Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) como matriz de distancia/disimilitud, corrigiendo los valores propios negativos (si es necesario) usando la corrección de Lingoes y posteriormente realizar el db-RDA de las coordenadas principales creadas anteriormente (que actúan como la matriz respuesta) limitada por las variables explicativas disponibles en el estudio. Posteriormente se seleccionaron las especies con mayor abundancia o correlación con bondad de ajuste en el gráfico

de ordenación. Por último y externo al gráfico se le agregaron los clusters realizados anteriormente (beta de Sorensen y Ward) pero asignados a la distribución en el db-RDA, utilizando funciones y paquetes del lenguaje R (decostand, capscale, goodness, triplot.rda) generando un triplot donde se ven las correlaciones, estaciones-variables-especies.

El db-RDA es un método que combina regresión y PCoA propuesto por Legendre y Anderson (1999). Es una extensión directa del Análisis de Redundancia (RDA) basándose en índices de disimilitud, proveniente del análisis de regresión múltiple para modelar por métodos multivariados una matriz respuesta (Y). El db-RDA es una herramienta extremadamente poderosa en manos de los ecologistas, especialmente por la introducción de las transformaciones de Legendre y Gallagher (2001) que ampliaron el RDA para el análisis de datos de composición de comunidades biológicas. El RDA es una regresión lineal múltiple multivariada (multirespuesta) seguida de un PCoA de la matriz de valores ajustados. Funciona de la siguiente manera, usando una matriz de datos de respuesta centrados (Y, especies) y una matriz de datos explicativos centrados (X, variables). Este método busca, en orden sucesivo, una serie de combinaciones lineales de las variables explicativas que mejor expliquen la variación de la matriz respuesta. Los ejes definidos en el espacio de las variables explicativas son ortogonales entre sí. RDA es por lo tanto un procedimiento de ordenación “constrained”, la diferencia con la ordenación “unconstrained” es que la matriz de variables explicativas condiciona los “pesos” (valores propios) y las direcciones de los ejes de ordenación. Además, una hipótesis (H_0) de ausencia de relación lineal entre Y y X se puede probar en RDA por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) para ver si es significativo ($p < 0.05$). (Borcard et al., 2018; Legendre et al., 2012)

Resultados

Exploración de datos

Riqueza de especies

Para tener un panorama más amplio de la variación de la riqueza faunística a lo largo del sur del Golfo de México (sGM) aplicada a la matriz de datos de presencia/ausencia, se utilizaron los números de Hill, con riqueza de especies ($q=0$), así como el uso de número de muestreos (estaciones) como variable comparable, para evitar el sesgo provocado por la diferencia de organismos de las campañas.

Tabla 1. Riqueza observada de especies de las 6 campañas oceanográficas y sGM.

Campaña	Estaciones	No. de especies
IMCA 1	37	67
IMCA 2	51	82
IMCA 3	17	78
IMCA 4	43	111
DINAMO 1	42	99
DINAMO 2	56	238
sur del Golfo de México	133	245

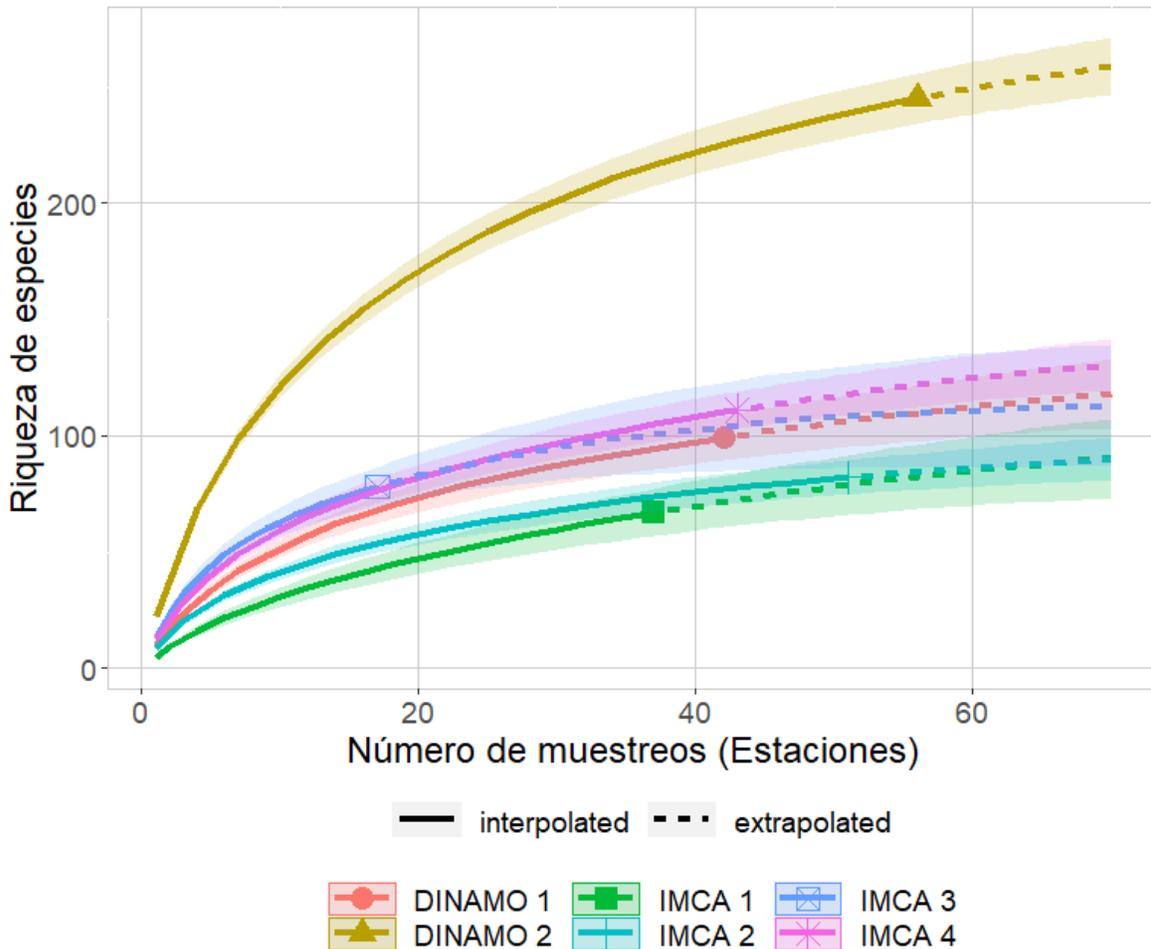


Figura 1. Rarefacción con matriz de presencia/ausencia para comparar la riqueza de especies de las 6 campañas correspondientes al sGM, usando número de muestreos (estaciones) como variable comparable, así como extrapolación a 70 estaciones de muestreo (100% de muestreo, modelo de Clench).

Se observa la diferencia en la riqueza de especies entre las campañas, siendo la campaña DINAMO 2 la que cuenta con mayor riqueza (238 spp) con 56 estaciones, comparándola con la campaña IMCA 2 (82 spp) con 51 estaciones, muestra una clara diferencia en la riqueza de especies contando con un número muy similar de estaciones de muestreo, siendo más parecida a la campaña IMCA 1 (67 spp) con 37 estaciones, en donde se puede ver la clara similitud en cuanto en su riqueza de especies, teniendo IMCA 2 más estaciones de muestreo, así como en la extrapolación llegando a una similitud en su riqueza de especies.

Así mismo podemos ver la gran similitud de riqueza de especies entre las campañas DINAMO 1 e IMCA 4, con 42 y 43 estaciones de muestreo respectivamente, y con una extrapolación muy similar. Destacando que DINAMO 1 y 2 se encuentran en la misma zona (carbonatada), donde si bien ambas cuentan con una alta riqueza de especies la diferencia radica en el número de estaciones de muestreo (42, 56 respectivamente), así mismo también se destaca la alta riqueza de especies de IMCA 4 que a diferencia de las otras campañas esta cuenta con 2 zonas de muestreo ampliamente distintas (plataforma de Campeche

y plataforma de Veracruz-Tamaulipas), por lo que se atribuye esta riqueza de especies.

Por último la campaña IMCA 3 con 17 estaciones de muestreo mostró una alta riqueza de especies, aún con la menor cantidad de estaciones, similar con las campañas anteriores, al igual que se ve en su extrapolación.

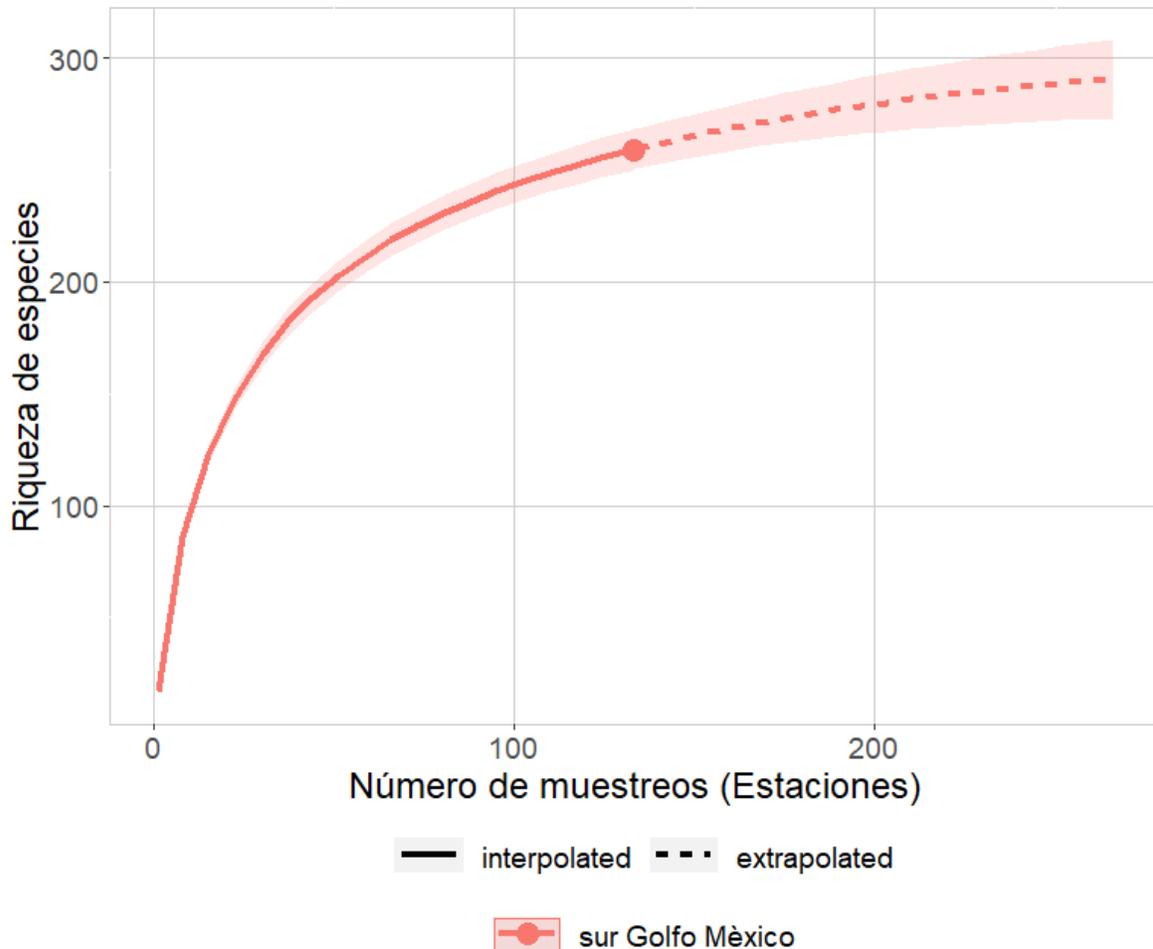


Figura 2. Rarefacción con matriz de presencia/ausencia para la riqueza de especies de las 6 campañas conjuntas correspondientes al sGM, usando número de muestreos (estaciones) como variable comparable, así como extrapolación al 100% de muestreo (modelos de Clench).

La riqueza de especies correspondiente al sGM muestra un total de 245 spp, en un total de 133 estaciones, igualmente se ve la extrapolación al máximo de especies estimadas.

Curva de acumulacion de especies

La curva de acumulacion de especies (extrapolación de la rarefacción de la matriz de presencia/ausencia con estaciones de muestreo), de cada campaña así como en su conjunto (sGM), para calcular conforme al modelo de Clench el valor máximo de especies esperadas (valor de la asíntota) y el porcentaje del avance del muestreo para alcanzar este valor máximo de especies esperadas.

Tabla 2. Valores obtenidos de las curvas de acumulación de todas las campañas oceanográficas y en su conjunto (sGM) ajustadas al modelo de Clench.

Campaña	No. de especies esperadas (valor de la asíntota)	% de avance de muestreo
IMCA 1	115.45	58
IMCA 2	104.81	78
IMCA 3	112.52	69
IMCA 4	144.05	77
DINAMO 1	134.21	73
DINAMO 2	289.43	79
sur del Golfo de México	297.13	87

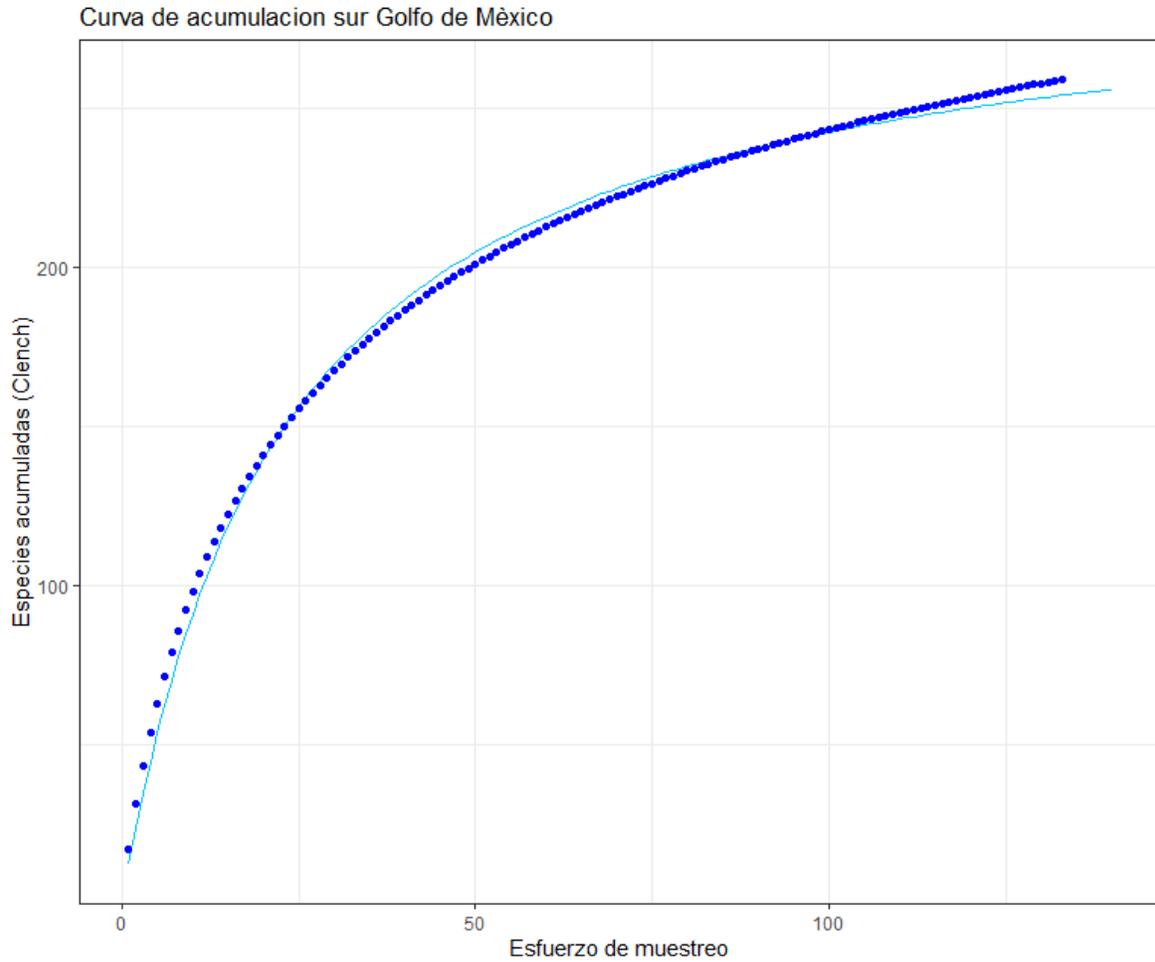


Figura 3. Curva de acumulación sGM.

Se puede observar las especies aculmuladas (puntos azules) y la curva calculada y ajustada a los valores por el modelo de Clench (línea azul) en la que se obtuvo el valor de la asíntota (297.13) que representa el valor máximo de especies esperadas y el porcentaje de avance del muestreo (0.83 o 83%) con estos datos tenemos un panorama de la cantidad de especies esperadas en el sGM indicando su riqueza máxima calculada con el modelo de Clench.

Beta de Sorensen y Dendrogramas (Clusters)

Utilizando la matriz de datos de presencia/ausencia de las especies de poliquetos de cada una de las campañas y en su conjunto (sGM) y usando la Beta de Sorensen (disimilitud) obtenemos el valor de la disimilitud por la composición de especies, obteniendo valores de 0-1 (siendo 1 el valor máximo teórico de disimilitud). Para una apreciación visual de la disimilitud entre estaciones se elaboraron dendrogramas donde se puedan ver los clusters generados por el método Ward.

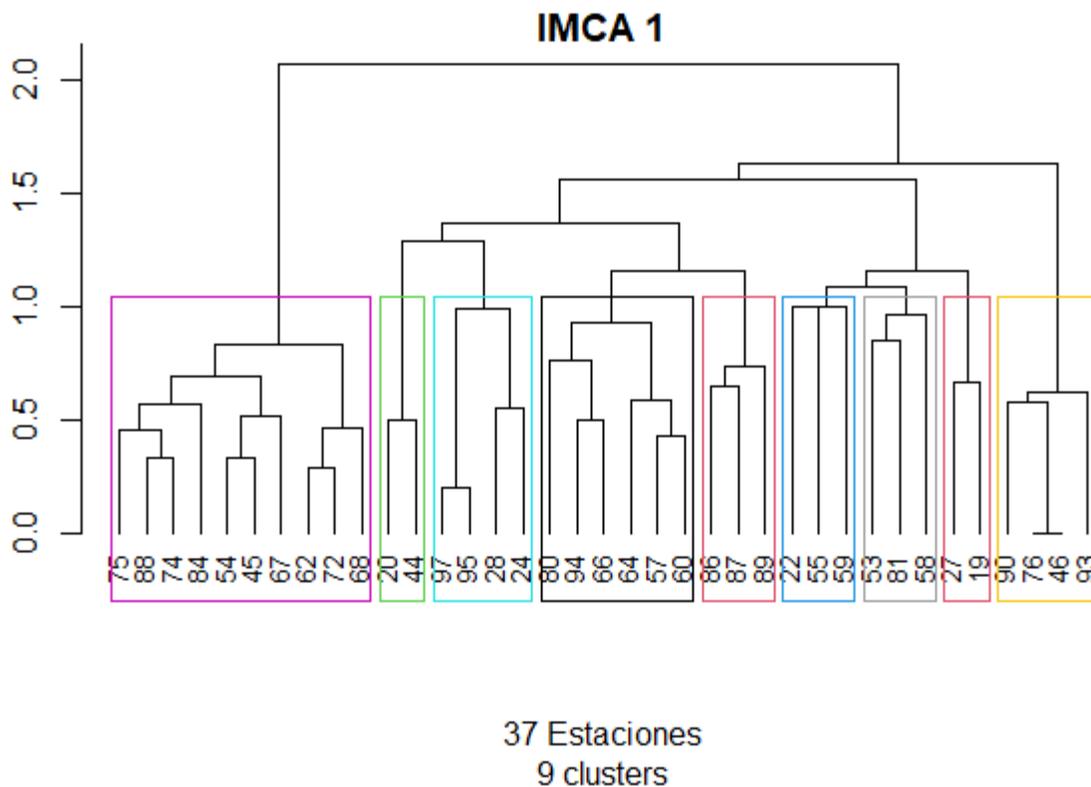


Figura 4. Dendrograma de la campaña IMCA 1.

IMCA 1 (Golfo de México)

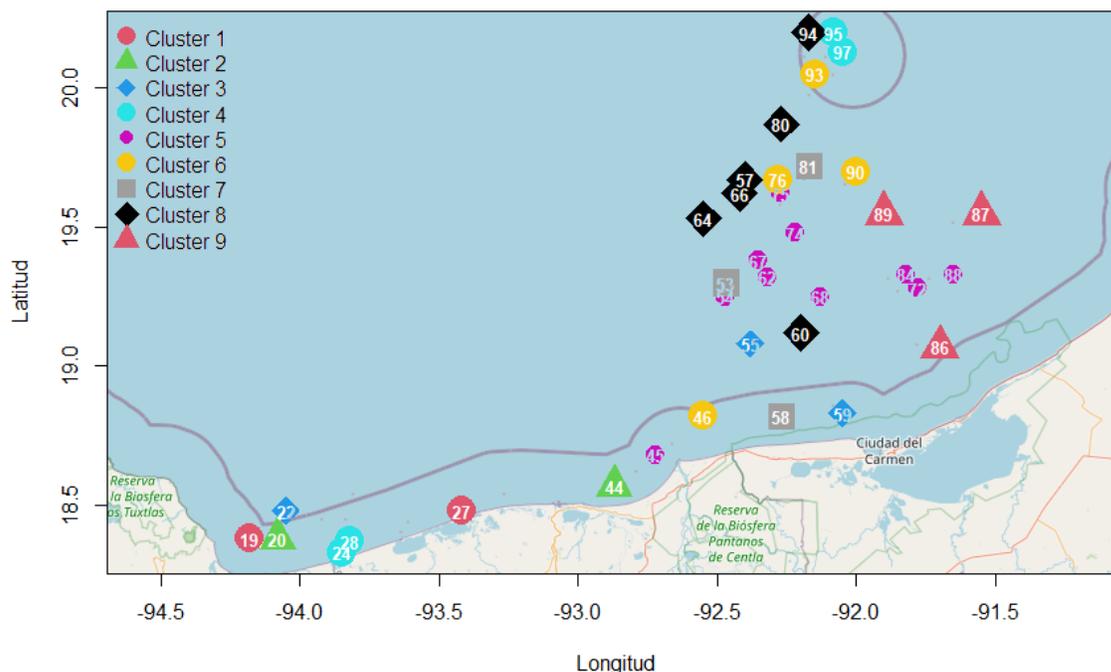


Figura 5. Gráfico espacial de las estaciones (37) de la campaña IMCA 1, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (9) generados por método Ward, Beta de Sorensen ($\beta S=1$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (9, $\beta S=1$) de la campaña IMCA 1 (37 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación. Los clusters 2, 3, 4, 6 y 7 no cuentan con la característica geográfica de la cercanía, donde las estaciones miembro del mismo cluster se encuentran espacialmente cercanas entre sí, y se encuentran dispersas a lo largo de la zona que comprende la campaña IMCA 1; por otro lado los cluster 5 y 8 reflejan una buena cantidad de estaciones y un gradiente espacial, dejando ver la similitud entre la mayor parte de las estaciones de esta campaña, por el contrario tenemos que existen clusters con muy pocos miembros como es el caso de los clusters 1 y 2 con dos estaciones cada uno, reflejando las estaciones más disímiles de la campaña. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en esta campaña.

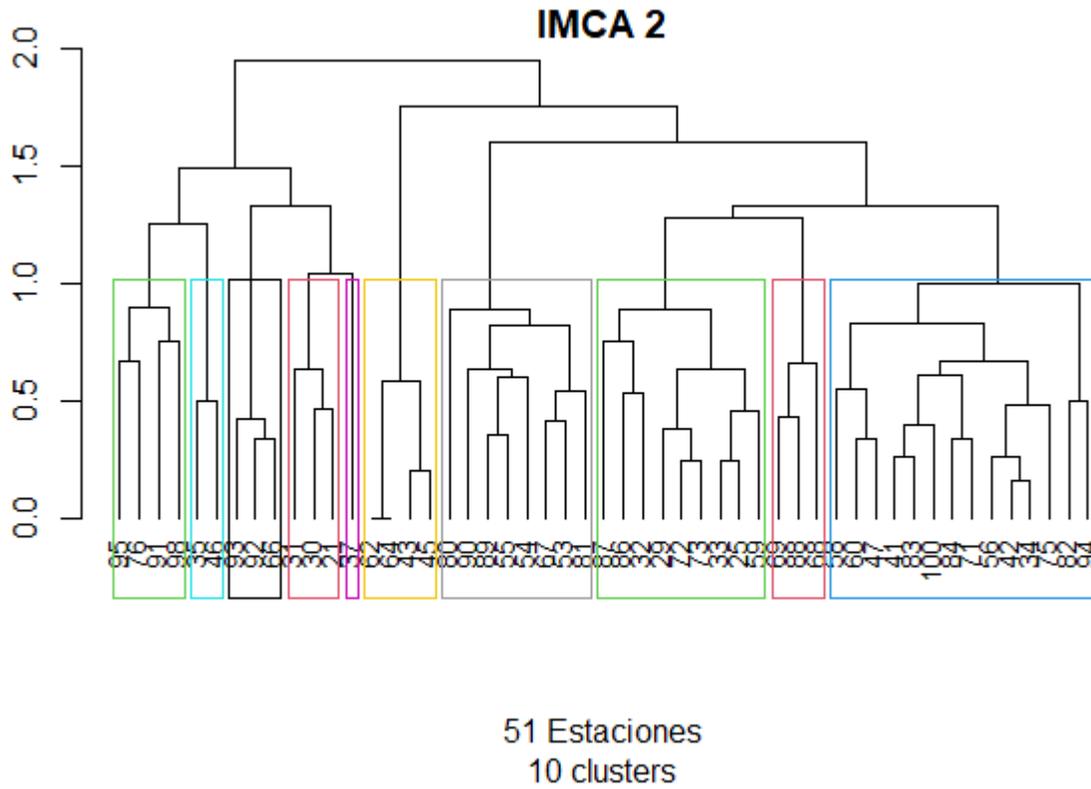


Figura 6. Dendrograma de la campaña IMCA 2.

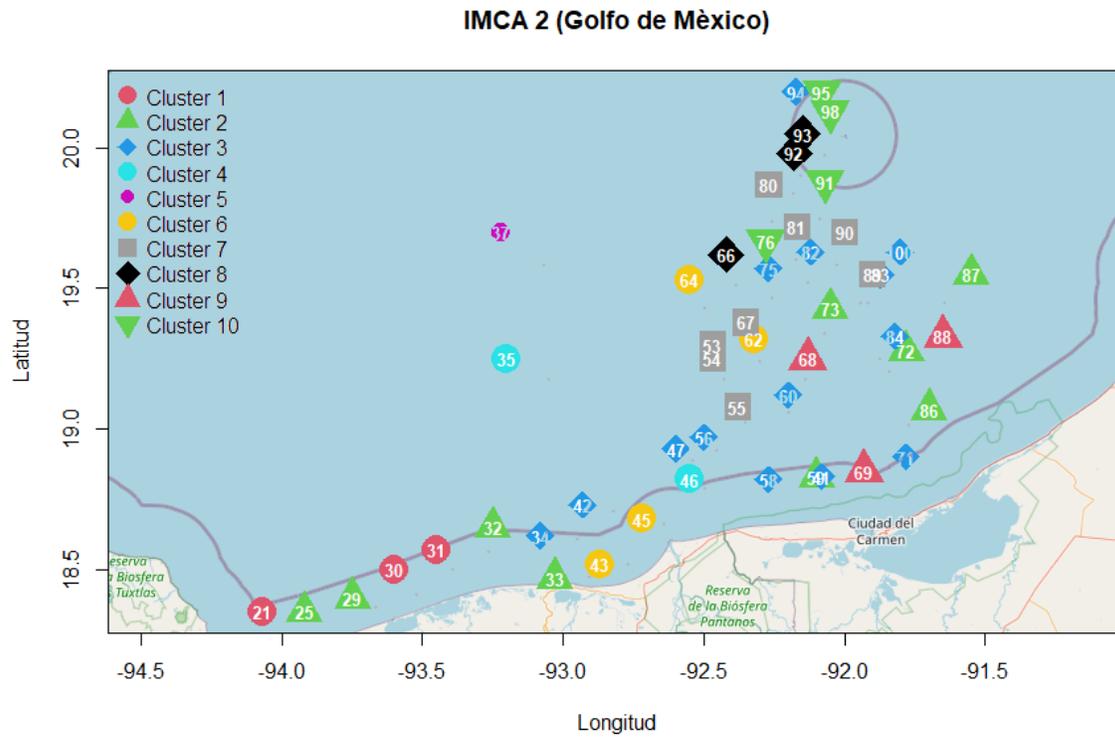


Figura 7. Gráfico espacial de las estaciones (51) de la campaña IMCA 2, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (10), generados por método Ward, Beta

de Sorensen ($\beta S=1$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (10, $\beta S=1$) de la campaña IMCA 2 (51 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación. Los clusters 2, 3, 4 y 6 no cuentan con la característica geográfica de la cercanía, donde las estaciones miembro del mismo cluster se encuentran espacialmente cercanas entre sí, y se encuentran dispersas a lo largo de la zona que comprende la campaña IMCA 2, solo los cluster 7 y 8 lo cumplen; por otro lado los cluster 2, 3 y 7 reflejan una buena cantidad de estaciones y un gradiente espacial muy disperso, dejando ver la similitud entre la mayor parte de las estaciones de esta campaña, por el contrario tenemos que los demás clusters contienen muy pocas estaciones miembro siendo los clusters 4 y 5 con dos y una estación/es respectivamente las que mejor reflejan la disimilitud de la campaña. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en esta campaña.

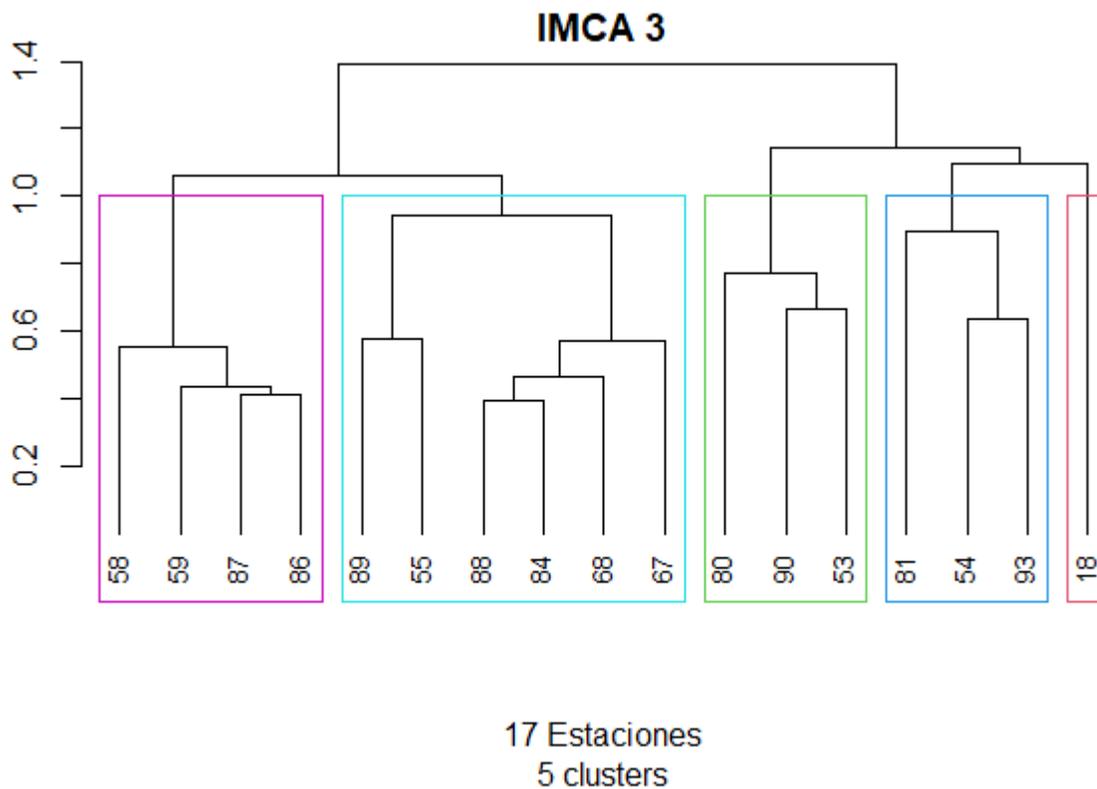


Figura 8. Dendrograma de la campaña IMCA 3.

IMCA 3 (Golfo de México)

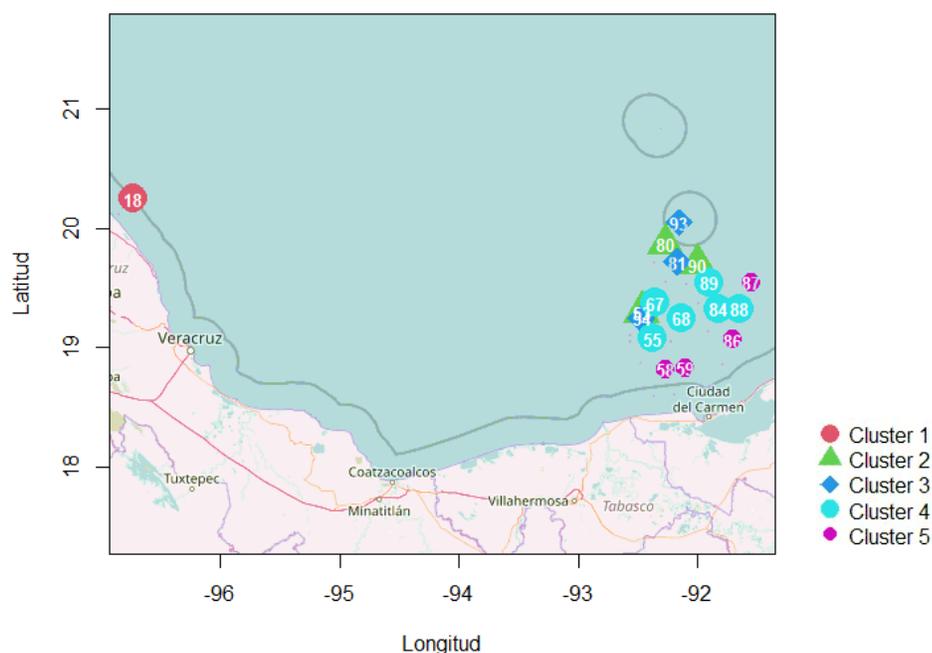


Figura 9. Gráfico espacial de las estaciones (17) de la campaña IMCA 3, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (5), generados por método Ward, Beta de Sorensen ($\beta S=1$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (5, $\beta S=1$) de la campaña IMCA 3 (17 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación, esta campaña cuenta con el menor número de estaciones de muestreo, además cuenta con una estación bastante alejada de la zona principal (plataforma de Campeche), lo que nos genera estos clusters siendo el cluster 1 el que resalta por tal motivo siendo la más disímil; los demás clusters 2, 3, 4 y 5 bastante homogéneos en sus estaciones miembro y ubicación geográfica, generando un notable gradiente espacial latitudinal. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en esta campaña.

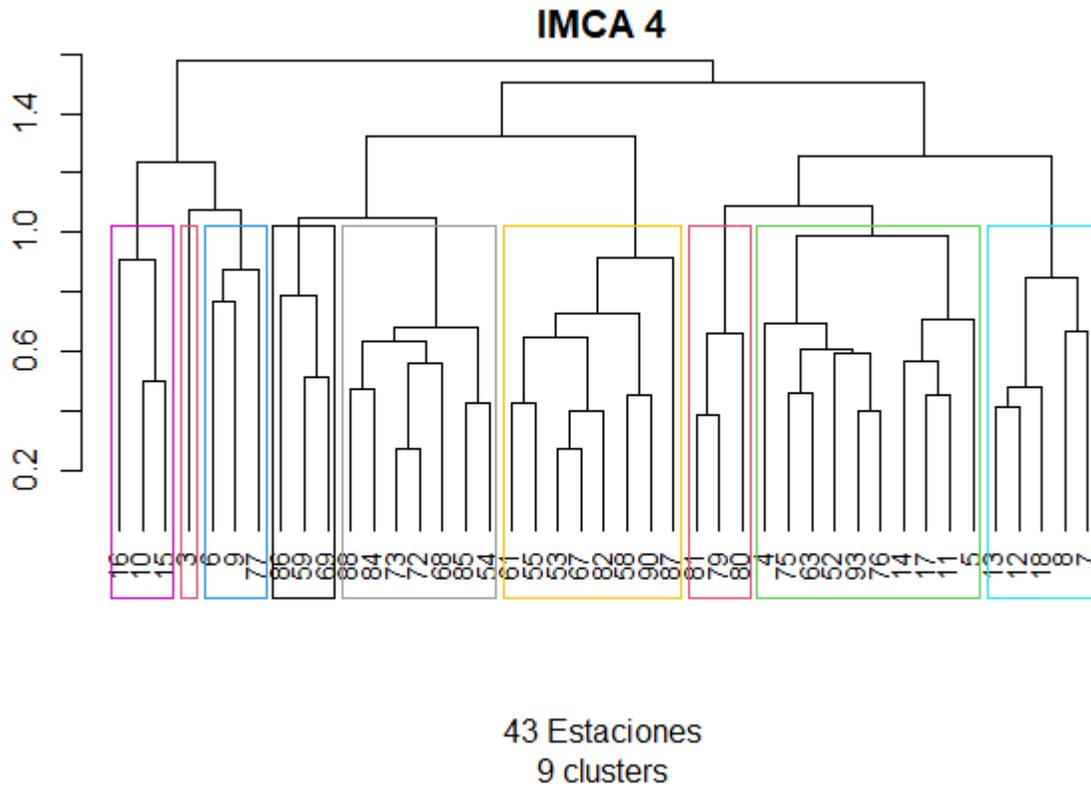


Figura 10. Dendrograma de la campaña IMCA 4.

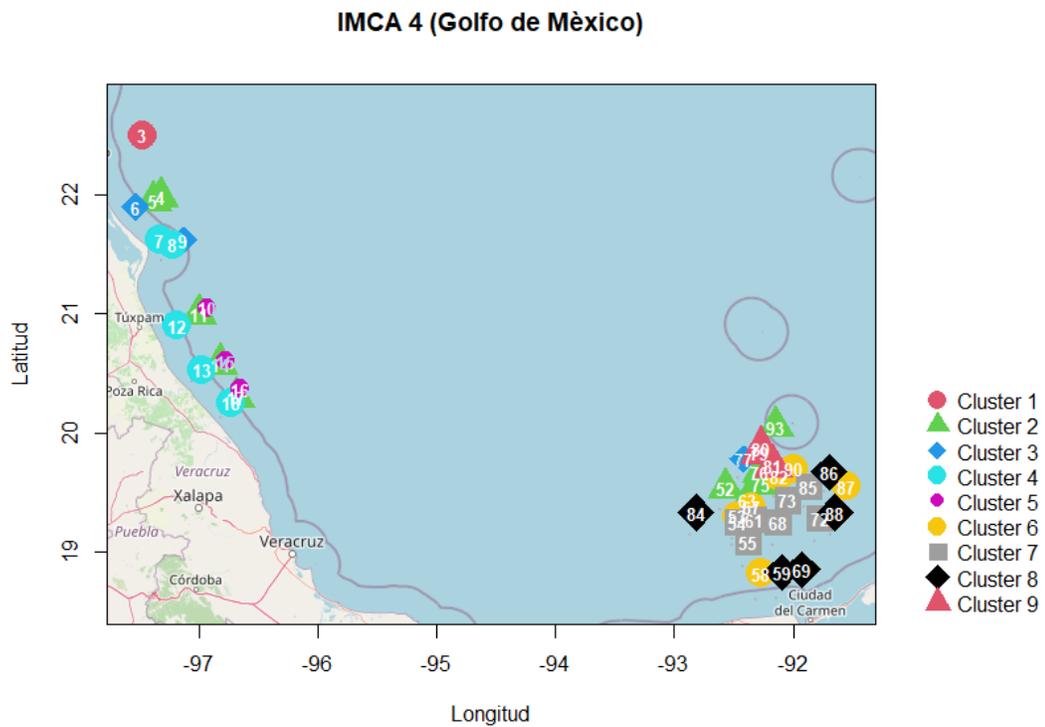


Figura 11. Gráfico espacial de las estaciones (43) de la campaña IMCA 4, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (9), generados por método Ward, Beta de Sorensen ($\beta S=1$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (9, $\beta S=1$) de la campaña IMCA 4 (43 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación. En particular en esta campaña se muestran dos zonas completamente distintas (plataforma de Campeche y plataforma Veracruz-Tamaulipas) dentro del sGM, destacando que dentro de los clusters 2 y 3 contienen estaciones presentes en estas zonas tan alejadas, lo que refleja la similitud en la composición de especies. Los clusters 6 y 7 reflejan la característica geográfica de la cercanía, así como una buena cantidad de estaciones y junto al cluster 9 un gradiente espacial latitudinal en la zona de la plataforma de Campeche, al igual que los clusters 4 y 5 en la plataforma de Veracruz-Tamaulipas con un gradiente de costa-plataforma; por el contrario el cluster 8 muestra sus estaciones miembro dispersas. El clusters 1 con una sola estación, refleja la más disímil de la campaña. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en esta campaña.

sur del Golfo de México (sGM)

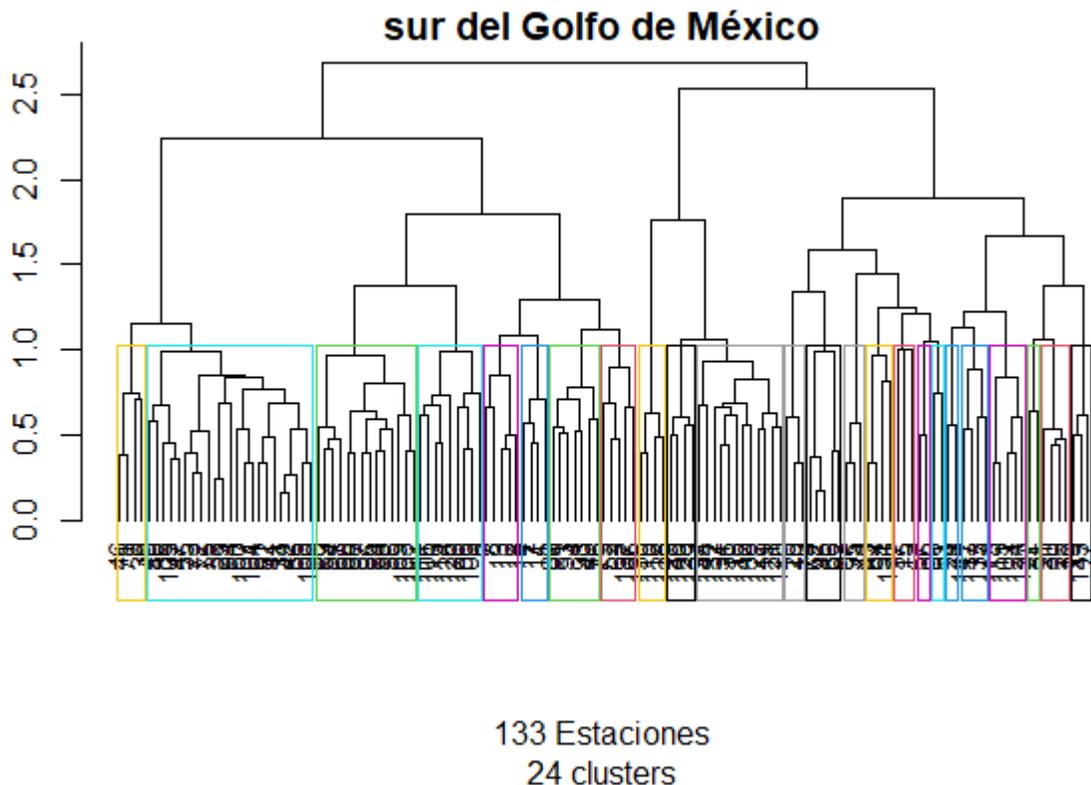


Figura 12. Dendrograma del sur del Golfo de México.

Bases de datos

Para un mejor manejo y análisis de los datos se conjuntaron las campañas de IMCA 1, 2 y 4 (plataforma Campeche), omitiendo a IMCA 3 por la falta de datos. Este conjunto nuevo de datos se denominó IMCAs y corresponde a las campañas que cuentan con las estaciones pertenecientes a la zona terrígena y de transición. También se conjuntaron los datos de la estación de la campaña IMCA 3 (estación 18) e IMCA 4 (plataforma Veracruz-Tamaulipas), denominando a esta nueva base de datos IMCAs-oeste; que corresponden a las campañas que cuentan con las estaciones pertenecientes a la zona de la plataforma Veracruz-Tamaulipas. Por último se utilizaron las campañas DINAMO 1 y 2 por separado debido a la falta de datos; que corresponden a las campañas que cuentan con las estaciones pertenecientes a la zona carbonatada. Estas nuevas 4 bases de datos cuentan con datos en sus composiciones faunísticas y variables espaciales/ambientales en cada una de sus estaciones, así como separadas por sus zonas geográficas, que es necesario para un correcto análisis de patrones de diversidad taxonómica, con esto se limitan los clusters generados por la inmensa cantidad de información en cuanto a composición faunística y la falta de datos de estaciones/variables.

IMCAs

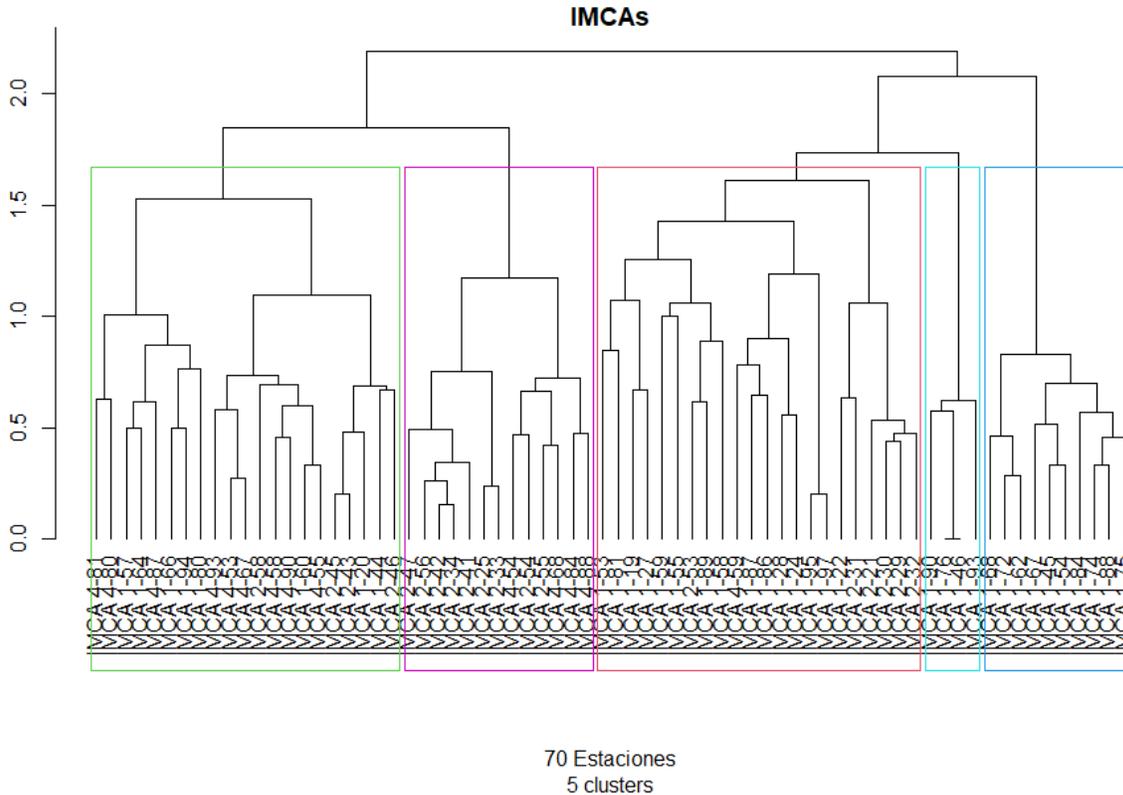


Figura 13. Dendrograma IMCAs.

IMCAs (Golfo de México)

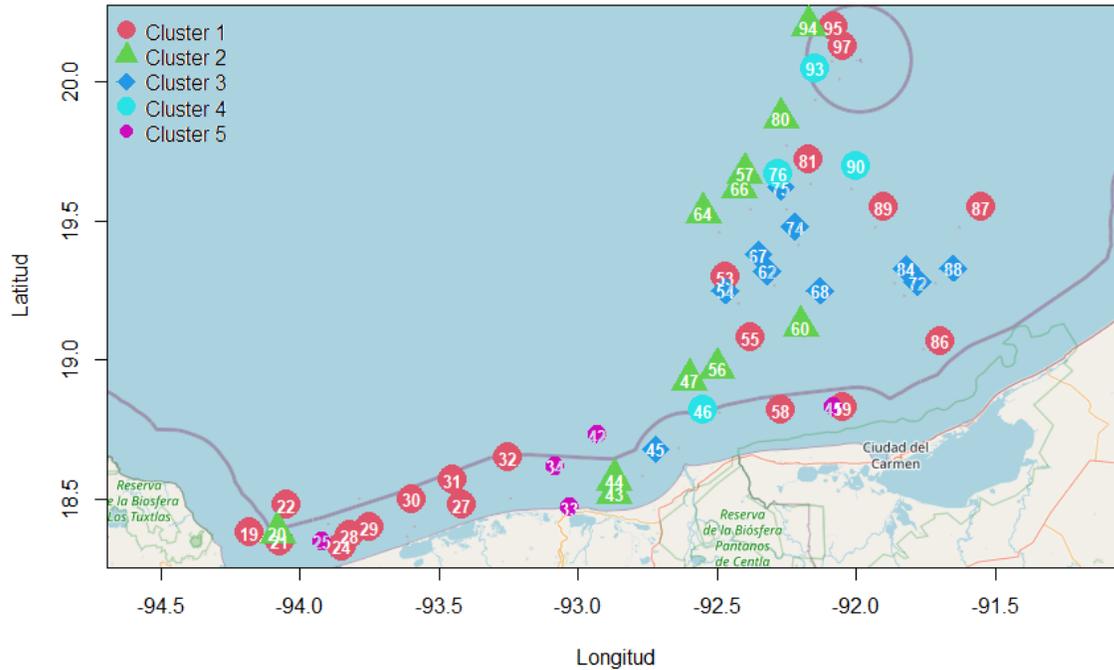


Figura 14. Gráfico espacial de las estaciones (70) de IMCAs, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (5), generados por método Ward, Beta de Sorensen definidos por el autor ($\beta S=1.7$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de como se ven los clusters generados por la Beta de Sorensen de IMCAs con su respectiva ubicación geográfica de cada estación, de las que se generaron 16 clusters ($\beta S=1$), pero para efectos prácticos y un mejor análisis se definieron los clusters a 5 ($\beta S=1.7$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (5, $\beta S=1.7$) de IMCAs (70 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación. El cluster 1 es el que mayor cantidad de estaciones contiene, lo que nos indica la similitud entre la mayor parte de las estaciones de IMCAs, también podemos ver que las estaciones que componen este cluster no cuentan con la característica geográfica de la cercanía, donde las estaciones miembro del mismo cluster se encuentran espacialmente cercanas entre sí, teniendo estaciones dispersas a lo largo de esta zona del sGM, cumpliendo esta característica solo en la plataforma de Tabasco.

El cluster 2 también contiene gran parte de las estaciones de IMCAs, lo que nos indica la similitud entre la mayor parte de las estaciones de IMCAs, y al igual que el anterior sus estaciones se encuentran muy dispersas a lo largo del sGM pero en este caso en un gradiente latitudinal cercano del arrecife Cayo Arcas. El cluster 3 es el que contiene las estaciones a diferencia de los otros cluster a una distancia más cercana entre sí, cumpliendo con la característica geográfica de la cercanía, reflejando la similitud espacial en su composición de especies y su concentración

en un punto geográfico del sGM.

El cluster 5 se encuentra disperso a lo largo de la zona del sGM, principalmente a lo largo de la plataforma de Campeche, teniendo estaciones repetidas con los cluster 1 y 2 (por lo que solo se ven pocas en el gráfico), dejando ver que la disimilitud entre estos clusters aun estando en las mismas estaciones es muy alta y más debido a que la disimilitud definida fue $\beta S=1.7$, dejando ver la clara diferencia en la composición de especies.

El cluster 4 es el que menos estaciones contiene con 4 y de los cuales se encuentran a una distancia no muy aceptable para un cluster, pero al igual que el cluster 2 se puede notar un gradiente latitudinal cercano del arrecife Cayo Arcas. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en IMCAs y en la zona correspondiente a la zona terrígena y de transición.

db-RDA

Para evaluar las variables ambientales/espaciales (Latitud, Longitud, Profundidad, Temperatura, Salinidad, Materia orgánica (MO), Lodo, Arena y Grava) que determinan la variación de las estaciones/clusters, se usó el análisis multivariado de ordenamiento db-RDA para cada uno de las bases de datos antes generadas; en todos los casos se utilizó la estandarización de Hellinger, para el PCoA se usó el modelo de disimilitud beta de Sorensen y se aplicó la corrección de Lingoes, posteriormente se le adiciono al db-RDA los clusters generados anteriormente.

Tabla 3. Valores de análisis multivariado de ordenamiento db-RDA.

Data base	varianza "constrained"	varianza representada por los dos primeros ejes	% varianza representada	ANOVA para el test global (p<0.05)	ANOVA para el test de los ejes canónicos (p<0.05)
IMCAs	0.1878	CAP1=0.2483 CAP2=0.2138	46.2	0.001	CAP1=0.001 CAP2=0.001
IMCAs-oeste	0.1878	CAP1=0.2857 CAP2=0.1860	47.1	0.001	CAP1=0.001 CAP2=0.001
DINAMO 1	0.3633	CAP1=0.3428 CAP2=0.2668	60.9	0.001	CAP1=0.001 CAP2=0.001
DINAMO 2	0.2744	CAP1=0.4874 CAP2=0.1482	63.5	0.001	CAP1=0.001 CAP2=0.001

En el db-RDA la varianza total se divide en "constrained" y "unconstrained". La "constrained" es la cantidad de varianza de la matriz expuesta (Y) explicada por

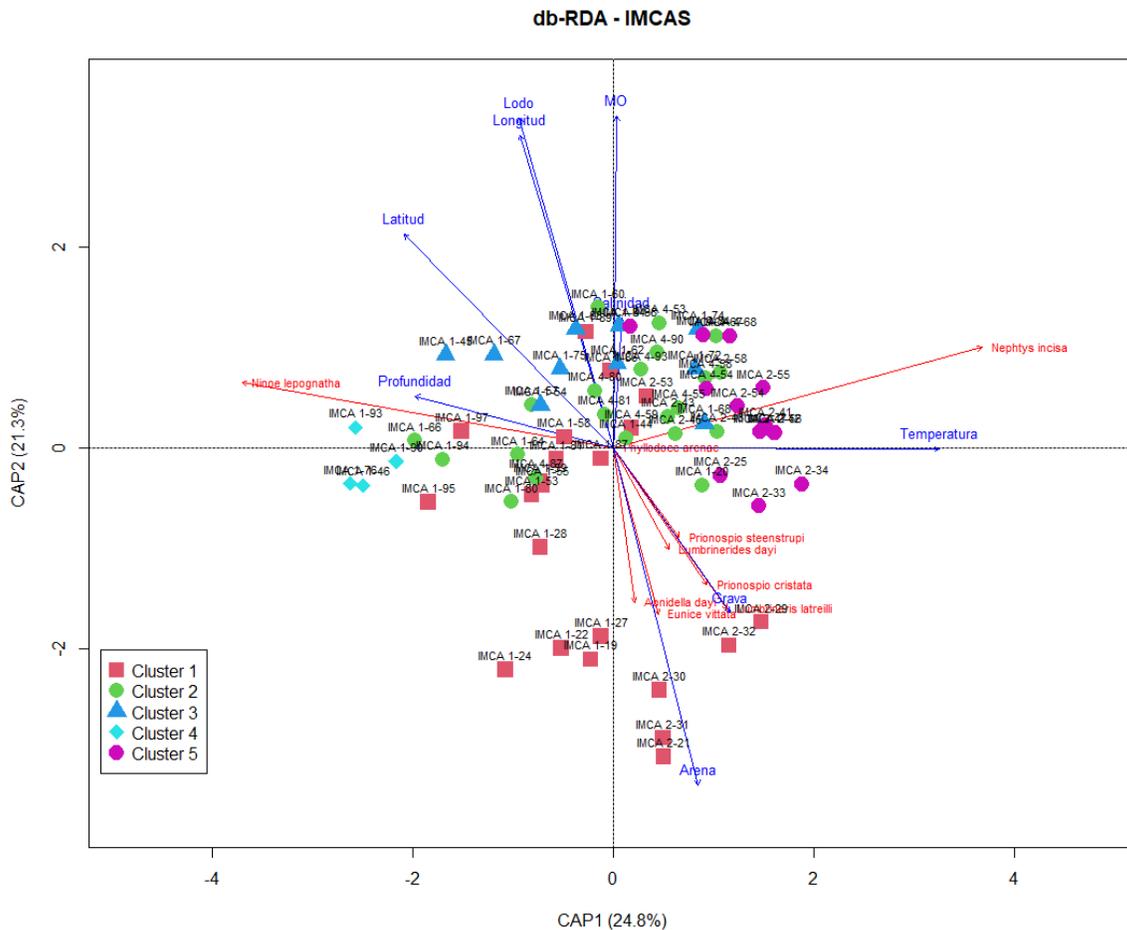


Figura 16. Gráfico de ordenamiento db-RDA para IMCAs, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingoes), “site scores” están representados por sus puntajes “wa” (suma ponderada de “species scores”), y cluster (5) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, “species scores” con un ajuste de bondad ($\text{spe.good} \geq 0.2$).

En este gráfico de ordenamiento db-RDA de IMCAs, la principal característica es la adición del PCoA (utilizando la Beta de Sorensen, aplicada a la matriz de datos de presencia/ausencia), resultando en la dispersión de las estaciones a lo largo de los ejes CAP1 y CAP2 (46.2% de la varianza representada) por sus puntajes “wa” (suma ponderada de “species scores”), lo que con la aplicación de clusters generados por el método Ward (definidos por el autor, 5 clusters, $\beta S=1.7$), así también la adición de las especies con ajuste de bondad ($\text{spe.good} \geq 0.2$) en el gráfico de ordenamiento, generando un triplot indicando la correlación variables-estaciones-especies.

Separando el gráfico en cuadrantes (por los ejes CAP1 y CAP2), empezando por el superior izquierdo y continuando hacia la derecha, tenemos que en se muestran las variables longitud y lodo con una alta correlación y buena correlación con la

MO; también la variable salinidad (poco representada) se encuentra correlacionada con estas variables, resultando muy correlacionada con la MO, (al ser una variable poco representada no tiene un valor significativo en este gráfico). Lo que nos dice que las variables lodo (sustrato terrígeno) y la MO “van de la mano”, indicando la mayor presencia de MO en este tipo de sustrato, así mismo estas variables están correlacionadas con la longitud mostrando los mayores pesos de estas variables e indicando los valores más altos de lodo-MO, esto en su conjunto nos dice la dirección (longitudinal) de las estaciones con respecto a las estaciones de otras campañas, ubicándose en la zona terrígena, así también de estaciones en la zona de transición (lodo-arenosa) de las zonas terrígena y calcárea, aquí encontramos la correlación con las estaciones definidas por su puntaje “wa” definido por la disimilitud de Sorensen, así como la generación de clusters por esta similitud siendo los clusters 2 y 3 los que son determinados por estas variables (clusters muy segregados), también se ve la alta correlación negativa con las variables arena y grava (sustratos calcáreos), lo que nos indica la relación inversamente proporcional de estas dos variables que al ser sustratos nos deja claro que en presencia de un tipo habrá ausencia de otro. Además dentro de este cuadrante encontramos la buena correlación de la profundidad y la latitud, pero muy baja (casi nula) con las otras variables presentes en este cuadrante, lo que indica que las estaciones más profundas se encuentran en latitudes mayores, aquí encontramos al cluster 4; la especie *Ninoe lepognatha* que indica la especie con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionada con estas estaciones y a su vez por estas variables.

En el cuadrante superior derecho se muestra la variable temperatura como variable independiente que tiene una correlación alta pero negativa con las variables longitud-profundidad, lo que indica que estas estaciones se encuentran a temperaturas más altas, por lo tanto a menor profundidad y a menor latitud, aquí encontramos las estaciones del cluster 5; las especies *Nephtys incisa* y *Phyllodoce arenae* (poco representada), con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionada con las estaciones y variables.

Por último en el cuadrante inferior derecho las variables arena y grava que representan al sustrato calcáreo tienen una alta correlación, y alta correlación negativa con el sustrato lodo, que se correlaciona con la MO y la longitud, lo que nos dice que estas estaciones se encuentran apartadas de la mayoría indicando su posición geográfica en la zona de transición (lodo-arenosa) entre las provincias terrígena y calcárea; aquí se encuentran estaciones pertenecientes al cluster 1, así mismo las especies *Prionospio steenstrupi*, *Prionospio cristata* (menos representadas), *Aonidella dayi*, *Lumbrinerides dayi*, *Eunice vittata* y *Lumbrineris latreilli* son las especies con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más

representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables.

En las especies con mejor ajuste de bondad en la correlación con las especies (spe.good \geq 0.2) tenemos que *Lumbrineridae* y *Spionidae* son las familias con mayores representantes (3 spp cada una) y su correlación comprende al sustrato arena-grava (zona de transición lodo-arenoso), la especie *Ninoe leptognatha* (*Lumbrineridae*) correlacionada a la profundidad y la especie *Nephtys incisa* (*Nephtyidae*) correlacionada con la temperatura.

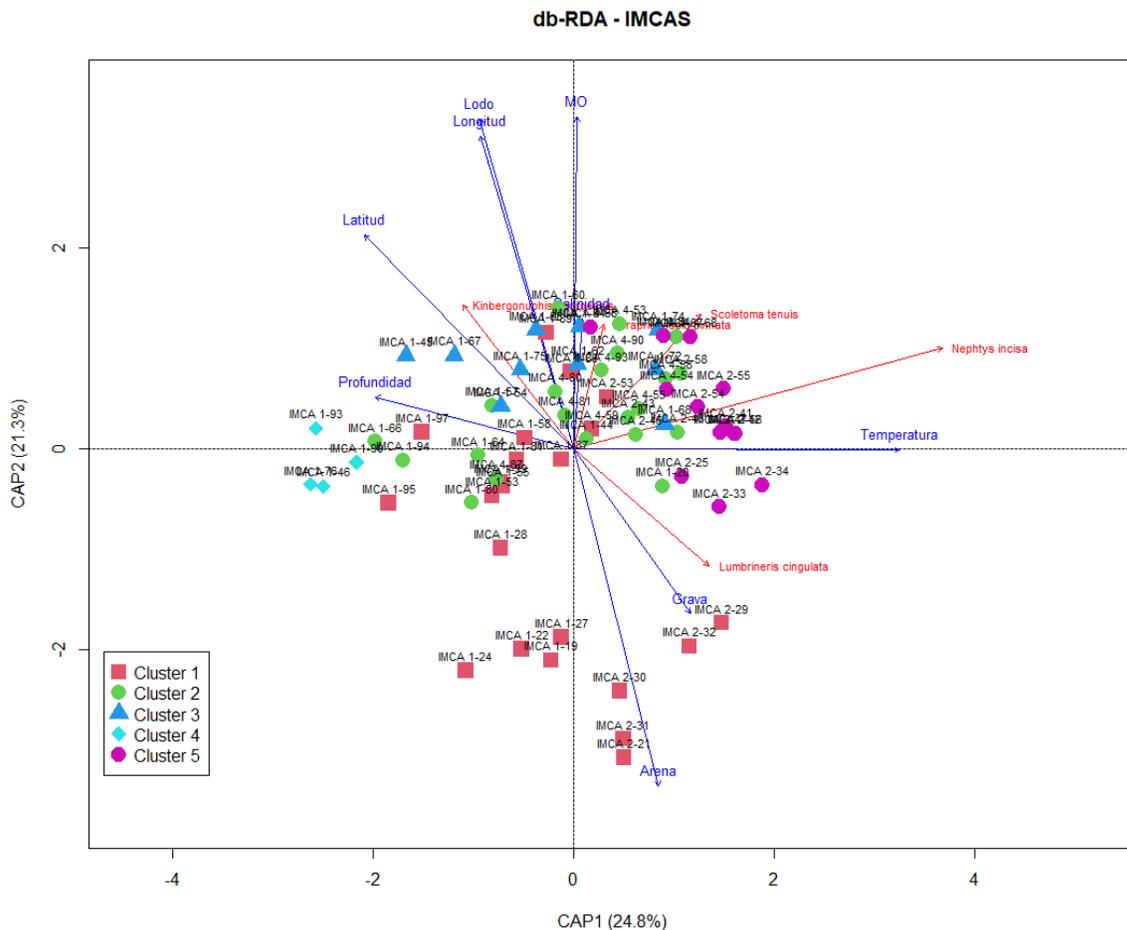


Figura 17. Gráfico de ordenamiento db-RDA para IMCAs, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingoes), “site scores” están representados por sus puntajes “wa” (suma ponderada de “species scores”), y cluster (5) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, “species scores” de las especies más abundantes.

En las especies con mayor abundancia (>100 organismos) tenemos que *Kinbergonuphis cedroensis*, *Scoletoma tenuis* y *Paraprionospio pinnata* (+), se encuentran determinadas y correlacionadas por el sustrato lodo-MO (zona terrígena) y *Lumbrineris cingulata* determinada y correlacionadas por el sustrato

arena-grava (zona calcárea) siendo la familia *Lumbrineridae* la más dominante teniendo presencia en los 2 tipos de sustrato, así como la especie *Nephtys incisa* (*Nephtyidae*) correlacionada con la temperatura.

NOTA: (+) simboliza la/s especie/s con mayor abundancia.

IMCAs-oeste

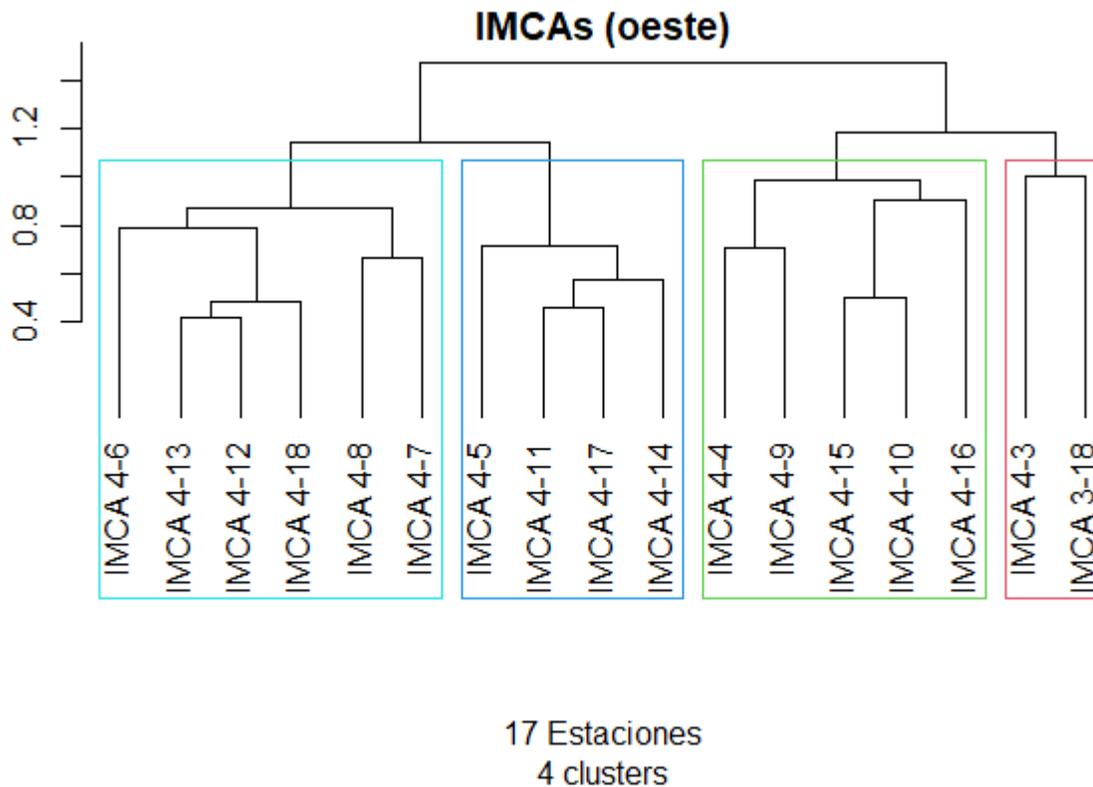


Figura 18. Dendrograma IMCAs-oeste.

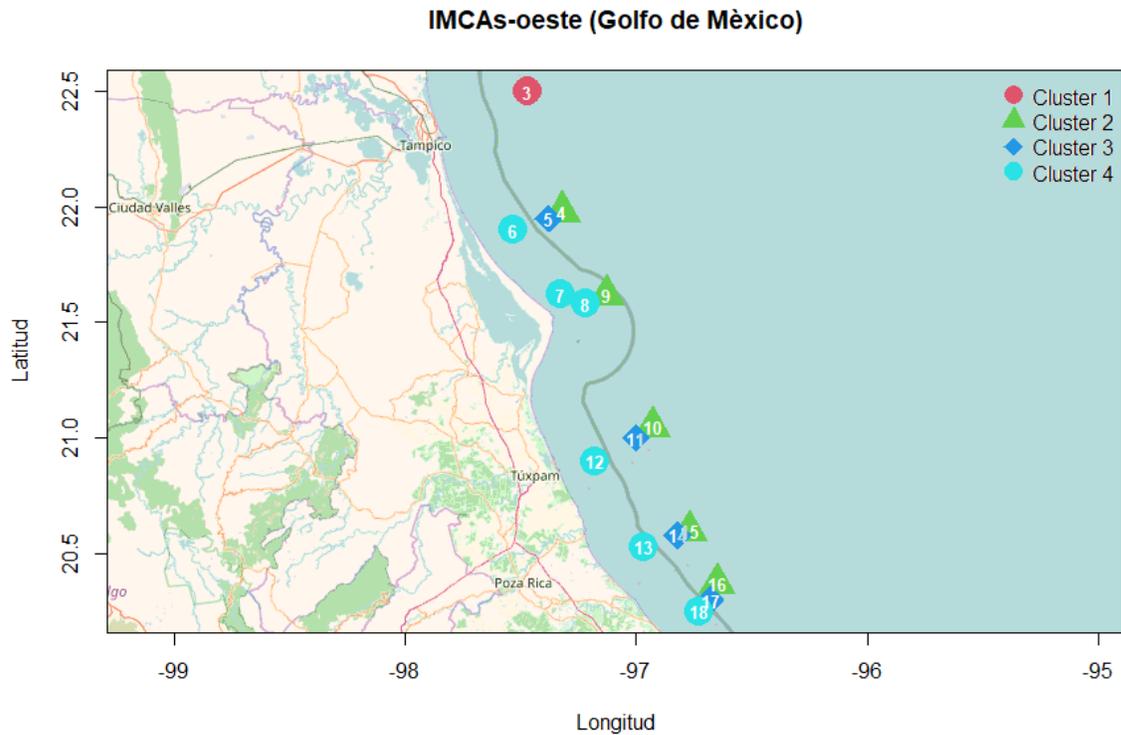


Figura 19. Gráfico espacial de las estaciones (17) de IMCAs, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (4), generados por método Ward, Beta de Sorensen definidos por el autor ($\beta S=1$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (4, $\beta S=1$) de IMCAs-oeste (17 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación. El clusters 1, que con su composición de especies lo hace el más disímil de los demás clusters y de esta zona de estudio. Los clusters 2, 3, 4 tiene una cantidad de estaciones que los componen similar, también podemos ver que las estaciones que componen estos cluster no cumplen con la característica geográfica de la cercanía, pero sí podemos observar una separación homogénea siguiendo un gradiente latitudinal, marcado por la costa y plataforma Veracruz-Tamaulipas, además estos clusters su distribución está muy marcada por un gradiente espacial costa-plataforma. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en IMCAs-oeste y en la zona correspondiente a la zona terrígena y de transición.

db-RDA

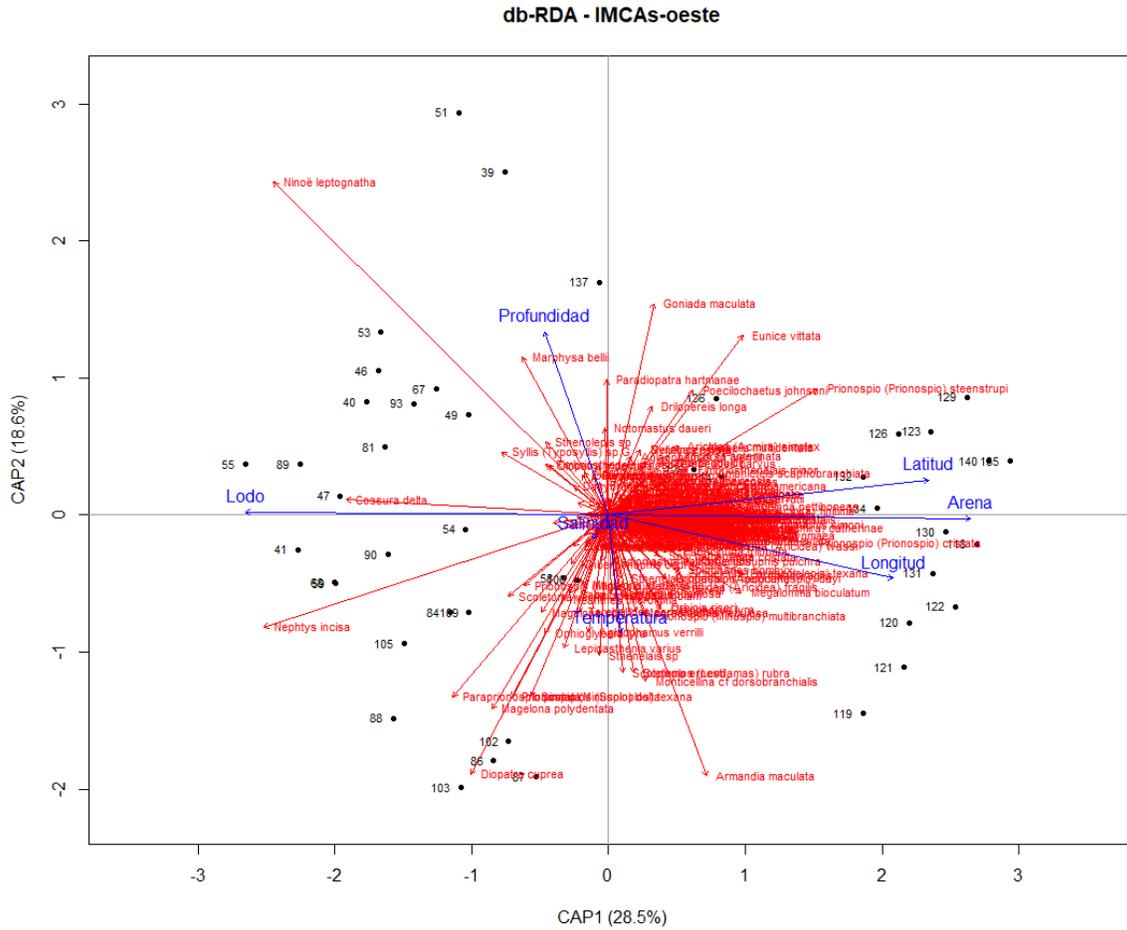


Figura 20. Gráfico de ordenamiento db-RDA para IMCAs-oeste, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingoes), "site scores" están representados por sus puntajes "wa" (suma ponderada de "species scores"), "species scores" de todas las especies.

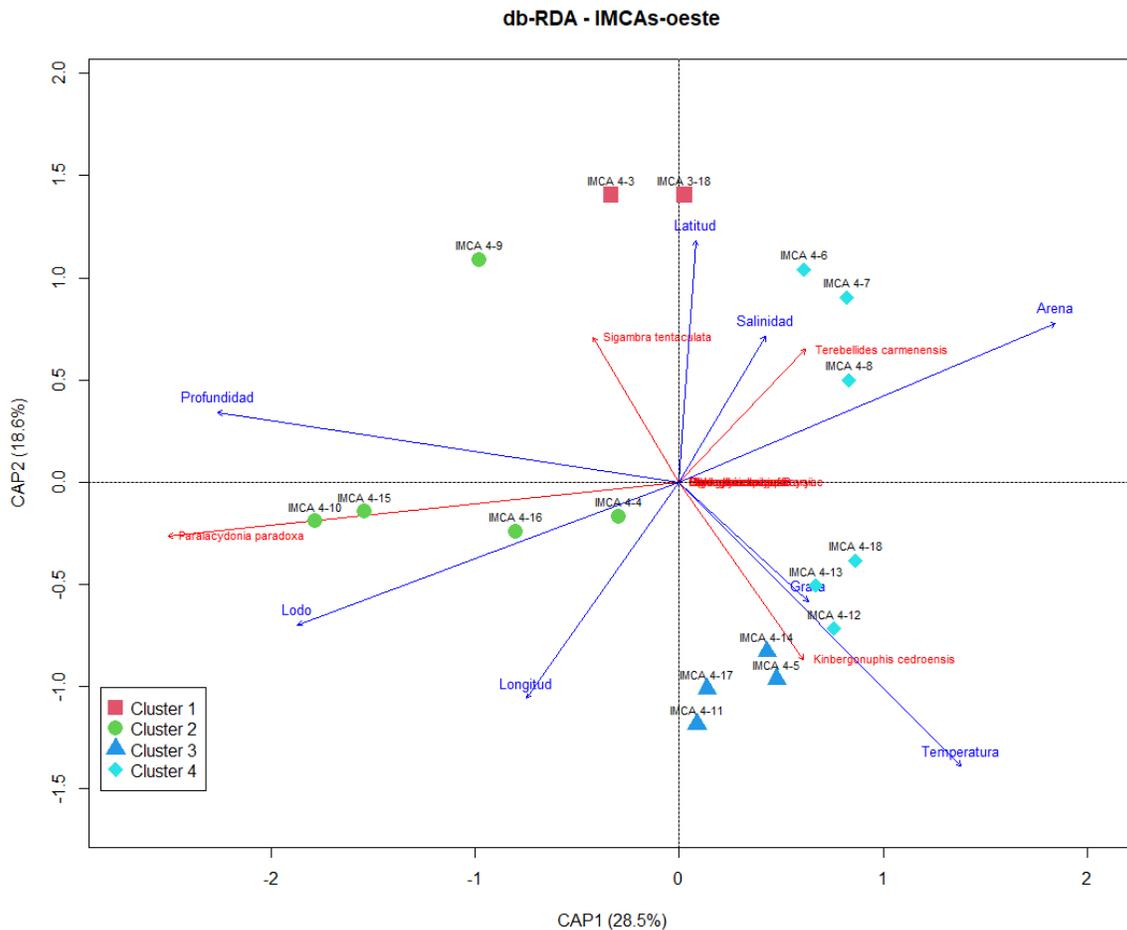


Figura 21. Gráfico de ordenamiento db-RDA para IMCAs-oeste, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingo), "site scores" están representados por sus puntajes "wa" (suma ponderada de "species scores"), y cluster (4) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, "species scores" con un ajuste de bondad ($\text{spe.good} \geq 0.2$).

En este gráfico de ordenamiento db-RDA de IMCAs-oeste, la principal característica es la adición del PCoA (utilizando la disimilitud de Sorensen aplicada a la matriz de datos de presencia/ausencia), donde se ve reflejando la correlación entre las variables, así como la dispersión de las estaciones a lo largo de los ejes CAP1 y CAP2 (47.1% de la varianza representada) por sus puntajes "wa" (suma ponderada de "species scores"), lo que con la aplicación de clusters (método Ward) podemos separarlos en agrupaciones de disimilitud de Sorensen (4 clusters, $\beta S=1$), también la adición de las especies con un ajuste de bondad ($\text{spe.good} \geq 0.5$); generando un triplot indicando la correlación variables-estaciones-especies.

Separando el gráfico en cuadrantes (por los ejes CAP1 y CAP2), empezando por el inferior izquierdo y continuando hacia la derecha observamos las variables

longitud, lodo y profundidad con una buena correlación, en este caso la variable lodo (sustrato de la zona terrígena) no cuenta con correlación con la MO por que no se encuentra en los datos; así mismo la correlación con la longitud indica la dirección geográfica en donde domina este tipo de sustrato y en este caso correlacionado de igual manera con las estaciones más profundas, aquí encontramos al cluster 2 y la especie *Paralacydonia paradoxal* con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables, también podemos observar la correlación alta pero negativa con las variables de latitud, arena y salinidad, dejando ver la relación inversamente proporcional de estos 2 tipos de sustratos.

En el cuadrante superior derecho encontramos las variables de latitud, arena y salinidad (poco representada) tienen buena correlación, indicando las estaciones con arena como su principal sustrato así como ubicadas a una latitud mayor, también cabe resaltar su correlación con la salinidad que en otros gráficos multivariados se observaba con lodo-MO pero en este caso no, lo que nos podría indicar su relación con la latitud ya que en este caso encontramos las latitudes mayores de toda la zona del sGM (al ser una variable poco representada no tiene un valor significativo en este gráfico), aquí encontramos a cluster 1 (mayor latitud) y parte del 4 (mayor presencia del sustrato grava); lo que correlaciona a estos grupos de variables es la correlación con las estaciones definidas por su puntaje "wa" definido por la disimilitud de Sorensen, así como la generación de clusters, adicionando la correlación de las especies *Sigambra tentaculata* y *Terebellides carmenensis* con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables, también se ve la alta correlación negativa con las variables longitud y lodo, lo que nos indica la relación inversamente proporcional.

En el cuadrante inferior derecho se muestra las variables temperatura y grava, lo que indica que estas estaciones se encuentran a temperaturas más altas por lo tanto a menor profundidad y por ende a menor latitud, cabe resaltar la correlación con la grava, en donde en otros gráficos multivariados siempre se veía correlacionada con la arena pero en este caso no, se nota la diferencia de correlaciones que se pueden atribuir a la ubicación geográficas dentro del sGM, generando nuevas correlaciones distintas a las ya vistas con las mismas variables, aquí encontramos las estaciones del cluster 3 y parte del 4; la especie *Kinbergonuphis cedroensis*, con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables.

En las especies con mejor del ajuste de bondad en la correlación con las especies (spe.good ≥ 0.5) tenemos que la familia con mayor representantes es

Amphinomidae (con 2 spp), las demás especies son de familias diferentes y además son familias con pocas (1-5) especie/s identificada/s en la zona de estudio (singletons), *Paralacydonia paradoxa* (*Paralacydoniidae*) correlacionada con la profundidad y el sustrato lodo (zona terrígena) y *Glycera americana*, *Phyllodoce mucosa*, *Ophioglycera lyra*, *Malmgreniella maccraryae*, *Sthenelais* sp, *Paramphinome jeffreysii*, *Paramphinome* sp B, *Kinbergonuphis cedroensis*, *Terebellides carmenensis*, correlacionadas al sustrato arena-grava (zona calcárea), la especie *Sigambra tentaculata* (*Pilargidae*), correlacionada con la latitud y la especie *Kinbergonuphis cedroensis* (*Onuphidae*), correlacionada con la temperatura.

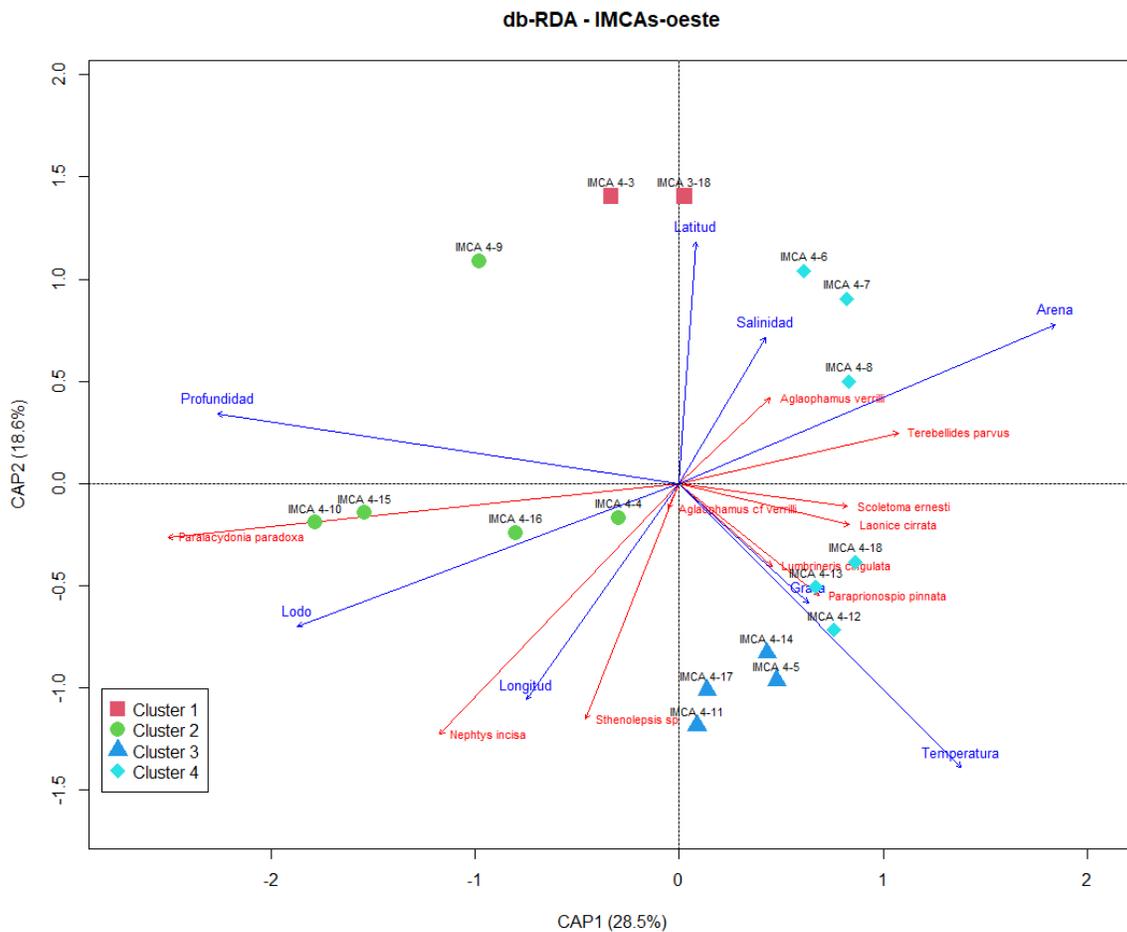


Figura 22. Gráfico de ordenamiento db-RDA para IMCAs-oeste, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingoés), “site scores” están representados por sus puntajes “wa” (suma ponderada de “species scores”), y cluster (4) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, “species scores” de las especies más abundantes.

En las especies con mayor abundancia (>15 organismos) tenemos a *Paralacydonia paradoxa* (*Paralacydoniidae*) correlacionada con la profundidad,

Nephtys incisa (+) y *Sthenolepsis* sp, determinadas y correlacionadas con el sustrato lodo (zona terrígena) y *Aglaophamus verrilli*, *Lumbrineris cingulata*, *Scoletoma ernesti*, *Paraprionospio pinnata* (+), *Laonice cirrata* (+), *Aglaophamus cf verrilli*, *Terebellides parvus*, determinadas y correlacionadas con la temperatura y sustrato arena-grava (zona calcárea), siendo las familias *Nephtyidae* (spp en ambos sustratos), *Lumbrineridae* y *Spionidae* las más dominantes de esta zona.

DINAMO 2

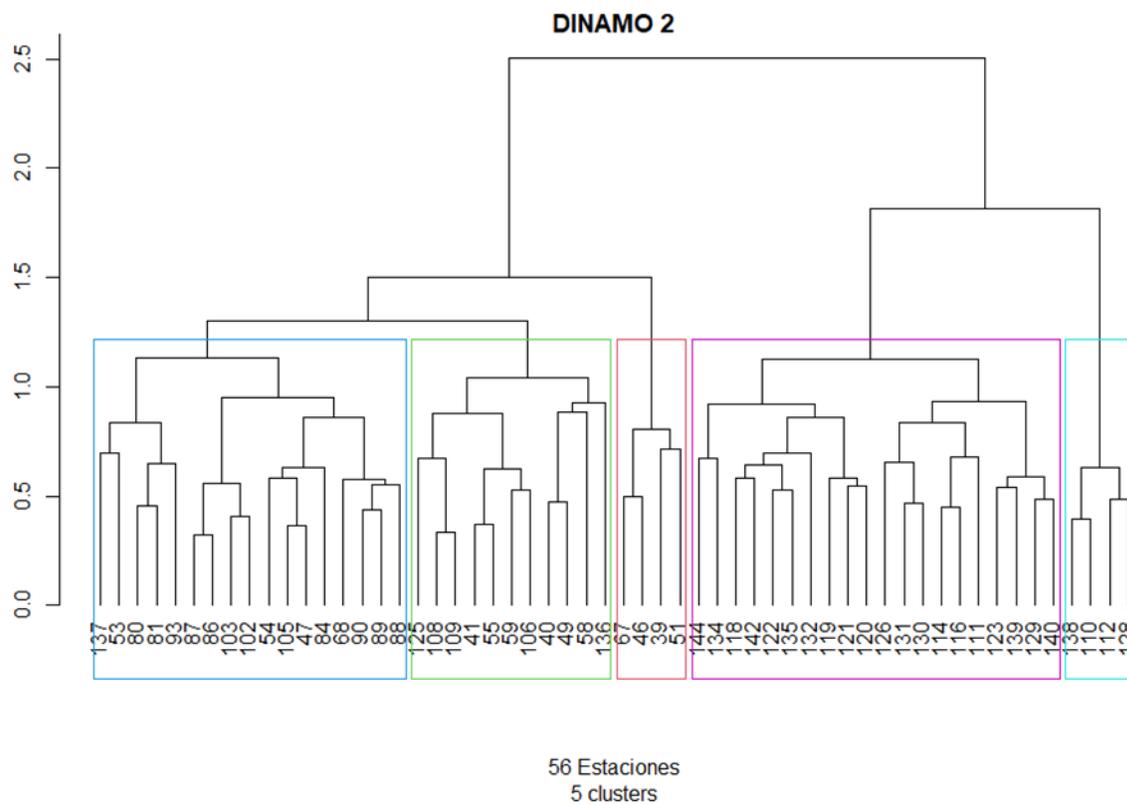


Figura 23. Dendrograma de la campaña DINAMO 2.

DINAMO 2 (Golfo de México)

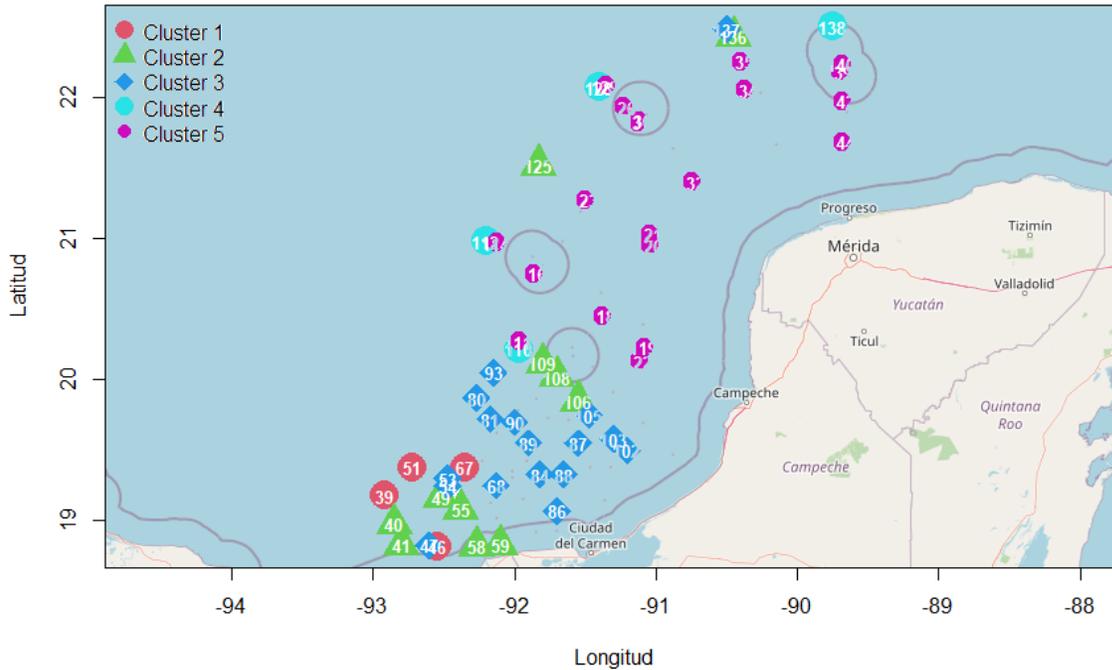


Figura 24. Gráfico espacial de las estaciones (56) de IMCAs, con sus ubicaciones geográficas en el sGM, separadas por medio de clusters (5), generados por método Ward, Beta de Sorensen definidos por el autor ($\beta S=1.2$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de como se ven los clusters generados por la Beta de Sorensen de DINAMO 2 con su respectiva ubicación geográfica de cada estación, de las que se generaron 8 clusters ($\beta S=1$), pero para efectos prácticos y un mejor análisis se definieron los clusters a 5 ($\beta S=1.2$).

En este gráfico podemos ver una representación espacial de los clusters (5, $\beta S=1.7$) de IMCAs (70 estaciones) con la respectiva ubicación geográfica de cada estación. Los clusters 1, 3 y 5 cumplen con la característica de la cercanía geográfica, siendo el cluster 5 el que ocupa una gran parte de la zona de la campaña, y junto con el cluster 3 sus estaciones representan más de la mitad de las estaciones de la campaña, representando la similitud dentro de estos 2 clusters, por otro lado los clusters 2 y 4 no cumplen con esta característica. Los cluster 1 y 4 son los que menos estaciones tienen, dejando ver que son los más disímiles en su composición de especies. Los clusters 4 y 5 reflejan un gradiente latitudinal muy marcado, en especial cercanos y siguiendo una tendencia a los arrecifes, así también los clusters 1 y 3 reflejan un gradiente latitudinal pero en la zona de la plataforma de Campeche. Estas características espaciales que dejan ver los clusters reflejan la diversidad en la composición faunística presentes en DINAMO 2 y en la zona correspondiente a la zona carbonatada y de transición.

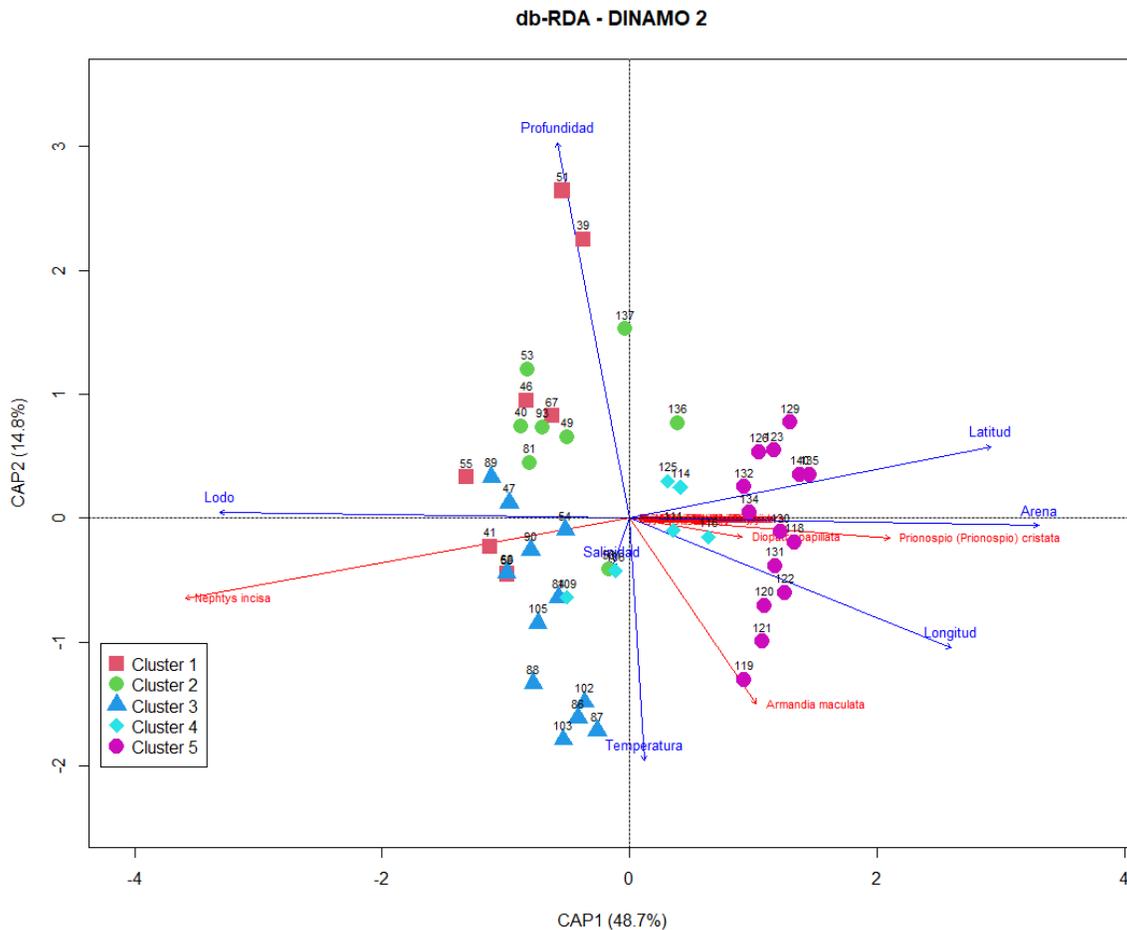


Figura 26. Gráfico de ordenamiento db-RDA para DINAMO 2, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingo), "site scores" están representados por sus puntajes "wa" (suma ponderada de "species scores"), y cluster (5) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, "species scores" con un ajuste de bondad ($\text{spe.good} \geq 0.4$).

En este gráfico de ordenamiento db-RDA para DINAMO 2, la principal característica es la adición del PCoA (utilizando la disimilitud de Sorensen aplicada a la matriz de datos de presencia/ausencia), donde se ve reflejando la correlación entre las variables, así como la dispersión de las estaciones a lo largo de los ejes CAP1 y CAP2 (63.5% de la varianza representada) por sus puntajes "wa" (suma ponderada de "species scores"), lo que con la aplicación de clusters (método Ward) podemos separarlos en agrupaciones de disimilitud de Sorensen (definidos por el autor, 5 clusters, $\beta S=1.2$), también la adición de las especies con un ajuste de bondad ($\text{spe.good} \geq 0.4$); generando un triplot indicando la correlación variables-estaciones-especies.

Separando el gráfico en cuadrantes (por los ejes CAP1 y CAP2), empezando por el superior izquierdo y continuando hacia la derecha podemos ver a la variable lodo, que no se encuentra correlacionada con alguna otra variable, algo que no se había visto en otros gráficos multivariados, al igual que la falta de correlación con la MO debido a su ausencia de datos, pero si tenemos la alta correlación negativa con las variables latitud, longitud y arena, lo que representa que en presencia de un tipo de sustrato habrá ausencia de otro; aquí encontramos a los clusters 2 y parte del 1 y 3, que se encuentra disperso y determinado principalmente por esta variable, indicando la correlación con las estaciones definidas por su puntaje “wa” definido por la disimilitud de Sorensen, también encontramos la especie, *Nephtys incisa*, que es la que mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variable. En el mismo cuadrante encontramos a la variable profundidad, que igualmente no se encuentra correlacionada con alguna otra variable, pero si la alta correlación negativa con la temperatura y salinidad (muy poco representada), indicando las estaciones a mayor profundidad; aquí encontramos parte del cluster 1 y 2, donde dichas estaciones son determinadas por esta variable.

En el cuadrante superior-inferior derecho encontramos las variables latitud, longitud y arena, donde se observa su buena correlación entre ellas, esto quiere decir que contrario a como pasaba en el db-RDA de IMCAs en este caso la latitud y longitud serán variables con más peso indicando la dirección de los valores más altos de arena, esto en su conjunto nos dice el cambio geográfico con respecto a las estaciones de IMCAs, dejando en evidencia la clara zona calcárea, evidenciado por los mayores valores del sustrato arena, donde se encuentran los clusters 5 y 4, siendo este último poco representado por la varianza del gráfico de ordenamiento db-RDA; encontrando las especies *Prionospio cristata*, *Armandia maculata*, *Prionospio (Prionospio) cristata*, *Diopatra papillata*, que son las que es la que mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables; nos dice que el nicho es distinto por lo que la mayor presencia de especies ahora se encuentra en el sustrato dominante.

En este mismo cuadrante encontramos a las variables profundidad y salinidad (poco representada), dejando ver su alta correlación (al ser una variable poco representada no tiene un valor significativo en este gráfico), así como su alta correlación negativa con la profundidad, indicando las estaciones a mayor temperatura y por lo tanto menor profundidad; aquí encontramos las estaciones del cluster 3 definidas por su puntaje “wa” definido por la disimilitud de Sorensen.

En las especies con mejor ajuste de bondad en la correlación con las especies (spe.good ≥ 0.4) tenemos que las familia con mayores representantes son *Lumbrineridae*, *Onuphidae*, *Paraonidae* y *Spionidae*, correlacionadas al sustrato arena (zona calcárea); la especie *Nephtys incisa*, es la única especie

correlacionadas al sustrato lodo (zona terrígena), y la especie *Armandia maculata* (*Opheliidae*) correlacionada con la temperatura.

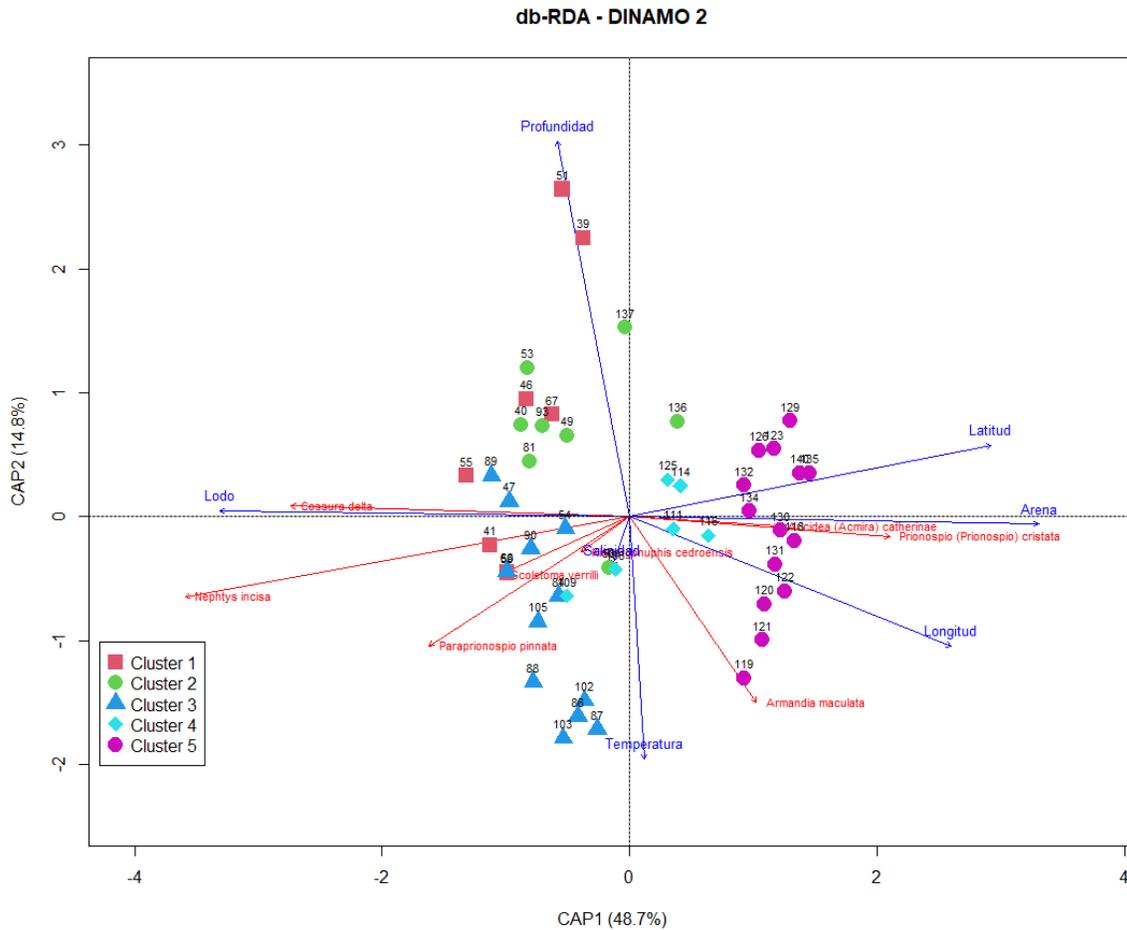


Figura 27. Gráfico de ordenamiento db-RDA para DINAMO 2, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingo), “site scores” están representados por sus puntajes “wa” (suma ponderada de “species scores”), y cluster (5) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, “species scores” de las especies más abundantes.

En las especies con mayor abundancia (>200 organismos) tenemos a *Cossura delta*, *Nephtys incisa* (+), *Scoletoma verrilli* (+) y *Paraprionospio pinnata* (+), determinadas y correlacionadas con el sustrato lodo (zona terrígena); *Armandia maculata*, *Aricidea (Acmira) catherinae*, *Kinbergonuphis cedroensis* y *Prionospio (Prionospio) cristata* correlacionada con el sustrato arena (zona calcárea); siendo las familias *Lumbrineridae* y *Spionidae* (spp en ambos sustratos), las más dominantes de esta zona.

Separando el gráfico en cuadrantes (por los ejes CAP1 y CAP2), empezando por el superior izquierdo y continuando hacia la derecha se muestran las variables lodo y MO con una alta correlación, lo que nos dice que las variables lodo (sustrato) y la MO “van de la mano”, indicando la mayor presencia de MO en este tipo de sustrato (como reflejaban los otros db_RDA anteriormente analizados), también se ve la alta correlación negativa con las variables latitud y arena, lo que nos indica esta relación inversa, al igual podemos ver que el cluster 1 se encuentra disperso y determinado principalmente por estas variables indicando la correlación con las estaciones definidas por su puntaje “wa” definido por la disimilitud de Sorensen.

En el cuadrante superior derecho podemos ver la variable de profundidad que en este caso no tiene correlación con ninguna otra variable, pero sí con algunas estaciones que conforman los clusters 1 y 3, lo que nos indica las estaciones más profundas.

En el cuadrante inferior derecho tenemos a las variables latitud y arena (sustrato) con una alta correlación y buena correlación con la variable longitud, esto quiere decir que contrario a como pasaba en el db-RDA de IMCAs en este caso la latitud será una variable con más peso indicando la dirección de los valores más altos de arena, e igual pero en menor peso la longitud, esto en su conjunto nos dice el cambio geográfico con respecto a las estaciones de IMCAs (igual que en DINAMO 2), dejando en evidencia la clara zona calcarea, aquí encontramos al cluster 3 y la correlación con las estaciones definidas por su puntaje “wa” definido por la disimilitud de Sorensen; en este caso no encontramos la ya repetida correlación arena-grava debido a la falta de estos datos (pero vista en DINAMO 2) y las especies *Syllis (Typosyllis) sp G*, *Aglaophamus verrilli* (menos representada), *Scoloplos (Leodamas) rubra*, *Aricidea (Acmira) taylori*, *Prionospio (Prionospio) steenstrupi* y *Ampharete lindstroemi*, con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables; nos dice que el nicho es distinto por lo que la mayor presencia de especies ahora se encuentra en el sustrato dominante.

Por último encontramos a el cluster 2, definidas por su puntaje “wa” definido por la disimilitud de Sorensen, donde no encontramos variables que se correlacionen con estas estaciones, lo que indica que no están distribuidas por la varianza representada que construyen los ejes CAP1 y CAP2 (60.9%); lo que nos indica valores intermedios en casi todas las variables medidas, pero podemos deducir la alta correlación negativa con la profundidad indicando las estaciones a menor profundidad y encontrando correlación con la alta presencia de las especies *Prionospio (Minuspio) perkinsi* y *Cossura delta*, con mejor ajuste de bondad y por lo tanto más representativa y correlacionadas con estas estaciones y variables.

En las especies con mejor ajuste de bondad en la correlación con las especies (spe.good ≥ 0.4) tenemos que la familia con mayor representantes es *Spionidae* (con 2 spp), las demás especies son de familias diferentes *Prionospio perkinsi*, *Cossura delta* correlacionadas al cluster 2 (sin variables) y a las especies *Syllis (Typosyllis) sp G*, *Aglaophamus verrilli*, *Scoloplos (Leodamas) rubra*, *Aricidea (Acmira) taylori*, *Prionospio steenstrupi*, *Cirriformia sp* y *Ampharete lindstroemi*, correlacionadas al sustrato arena (zona calcárea).

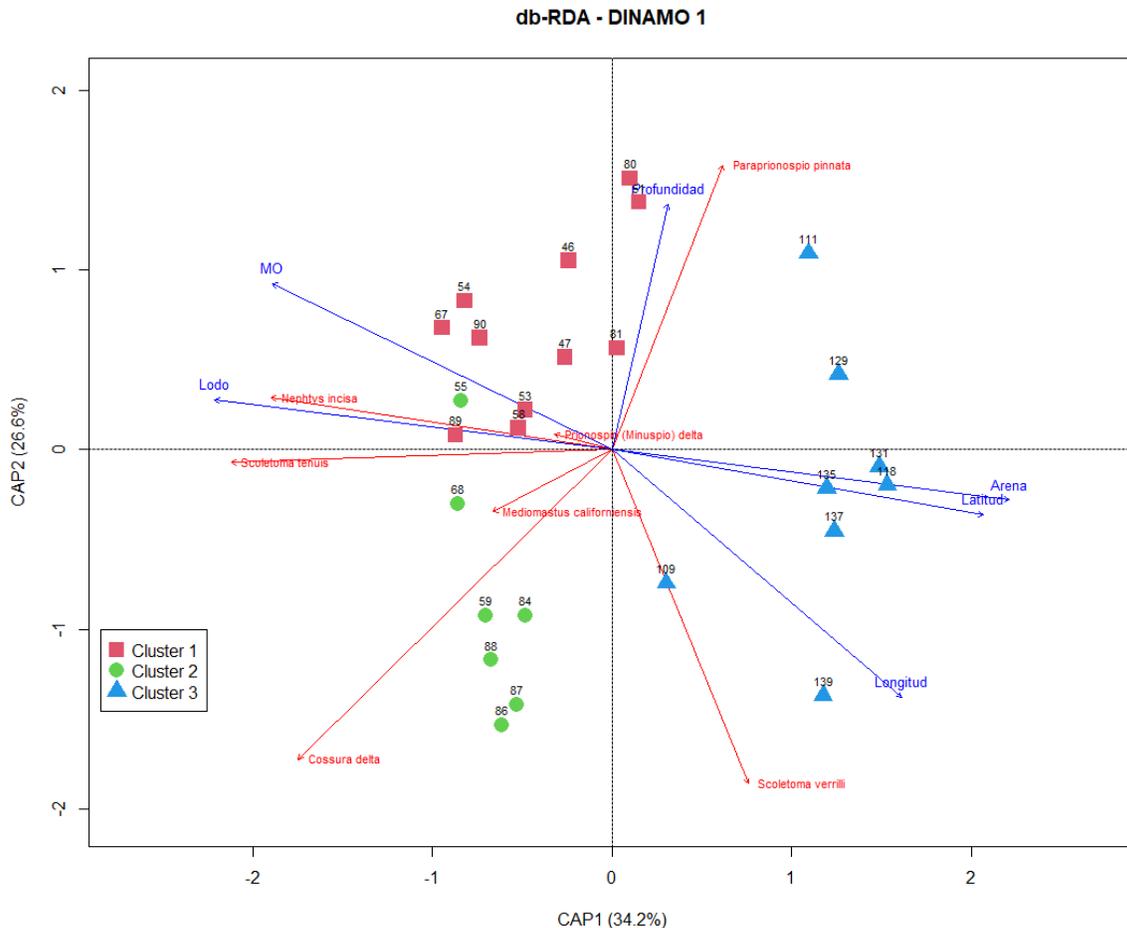


Figura 29. Gráfico de ordenamiento db-RDA para DINAMO 1, Disimilitud de Sorensen (estandarización de Hellinger, corrección de Lingoés), "site scores" están representados por sus puntajes "wa" (suma ponderada de "species scores"), y cluster (3) generados por el método Ward por medio de la Beta de Sorensen, "species scores" de las especies más abundantes.

En las especies con mayor abundancia (>50 organismos) tenemos a *Nephtys incisa*, *Scoletoma tenuis* y *Prionospio (Minuspio) delta*, determinadas y correlacionadas con el sustrato lodo (zona terrígena), la especie *Scoletoma verrilli* (+) correlacionada con el sustrato arena (zona calcárea), la especie *Paraprionospio pinnata* (+), correlacionada con la profundidad, las especies

Cossura delta (+) y *Mediomastus californiensis*, correlacionadas con el cluster 2 (sin variables), siendo las familias *Lumbrineridae* y *Spionidae* (spp en ambos sustratos), las más dominantes de esta zona.

Discusión

Riqueza de especies

La riqueza de especies observada muestra que la riqueza de la campaña DINAMO 2 (238 spp) representa el 97% del total de especies registradas en el sGM (245 especies), concordando con (Quiroz-Martínez, 2007), donde utilizando la misma base de datos encontró que la riqueza total de especies fue de 259, mientras que en la plataforma carbonatada se incluyeron 238 especies y en la plataforma terrígena 122 especies con 101 en común.

Podemos observar la clara diferencia en la riqueza de especies entre las campañas de IMCA (1, 2, 3, 4-plataforma Campeche) pertenecientes a la zona terrígena, con respecto a las campañas de DINAMO (1, 2) pertenecientes a la zona carbonatada. Observamos un gradiente faunístico de mayores valores a más bajos de riqueza de especies en las zonas: carbonatada>terrígena>transicional >ambientes profundos (Santibañez-Aguascalientes et al., 2020). La riqueza de especies varió a lo largo del gradiente longitudinal, con un aumento en la riqueza de oeste a este. Se detectaron claramente dos conjuntos distintos de especies de poliquetos: uno correspondiente a la plataforma terrígena en el oeste del área de estudio, y el otro asociado con la plataforma de carbonato en el este (Quiroz-Martínez et al., 2021).

Así también con las extrapolaciones hechas con la rarefacción y el cálculo asintótico con el modelo de Clench se da un pronóstico al máximo de especies esperadas con un aumento en el porcentaje de muestreo hecho, en donde la tendencia de la riqueza de especies crece llegando a una media en la zona terrígena de 118 spp. y en la zona calcárea de 211 spp. esto contando con la zona de transición que las dos provincias comparten. La composición de especies y abundancia de fauna de invertebrados bentónicos se utilizan a menudo como variables clave en los programas de monitoreo destinados a evaluar los impactos producidos por las presiones humanas sobre los ecosistemas acuáticos (Borja et al., 2015).

Beta de Sorensen (Dendrogramas y clusters)

El análisis de disimilitud realizado con la Beta de Sorensen mostró la disimilitud entre la composición de poliquetos de todas las estaciones de muestreo a lo largo del sGM, así como la generación de clusters por el método Ward, visualizando estos agrupamientos de estaciones, mediante el valor de disimilitud máximo

teórico, donde al tener la libertad de asignación del valor de disimilitud se puede realizar un mejor análisis de datos biológicos. Esto requiere un cierto grado de abstracción, pero los ecologistas pueden decidir si los objetos son lo suficientemente similares para ser asignados a un cluster, e identificar las distinciones o separaciones entre clusters (Borcard et al., 2018; Legendre et al., 2012). Los clusters reflejaron sus distribuciones y ubicaciones espaciales dentro de mapas de la zona del sGM, las características espaciales que dejan ver los clusters con base a la diversidad en la composición faunística presentes en las campañas oceanográficas y en las zonas del sGM (terrígena, calcárea, transición y Veracruz-Tamaulipas). La heterogeneidad dentro del sGM se vio reflejada en los pocos clusters que residen a una distancia cercana entre sí, como bien un clúster refleja. En esta técnica de ordenamiento en la que las muestras tienen un alto grado de similitud (miembras de un cluster), se encuentran cercanas entre sí (Borcard et al., 2018; Legendre et al., 2012).

En los gráficos espaciales se ve la distribución de las estaciones miembro de cada cluster, dejando ver la gran diversidad de la composición de especies presentes en las estaciones, destacando la dispersión y gradientes espaciales de los clusters a lo largo de la zona de sGM, en IMCAs se aprecia una gran distribución de las estaciones miembro de los clusters a lo largo de esta zona (terrígena y de transición), dejando claro la similitud de especies a lo largo de las estaciones dispersas y separadas, así como se nota un gradiente de clusters cercanos al arrecife Cayo Arcas. En la zona correspondiente a la zona calcárea (DINAMO), igualmente se aprecia un gradiente espacial latitudinal bien marcado por los clusters generados, con una homogeneidad en las estaciones miembro y en su dispersión entre los clusters que la conforman, en donde se encuentra el sustrato arena y grava. Siguiendo patrones de distribución a lo largo de los Arrecifes de la Sonda Campeche (Cayo Arcas, Triángulo Oeste, Cayo arenas, Arrecife Alacrán). Las observaciones geostróficas registradas por (Salas-Monreal et al., 2018) explican las trayectorias y corrientes larvales que trae sustratos, materia en suspensión y organismos del Sistema Arrecifal Campeche (CRS) al Sistema Arrecifal Veracruz (VRS), por lo tanto, se describieron dos tipos de rutas, una costera conectando todos los sistemas de arrecifes y otra con rutas de mar abierto, que conecta principalmente el Sistema Arrecifal Campeche (CRS) con el Sistema Arrecifal Veracruz (VRS) y el Sistema Arrecifal Tuxpan-Lobos (TLRS). En la zona de IMCAs-oeste se aprecia un gradiente muy bien marcado dentro de los clusters, tanto su distribución latitudinal dentro de cada cluster como un gradiente costa-plataforma abarcando todos los clusters que conforman esta zona, mostrando una homogeneidad en la composición de especies. La conectividad entre el oeste del Golfo de México (WGM) y los sistemas arrecifales del Caribe, donde algunos autores mencionan una relación más directa entre los sistemas

arrecifales del Caribe con el Sistema Arrecifal Veracruz (VRS) y el Sistema Arrecifal Tuxpan-Lobos (TLRS) (Salas-Monreal et al., 2018).

db-RDA

IMCAs

El análisis multivariado db-RDA mostró las correlaciones entre la matriz respuesta (especies) y la matriz explicativa (variables), por medio de la especificación de las variables correlacionadas que determinan las estaciones y la disimilitud en los clusters de la composición de poliquetos, lo que permitió la diferenciación de las zonas terrígena, transicional y carbonatada. Las variables ambientales (abióticos) determinan las distribuciones de los poliquetos, a lo largo de diferentes gradientes como: latitud/longitud, profundidad, temperatura, salinidad, tipo de sedimento (Rehitha et al., 2019). En las distintas zonas analizadas los ejes canónicos del db-RDA dividió al gráfico en cuadrantes opuestos, indicando un gradiente representado principalmente por el tipo de sustrato. En los cuales tenemos las estaciones con los valores más altos de arena-grava (sustrato calcáreo) y las que tienen los valores más altos de lodo (sustrato terrígeno), indicando esta relación inversa y remarcando las zonas sedimentarias. Varios estudios han demostrado que el sedimento en la composición puede ser el factor clave que controla las comunidades bentónicas en ambientes marinos; el tipo de sedimento y la profundidad son los principales factores que determinan la distribución de especies de poliquetos y los patrones de abundancia en el Sur del Golfo de México (Granados-Barba, 2003; Santibañes-Aguascalientes, 2020; Quiroz-Martínez et al., 2021).

La variación en las correlaciones variables-estaciones-especies mostrada en el análisis multivariado son el resultado conjunto de la influencia de la región geográfica, los cambios en la composición de sedimentos y la cantidad de MO en el sustrato. En el db-RDA de IMCAs que es representante de la zona terrígena y de transición, se encontró la alta correlación del sustrato lodo con la MO. Los fondos terrígenos están influenciados por descargas fluviales, por lo tanto, los sedimentos contienen lodo (limo y arcilla) y arena asociada con minerales (Na₂O, TiO₂, MnO y SiO₂) (Cuevas-Madrid et al., 2018).

Esta alta correlación del sustrato lodo con la MO está totalmente influenciado por las descargas de masas de agua continental, siendo los sistemas Usumacinta y Grijalva los de mayor influencia en el sGM. Se ha estimado que la descarga de los ríos Grijalva-Usumacinta hacia el sur del Golfo tiene una media anual de $2.13 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con pico de egresos de julio a septiembre/octubre (CONAGUA,

2020). Los factores climáticos e hidrológicos son los principales responsables de la dispersión y deposición de materiales finos en la plataforma en el sur del Golfo de México (Hernández-Arana et al., 2003; 2005). Por lo tanto el sustrato lodo con las mayor cantidad de MO genera un ambiente propicio para el establecimiento de grandes comunidades de poliquetos por esta abundancia alimenticia, corroborado por la comparación entre las especies con mejor correlación y las especies más abundantes, presentes en los gráficos multivariados (db-RDA), donde se mostró una mayor cantidad de organismos pero de pocas especies en la zona terrígena y de transición, siendo la familia *Lumbrineridae* la más dominante y con mejor correlación, teniendo presencia en la zona terrígena y de transición (más en la zona terrígena). La materia orgánica, determinar la distribución composición, densidad y biomasa macrofaunal (Escobar-Briones et al., 2008). Las locaciones cercanas a las desembocaduras de ríos y lagunas muestran una alta diversidad de especies de poliquetos, adaptadas al fondo turbio y al material terrígeno. Principalmente en ambientes terrígenos, registramos poliquetos, clasificados de sensibles a oportunistas, sin embargo el estado ecológico bentónico se asoció con ambientes contaminados (Hernández-Alcántara et al., 2011; Santibañez-Aguascalientes et al., 2018; 2020).

Las especies *Ninoe leptognatha* (*Lumbrineridae*) y *Kinbergonuphis cedroensis* (*Onuphidae*) estuvieron mejor correlacionadas y determinadas por la latitud-profundidad. La profundidad tuvo, en general, un efecto marginal sobre la composición de especies, estando asociada principalmente con los cambios batimétricos abruptos observados en la región terrígena debido a la estrechez de su plataforma continental (Hernández-Arana et al., 2003; 2005).

El análisis db-RDA mostró las distribuciones de las estaciones miembro de los clusters en su correlación con las variables, en la que se observa esta división entre las provincias terrígena (lodo) y de transición (lodo-arenosa), apoyado por los cluster generados por la composición de especies (beta de Sorensen) siendo los clusters 2, 3 y 5 los que se encuentran en la zona terrígena. Los lugares cerca de las desembocaduras de los ríos y lagunas costeras muestran una alta diversidad de especies de poliquetos, adaptadas a la turbia material inferior y sustrato terrígeno (Hernández-Alcántara et al., 2011; Santibañez-Aguascalientes et al., 2018). Los cluster 1 (estaciones plataforma de Campeche y cercanas al arrecife Cayo Arcas), cluster 2 y 4 (estaciones cercanas al arrecife Cayo Arcas) los que se encuentran en la zona transicional. Los arrecifes coralinos promueven la formación de microhábitats que permiten el establecimiento de las poblaciones de organismos caracterizados por su riqueza alimenticia y formación de bancos de arena (Hernández-Arana et al., 2005; Solis-Weiss, 1998).

La zona de transición se caracteriza por esta mezcla de sustratos resultando en una zona muy heterogénea y por ende un gran variación en las especies que las habitan, generando que estaciones cercanas pertenezcan a clusters diferentes. La zona de transición cuyos límites varían estacionalmente, se puede identificar por una mezcla de sedimentos (Granados-Barba, 2001). La plataforma continental de transición del sur del Golfo de México se puede describir como un ambiente de depósito, con un régimen de energía decreciente a medida que aumenta la profundidad. En consecuencia, esperaríamos un cambio en la distribución del tamaño de grano que se vuelve más fino hacia el estante interior y exterior. La correlación encontrada entre MO con el contenido de CO y Superficie Específica de los Sedimentos (SSAS) proporciona evidencia que sugiere que la interacción de material terrígeno y CO en la zona de transición es una consecuencia del comportamiento hidrodinámico de sedimentos finos y la MO asociado adsorbido (Hernández-Arana et al., 2003; 2005).

IMCAs-oeste

Estas características de la zona de transición se ven igualmente reflejadas en los datos de IMCAs-oeste, donde el análisis db-RDA mostró esta heterogeneidad en el tipo de sustrato y en general en la correlación de variables mostrando esta relación inversa del tipo de sustrato representativo de una zona de transición marcado por (Hernández-Arana et al., 2005; Solis-Weiss, 1998) con esta mezcla lodo-arenosa. Se mostraron las distribuciones de las estaciones correlacionadas y determinadas mayormente por la latitud-profundidad y temperatura, en conjunto con el sustrato, los patrones de distribución de los clusters generados por la composición faunística de los poliquetos. Las variables espaciales explicaron un mayor porcentaje de varianza que las ambientales en casi todos los modelos (Checon y Amaral, 2016). Se mostró que la profundidad influye en la estructura de la comunidad de poliquetos en el Golfo, con un aumento en la riqueza de especies de poliquetos con la profundidad. La temperatura es un factor clave para la distribución de los poliquetos, debido a que afecta sus actividades metabólicas, reproductivas y de crecimiento (Granados-Barba, 2001; Santibañez-Aguascalientes et al., 2018; 2020).

Teniendo los valores más altos de arena en la zona interior de la plataforma Veracruz-Tamaulipas, marcado también por una mayor latitud y estaciones a mayor profundidad. Los gradientes de profundidad observados en las ordenaciones multivariadas pueden interpretarse en términos de la hidrodinámica que afecta los sedimentos depositados provenientes de las descargas de los ríos. Las diferencias cualitativas en la plataforma interior y exterior son el resultado de las descargas después de la temporada de fuertes lluvias y la acción de las olas y

corrientes de fondo sobre una fina matriz sedimentaria (Hernández-Arana et al., 2005). Por otro lado sobresale la correlación de las variables grava y temperatura, que difiere de la ya marcada correlación arena-grava (sustrato de la zona calcárea), correlacionadas con los clusters 3 y 4, también representativos del sustrato calcáreo y presentes en una menor latitud-profundidad. Cerca de la costa se observa una contribución relativamente alta de limo grueso y fracciones de arena, ocurre un agregado de la distribución del tamaño de grano del sedimento, siendo eliminados preferentemente los tamaños <32 micrómetros por el régimen hidrológico que ocurre cerca de la costa (Hernández-Arana et al., 2005).

Los que tienen los valores más altos de lodo son el cluster 2, que se ve representado espacialmente por un gradiente latitudinal a lo largo de la plataforma exterior Veracruz-Tamaulipas, en este caso el sustrato lodo se encuentra en la parte exterior de la plataforma, reflejando la licuefacción ocasionada por el arrastre de las corrientes definidas y marcadas por (Salas-Monreal et al., 2018), trayectos unidireccionales y bidireccionales (norte-sur), los giros ciclónicos y anticiclónicos ubicados fuera de la plataforma continental. Cuando las olas y las corrientes actúan sobre una estructura sedimentaria cohesiva, contribuyen a la fluidización y licuefacción, la mezcla se comporta como una suspensión densa que puede ser transportada por corrientes débiles del fondo (Teisson et al., 1993).

En esta zona no se muestra la correlación de la MO con algún tipo de sustrato u otra variable debido a la ausencia en los datos, pero análisis de autores reflejan que esta tendencia en la correlación se mantiene. En el oeste del Golfo de México los ríos son la principal fuente de MO terrestre, que tiende a acumularse en la plataforma continental dependiendo de la entrada local y el ancho del estante, por lo tanto los cambios en el sedimento provocados por la morfodinámica del ambiente afectan directamente a la distribución y abundancia de los poliquetos ya que la variación en el tamaño de grano de arena y en el contenido de materia orgánica son factores importantes para este tipo de organismos (Bishop, 2005).

En la comparación entre las especies con mejor correlación y las especies más abundantes, presentes en los gráficos multivariados no se encontró relación más que en dos especies *Paralacydonia paradoxa* (*Paralacydoniidae*) correlacionada con la profundidad y *Kinbergonuphis cedroensis* (*Onuphidae*) correlacionada con la temperatura. Las familias se caracterizaron por una gran cantidad de especies singletons y con muy baja abundancia y solo destacando las familias *Lumbrineridae* y *Spionidae* como las dominantes en la zona. Las grandes diferencias entre correlaciones que definen estos patrones de distribución taxonómica se atribuye al cambio geográfico que tenemos siendo IMCAs-oeste las estaciones más alejadas de las demás del sGM, así como las estaciones que a mayor gradiente latitud se encuentran.

DINAMO

Siguiendo este gradiente longitudinal (oeste-este) del tipo de sustrato (terrágeno-transicional-calcáreo), tenemos la zona calcárea representada por DINAMO, ubicado en gran parte de la Sonda Campeche, caracterizado por su plataforma continental que en esta zona es muy ancha. La región carbonatada está vinculada a una gran plataforma continental (150 km de ancho) que no se ve afectada por la descarga de ríos y el establecimiento y distribución de la fauna macrobentónica local está directamente influenciada por estos factores (Hernández-Arana et al., 2003; 2005). Estas características de la zona calcárea se ven reflejadas en el db-RDA de DINAMO (1 y 2), donde el análisis multivariado mostró las distribuciones de las estaciones miembro de los clusters en su correlación con las variables, nuevamente determinado principalmente por su tipo de sustrato, donde los valores más altos de arena, en este caso mayor correlacionado con la latitud y longitud, indicando la dirección y ubicación de las estaciones, correlacionados por la composición de especies con los clusters 5 y 4, mostrando un gradiente latitudinal bien marcado con las estaciones bien agrupadas en la plataforma continental y alrededor de las arrecifes (Cayo Arcas, Triángulo Oeste, Cayo arenas, Arrecife Alacrán), dejando ver que en la zona calcárea el sustrato es más homogéneo siendo este el que determina estos patrones de distribución. Siguiendo las corrientes y trayectorias larvales geostróficas definidas por (Salas-Monreal et al., 2018). La zona carbonatada está constituida por calcarenitas y óxidos medianos y finos (CaO, MgO y P₂O₂) asociados a material biogénico, que proporcionan hábitat adecuado para la comunidad bentónica (Cuevas-Madrid et al., 2018; Granados-Barba et al., 2003). Destaca la misma correlación del lodo-MO (vista solo en el db-RDA DINAMO 1) en donde los valores de arena-grava son mayores, en este caso la diferencia radica en el contenido de MO y el tamaño de grano. La asociación entre CO y sedimentos con Tamaño Medio de Grano (MGS) contrasta con la relación entre MO y sedimento MGS. El patrón espacial fue temporalmente mantenido en relación con el sedimento el contenido de CO mostró una asociación inversa en respuesta al efecto de sedimento fino de origen terrígeno portador de MO adsorbido; el contenido de CO parece estar relacionado con material más grueso (distribución granulométrica) y con menos contenido de MO (Hernández-Arana et al., 2005). Los valores más altos de lodo, se ve reflejado en la correlación con los clusters 1 y 2 representativos de este tipo de sustrato, ubicándose en la zona de transición (lodo-arenosa), ya antes mencionada en la zona IMCAs, la temperatura determinó principalmente al cluster 3; junto a los otros clusters muestran un gradiente latitudinal y una dispersión cercana entre estaciones del mismo cluster. En el área del Banco de Campeche, estudios previos han demostrado que la distribución y diversidad de los poliquetos están influenciadas principalmente por

la composición del sedimento, con diversidad de poliquetos aumentando con mayor contenido de arena (Quiroz-Martínez et al., 2021; Santibañes-Aguascalientes et al., 2018; 2020).

En la comparación entre las especies con mejor correlación y las especies más abundantes, presentes en los gráficos multivariados se encontró a la especie *Armandia maculata* (*Opheliidae*) correlacionada con la temperatura, siendo las familias más dominantes *Lumbrineridae* y *Spionidae*, con especies en ambos tipos de sustrato, con una menor cantidad de especies pero con mayor abundancia en las especies de la zona de transición; y una mayor cantidad de especies pero con una menor abundancia en las especies de la zona carbonatada. Coincidiendo con los demás análisis multivariados y con autores, la riqueza de especies es marcada por el tipo de sustrato y la abundancia por cantidad de MO presente en este.

Conclusiones

- La aplicación de métodos y análisis multivariados de la Ecología Numérica y con la ayuda de paquetes en el lenguaje estadístico R, permite tener un punto de vista diferente a cómo conceptualizamos conceptos ecológicos como organismos, comunidades y el medio ambiente.
- El uso de la Beta de Sorensen como índice de disimilitud junto con dendrogramas, clusters y mapas, permitieron caracterizar a los patrones de diversidad taxonómica de los poliquetos en el sGM. La representación visual de estos patrones permiten conocer la variabilidad en la composición de especies de poliquetos en el sGM.
- El db-RDA, profundizado en el análisis multivariado de datos biológicos para los patrones de diversidad taxonómica de poliquetos, correlacionando y determinando estas variaciones en la distribución por medio de las variables ambientales/espaciales, así como el tipo de sustrato y materia orgánica asociada a las provincias del sur del Golfo de México.
- El efecto combinado de la zona geográfica y la composición sedimentaria explicó principalmente las variaciones en la composición de las especies en toda el área de estudio (sGM).
- Los patrones de diversidad taxonómica de poliquetos son marcados fundamentalmente por las diferencias entre las regiones terrígena, de transición y

carbonatada, resultado de la influencia geográfica, los cambios en la composición de sedimentos y la cantidad de MO en el sustrato, y en menor medida, pero también determinante dependiendo del caso (IMCAS-oeste), la profundidad y la temperatura.

- La riqueza de especies está marcada por el tipo de sustrato, siendo la heterogeneidad en su tamaño de grano y las características fisicoquímicas de los sustratos calcáreos los factores que permiten el establecimiento de múltiples especies de poliquetos.

- La abundancia de especies está determinada por la cantidad de MO presente en el sustrato. El principal aporte de MO proviene de su arrastre por las masas de agua continentales y depositada en la plataforma de la zona terrígena.

- La zona de transición es intermedia entre las provincias terrígena y calcárea con valores intermedios de abundancia y riqueza de poliquetos.

- Se observó una relación inversa entre riqueza y abundancia. Para el sGM se tuvieron las siguientes relaciones entre zonas de estudio:

Riqueza: Carbonatada > Terrígena > Transición

Abundancia: Terrígena > Transición > Carbonatada

- Las especies miembros de las familias *Lumbrineridae* y *Spionidae* fueron las más dominantes en toda la zona de estudio correspondiente al sur del Golfo de México, demostrando ser las más abundantes y con mayor riqueza, sin depender del tipo de sustrato ni de las demás variables consideradas.

Referencias

- Antoine, W. J. 1971. *Structure of the Gulf of Mexico*. In: Rezak, R. (Ed.) Texas A. & M. University Oceanographic Studies. Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico: 1-1 34.
- Baselga A, Orme D, Villeger S, De Bortoli J, Leprieur F, Logez M. 2022. betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components. R package version 1.5.6, <https://CRAN.R-project.org/package=betapart>.
- Bishop, M. J. 2005. *Artificial sampling units: A tool for increasing the sensitivity of test for impact in soft sediments*. *Environmental Monitoring and Assessment*. 107: 203-220
- Borcard D., P. Legendre. 2004. *Environmental control and spatial structure in ecological communities: an example using oribatid mites*. *Environmental and Ecological Statistics*, 1, 37–61.
- Borcard D., P. Legendre, P. Deapeau. 1992. *Partialling out the spatial component of ecological variation*. *Ecology*, 73, 1045–1055.
- Borcard, D., F. Gillet, P. Legendre. 2018. *Numerical ecology with R*. 2nd Edition, p. 444 Springer.
- Borja, A., Marín, S.L., Pino, L., Rodríguez, J.G., 2015. *Is there a possibility of ranking benthic quality assessment indices to select the most responsive to different human pressures?* *Mar. Pollut. Bull.* 97, 85–9
- Carabias, J., J. A. Meave, T. Valverde, Z. Canón. 2009. *Ecología y medio ambiente en el siglo XXI*. Pearson Educación.
- Chao, A, N. J. Gotelli, T. C. Hsieh, E. L. Sander, K. H. Ma, R. K. Colwell y A. M. Ellison. 2014. *Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies*. *Ecol Monogr* 84:45–67
- Chao, A., C. H. CHIU. 2016. *Species richness: estimation and comparison*. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(12), 1451-1456.
- Checon, H. H y Amara., A. C. 2017 *Taxonomic sufficiency and the influence of rare species on variation partitioning analysis of a polychaete community*. *Mar. Ecol.*, 38, e12384
- Cheng, J., Karambelkar B. & Xie Y. 2022. *leaflet: Create Interactive Web Maps with the JavaScript 'Leaflet' Library*. R package version 2.1.1, <https://CRAN.R-project.org/package=leaflet>.
- Clench, H. 1979. *How to make a regional list of butterflies: some thoughts*. *Journal of the Lepidopteran Society* 33:216-231.
- Cottenie, K. 2005. *Integrating environmental and spatial processes in ecological community dynamics*. *Ecology Letters*, 8, 1175–1182.
- Cuevas-Madrid, H., Rosales-Hoz, L., Márquez-García, A.Z., Carranza-Edwards, A., 2018. *Environmental assessment of a mangrove protected area in the southeast Gulf of Mexico through sediment core analysis*. *Environ. Earth Sci.* 77, 73.
- Defeo, O., M. Rueda. 2002. *Spatial structure, sampling design and abundance estimates in sandy beach macroinfauna: some warnings and new perspectives*. *Marine Biology*, 140(6), 1215-1225.
- De la Lanza-Espino, G., J. C. Gómez-Rojas. 2004. *Características físicas y químicas del Golfo de México*. In M. Caso, I. Pisanty, E. Ezcurra (Comp.), *Diagnóstico ambiental del Golfo de México (1a ed., Vol. I, pp. 105-136)*. Distrito Federal: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Escobar-Briones, E., Estrada-Santillán, E.L., Legendre, P., 2008. *Macrofaunal density and biomass in the Campeche Canyon, Southwestern Gulf of Mexico*. *Deep-Sea Res. II*. 55, 2679–2685.
- Gaston, K.J. 2000. *Global patterns in biodiversity global patterns in biodiversity*. *Nature* 405, 220–227.
- Gerami, M., R. Patimar, H. Negarestan, H. Jafarian & M. Mortazavi. 2016. *Temporal variability in macroinvertebrates diversity patterns and their relation with environmental factors*. *Biodiversitas, Journal Of Biological Diversity*
- Gilbert, B., Bennett, J.R. 2010. *Partitioning variation in ecological communities: Do the numbers add up?* *J. Appl. Ecol*, 47, 1071–1082.

- Glasby, C. J., P. A. Hutchings, K. Fauchald, H. Paxton, G. W. Rouse, C. Watson-Rusell. 2000. *Class Polychaeta*. In P. Beesley, G. Ross, & C. Glasby (Eds.), *Polychaetes and Allies: The Southern Synthesis*. Fauna of Australia (Vol. IVA, pp. 1-296). Melbourne: CSIRO Publishing.
- Glasby, C., T. Timm, A. Muir, J. Gil. 2009. *Catalogue of non-marine Polychaeta (Annelida) of the World*. *Zootaxa*, 2070(1), 1–52
- Gotelli, N. J., A. Chao. 2013. *Measuring and estimating species richness, species diversity, and biotic similarity from sampling data*. In *The Encyclopedia of Biodiversity*, Vol. 5, ed. SA Levin, pp. 195–211. Waltham, MA: Academic. 2nd ed.
- Granados-Barba, A. 2001. *Los Poliquetos Bénticos de la Región Petrolera del Suroeste del Golfo de México: Estructura Comunitaria e Impacto Ambiental*. Ph.D. Thesis, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México City, México, pp. 149.
- Granados-Barba, A., Solís-Weiss, V., Tovar-Hernández, M.A., Ochoa-Rivera, V. 2003. *Distribution and diversity of the Syllidae (Annelida: Polychaeta) from Mexican Gulf of Mexico and Caribbean*. *Hydrobiologia*, 496, 337–345. [CrossRef]
- Halpern, B. S., S. Walbridge, K. A. Selkoe, C. V. Kappel, F. Micheli, et. al. 2008. *A global map of human impact on marine ecosystems*. *Science* 319: 948–952.
- Heino J., A.S. Melo, T. Siqueira, J. Soininen, S. Valanko, L. M. Bini. 2015. *Metacommunity organisation, spatial extent and dispersal in aquatic systems: patterns, processes and prospects*. *Freshwater Biology*, 60, 845–869.
- Heino J., A.S. Melo, L.M. Bini. 2015. *Reconceptualising the beta diversity-environmental heterogeneity relationship in running water systems*. *Freshwater Biology*, 60, 223–235.
- Hernández-Arana, H.A., Rowden, A.A., Attrill, M.J., Warwick, R.M., Gold-Bouchot, G., 2003. *Large-scale environmental influences on the benthic macroinfauna of the southern Gulf of Mexico*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 58, 825–841.
- Hernández-Arana, H., A. B. Martin, J. Attrill, R. Hartley, G.Gold. 2005. *Transitional carbonate-terrigenous shelf sub-environments inferred from textural characteristics of surficial sediments in the Southern Gulf of Mexico*.
- Hernández-Alcántara, P. 2002. *Composición y estructura de las comunidades de poliquetos (Annelida: Polychaeta) bénticos de la plataforma continental del Golfo de California*. Tesis de doctorado de la Facultad de Ciencias: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández-Alcántara, P., Cortés-Solano, J. D., Solís-Weiss, V., 2011. *Polychaete diversity in lagoons and estuaries of the Southern Gulf of Mexico*. In: *Proceedings of the Tenth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*. MEDCOAST 11, E. Özhan (Editor), 25-29 October 2011.
- Hernández-Alcántara, P., Salas-de León, D.A., Solís-Weiss, V. et al. 2013. *Geographical patterns in species richness of the benthic polychaetes in the continental shelf of the Gulf of California, Mexican Pacific*. *Helgol Mar Res* 67, 579–589.
- Hill, M. O. 1973. *Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences*. *Ecology* 54:427–432
- Huong, N., P. Duc, P.Mien. 2017. *Changes of Benthic Macroinvertebrates in Thi Vai River and Cai Mep Estuaries Under Polluted Conditions with Industrial Wastewater*. *Geoscience Engineering*, 63 (2), 19-25
- Hsieh T. C., K. H. Ma. & Anne Chao. 2020. *iNEXT: iNterpolation and EXTrapolation for species diversity*. R package version 2.0.20 URL: <http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software-download/>
- Hutchings, P. 1998. *Biodiversity and functioning of polychaetes in benthic sediments*. *Biodiversity & Conservation*, 7(9), 1133-1145.
- Jolliffe, I., T. J. Cadima. 2016. *Principal component analysis: a review and recent developments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
- Jost, L. 2006 *Entropy and diversity*. *Oikos* 113:363–375
- Keddy, P. 1992. *Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology*. *Journal of Vegetation Science*, 3, 157–162.
- Legendre, P., L. Legendre. 2012. *Numerical ecology*. Third Edition. Elsevier.

- Legendre P., D. Borcard, P. R. Peres-Neto. 2005. *Analyzing beta diversity: partitioning the spatial variation of community composition data*. Ecological Monographs, 75, 435–450.
- Li. 2018. *hillR: taxonomic, functional, and phylogenetic diversity and similarity through Hill Numbers*. Journal of Open Source Software, 3(31), 1041. <https://doi.org/10.21105/joss.01041>
- MacGregor-Fors I., L. Morales-Perez, J. E. Schondube. 2012. *Avian Ecology in Latin American Cityscapes*. Studies in Avian Biology (No. 45. University of California Press, Berkeley, pp 33–48
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell Science, Oxford.
- McLachlan A., A. Dorvlo. 2005. *Global patterns in Sandy beaches macrobenthic communities*. Journal of Coastal Research, 21, 674–687.
- Moreno, C. E., J. M. Calderón-Patrón, V. Arroyo-Rodríguez, F. Barragán, F. Escobar, Y. Gómez-Ortiz, & I. Zuria. 2017. *Measuring biodiversity in the Anthropocene: a simple guide to helpful methods*. Biodiversity and Conservation, 26(12), 2993–2998.
- Moreno, C. E., J. M. Calderón-Patrón, N. Martín-Regalado, A. P. Martínez-Falcón, I. J. Ortega-Martínez, C. L. Rios-Díaz & F. Rosas. 2018. *Measuring species diversity in the tropics: a review of methodological approaches and framework for future studies*. Biotropica, 50(6), 929–941.
- Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, O'Hara R, Solymos P, Stevens M, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista H, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill M, Lahti L, McGlenn D, Ouellette M, Ribeiro Cunha E, Smith T, Stier A, Ter Braak C, Weedon J. 2022. *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.6-2, <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Prado-Navarro, A., V. Díaz-Castañeda, A. Leija-Tristán & J. A. De-León-González. 2016. *Composición y estructura de las comunidades de poliquetos (Annelida) asociadas a fondos blandos de la costa occidental de la península de Baja California, México*. Revista Mexicana de Biodiversidad, 87(1), 74-85.
- Quiroz-Martínez, B. 2007. *Patrones de diversidad de especies e intervalos batimétricos de distribución en anélidos poliquetos del Sur del Golfo de México*. UNAM. ICML. Tesis de Maestría.
- Quiroz-Martínez, B.; Hernández-Alcántara, P.; Salas-de-León, D.A.; Solís-Weiss, V. 2021. *Polychaete (Annelida) Diversity Patterns in Southern Gulf of Mexico: The Influence of Spatial Structure and Environmental Variables*. Diversity 2021, 13, 425
- Rehitha, T. V., N. V. Madhu, G. Vineetha, P. V. Vipindas, P. Resmi & C. Ravichandran. 2019. *Spatio-temporal variability in macrobenthic communities and trophic structure of a tropical estuary and its adjacent coastal waters. Environmental monitoring and assessment*, 191(6), 1-18.
- Salas-Monreal, D., Marín-Hernandez, M., Salas-Perez, J. de J., Salas-de-Leon, D. A., Monreal-Gomez, M. A., & Perez-España, H. 2018. *Coral reef connectivity within the Western Gulf of Mexico*. Journal of Marine Systems, 179, 88–99.
- Santibañez-Aguascalientes, N.A., Borja, A., Kuk-Dzul, J.G., Montero-Muñoz, J. L., Ardisson, P. L. 2018. *Assessing benthic ecological status under impoverished faunal situations: A case Study from southern Gulf of Mexico*. Ecol. Indic. 91, 679–688.
- Santibañez-Aguascalientes, N.A.; Borja, Á.; Montero-Muñoz, J.L. Herrera-Dorantes, M.T. Ardisson, P. L. 2020. *Setting reference conditions to assess the ecological status of the sublittoral and bathyal benthic communities of the southern Gulf of Mexico*. Ecol. Indic., 111, 105964.
- Soberón-Chavez, G. 1985. *Mecanismos de producción natural de las poblaciones de peces demersales de la plataforma continental del sur del Golfo de México: Variables físicas de interacción ecológica*. Tesis de Maestría. UACPyP-CCH. Univ. Nal Autón. México. 121 p.
- Soberón, J., J. Llorente. 1993. *The use of species accumulation functions for the prediction of species richness*. Conservation Biology 7(3):480-488.
- Solís-Weiss, V., P. Hernández-Alcántara y A. Granados-Barba. 2014. *Los anélidos poliquetos del mar profundo en México*. In A. Low Pfeng, & E. Peters Recagno, La frontera final: el mar profundo(1a ed., pp. 175-214). Distrito Federal: SEMARNAT-INECC.

Solís-Weiss, V., P. Hernández-Alcántara, A. Granados-Barba, A. Ochoa-Rivera y I. Palomar-Morales. 1998. *Atlas de Anélidos Poliquetos de la Plataforma Continental del sur del Golfo de México*. Informe Final. Proyecto PO/52 CONABIO.

Tal Galili. 2015. *dendextend*. an R package for visualizing, adjusting, and comparing trees of hierarchical clustering. Bioinformatics. DOI: 10.1093/bioinformatics/btv428.

Teisson, C., M. Ockenden, P.L. Hir, C. Kranenburg, L. Hamm. 1993. *Cohesive sediment transport processes*. Coastal Engineering 21, 129–162.

Tovar-Hernández, María, A , P. Salazar-Silva, J. A. De-León-González, L. F. Carrera-Parra & S. I. Salazar-Vallejo. 2014. *Biodiversidad de Polychaeta (Annelida) en México*

Tovar-Hernández, M., P. Salazar-Silva, A. De-León-González, L. Carrera-Parra y S. Salazar-Vallejo. 2013. *Biodiversidad de Polychaeta (Annelida) en México*. Revista Mexicana de Biodiversidad, Suplementario, 85, S 190-S196.

Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.

Worm B., E. B. Barbier, N. Beaumont, J. E. Duffy, C. Folke. 2006. *Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services*. Science 314: 787–790.

Wu J., D. E. Jelinski., Luck M., P. T. Tueller. 2000. *Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics*. Geogr Inform Sc 6: 6–19.

Yañez-Correa, A. 1971. *Procesos costeros y sedimentos recientes de la plataforma continental al Sur de la bahía de Campeche*. Biol Soc. Geol. Mexicana., 32(2):75-1 15.

Zintzen, V., Anderson, M.J., Roberts, C.D., Harvey, E.S., Stewart, A.L. 2017. *Effects of latitude and depth on the beta diversity of New Zealand fish communities*. Sci. Rep. 7, 8081.

<http://CONAGUA.org.mx>

<http://SIMAR.org.mx>

<http://WoRMS.org>