

**APLICACIÓN DE MÉTODOS HIDROACÚSTICOS Y ÓPTICOS EN EL ESTUDIO  
DE LA BIOMASA Y ESPECTRO DE TALLAS DEL ZOOPLANCTON EN LA COSTA  
DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, CARIBE COLOMBIANO**

**LINA MARCELA SILVA TRUJILLO**

**Trabajo de grado para optar el título de Bióloga**

**Directora**

**María Isabel Criales Hernández**

*Dr. rer. nat*

**Co- Director**

**José Manuel Gutiérrez Salcedo**

*M.Sc. Biología Marina*

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS**

**ESCUELA DE BIOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2017**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios quien me permitió vivir esta aventura de 5 años con salud, fortaleza e inteligencia.

A mis padres y hermana, quienes creyeron en mi desde el momento que decidí ser Bióloga, su amor, ternura y ayuda son los que hicieron todo esto posible.

A mi familia, sus bendiciones siempre me han acompañado.

A mis compañeros y profesores, quienes con cada granito de arena ayudaron en las etapas académicas vividas.

A mis amigos, esos locos amigos que llenaron de alegría y cariño cada día; esos amigos que hacían divertido el estudio: Salomé, Bianeth, Felipe, Jefferson y Julián. Esos que desbordaron de compañía y amor muchos momentos: Jonathan, Tatiana y Brian, y quien con su apoyo y amor incondicional alegró cada día: Leonel.

## Índice General

Introducción .....	13
1. Objetivos .....	17
1.1 General .....	17
1.2 Específicos .....	17
2. Marco teórico .....	18
2.1 Hidroacústica .....	18
2.2 Zooplancton .....	20
2.3 Biomasa.....	21
2.4 Espectro de tallas .....	23
2.5 Distribución espacial.....	24
3. Materiales y métodos .....	26
3.1 Área de estudio .....	25
3.2 Muestras de zooplancton.....	28
3.2.1 Espectro de tallas .....	29
3.2.2 Biomasa .....	30
3.3 Muestra acústica.....	30
3.4 Análisis de la información .....	31

4. Resultados .....	36
4.1 Valores de NASC, biomasa y espectro de tallas.....	36
4.2 Análisis de la información y correlaciones.....	36
4.3 Mapa de distribución y temperatura.....	39
5. Discusión.....	43
6. Conclusiones .....	49
7. Recomendaciones .....	50
Referencias Bibliográficas .....	52

**Índice de Figuras**

<b>Figura 1.</b> Área de estudio .....	28
<b>Figura 2.</b> Correlaciones entre dispersión y variables ecológicas .....	38
<b>Figura 3.</b> Prueba t pareada para biomasa seca .....	39
<b>Figura 4.</b> Variograma experimental .....	41
<b>Figura 5.</b> Mapa de distribución.....	42
<b>Figura 6.</b> Mapa de temperatura .....	43

**Índice de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Sensores utilizados para generar las imágenes G1SST .....	35
<b>Tabla 2.</b> Estaciones muestreadas, variables analizadas (NASC, biomasa, pendiente y biovolumen).....	37
<b>Tabla 3.</b> Análisis de anisotropía .....	40

## RESUMEN

**TÍTULO:** APLICACIÓN DE MÉTODOS HIDROACÚSTICOS Y ÓPTICOS EN EL ESTUDIO DE LA BIOMASA Y ESPECTRO DE TALLAS DEL ZOOPLANCTON EN LA COSTA DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, CARIBE COLOMBIANO<sup>1</sup>

**AUTOR:** LINA MARCELA SILVA TRUJILLO<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Biomasa, espectro de tallas, hidroacústica, factor de conversión

El zooplancton es uno de los principales componentes de las comunidades biológicas en los ecosistemas marinos, estos se han estudiado tradicionalmente mediante redes, en los últimos años se ha implementado el uso de nuevas tecnologías como la hidroacústica y la óptica permitiendo mejorar sus estimaciones. El presente trabajo, utilizó un modelo general para correlacionar la retrodispersión hidroacústica con la biomasa en peso seco de zooplancton estimada de redes de arrastre de sitios específicos a partir de un crucero oceanográfico durante mayo de 2016. La relación entre el peso seco del zooplancton y la retrodispersión fue significativa ( $p < 0,001$ ) y explicó el 54% de la variabilidad en los datos de peso seco. La relación entre la pendiente del espectro de tallas y la retrodispersión no fue significativa, al igual que con el biovolumen de cada estación ( $p > 0,001$ ). Los resultados obtenidos se emplearon en un análisis geoestadístico, con el fin de analizar la media y la varianza, y el kriging ordinario con el objetivo de obtener un mapa espacial de distribución de la comunidad zooplanctónica. Las estimaciones medias de la biomasa en peso seco de mesozooplancton por redes de plancton y de la hidroacústica no fueron significativamente diferentes ( $p = 0,99$ ). El mapa de distribución del zooplancton ilustra las tendencias espaciales de las agregaciones que no se podrían distinguir por los medios generales. La energía externa que entra al golfo por aguas continentales incide en el espectro de tallas, evidenciando una estructura uniforme de los individuos zooplanctónicos.

---

1 Trabajo de Investigación

2 Facultad de Ciencias, Escuela de Biología, Director: María Isabel Criales Hernández, Dr. rer. nat y Co- Director: José Manuel Gutiérrez Salcedo, MSc. Biología Marina.

**ABSTRACT**

**TITLE:** APPLICATION OF HYDROACUSTIC AND OPTICAL METHODS IN THE STUDIES OF THE ZOOPLANKTON BIOMASS AND SIZE SPECTRUM AT THE COAST OF THE DEPARTMENT OF MAGDALENA, CARIBE COLOMBIANO<sup>1</sup>

**AUTHOR:** LINA MARCELA SILVA TRUJILLO<sup>2</sup>

**KEYWORDS:** Biomass, size spectrum, hydroacoustic, conversion factor.

Zooplankton is one of the main components of biological communities in marine ecosystems. Traditionally they had to be caught with net tows in order to be researched. However, in recent years, new technologies such as hydroacoustics and optical instruments have allowed newer and deeper insights into these organisms. The present study uses a general model to correlate hydroacoustic backscatter with the dry weight biomass of zooplankton. Data for the biomass is estimated based on trawl net catching from several, specific sites that were obtained by an oceanographic cruiser during May 2016. The relationship between zooplankton dry weight and hydroacoustic backscatter was significant ( $p < 0.001$ ) and explained 54% of variability in dry weight data. On the other hand, the relationship between the size spectrum slope and backscatter was not significant, neither was the biovolume of each location ( $p > 0.001$ ). These results were subsequently used in a geo-statistical analysis. By evaluating the media, variance and ordinary kriging, a spatial distribution map of the zooplankton community was created. The mean mesozooplankton dry weight biomass estimated from plankton net tows and hydroacoustic were not significantly different ( $p = 0.99$ ). The map of zooplankton distribution illustrated spatial trends in zooplankton dry weight biomass that were not discernible from the overall means. External energy which enters the balloon by continental waters affects the size spectrum, showing a uniform structure of the zooplankton individuals.

---

<sup>1</sup> Research Work

<sup>2</sup> Science faculty, Department of Biology. Director: María Isabel Criales Hernández, Dr. rer. nat and Co- Director: José Manuel Gutiérrez Salcedo, MSc. Marine Biology.

## INTRODUCCIÓN

El zooplancton es la parte de la comunidad planctónica que agrupa a los organismos que pertenecen al reino animal. Es considerado un grupo muy diverso debido a que allí se encuentran la mayor parte de los invertebrados y de algunos vertebrados marinos en los diferentes estadios del ciclo de vida (huevos, larvas y adultos). Constituyen una importante conexión en la red trófica marina, conectando a los productores primarios con los niveles tróficos superiores como los peces (Hays *et al.* 2005). Adicionalmente, es un bioindicador de alteraciones oceanográficas y climáticas, por sus características sensitiva y reactiva a perturbaciones externas, (Beaugrand, 2005), e indicador del desplazamiento de masas de agua verticales (Vives, 1985). La distribución del zooplancton se asocia a la variabilidad oceanográfica, indicando procesos de acoplamiento físico-biológico (Mann y Lazier 1996).

Para estudiar el zooplancton, se han utilizado diferentes técnicas de extracción, siendo el uso de redes el método más tradicional. Sin embargo, existen métodos alternos como la hidroacústica y la óptica que están permitiendo obtener resultados similares a los obtenidos con las redes, así como de proporcionar información diferente que permite complementar y mejorar los resultados y análisis obtenidos tradicionalmente (Boltovskoy, 1981).

La hidroacústica permite describir espacialmente en tiempo real la distribución y estructura del zooplancton (Wilson *et al.* 2002, Jarvis *et al.* 2010), para ello se crean factores de conversión entre la dispersión acústica y los diferentes atributos ecológicos del zooplancton como la

biomasa y la estructura de tallas. Con esta información, se puede entender detalladamente la dinámica de un ecosistema (Greenlaw, 1979; Simard y Lavoie 1999; Foote y Stanton 2000; Kirsch *et al.* 2000; Wilson *et al.* 2002; Godlewska y Jelonek 2006; Szczucka *et al.* 2016). De otro lado los métodos ópticos permiten la medición de individuos zooplanctónicos y la determinación de abundancia en laboratorio en un menor tiempo (Bell y Hopcroft 2008; Gorsky *et al.* 2010; Medellin-Mora y Escribano 2013).

En las regiones templadas y polares, con el uso de los métodos hidroacústicos ya se han obtenido factores de correlación de los datos de dispersión acústica con los atributos ecológicos como la biomasa, espectro de tallas, abundancia e identificación de especies o estadios de vida, permitiendo mejorar los modelos biológicos y ecológicos, principalmente de especies de interés comercial, como los eufáusidos (i.e. el krill) (ej. Demer y Hewitt 1995; Jarvis *et al.* 2010; Calise *et al.* 2011; McQuinn *et al.* 2013). Dentro de las recomendaciones que se han generado, es que cada región estudiada con este tipo de herramientas, debe crear su propio factor para que los valores sean los más cercanos a la realidad. El uso de factores de correlación universales u obtenidos de otras regiones, puede llegar a sub- o sobrevalorar las estimaciones y, por lo tanto, no permiten una buena evaluación (Holliday *et al.* 1989; Martin *et al.* 1996).

Las razones del por qué se deben crear factores de correlación locales se debe a tres aspectos: (1) cada organismo emite una respuesta acústica única y ésta depende de su tamaño, forma y composición, por lo que inclusive si se tiene una misma especie en regiones contrastantes (ej. polar vs. tropical), la respuesta será diferente por usar diferentes adaptaciones a las condiciones

ambientales locales (Martin *et al.* 1996); (2) cada ensamblaje presenta una estructura de tallas característica, que al igual que el punto anterior, dependerá de los factores ambientales locales (O'Brien *et al.* 1979) y (3) dependiendo la frecuencia utilizada, que usualmente va desde 38 kHz hasta 2.0 MHz, la respuesta acústica del zooplancton es diferente. Las frecuencias más altas permiten detallar mejor a los organismos más pequeños. Es por ello que es necesario realizar arrastres con redes para corroborar qué es lo que se encuentra en los ensamblajes zooplanctónicos y afinar los análisis acústicos (Stanton *et al.* 1994; Stanton, 2012).

Tanto para la región tropical como para el Caribe colombiano, los trabajos realizados con el zooplancton no han contemplado el uso de las técnicas hidroacústicas, a la fecha se han basado principalmente en análisis taxonómicos y ecológicos a partir de muestras obtenidas con redes (ej. Bernal y Zea 1993; Franco-Herrera *et al.* 2006), por lo que este sería el primer estudio para la región con esta técnica. La hidroacústica sólo ha sido utilizado en pesquería de organismos de interés comercial como peces, camarón, langosta, entre otros, con el fin de obtener la biomasa y el “stock” (Paramo y Viaña 2002; Paramo y Roa 2003; Manjarrés *et al.* 2004). Debido a esto, no es aconsejable utilizar estos factores de conversión para analizar al zooplancton.

Por otro lado, siempre las relaciones de los atributos ecológicos de biomasa y estructura de tallas del zooplancton con la hidroacústica se han analizado tradicionalmente de forma separada (ej. Kristensen y Dalen 1986, Mitson *et al.* 1996, Simard y Lavoie 1999; Wanzenböck *et al.* 2003; Holbrook *et al.* 2006; Pollom y Rose 2015; Szczucka *et al.* 2016), omitiendo una

comparación para conocer cuál de estos refleja más correcta o significativamente los valores de dispersión hidroacústica en un ecosistema.

Por estas razones, el presente estudio busca por primera vez utilizar la hidroacústica para analizar la estructura ecológica del zooplancton y determinar cuál de los atributos ecológicos, biomasa y el espectro de tallas del zooplancton, es la que mejor se correlaciona con los datos obtenidos de la hidroacústica y la predicción de los mismos, para una época del año.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 General:**

Determinar la correlación más significativa entre los atributos ecológicos de biomasa y estructura de tallas del zooplancton con los valores de dispersión hidroacústica en el Golfo de Salamanca, departamento del Magdalena.

### **1.2 Específicos:**

1. Estimar la estructura de tallas del zooplancton en las estaciones de estudio establecidas en el Golfo de Salamanca, departamento del Magdalena.

2. Estimar la biomasa seca del zooplancton en las estaciones de estudio establecidas en el Golfo de Salamanca, departamento del Magdalena

3. Evaluar la relación existente entre la biomasa y el espectro de tallas con los valores de dispersión hidroacústica en las estaciones de estudio establecidas en el Golfo de Salamanca, departamento del Magdalena.

4. Establecer la predicción de los factores de conversión en los atributos biomasa y espectro de tallas del Golfo de Salamanca, departamento del Magdalena.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Hidroacústica

Para la obtención de datos de zooplancton se han utilizado técnicas alternativas en los últimos años como la hidroacústica, inicialmente para la evaluación y predicción de las pesquerías, luego para la identificación de especies, así como para estudiar el comportamiento y las relaciones entre especie y medio ambiente (Jolly y Hampton 1990; Misund y Aglen 1992; Orłowski, 2001; Marinovic *et al.* 2002; Chapman *et al.* 2005; Doray *et al.* 2009). Los métodos hidroacústicos se basan en la aplicación del sonido mediante el uso de una ecosonda, las ondas de frecuencia (van desde 38 kHz hasta 2.0 MHz) que chocan con los organismos son recibidos por un receptor y el programa de adquisición de datos, lo traduce en una imagen (ecograma) que representa el ecosistema subacuático (Rodríguez-Sánchez *et al.* 2012). Al proporcionar esta información de los distintos compartimientos del ecosistema acuático, puede ser utilizado tanto en el estudio de pequeños organismos (ej. zooplancton) como en estudios de organismo de mayor tamaño (ej. peces) (Rodríguez-Sánchez *et al.* 2012; Szczucka *et al.* 2016). En el caso del zooplancton se procesa más correctamente la información con frecuencias mayores, debido a la poca interferencia de ruido en la columna (Stanton, 2012), de esta manera se suministra información básica de la distribución espacial y temporal de las comunidades (Godlewska y Jelonek 2006).

Entre las ventajas de los métodos acústicos, podemos destacar el hecho de que es no invasivo y que permite la exploración de grandes áreas en un periodo relativamente corto de tiempo, con alta resolución espacial y temporal (Stanton *et al.* 1994; Stanton, 2012). En el Caribe colombiano esta técnica ha estado limitada para evaluar exclusivamente los recursos pesqueros. Los primeros

estudios se hicieron para la región nororiental, con el objetivo de hacer prospecciones de los recursos pesqueros, con dos cruceros: en 1985 (Blanco, 1986) y 1988 (Anon, 1989). Los resultados de estos trabajos se limitan a informes científicos. Solo hasta el 2000 se publicó un trabajo más detallado de datos provenientes de hidroacústica, explorando las posibles causas de la distribución y abundancia de pequeños pelágicos relacionados con las variables ambientales (Paramo y Roa 2003). A partir de entonces, se han desarrollado varios trabajos similares, debido al alto interés científico y comercial en la región (Viaña *et al.* 1998; Paramo y Viaña 2002; Paramo y Roa 2003; Paramo *et al.* 2003; Manjarrés *et al.* 2004; Paramo *et al.* 2007; Gerlotto *et al.* 2011).

Tradicionalmente, cuando se utilizan métodos de análisis invasivo, la biomasa del zooplancton se puede calcular con métodos volumétricos, gravimétricos y bioquímicos. Sin embargo, el tratamiento de esas muestras es difícil y en algunos casos, se usa sustancias cancerígenas como el formol para conservar las muestras, además tiene limitaciones en la obtención de una adecuada representación real de la naturaleza, como el que no sean lo suficientemente asertivos en la mayoría de los ecosistemas marinos, debido a que es probable que solo se capture una fracción, desconociendo la totalidad del parche (Greenlaw 1979; Nichols y Thompson 1991). Por ello, se ha desarrollado una manera de hacer que la señal de retrodispersión sea viable para estudios de zooplancton con pocas muestras capturadas. Esta se basa en la comparación entre la retrodispersión acústica y la concentración de plancton, convirtiendo los valores hidroacústicos en valores comparables con lo capturado por redes, determinando factores de conversión (Bertrand *et al.* 1999; Foote y Stanton 2000; Jaffe, 2005).

Igualmente, la relación de los análisis hidroacústicos con las clases de tamaño requieren que se tengan prospecciones acústicas con valores de dispersión exactos para los individuos de la zona, valores que dependen de sus propiedades de tamaño, forma, composición y orientación, así como de la frecuencia de la ecosonda, generando que los mismos varíen ampliamente, por la gran variedad del componente zooplanctónico (Stanton *et al.* 1996). Actualmente, se cuentan con datos propios de las frecuencias a las que se reconocen grupos como eufáusidos, gastrópodos y sifonóforos (Stanton *et al.* 1994; Foote y Stanton 2000). Para la Antártida y algunas áreas de la región templada se realizan estudios con eufáusidos, desde métodos con frecuencias individuales hasta sondas de multifrecuencia, con las que analizan factores ambientales, de distribución, estructura de tallas y clasificación (Calise *et al.* 2011; McQuinn *et al.* 2013; Szczucka *et al.* 2016). Sin embargo, para grupos dominantes por su abundancia como los copépodos, chaetognatos, larváceos y braquiuros en las zonas tropicales no se cuentan con esta información.

## **2.2 Zooplancton**

El zooplancton es una comunidad formada por una amplia variedad de animales, está constituido por grupos de organismos consumidores heterogéneo, que incluye desde pequeños ciliados y flagelados, hasta grandes elementos del plancton gelatinoso, como medusas y salpas, y que pertenecen a una gran variedad de grupos taxonómicos, desde protozoos hasta vertebrados (ej. larvas de peces) (Hays *et al.* 2005; Szczucka *et al.* 2016). Estos organismos pueden medir entre 2  $\mu\text{m}$  (microplancton), como tintínidos, hasta más de 2 m (megaplancton) como algunas medusas (Nogueira *et al.* 2004; Hays *et al.* 2005). En los mares tropicales el tamaño predominante corresponde al microplancton y mesozooplancton (0.2 a 2 mm), quienes son base importante en los mares Colombianos en la realización de estudios en grupos como los

copépodos, quetognatos, anfípodos, eufaúsidos e ictioplancton (ej. Criales-Hernández *et al.* 2003; Díaz 2008; Franco-Herrera y Castro 2008; Martínez-Barragán *et al.* 2009; Medellín-Mora y Navas 2010, Valencia y Giraldo 2012). Estos estudios ecológicos buscaban describir la comunidad a partir de los atributos ecológicos riqueza, diversidad, abundancia y en algunos casos complementan con la biomasa y la estructura de tallas.

### **2.3 Biomasa**

La biomasa es el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, compuesta en el caso de la biomasa animal por los organismos que se alimentan de la materia vegetal u otros animales; los componentes que aportan a esta variable ecológica se basan en sus moléculas, como lípidos y carbohidratos (De Juana, 2003). Entender este componente y su distribución en los océanos del mundo es un requisito para predecir su contribución a la materia orgánica global (para entender procesos como la fijación de carbono y la cantidad fijada en el mundo) y el flujo de energía (Banse, 1995).

Los valores de biomasa pueden obtenerse a partir de mediciones analíticas a partir de métodos estándar como los volumétricos, gravimétricos y bioquímicos. El primero se basa en el principio del volumen desplazado, el cual utiliza una cámara de Sutcliffe (Sutcliffe, 1957) o una probeta, para determinar el volumen en ausencia del agua intersticial entre los organismos. Esta medición puede variar considerablemente si la muestra contiene o no organismos gelatinosos como

medusas y sifonóforos, por lo que, al compararlo con el peso húmedo o seco, puede generarse inconsistencias.

El segundo método de medición se basa en el peso individual de los individuos. Los valores pueden darse peso húmedo o seco. Si se desea conocer la cantidad de materia orgánica, simplemente se reduce a cenizas. En ambos casos, es necesario filtrar la muestra para extraer el agua intersticial y sales adheridas (Postel *et al.* 2000; Williams y Robins 1982), y llevarla a secado, donde para evitar subjetividades se requiere utilizar un peso seco constante, siendo considerado un procedimiento preciso al tener la materia orgánica neta del zooplancton.

El tercer método de medición se basa en fundamentos indirectos, por un lado, se puede determinar a partir de algún componente celular específico o al cuantificar alguna actividad enzimática, dependiendo del estado metabólico de los organismos, por el otro lado a partir de relaciones directas con las formas de los organismos (ej. geometría) (Arnáiz *et al.* 2000). En ambos casos son procedimientos simples de realizar y sus resultados se obtienen rápidamente, sin embargo, para el primero, su principal desventaja es que los valores fisiológicos y metabólicos son muy variables y dependen de las condiciones ambientales, sumado a lo costoso de su realización (Postel *et al.* 2000; Arnáiz *et al.* 2000).

En el Caribe colombiano se han realizado investigaciones que relacionan la biomasa zooplanctónica con la abundancia de pequeños pelágicos (Duarte y García 2002; Paramo *et al.*

2003; Franco-Herrera *et al.* 2006), encontrando una relación directa entre estos dos componentes del ecosistema. Igualmente, también se han hecho estudios de zooplancton puntuales por los métodos tradicionales, donde se obtiene la biomasa para conocer su distribución (Duarte y García 2002; Franco-Herrera *et al.* 2006; Valencia y Giraldo 2012).

## 2.4 Espectro de tallas

El espectro de tallas, es un nivel de organización basado a la formación de clases o rangos de tamaño de los individuos zooplanctónicos en función de la abundancia, tradicionalmente se trabaja con el espectro de biomasa cuando se cuenta con el peso de los organismos; con el zooplancton se ha realizado una variante llamada espectro de biovolumen, al ser difícil calcular la biomasa de los grupos (Rodríguez, 1994; Quintana, 2002). Gráficamente se observa que los rangos de tallas más pequeños, son los más abundantes, mientras que los rangos de tallas más grandes, son menos abundantes (Thiebaut y Dickie 1993; Rodríguez, 2005). La relación de la abundancia con respecto a los rangos es exponencial negativa, por lo que, si los datos son transformados logarítmicamente, se forma una línea recta (espectro) entre las variables con una pendiente negativa. Dicho espectro se ha convertido en una herramienta importante en la investigación, debido a que este permite analizar aspectos como la transferencia de carbono y las condiciones tróficas de la columna de agua, evaluar la dinámica poblacional, el estado de afloramientos o sobreexplotación de los organismos que componen la comunidad de zooplancton en la región estudiada, basados en las variables extraíbles de dicho espectro, la pendiente, el intercepto y el  $R^2$  (Zhou y Huntley 1997; Rodríguez, 2005). Este enfoque ha sido el objetivo de algunos trabajos en el Caribe colombiano, para grandes grupos o específicos de uno (Cerón, 2009; Gutiérrez- Salcedo, 2011).

El tamaño del zooplancton se procesa de forma usual en laboratorio midiendo el tamaño corporal y área de cada individuo en un estereoscopio tradicional o con una cámara adecuada a este (Montero, 1979; Uye, 1982). A partir de las últimas décadas del siglo XX, se desarrollaron técnicas ópticas que facilitan la obtención de siluetas, la enumeración, las mediciones y la identificación de organismos planctónicos, por lo que han agilizado los análisis ecológicos (Ortner *et al.* 1979; Rolke y Lenz 1984; Noji y Estep 1991; Hillebrand *et al.* 1999; Gislason y Silva 2009; Lindgren *et al.* 2013).

En laboratorio se han generado metodologías ópticas para analizar muestras preservadas con la digitalización de imágenes en equipos especialmente diseñados, como el ZooScan, o con herramientas convencionales, como estereoscopio, cámara o escáner, donde se analizan posteriormente con programas de imágenes y estadísticos como el Zooproces, Zooimage, ImageJ, R, entre otros (Abràmoff *et al.* 2004; Gorsky *et al.* 2010; Medellín-Mora y Escribano 2013).

## **2.5 Distribución espacial del mesozooplancton**

La distribución espacial ha sido utilizada durante varios años en el zooplancton como una herramienta que refleja los procesos biológicos del comportamiento y la dinámica de la población, así como los procesos físicos que la modulan (Mackas *et al.* 1985; Denman, 1994). El mesozooplancton está modulado principalmente por el patrón de circulación (tanto local como regional) y por procesos oceanográficos multiescalares que determinan las características físicas,

químicas y biológicas de la columna de agua (Parsons *et al.* 1984; Mullin, 1993). Variaciones espaciales y temporales se deben, entre otros, a factores físicos y químicos, tales como la topografía del fondo, la temperatura, la salinidad, el oxígeno disuelto en el agua y a factores biológicos como la disponibilidad de recursos alimentarios, la capacidad reproductiva, la exclusión competitiva. Se reconoce que dichas variaciones son más complejas en las zonas costeras que en zonas oceánicas debido al carácter sinérgico de las influencias océano-continente que allí se presentan (Thurman 1996; Avois *et al.* 2002).

La representación de esa información de distribución se basa en análisis estadísticos, inicialmente se recomendaba el incorporar aleatoriedad en el diseño de los cruceros, es decir, en la colocación de las estaciones de arrastre y en los transectos (Jolly y Hampton 1990), lo que era muchas veces aceptado debido a la percepción de que solamente un muestreo al azar puede dar un correcto estimado de la varianza (Rivoirard *et al.* 2000). Sin embargo, la aleatoriedad en el diseño del muestreo degrada la precisión del estimado de la abundancia. En la última década, se han desarrollado enfoques estadísticos que resuelven el problema de la estimación de la varianza y que evitan degradar el estimado de la abundancia, uno de ellos es la geoestadística (Jolly y Hampton 1990; Simmonds y Fryer 1996; Rivoirard *et al.* 2000).

La geoestadística es la rama de la estadística que estudia los procesos espaciales y su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de conjunto de datos espaciales o espacio-temporales (Journel y Huijbregts 1978). La estadística clásica es conveniente para procesos estocásticos, pero ignora la estructura espacial. La geoestadística toma en cuenta parámetros regionales (espaciales) ajustando un modelo al conjunto de datos (Simmonds *et al.* 1992). La

teoría de las variables regionalizadas y particularmente el método conocido como kriging, da un estimador no sesgado a partir de las muestras autocorrelacionadas (Conan, 1985).

Esta se basa en la posibilidad que se pueda inferir la estructura espacial y la varianza se expresa en términos de su estructura (Petitgas, 1993). Este enfoque es modelo-basado, debido a que se asume un modelo de estructura espacial. La variable de interés de la población es vista como una variable aleatoria, y, por tanto, las propiedades estadísticas de los estimadores vienen dadas por la distribución conjunta de las variables tomadas en la muestra, la que a su vez depende del modelo seleccionado. Tanto la abundancia local como la total son procesos aleatorios que son generados por un proceso estocástico cuya estructura es completamente conocida a partir de un número fijo de parámetros (Smith, 1990). Da a la ecología una novedosa herramienta para la interpretación de los patrones espaciales de los organismos, de los numerosos componentes ambientales con los cuales estos interactúan, y la conexión de dependencia espacial entre organismos y su ambiente (Rossi *et al.* 1992; Rivoirard *et al.* 2000).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudio

El mar Caribe colombiano está dominado directamente por el desplazamiento norte-sur de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT). Cuando éste se desplaza hacia el sur, la región se encuentra en la época climática seca (Andrade *et al.* 2003; Paramo *et al.* 2003, 2009). Cuando la ZCIT se desplaza hacia el norte aumenta el desarrollo de las nubes para iniciar la época lluviosa

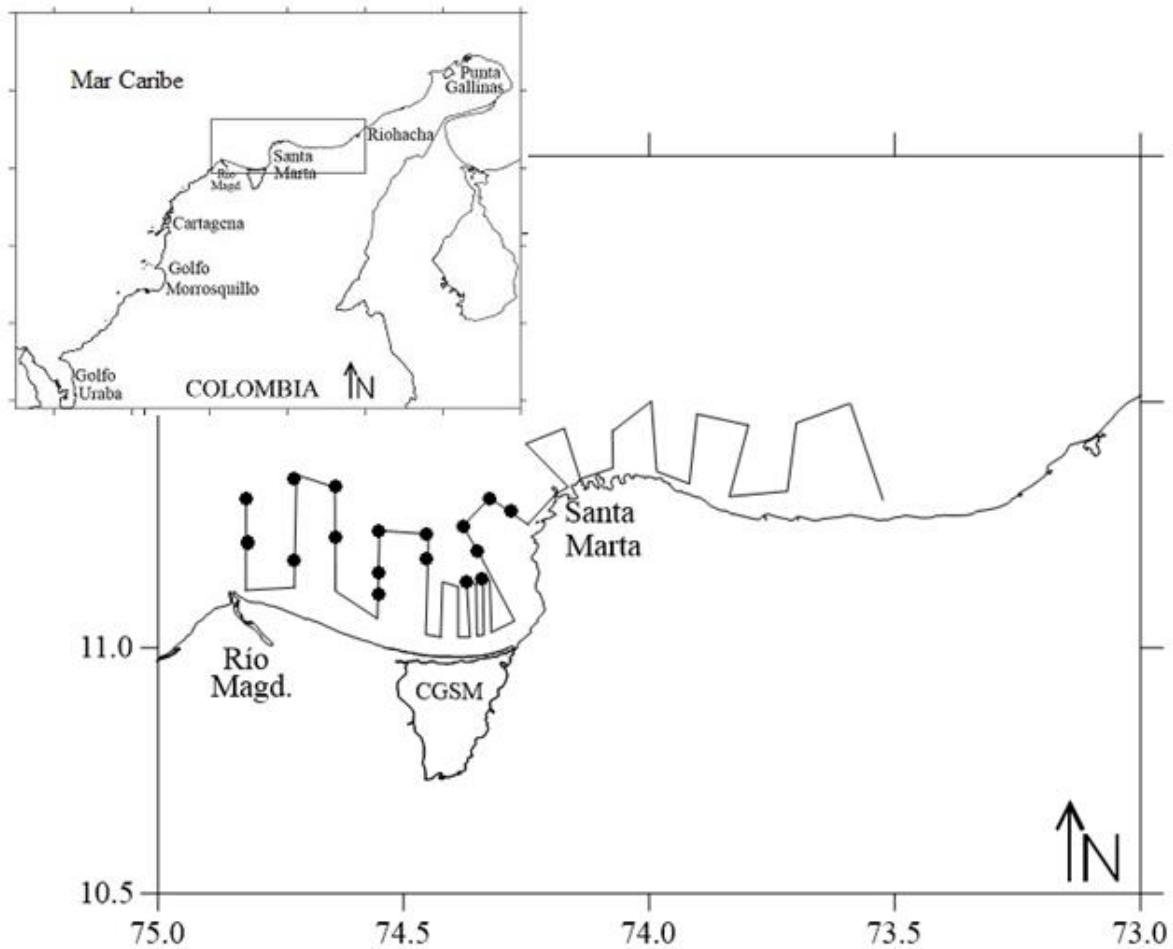
(Andrade *et al.* 2003; Franco-Herrera 2005). El rango anual de temperatura para esta región está entre 21 a 29 °C y el de salinidad entre 31 a 38 unidades debido a las diversas fuentes de agua en la zona (surgencia, precipitaciones y escorrentía continental) (Ramírez, 1983); la profundidad de la termoclina es permanente ubicando su inicio entre los 30 y 40 m de profundidad (Ramírez, 1990); las concentraciones de clorofila- $\alpha$  superficial durante el año, comienzan siendo mayores en la época lluviosa ( $>5.0 \mu\text{g L}^{-1}$ ) y disminuyen en la seca ( $1.0\text{-}2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ ; Franco-Herrera, 2005).

El Golfo de Salamanca ubicado entre  $11^{\circ} 00'$  y  $11^{\circ} 19'$  N,  $74^{\circ} 12'$  y  $74^{\circ} 50'$  O, se encuentra cubriendo la franja costera comprendida entre Punta Betín y la desembocadura del Río Magdalena, en la parte central del Mar Caribe Colombiano (**Figura 1**). El Golfo sigue el régimen del mar Caribe con una época seca entre diciembre a abril dominado por el régimen de los vientos Alisios del Noreste que inducen surgencia en el Parque Natural Nacional Tayrona (PNNT) y una época lluviosa entre mayo a noviembre ( $<200 \text{ mm}$ ), que incrementa las entradas de agua continental provenientes de la laguna costera Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) y los ríos Toribio, Córdoba, Gaira y Manzanares (Andrade, 1993; Cabrera y Donoso 1993; Cañón y Santamaría 2003). La temperatura superficial del mar durante el periodo muestreado se mantuvo en un promedio de 26 °C (CIOH).

El presente estudio se desarrolló con un crucero oceanográfico desde Boca Tocino hasta el río Palomino, cubriendo la costa del departamento del Magdalena. El muestreo fue sistemático, con transectos paralelos y perpendiculares a la línea de costa espaciados regularmente cada 5 m

(unidad de longitud en la navegación marítima) desde 10 m hasta los 100 m de profundidad (Figura 1).

### Área de estudio



**Figura 1.** Área de estudio en el mar Caribe colombiano, se observa la grilla sistemática recorrida, los círculos indican las estaciones muestreadas.

### 3.2 Muestras de zooplancton

El muestreo biológico se efectuó exclusivamente en el Golfo de Salamanca debido a disponibilidad de la embarcación, se colectaron 19 muestras siguiendo la grilla de muestreo (**Figura 1**), las estaciones fueron georeferenciadas con un GPS de marca Garmin. Las muestras de zooplancton se recolectaron mediante arrastres verticales (Rae, 1952) desde la superficie hasta una profundidad de 50 m, utilizando una red tipo Bongo de 60 cm de diámetro y 150 cm de largo, provista con mallas de 250  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$  de apertura del poro de malla, equipada con un flujómetro digital General Oceanics para establecer el volumen de agua filtrado.

Las muestras fueron fijadas en formol neutralizado al 5% siguiendo los procedimientos descritos por Boltovskoy (1981). Estas fueron trasladadas al laboratorio de Hidrobiología de la Universidad Industrial de Santander para el correspondiente análisis, tomando sólo las muestras colectadas con 250  $\mu\text{m}$ , al limitarse el estudio a mesozooplancton.

**3.2.1 Espectro de tallas.** Las muestras de las 19 estaciones fueron fraccionadas hasta obtener aproximadamente 2000 organismos en cada estación, obteniendo una precisión del 95% (Lund *et al.* 1958; Postel *et al.* 2000). Cada fracción se limpió de toda materia orgánica no correspondiente a organismos zooplanctónicos, luego se digitalizó a color y a una resolución de 2400 dpi con un escáner convencional (Medellín-Mora y Escribano 2013). Para ello se distribuyeron las muestras en cajas Petri de 12 cm de diámetro, evitando superposición en los organismos y una abundancia de 500 individuos por cada una, lo que ocasionó el tener 5 imágenes (sumando la de organismos gelatinosos que al ser translúcidos eran tratados de forma diferente) en promedio por cada estación.

Cada imagen se analizó con el programa Image J (Abràmoff *et al.* 2004), siguiendo las recomendaciones de Cerón (2009). Primero se convirtieron a una imagen de 8 bits (negro) y luego el programa determinó el área de cada organismo asemejándolo a una elipse estándar, conjunto a los valores de largo y ancho, dados en milímetros cuadrados ( $\text{mm}^2$ ) y milímetros (mm) respectivamente. Con esta información, utilizando la fórmula geométrica de una elipsoide, se obtuvo el valor del biovolumen de cada organismo en milímetros cúbicos ( $\text{mm}^3$ ) (Alcaraz *et al.* 2003; Vadrucchi *et al.* 2007).

Para estimar el espectro de tallas se siguió la metodología descrita por Rodríguez (1994), utilizando el método de Pareto a partir del volumen de cada individuo. Primero se obtiene la probabilidad de cada organismo de ser igual o más pequeño que los demás y luego se transforma logarítmicamente. El valor calculado de biovolumen es transformado de igual forma logarítmicamente y los nuevos valores se linealizan mediante una regresión para obtener el espectro de tallas de cada estación, siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez-Salcedo (2011). Se eligió como variable de análisis, la pendiente del espectro, debido a que esta representa el crecimiento, mortalidad y niveles tróficos de la comunidad del mesozooplancton (Zhou, 2006).

**3.2.2 Biomasa.** Para estimar la biomasa se utilizó la mitad de cada muestra, siguiendo el método gravimétrico en peso seco descrito por Postel *et al.* (2000), donde inicialmente se filtraron las muestras de cada estación y fueron sometidas a secado en un horno a 60 °C durante

48 horas. Los datos obtenidos fueron en  $\text{g.m}^3$  y transformados a  $\text{g.m}^2$  teniendo en cuenta la profundidad del arrastre zooplanctónico.

### 3.3 Muestra acústica

Los datos acústicos fueron colectados con una ecosonda científica Biosonics DTX, con un transductor de 38 kHz Split Beam; grabando información diurna durante los días del crucero del 19 al 28 de mayo. Inicialmente en los 19 puntos georeferenciados de arrastre zooplanctónico (25-28 de mayo) se analizaron los ecogramas filtrados bajo un umbral de -80 db (Trevorrow, 2005), este se limitó bajo los 5 m y sobre los 50 m de profundidad, en un rango de 100 m para cada punto, limpiando igualmente esta área de reverberación y ruido. Además, se realizó el mismo procedimiento para los otros días, obteniendo así los valores de dispersión para todo el recorrido del crucero.

La medida de dispersión hidroacústica usada para el análisis fueron los coeficientes de dispersión acústica de área náutica (NASC – Nautical Area Scattering Coeficient) de una milla náutica (mn). El NASC es definido como el área de retrodispersión forzada por mn, representando el valor de densidad hidroacústico de cada estación.

$$NASC = 4\pi(1.852)^2 10^{\frac{Sv}{10}} T \text{ [m}^2/\text{n.mi}^2\text{]}$$

donde  $4\pi$  es el estereorradian en una esfera, 1.852 es el número de metros en una milla náutica,  $S_V$  es el volumen medio de intensidad de retrodispersión en el medio analizado y  $T$  es el grosor del dominio que se analiza.

### 3.4 Análisis de la información

Con el fin de evaluar la correlación existente entre la biomasa y el espectro de tallas con los valores de dispersión hidroacústica se realizaron regresiones lineales entre las variables: la biomasa en peso seco ( $\text{g/m}^2$ ), la pendiente del espectro de tallas y los valores de biovolumen se correlacionaron linealmente con los NASC para los datos de 19 estaciones, donde la variable independiente correspondía a los NASC (Holbrook *et al.* 2006). Se evaluaron las diferencias entre los valores de biomasa en peso seco por red de arrastre con los valores de biomasa hidroacústico mediante una prueba t pareada.

Para establecer la predicción del factor de conversión se generó un mapa de distribución espacial del mesozooplankton, donde inicialmente se calcularon los valores de biomasa en  $\text{g.m}^2$  para todo el crucero, con NASC cada 0.5 mn, datos analizados usando geoestadística. Las técnicas geoestadísticas (Matheron, 1963; Cressie, 1993; Petitgas, 1993) fueron usadas para describir la estructura espacial de la distribución de la biomasa y un estimador de densidad de la misma. Previamente, el sistema de coordenadas (latitud y longitud) fue transformado a millas náuticas dentro del componente espacial este y norte, usando UTM (Universal Transverse Mercator). De esta manera, mediante el software Rstudio, se utilizó el variograma experimental, el cual se define como la diferencia de varianza entre los valores que son unidades  $h$  aparte y es una función de la varianza y covarianza:

$$\hat{Y}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

donde  $\hat{Y}(h)$  es la semivarianza,  $h$  es un vector de distancia y dirección,  $N(h)$  es el número de pares de observaciones a distancia, y  $Z(X_i)$  es la densidad de biomasa por el punto de datos  $i$ -ésimos.

Con el fin de explorar y detectar si la intensidad de la autocorrelación espacial varía según la dirección (proceso anisotrópico), el variograma experimental se calculó para los datos en bruto en cuatro direcciones ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ). Una vez analizados los variogramas direccionales, los variogramas experimentales omnidireccionales o isotrópicos se calcularon para los datos en bruto. Muchas distancias entre estaciones fueron exploradas para mejorar la resolución de la continuidad espacial, y las funciones asintóticas tales como los modelos esférico, gaussiano y exponencial fueron ajustados y seleccionados al criterio de minimización de mínimos cuadrados ponderados de Cressie (1993).

En los modelos de variograma, el nugget es el intercepto- $y$ , mientras el rango y el sill son determinados por la inflexión superior donde la línea se vuelve plana. El modelo exponencial de variograma fue el mejor en explicar el variograma experimental. Seguidamente, la validación cruzada (Isaaks y Srivastava 1989) fue usada para determinar dos parámetros cercanos de kriging: el número de sectores y el número de puntos cercanos usados en la interpolación por kriging. El error cuadrático medio de los residuos se utilizó para seleccionar la mejor

combinación de los parámetros (Maravelias *et al.* 1996). Finalmente, el punto ordinario del kriging fue usado para reproducir los procesos estocásticos en toda la región de interés. Este método proporciona la mejor linealidad, estimadores imparciales de densidad local, que son los mejores al tener menos varianza residual (Isaaks y Srivastava 1989).

La densidad de biomasa estimada para cualquier punto dentro de la región fue dada por:

$$z^*(x_0, y_0) = \sum_{i \in n} \lambda_i z(x_i, y_i)$$

donde  $n$  define la localidad cercana y  $\lambda$  es un peso asignado a cada observación dentro de  $n$ . Durante el kriging, los pesos fueron obtenidos usando el modelo de variograma estimado y minimizando la varianza del kriging (Isaaks y Srivastava 1989). La densidad media de biomasa en la región  $R$  fue obtenida por:

$$z^*(R) = \frac{1}{M} \sum_M^M z^*_{*m}$$

donde  $M$  es el número de nodos en un kriging predeterminado y  $m$  indexa esos nodos. Para estimar la varianza de la media de la densidad de biomasa, se aplicó el método de geoestadística en donde la varianza se calcula:

$$\sigma_E^2 = 2\bar{y}(V, v) - \bar{y}(V, V) - \bar{y}(v, v)$$

donde  $\bar{\gamma}(V, v)$  representa la media del variograma e involucra toda la distancia entre cada muestra, considerando la posición de la muestra en el área  $V$ . El término  $\bar{\gamma}(V, V)$ , la varianza en  $V$  teniendo en cuenta la forma del área  $V$ , es la varianza poblacional dentro de  $V$  y se llama varianza de dispersión. Finalmente,  $\bar{\gamma}(v, v)$  tiene en cuenta el diseño de muestreo. De esta manera, la varianza es dependiente de la geometría en  $V$ , el diseño de muestreo y la estructura del variograma (Petitgas y Prampart 1995; Rivoirard *et al.* 2000). Se usó el software EVA2 (Petitgas y Prampart 1995; Petitgas y Lafont 1997) para la estimación de la varianza.

Finalmente, para analizar las agregaciones del mapa de distribución se graficó la Temperatura Superficial de Mar (TSM), basándose en la utilización de sensores remotos que permiten estudiar estructuras oceánicas de mayor escala que los datos tomados *in situ*. Se utilizaron datos satelitales G1SST, en el periodo del 19 al 30 de mayo de 2016 (**Tabla 1**). Estos datos globales corresponden a la TSM, con resolución espacial de 1 km, producidas por el grupo JPL ROMS y resultan de la combinación de varios sensores y datos *in situ*, obtenidos del algoritmo de Chao *et al.* (2009), el objetivo de estas imágenes es proporcionar una estimación óptima global de la TSM en la más alta resolución espacial posible y libres de nubosidad. Los datos suministrados para elaborar las gráficas fueron descargados de <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>.

**Tabla1.**

*Sensores utilizados para generar las imágenes GISST.*

Satélite	Tipo de sensor	Sensor	Resolución
TERRA	vis/IR	MODIS	1km
AQUA	vis/IR	MODIS	1km
ENVISAT	Infrarrojo	AATSR	1km
NOAA	Infrarrojo	AVHRR	2km
METOP	Infrarrojo	GOES	6km
AQUA	AMSR-E	Micro ondas	25km

Los datos *in situ* de la TSM se obtienen del Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE), los cuales son datos de barcos y mediciones de boyas.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Valores de NASC, biomasa y espectro de tallas.

La comunidad de mesozooplankton en el Golfo de Salamanca presentó una biomasa en peso seco entre 0.06 y 1.04 g/m<sup>2</sup>, los mayores valores estuvieron en las estaciones 5 y 6; la pendiente del espectro de tallas entre -0.9469 y -0.6088, con una inclinación cercana a cero para la mayoría de las estaciones exceptuando las estaciones 1, 7 y 9 que estuvieron cercanas a -1; el biovolumen estuvo entre 995.51 y 15080.81 mm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, los mayores volúmenes se presentaron en la estación 5

y 15, representando tamaños más grandes y los NASC entre 1.10 y 3.98  $\text{m}^2/\text{n.mi}^2$ , con las mayores densidades acústicas en los puntos 6 y 10 (**Tabla 2**).

#### 4.2 Análisis de la información y correlaciones

Las cuatro variables presentaron una distribución normal en los datos ( $p>0.05$ ). La correlación entre los NASC ( $\text{m}^2/\text{n.mi}^2$ ) y la biomasa en peso seco del zooplancton ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) mostró una relación significativamente lineal en la ubicación exacta del arrastre zooplanctónico ( $p<0.001$ ,  $R^2=0.536285$ ,  $N=19$ , **Figura 2 a.**); una regresión no significativamente lineal entre la variable pendiente del espectro de tallas, el biovolumen y los NASC ( $p>0.001$ ,  $R^2=0.0189$ ,  $N=19$ , **Figura 2 b.** y  $p>0.001$ ,  $R^2= 0.4273$ ,  $N=19$ , **Figura 2 c.** respectivamente).

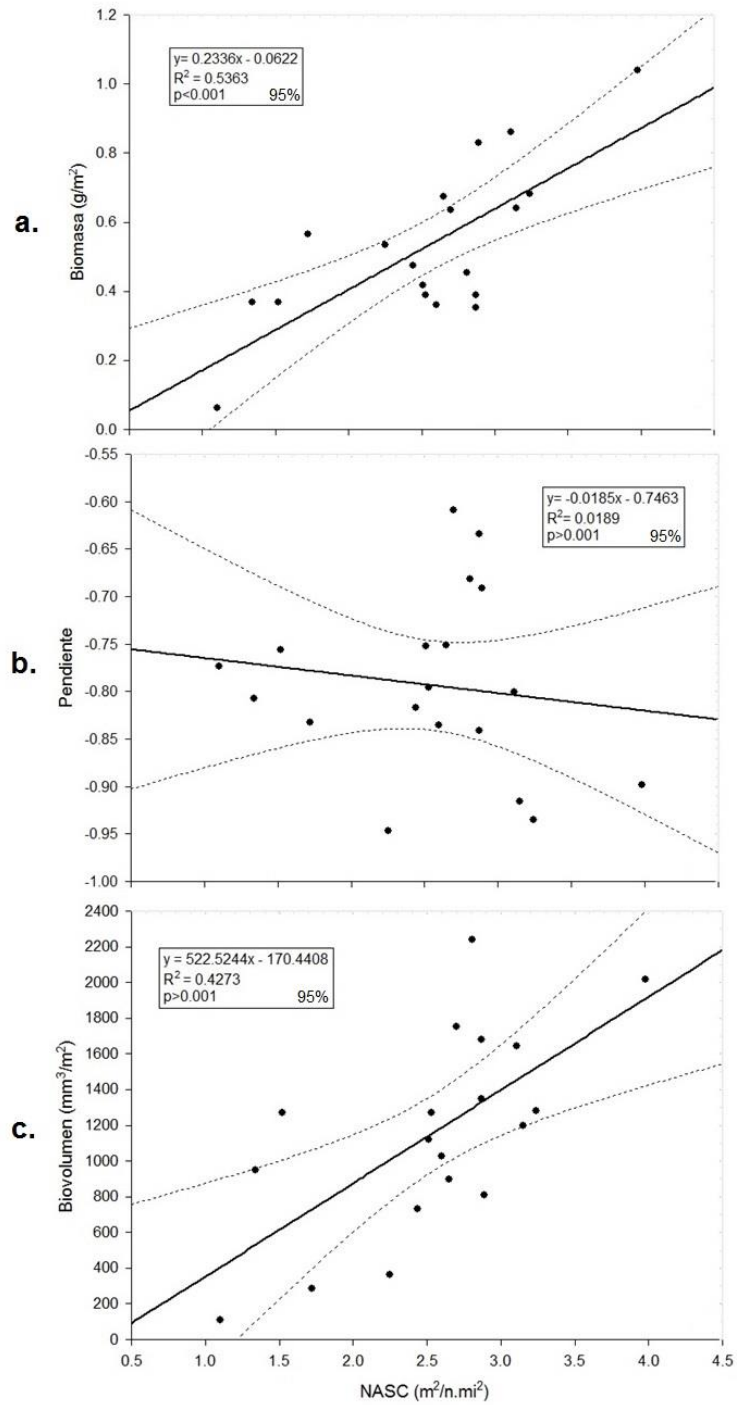
**Tabla 2.**

*Estaciones muestreadas, variables analizadas (NASC, biomasa, pendiente y biovolumen).*

Estación	Coordenadas		NASC ( $\text{m}^2/\text{n.mi}^2$ )	Biomasa ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Pendiente	Biovolumen ( $\text{mm}^3/\text{m}^2$ )
1	74° 49' 8,9940"	11° 18' 6,78600"	2.25	0.53	-0.947	2872.59
2	74° 49' 7,2444"	11° 12' 39,07440"	2.53	0.39	-0.795	9792.69
3	74° 49' 6,3696"	11° 12' 55,21680"	1.52	0.37	-0.756	11926.09
4	74° 43' 26,0004"	11° 10' 43,36680"	1.10	0.06	-0.774	995.51
5	74° 43' 23,3796"	11° 20' 42,09720"	3.11	0.86	-0.800	13582.78
6	74° 38' 20,3928"	11° 19' 36,86520"	3.98	1.04	-0.899	11927.13
7	74° 38' 20,3928"	11° 13' 24,11400"	3.24	0.68	-0.935	8461.89
8	74° 33' 3,2220"	11° 6' 30,20400"	2.89	0.83	-0.691	6633.67
9	74° 33' 3,2220"	11° 9' 4,74120"	1.34	0.37	-0.807	8340.47
10	74° 33' 3,2220"	11° 14' 13,81560"	3.15	0.64	-0.916	7161.35
11	74° 27' 17,5428"	11° 13' 52,07160"	2.60	0.36	-0.836	5946.12
12	74° 27' 17,5428"	11° 10' 53,46120"	2.51	0.42	-0.752	8602.04
13	74° 22' 18,1884"	11° 7' 57,95760"	1.72	0.56	-0.832	2652.54
14	74° 20' 31,1424"	11° 8' 25,911601"	2.65	0.68	-0.751	6922.72
15	74° 21' 2,9448"	11° 11' 49,37280"	2.70	0.63	-0.609	15080.81
16	74° 22' 42,5964"	11° 14' 44,87640"	2.44	0.47	-0.817	5930.75
17	74° 19' 34,2588"	11° 18' 9,82280"	2.87	0.35	-0.842	7262.94
18	74° 16' 51,7440"	11° 16' 35,15160"	2.81	0.45	-0.682	13166.90

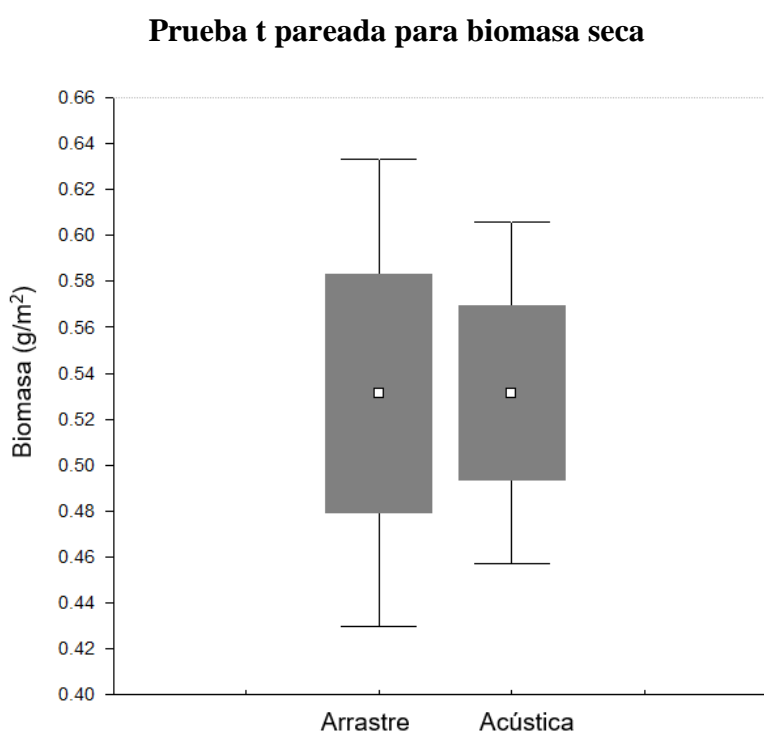
19 74° 17.897' 11° 17.066' 2.87 0.39 -0.634 12392.32

**Correlaciones entre dispersión y variables ecológicas**



**Figura 2.** Relación entre los NASC y la biomasa en peso seco (a.), la pendiente del espectro de tallas (b.) y el biovolumen de tallas (c.) del zooplancton en sitios específicos. La línea sólida representa la regresión lineal de mínimos cuadrados, las líneas punteadas representan el intervalo de confianza del 95%.

La media muestral del peso seco del zooplancton para el transecto hidroacústico fue comparada con la media muestral de la biomasa capturada por redes de arrastre para cada dato de muestreo (**Figura 3**). En general, no hubo diferencias significativas entre las medias de los dos métodos de muestreo (prueba t pareada,  $p= 0.99$ ).



**Figura 3.** Media del peso seco del zooplancton ( $\text{g/m}^2$ ) calculado del transecto hidroacústico y comparado con la media del peso seco de las redes de arrastre ( $\text{g/m}^2$ ). El error estándar es  $\pm 1.96 \cdot \text{SE}$ .

### 4.3 Mapa de distribución y temperatura

Las características espaciales para el mesozooplancton en el Golfo de Salamanca indican un variograma unidireccional mostrando similitudes en su modelamiento. La ausencia de

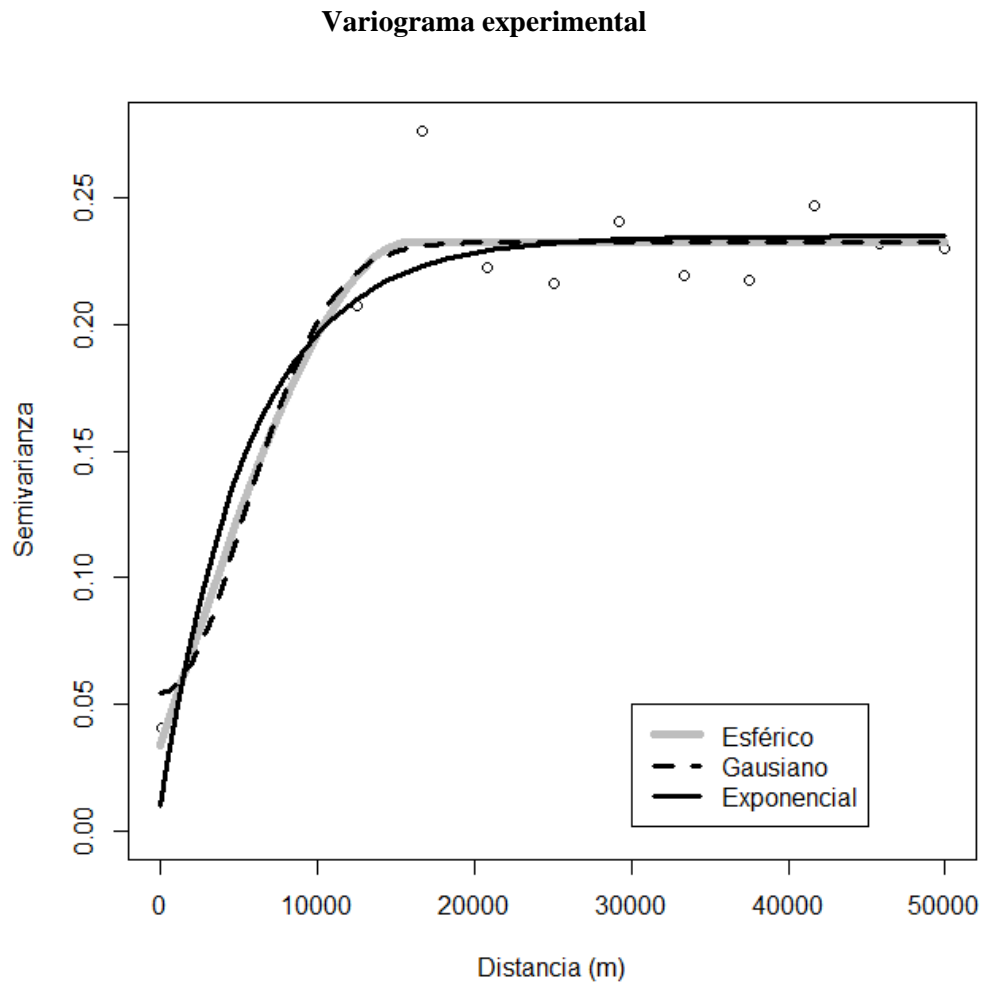
anisotropía geométrica puede ser demostrada con la razón entre los valores máximos y mínimos del rango de autocorrelación espacial en el variograma unidireccional, el cual fue menor a dos (**Tabla 3**), lo que señala que la estructura espacial de la agregación de la biomasa zooplanctónica tiene el mismo tamaño en todas las direcciones de la autocorrelación espacial. Por lo tanto, la estructura espacial de la biomasa ( $\text{g/m}^2$ ) fue estudiada usando un variograma isotrópico experimental. El variograma exponencial fijado mostró una estructura no resuelta por el diseño muestral que considera el 4.34% del total de la varianza (nugget como porcentaje de sill). El rango de autocorrelación de la biomasa fue de 17001 m, es decir el diámetro de la agregación de la biomasa mesozooplanctónica (**Figura 4**). Los valores más altos de la biomasa estuvieron distribuidos en la zona este del PNNT de  $74.0^\circ$  a  $73^\circ 5'$  O a lo largo de  $11^\circ 5'$  S (**Figura 5**). La cantidad de biomasa en la zona de estudio mostró una densidad media de  $1.16 \text{ g/m}^2$ , una biomasa total de 3299111.73 kg y un Coeficiente de Variación (CV) igual a 0.78.

**Tabla 3.**

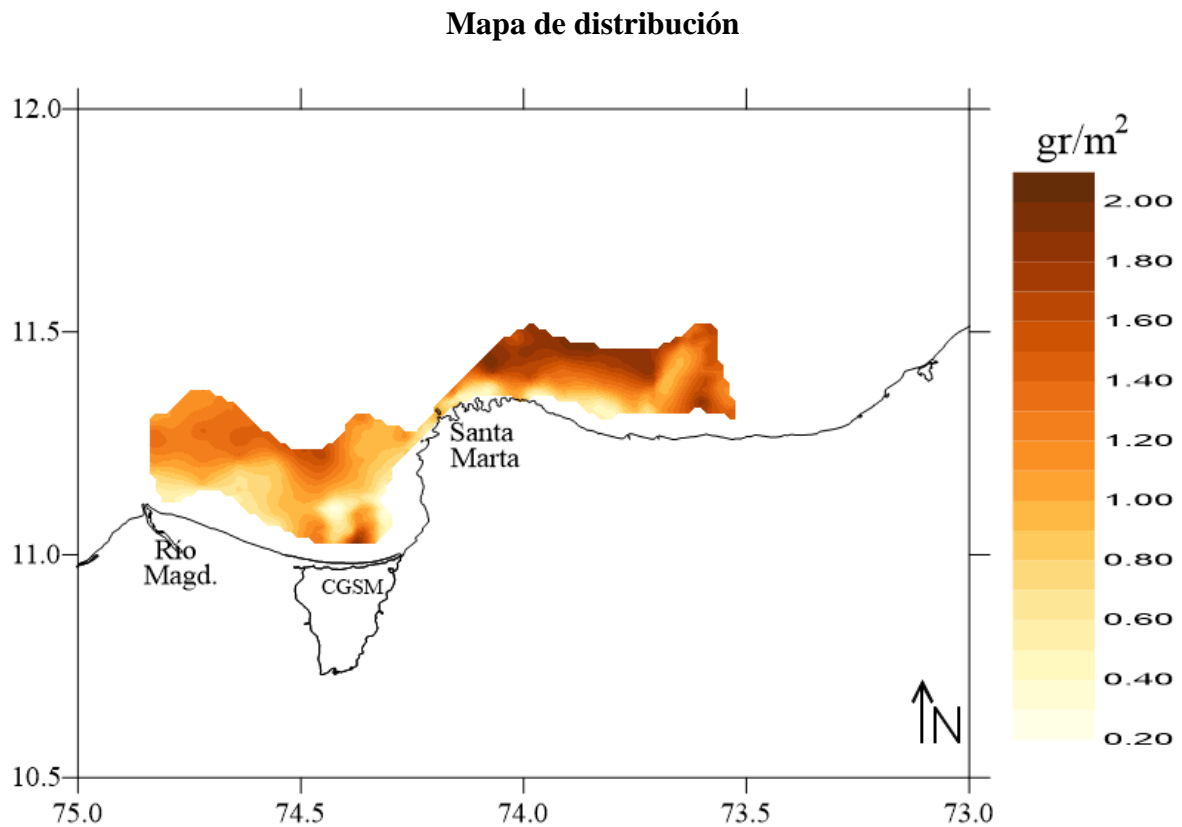
*Análisis de anisotropía*

Parámetro	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$
Nugget	0.00	0.00	0.00	0.00
Sill	0.00	0.00	0.00	0.00
Range	11200.00	19200.00	8960.00	16000.00
Ratio	1.71	1.00	2.14	1.20

Modelo de variograma exponencial ajustado al variograma direccional empírico para  $\log(\text{g/m}^2 + 1)$  de biomasa mesozooplanctónica.



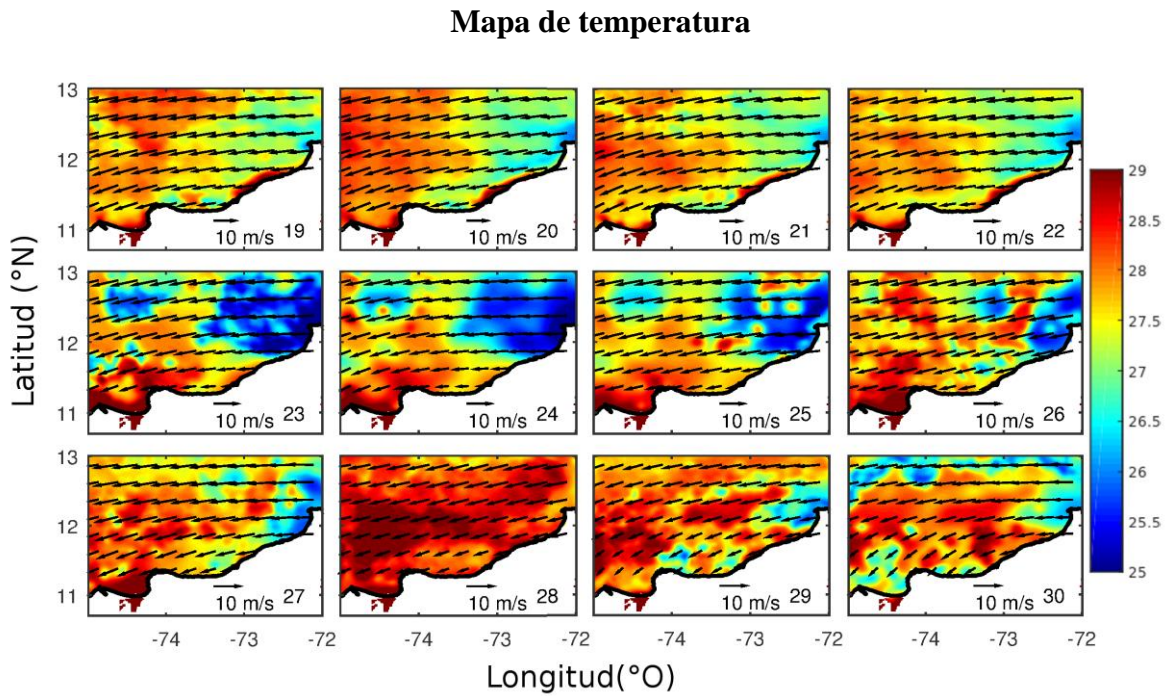
**Figura 4.** Variogramas experimentales ajustados (esférico, gausiano y exponencial) para los datos espaciales de la biomasa mesozooplanctónica.



**Figura 5.** Distribución espacial de la densidad de biomasa del mesozooplankton ( $\text{g/m}^2$ ) como la reproducción de un proceso estocástico espacial por kriging.

En cuanto a las condiciones oceanográficas presentadas durante el muestreo en mayo de 2016, el rango de TSM estuvo entre 25.06 y 27.94 °C (promedio: 26.40 °C, desviación estándar = 0.79 °C), las menores temperaturas se observaron de forma general en el norte del Caribe colombiano, en el área estudiada se observó la menor temperatura para el día de inicio del crucero frente al

PNNT y posteriormente con una continua entrada de aguas cálidas en esta zona y en el Golfo de Salamanca durante los días siguientes del crucero (**Figura 6**).



**Figura 6.** Distribución de la TSM en mayo de 2016 en el Caribe central y norte de Colombia.

## 5. DISCUSIÓN

La biomasa mesozooplancónica del Golfo de Salamanca representa una densidad coherente para la fecha en estudio, donde los valores son similares a los encontrados en otras investigaciones

(Bernal y Zea 2000; Bernal *et al* 2004; Medellín-Mora y Martínez 2010), la pendiente del espectro de tallas representa valores de menor inclinación, lo que está indicando una homogeneidad en los rangos de tamaños de los organismos para todos los niveles tróficos de la comunidad, lo que podría inferir que se está reciclando la energía entre todos los eslabones (Zhou, 2006; Gutiérrez-Salcedo, 2011; Dai *et al.* 2016). El biovolumen es una variable que refleja directamente la densidad de mayores biomásas, en el Golfo de Salamanca estos valores posiblemente pueden estar atribuidos a la dinámica de descarga de los diferentes ríos y ciénaga en el Golfo (Zhou y Huntley 1997; Gutiérrez-Salcedo, 2011; Sato *et al.* 2015).

Los resultados indican que las frecuencias hidroacústicas permiten analizar el comportamiento de las poblaciones de zooplancton, mediante un muestreo de forma rápida y continua en diferentes áreas, debido a que se encontró una relación entre las variables de retrodispersión que este provee y su relación con aspectos ecológicos. En esta investigación, se usó un modelo general para convertir la retrodispersión hidroacústica a biomasa en peso seco de zooplancton (**Figura 2 a.**), esta metodología provee ventajas para llegar a estimar modelos de fuerza de blanco especie-específicos como lo observó Holbrook *et al.* (2006). Al correlacionar los valores de redes de arrastre con los NASC, se ha logrado convertir con rapidez y eficiencia las medidas de retrodispersión a una medida biológicamente significativa, que podrá ser comparable con estudios realizados en la región. Si bien las redes de arrastre se han usado por muchos años para proveer información biológica relevante, no se debe olvidar que estas requieren la inversión de mayor tiempo para dilucidar los patrones o características en un área de estudio en un momento determinado.

Para el uso de un modelo general hidroacústico, no es necesario asumir cuál es el taxón que dispersa la mayor parte del sonido o conocer la composición exacta de la comunidad para estimar la biomasa, esta variable es la base del primer enfoque que se ha desarrollado en la estimación acústica de zooplancton, donde con los valores acústicos de una sola frecuencia se establecen ecuaciones de regresión para convertir medidas de retrodispersión a biomasa zooplanctónica (Kristensen y Dalen 1986; Wiebe *et al.* 1996; Holbrook *et al.* 2006; Godlewska y Jelonek 2006; Warren *et al.* 2016). Sin embargo, la sección de retrodispersión que cruza o penetra un objetivo está en función del tamaño, los parámetros físicos, la orientación del dispersor y de la incidencia al objeto, y la frecuencia del sistema acústico (Kristensen y Dalen 1986; Stanton *et al.* 1994), quienes finalmente determinan la estimación y exactitud de la comunidad.

La frecuencia de 38 kHz en el estudio muestra una subestimación en la biomasa del mesozooplancton, debido a que existe un 46% que no puede ser explicado por el factor de conversión determinado (**Figura 2 a.**), esto es atribuido inicialmente a las bases teóricas de que las categorías anatómicas mayores de zooplancton semejante a fluido (copépodos, eufáusidos, miscidáceos, y salpas), portador de gas (sifonóforos) y concha elástica (gastrópodos) poseen diferente intensidad de retrodispersión debido a la proporción de la biomasa por la energía del eco, incluso hay cambios en los niveles acústicos para organismos con la misma biomasa (Stanton *et al.* 1994), ocasionando que los primeros de mayor tamaño puedan ser reconocidos por la onda incidente, pero aquel de menor tamaño (ej. copepodos pequeños) no puedan ser correctamente detectados y cuantificados en dicha frecuencia (Mitson *et al.* 1996; Lezama-Ochoa *et al.* 2011). Igualmente, se ha demostrado que la correlación entre valores de

retrodispersión medidos y los calculados decrece a medida que disminuye la frecuencia (Szcucka *et al.* 2016; Warren *et al.* 2016). Se debe resaltar que al no encontrar diferencias significativas entre las medias de la biomasa seca de arrastre y la biomasa acústica (**Figura 3**), el factor de conversión puede ser utilizado para evaluaciones de la comunidad de zooplancton en el Caribe colombiano, observando distribuciones espaciales coherentes.

Más allá del enfoque empírico en la hidroacústica basado en el modelo general usado en la biomasa, se encuentra aquel que involucra la dispersión representativa de cada organismo (Holliday y Pieper 1980), este enfoque encierra aquellos análisis especie-específicos, como lo es el espectro de tallas, cuya variable comunmente analizada, la pendiente, está formada por la combinación de cada pendiente de los eslabones en la cadena trófica, que al sumarlos dan un valor final de la comunidad, la cual es menos empinada (Zhou, 2006). En el mesozooplancton estudiado, se debe tener en cuenta los grupos y niveles tróficos de un sistema nerítico, y la temporalidad en la que se encontraba el Caribe colombiano (Bernal y Zea 2000; Franco-Herrera *et al.* 2006; Ramírez-Barón *et al.* 2010) para obtener valores cercanos a 0, pendientes menos inclinadas (ver **Tabla 1**). Esta condición fue evaluada parcialmente por la frecuencia utilizada, generando una correlación no significativa entre los NASC y la pendiente (**Figura 2 b.**), al subestimar o no detectar los grupos de menor tamaño, cuerpo blando o transparente. A su vez, para aumentar la probabilidad de detectar un objeto en la columna de agua, lo deseable es que la longitud de onda del sonido sea igual o menor que el tamaño del organismo dispersado (Holliday *et al.* 1989), por lo que las frecuencias inferiores de 100 kHz pueden detectar zooplancton de mayor tamaño y larvas de peces, razón de la subestimación en los menores tamaños (ej.

copéodos y cladóros), que aluden a la ausencia de los eslavones tróficos menores del zooplancton en la relación hidroacústica con el espectro de tallas.

En la últimas décadas las investigaciones en otras regiones sobre el espectro de tallas en relación a la hidracústica se han basado en multifrecuencias (Costello *et al.* 1989; Holliday *et al.* 1989; Pieper *et al.* 1990; Napp *et al.* 1993; Wheeland y Rose 2016), con el fin de afinar la dispersión para cada grupo de tamaños, abarcando un amplio rango de frecuencias que pueden discriminar esos eslavones no identificados por un solo haz, de esta manera se podría evidenciar que a mayor densidad acústica expresada por el NASC, existe una adecuada secuencia de tamaños pequeños a grandes, observando una relación significativa entre dichas variables (Kristense y Dalen 1986; Zhou, 2006; Ragnarsson-Stabo *et al.* 2014; Sawada *et al.* 2016).

El enfoque multifrecuencial permite relacionar directamente el biovolumen de retrodispersión con el biovolumen de redes de arrastre (Holliday y Pieper 1980; Costello *et al.* 1989; Napp *et al.* 1993); la linealidad no significativa obtenida alude nuevamente a la subestimación de las formas de menor tamaño y composición anatómica débil para la retrodispersión (**Figura 2 c.**) debido a la carencia de la frecuencia utilizada de detectar todos los rangos de tamaño del mesozooplancton.

La capacidad de representar espacialmente la biomasa en peso seco del zooplancton, es quizás la mayor ventaja de usar frecuencias hidroacústicas; la distribución espacial puede revelar diferencias en las agregaciones que pueden no reflejarse en la media general de los arrastres. Estos mapas son una herramienta importante para explorar las relaciones espaciales entre factores biológicos y físicos que influyen al zooplancton en una escala fina. Factores físicos

como la temperatura y el afloramiento costero han sido identificados como fuentes primarias que influyen en las agregaciones del zooplancton (Malone y McQueen 1983; Pinel-Alloul y Pont 1991; Megard *et al.* 1997; Zhou *et al.* 2001). La región del caribe estudiada experimenta un fuerte afloramiento costero impulsado por el viento aproximadamente de enero a mayo (Herrera y Febres-Ortega 1975; Andrade-Amaya 2000; Ruiz-Ochoa *et al.* 2012), alrededor de mayo típicamente hay un incremento de la temperatura superficial del mar (Rueda-Roa 2012; Rueda-Roa y Muller-Karger 2013), como lo observado en los resultados. Este patrón oceanográfico desplaza el mesozooplancton que se encuentra frente al PNNT procedente quizás del afloramiento de enero a mayo, la entrada de aguas cálidas a lo largo de la costa, está desplazando las mayores biomásas hacia aguas oceánicas, sustentado con la misma distribución que sufre la comunidad de productividad primaria en la zona para el mes de estudio, patrón evidenciado por Ramírez-Barón *et al.* (2010).

En el golfo de salamanca también se ha identificado un foco de afloramiento entre enero y marzo, para el mes en estudio la transicionalidad a temporada húmeda explica la distribución de la biomasa mesozooplanctónica, basándose en la estabilidad de la columna de agua causada por el giro cálido y profundo de Panamá-Colombia y la descarga del Río Magdalena (Bernal *et al.* 2006). El primero provee en general aguas más cálidas y con una variedad menor a lo largo del año (**Figura 6**), pero el inicio de mayor llegada de agua dulce por el cambio de temporada influye drásticamente en las agregaciones de la comunidad; típicamente la suspensión de sedimentos en una pluma o desembocadura inhibe la producción primaria, a medida que estos se van proyectando o dispersando con los nutrientes derivados, se incrementa la disponibilidad de luz y de las redes tróficas (Gocke *et al.* 2003; Restrepo *et al.* 2006; Moline *et al.* 2008), patrón

que explica la mayor abundancia de mesozooplankton frente a la ciénaga del Magdalena y hacía la parte oceánica del golfo, donde la corriente del Giro y la Contracorriente de Colombia influyen en el agua dulce descargada al ser arrastrada más fácilmente en el centro del Caribe colombiano (Andrade y Thomas 1988; Caños-Páez y Santamaria del Ángel 2003; Restrepo *et al.* 2006).

El espectro de tallas del mesozooplankton puede ser también una herramienta utilizada para explicar las mayores concentraciones de biomasa observadas en el Golfo de Salamanca, las cuales poseen pendientes con menor inclinación, lo que está indicando que las mayores agregaciones, corresponden a una estructura comunitaria más homogénea y uniforme, con tallas proporcionales para los niveles del espectro entre organismos pequeños y de mayores tamaños, atribuidos al inicio de entrada de energía externa al sistema dada por el Río Magdalena, lo que se ha evidenciado por Gutiérrez-Salcedo (2011) para la región del Caribe central y en las teorías de espectro basado en biovolumen (Zhou y Huntley 1997; Zhou, 2006; Basedow *et al.* 2010)

## 6. CONCLUSIONES

Los valores de biomasa seca para mayo de 2016 se encuentran dentro de los rangos encontrados para el centro del Caribe colombiano.

La pendiente del espectro de tallas evidencia una comunidad mesozooplanctónica con entrada de aguas continentales o energía externa.

La regresión lineal general permitió convertir la retrodispersión hidroacústica en una medida biológica significativa comparable con los resultados de redes de arrastre, los cuales podrán ser utilizados en el zooplancton para el centro del Caribe colombiano.

El factor de conversión permitió espaciar la biomasa en peso seco del zooplancton en una escala fina, mediante mapas de distribución espacial; este valor es una herramienta importante para analizar los factores que influyen en las agregaciones del zooplancton.

Las agregaciones de biomasa zooplanctónica en el centro del Caribe colombiano pueden ser explicadas por factores físico-químicos como la temperatura superficial de mar y por variables como el tamaño.

Se logró determinar un modelo general que puede ser un método simple y eficaz para convertir la retrodispersión hidroacústica a biomasa en peso seco de zooplancton en un área específica del Caribe colombiano a pesar de las limitaciones en los enfoques hidroacústicos utilizados.

## **7. RECOMENDACIONES**

En próximas investigaciones, para mejorar la estimación de la biomasa en peso seco del mesozooplankton en áreas tropicales debe utilizarse un transductor de alta frecuencia, que permita identificar un mayor rango de individuos en cada estación.

Se recomienda utilizar multifrecuencias para desarrollar la metodología específica respecto a tallas, cubriendo todo el espectro de estas en el centro del Caribe colombiano.

Realizar una comparación en otro mes del año de la época lluviosa para validar el modelo, evidenciando si el periodo de muestreo afecta o no las estimaciones.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abràmoff, M. D., P. J. Magalhães y S. J. Ram. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International* 11(7): 36–41.
- Alcaraz, M., E. Saiz, A. Calbet, I. Trepas y E. Broglio. (2003). Estimating zooplankton biomass through image analysis. *Marine Biology* 143(2): 307–15.
- Andrade-Amaya, A. (2000). The circulation and variability of the Colombian basin in the Caribbean sea. *University of Wales, Wales, UK, Ph.D. dissertation* 223.
- Andrade, C. A. (1993). Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe. *Boletín Científico CIOH* 13: 33-43.
- Andrade, C. A., E. D. Barton y C. N. K. Mooers. (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research* 108(C6): 16.1-16.11.
- Andrade, C. A. y Y. F. Thomas. (1988). Sedimentos en suspensión e hidrodinámica al sureste del delta del Río Magdalena, Mar Caribe (Colombia). *Boletín Científico CIOH* 8: 27-34.
- Anon., (1989). Prospecciones de los recursos pesqueros de las áreas de plataforma entre Surinam y Colombia. *Institute of Marine Research, NORAD/UNDP/FAO Programme*. Bergen.
- Arnáiz, C., L. Isac y J. Lebrato. (2000). Determinación de la biomasa en procesos biológicos. *Tecnología del agua* 20(205): 45–52.
- Avois, J.C., P. Legendre y M. Louis. (2002). Coastal tropical zooplankton: Patterns and

Processes over Spatial Scales. *Coral Reefs 1*: 1-37.

Banase, K. (1995). Zooplankton: pivotal role in the control of oceanic production. *ICES Journal of Marine Science* 52(1): 265–77.

Basedow, S. L., K. S Tande y M. Zhou. (2010). Biovolume spectrum theories applied: spatial patterns of trophic levels within a mesozooplankton community at the polar front. *Journal of plankton research*. 32(8): 1105-1119.

Beaugrand, G. (2005). Monitoring pelagic ecosystems using plankton indicators. *ICES Journal of Marine Science* 62: 333-338.

Bell, J. y R. Hopcroft. (2008). Assessment of zoolume as a tool for the classification of zooplankton. *Journal of Plankton Research* 30(12): 1351–67.

Bernal, G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* 30(115):195-208.

Bernal, A. y S. Zea. (1993). Variaciones nictemerales en la comunidad de zooplankton de la bahía de Santa Marta, mar Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 22(1): 5–20.

Bernal, A. y S. Zea. (2000). Estructura de la comunidad de zooplankton en condiciones de descarga continental y de afloramiento costero en Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 29(1):3-26.

Bernal, A., B. Werding y S. Zea. (2004). Variación espacial y temporal de biomasa zoopláctónica en el sector nerítico del mar Caribe colombiano. REMAR. pp.: 187-196

- Bertrand, A., R. Borgne y E. Josse. (1999). Acoustic characterisation of micronekton distribution in French polynesia. *Marine Ecology Progress Series 191*(1): 127–40.
- Blanco, J. 1986. Resultados crucero de prospección acústico- pesquera. En: Desarrollo de la Pesca Artesanal de la región de Santa Marta. *COLCIENCIAS-CIID-FES*. Bogota, pp. 127-150.
- Boltovskoy, D. (1981). Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino. *Publicación especial del INIDEP*. Mar de Plata, Argentina. 891 pp.
- Cabeza, D. L (2012). Caracterización ingreso de frentes fríos al Mar Caribe colombiano. Cartagena, Colombia.
- Cabrera, E., y M. C. Donoso. (1993). Estudio de las características oceanográficas del Caribe colombiano, Región III, Zona 1, PDCTM. *Boletín Científico CIOH 13*: 19-32.
- Calise, L., T. Knutsen y W. Melle. (2011). Multifrequency target strength of horizontally free swimming northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) in a mesocosm venue. *ICES Journal of Marine Science 170*(1): 2-12.
- Cañón, M. L. y A. Santamaría. (2003). Influencia de la pluma del río Magdalena en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH 21*:66-84.
- Caños-Paez, M. L. y E. Santamaria del Angel. (2003). Influencia de la pluma del río Magdalena en el Caribe colombiano. *Boletín Científico del CIOH 21*: 66-84.
- Cerón, M.A. (2009). Caracterización de la fauna de copépodos calanoideos en tres

localidades del mar Caribe colombiano (La Guajira, el Magdalena y Morrosquillo) con base en la distribución de tamaños. Tesis Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 38 pp.

Chao, Y., Z. Li, J. D. Farrara y P. Hung. (2009). Blending sea surface temperatures from multiple

satellites and in situ observations for coastal oceans. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(7): 1415-1426.

Chapman, D., E. Pikitch, E. Babcock y M. Shivji. (2005). Marine reserve design and evaluation using automated acoustic telemetry: a case-study involving coral reef-associated sharks in the mesoamerican caribbean. *Marine Technology Society Journal* 39(1): 42-55.

CIOH. (s.f.). Climatología del Caribe

Conan, G.Y. (1985). Assessment of shellfish stocks by geostatistical techniques. *ICES CM* 30: 24.

Costello, J. H., R. E. Pieper y D. V. Holliday. (1989). Comparison of acoustic and pump sampling techniques for the analysis of zooplankton distributions. *Journal of Plankton Research* 11:703-709.

Criales-Hernández, M., E. Arteaga, L. Manjarrés. (2003). Distribución espacio-temporal y tallas de las larvas de tres especies de Lutjanidos en el área norte del Caribe colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Academia Colomb. Cienc* 102: 85-91.

Cressie, N. A. C., (1993). Statistics for spatial data. *John Wiley and Sons, Inc.*, New York.

- De Juana, S. (2003). *Energías renovables para el desarrollo*. Editorial Paraninfo, España: 311 pp.
- Demer, D. y R. Hewitt. (1995). Bias in acoustic biomass estimates of *Euphausia superba* due to diel vertical migration. *Deep-Sea Research Part I* 42(4): 455-475.
- Denman, K. L. (1994). Scale determining biological-physical interactions in oceanic food webs. in *Aquatic Ecology: Scale, Pattern, and Process*. edited by P. S. Giller, A. G. Hildrew, and D. G. Raffaelli. pp. 377-402. Blackwell Sci., Malden, Mass.
- Díaz, X. (2008). Influencia de los eventos climáticos el niño y la niña en la comunidad de chaetognatha de las aguas superficiales del océano Pacífico colombiano. *Engenharia de Pesca* 3(1): 30–50.
- Doray, M., S. Mahévas y V. Trenkel. (2009). Estimating gear efficiency in a combined acoustic and trawl survey, with reference to the spatial distribution of demersal fish. *ICES Journal of Marine Science* 67(4): 1–9.
- Duarte, L. y C. García. (2002). Testing responses of a tropical shelf ecosystem to fisheries management strategies: a small-scale fishery from the Colombian Caribbean sea. *Fisheries Centre Research Reports* 10(2): 142–49.
- Foote, K. G. y T. Stanton. (2000). Acoustical Methods. En: *ICES Zooplankton Methodology Manual*, Academic Press, London, pp 223–258.
- Franco, A. (2005). Oceanografía de la ensenada de Gaira El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe colombiano. *Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano* 56.

- Franco-Herrera, A. y L. Castro. (2008). Seasonal variations in grazing of the copepod eucalanus in the continental shelf of the south central Caribbean sea, Colombia. *Caribbean Journal of Science* 44(3): 361–74.
- Franco-Herrera, A., L. Castro y P. Tigreros. (2006). Plankton dynamics in the south-central Caribbean sea: strong seasonal changes in a coastal tropical system. *Caribbean Journal of Science* 42(1): 24–38.
- Gerlotto, F. P. Brehmer, P. Fernandes, D. Reid, David G. P. Copland, S. Georgakarakos y J. Paramo. (2011). Application of multibeam sonar in marine ecology and fisheries research: new fields and limitations. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129(4): 2299.
- Giraldo, A. y E. Gutiérrez. (2007). Composición taxonómica del zooplancton superficial en el Pacífico colombiano (septiembre 2003). *Investigaciones Marinas* 35(1): 117-122.
- Gislason, A. y T. Silva. (2009). Comparison between automated analysis of zooplankton using zooimage and traditional methodology. *Journal of Plankton Research* 31(12): 1505–16.
- Gocke, K., M. Pineda, J. Ernesto, L. A. Vidal y D. Fonseca. (2003). Planktonic primary production and community respiration in several coastal lagoons of the outer Delta of the Río Magdalena, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 32(1): 125-144.
- Godlewska, M., y M. Jelonek. (2006). Acoustical estimates of fish and zooplankton distribution in the piaseczno reservoir, southern Poland. *Aquatic Ecology* 40(2): 211–19.
- Gorsky, G., M. Ohman, M. Picheral, S. Gasparini y L. Stemann. (2010). Digital zooplankton image analysis using the zooscan integrated system. *Journal of Plankton Research* 32(3):

285–303.

Gorsky, G., M. Ohman, M. Picheral, S. Gasparini y L. Stemann. (2010). Digital zooplankton image analysis using the zooscan integrated system. *Journal of Plankton Research* 32(3): 285–303.

Greenlaw, C. (1979). Acoustical of zooplankton. *Limnological Oceanography* 24(2): 226–42.

Gutiérrez-Salcedo, J. (2011). Estructura vertical del zooplancton oceánico del mar Caribe colombiano. Tesis de Maestría en Ciencias Biología. Universidad Nacional de Colombia-IVEMAR. Santa Marta. 124 pp.

Hays, G., A. Richardson y C. Robinson. (2005). Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology & Evolution* 20(6): 337–44.

Herrera, L., G. Febres-Ortega. (1975). Kinematics of the wind-generated velocity field in the surface waters off eastern Venezuela. *Caribbean Sea Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente* 14(2):165-186.

Hillebrand, H., C. Dürselen, D. Kirschtel, U. Pollinger y T. Zohary. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* 35(2): 403–24.

Holbrook, B., T. Hrabik, D. Branstrator, D. Yule y J. Stockwell. (2006). Hydroacoustic estimation of zooplankton biomass at two shoal complexes in the apostle islands region of lake superior beth. *International Review of Research in Open and Distance Learning* 32: 680–96.

Holliday, D. V., y R. E. Pieper.(1980). Volume scattering strengths and zooplankton distributions at acoustic frequencies between 0.5 and 3MHz. *The Journal of the Acoustical*

*Society of America* 67:135-146.

Holliday, D. V., R. E. Pieper y G. S. Kleppel. (1989). Determination of zooplankton size and distribution with multifrequency acoustic technology. *ICES Journal of Marine Science* 46(1): 52–61.

Invemar. (2006). Ordenamiento ambiental de la zona costera del departamento del Atlántico. *Informe final componente físico, Barranquilla* 108.

IRI/CPC. (2016). The international Research Institute for Climate and Society. Recuperado el 25 de Mayo de 2013, de [http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/SST\\_table.html](http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/SST_table.html).

Isaaks, E. H. y R. M. Srivastava. (1989). Applied Geostatistics. *Oxford University Press*, New York.

Jaffe, J. S. (2005). Sensing plankton : acoustics and optical imaging. En: *Realtime Observation Systems for Ecosystem Dynamics and Harmful Algal Bloomsg*. Paris, France: UNESCO. Paris. 45 pp.

Jarvis, T., N. Kelly, S. Kawaguchi, E. van Wijk y S. Nicol. (2010). Acoustic characterisation of the broad-scale distribution and abundance of antarctic krill (*Euphausia superba*) off east antarctica (30-80-E) in January-March (2006. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 57(9-10): 916–33.

Javelaud, O. (1986). Sedimentología de la plataforma continental del Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH* 6: 17-39.

Jolly, G. M, y I. Hampton. (1990). A stratif id random transect design for acoustic surveys of fish stocks. *Fisheries Research* 47(1): 1282–91.

- Journel, A. G., y C. J. Huijbregts. (1978). Mining geostatistics. *Academic Press, New York* 600.
- Kirsch, J., G. L. Thomas, y R. Ted-Cooney. (2000). Acoustic estimates of zooplankton distributions in Prince William sound, spring 1996. *Fisheries Research* 47(2-3): 245–60.
- Kristensen, Age., J. Dalen. (1986). Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton. *The Journal of the Acoustical Society of America* 80(2): 601-611.
- Lezama-Ochoa, A., M. Ballón, M. Woillez, D. Grados, X. Irigoien, A. Bertrand. (2011). Spatial patterns and scale-dependent relationships between macrozooplankton and fish in the Bay of Biscay: an acoustic study. *Marine Ecology Progress Series*, 439:151-168.
- Lindgren, J. F., I. Hassellöv y I. Dahllöf. (2013). Analyzing changes in sediment meiofauna communities using the image analysis software zoomage. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 440: 74–80.
- Lund, J. W. G., C. Kipling y E. D. Le Cren. (1958). The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiologia* 11(2): 143-170.
- Mackas, D. L., K. L. Denman y M. R. Abbott. (1985). Plankton patchiness: Biology in the physical vernacular. *Bulletin of Marine Science* 37:652-674.
- Malone, B. J. y D. J. McQueen. (1983). Horizontal patchiness in zooplankton populations in two Ontario kettle lakes. *Hydrobiologia* 99:101-124.
- Manjarrés, L. M., J. Viaña, J. Hernandez, A. Castaño, G. Páez y J. Daza. (2004). Prospección acústico-pesquera y caracterización ambiental de algunos recursos de tipo demersal en el Caribe colombiano. *Intropica* 1(1): 57–61.

- Mann, KH. y J. Lazier. (1996). Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans, Edition: 2nd. Blackwell Science, Cambridge.
- Maravelias, C., D. G. Reid, E. J. Simmonds, J. Haralabous. (1996). Spatial analysis and mapping of acoustic survey data in the presence of high local variability: geostatistical application to North Sea herring (*Clupea harengus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic*. 53:1497-1505.
- Marinovic, B. B., D. A. Croll, N. Gong, S. R. Benson y F. P. Chavez. (2002). Effects of the 1997-1999 el niño and la niña events on zooplankton abundance and euphausiid community composition within the monterey bay coastal upwelling system. *Progress in Oceanography* 54(1-4): 265–77.
- Martin, L., T. Stanton, P. Wiebe y J. Lynch. (1996). Acoustic classification of zooplankton. *The Journal of the Acoustical Society of America* 53: 217–24.
- Martínez-Barragán, M., A. Franco-Herrera, J. Medina-Calderón y A. Santos-Martínez. (2009). La comunidad de copépodos en las islas de providencia y santa catalina (Caribe colombiano) durante el período lluvioso (octubre) 2005. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 38(1): 85–103.
- Matheron, G., (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology* 58:1246–1266.
- McQuinn, L., M. Dion y J. Pierre. (2013). The acoustic multifrequency classification of two sympatric euphausiid species (*Meganctiphanes norvegica* and *Thysanoessa raschii*), with empirical and SDWBA Model Validation. *ICES Journal of Marine Science* 70(3): 636–49.
- Medellín-Mora, J y O. Martínez. (2010). Distribución del mesozooplankton en aguas oceánicas

del Mar Caribe Colombiano durante mayo y junio de 2008. Biodiversidad del Margen Continental del Caribe Colombiano Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - Invemar, Programa de Biodiversidad y Ecosistemas Marinos.

Medellín-Mora, J. y R. Escribano. (2013). Análisis automático de zooplancton utilizando imágenes digitalizadas: estado del conocimiento y perspectivas en latinoamérica. *Latin American Journal of Aquatic Research* 41(1): 29–41.

Medellín-Mora, J. y G. Navas. (2010). Listado taxonómico de copépodos (arthropoda : crustacea) del mar Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 39(2): 265–306.

Megard, R. O., M. M. Kuns, M. C. Whiteside y J. A. Downing. (1997). Spatial distributions of zooplankton during coastal upwelling in western Lake Superior. *Limnology and Oceanography* 42:827–840.

Mitson, R. B., Y. Sirmard y C. Goss. (1996). Use of a two-frequency algorithm to determine size and abundance of plankton in three widely spaced locations. *ICES Journal of Marine Science* 53:209-215.

Misund, O. y A. Aglen. (1992). Swimming behaviour of fish in the north sea during acoustic surveying and pelagic sampling trawling. *International Council for the Exploration of the Sea* 49(1): 325–34.

Moline, M., T. Frazer, R. Chant, S. Glenn, C. Jacoby, J. Reinfelder, J. Yost, M. Zhou y O. Schofield. (2008). Biological responses in a dynamic buoyant river plume. *Oceanography* 21(4):70-89.

- Montero, I. (1979). aplicación del análisis de imagen de crecimiento del zooplancton. *Vector Plus* 2(15): 59–67.
- Mullin, M. M. (1993). Webs and scales: physical and ecological processes in marine fish recruitment. Washington Sea Grant. *University of Washington Press* 135.
- Napp, J. M., P. B. Ortner, R. E. Pieper y D. V. Holliday. (1993). Biovolume-size spectra of epipelagic zooplankton using a multi-frequency acoustic profiling system (MAPS). *Deep-Sea Research* 40(3):445-459.
- Nichols, J. y A. Thompson. (1991). Mesh selection of copepodite and nauplius stages of four calanoid copepod species. *Journal of Plankton Research* 13(3): 661-671.
- NOAA. (2016). [http:// www.cpc.ncep.noaa.gov/ products/ analysis\\_monitoring/ ensostuff/ ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml).
- Nogueira, E., G. González-Nuevo, A. Bode, M. Varela, X. Moran y L. Valdes. (2004). Comparison of biomass and size spectra derived from optical plankton counter data and net samples: application to the assessment of mesoplankton distribution along the northwest and north iberian shelf. *ICES Journal of Marine Science* 61(4): 508–17.
- Noji, T. y K. Estep. (1991). Image analysis of faecal material grazed upon by three species of copepods: evidence for coprorhexy, coprophagy and coprochaly. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 71(1): 465–80.
- O'Brien, J. W., C. Buchanan y J. F. Haney. (1979). Arctic zooplankton community structure : exceptions to some general rules. *Arctic* 32(3): 237–47.
- Orlowski, A. (2001). Behavioural and physical effect on acoustic measurements of baltic fish

within a diel cycle. *ICES Journal of Marine Science* 58(6): 1174–83.

Ortner, P., S. Cummings y P. Aftring. (1979). Silhouette photography of oceanic zooplankton.

*Nature* 277(4): 50–51.

Paramo J., L. Guillot, S. Benavides. A. Rodríguez y C. Sanchez. (2009). Aspectos poblacionales

y ecológicos de peces demersales de la zona norte del Caribe colombiano en relación con el hábitat: una herramienta para identificar Áreas Marinas Protegidas (AMPs) para el manejo pesquero. *Caldasia* 31:123–144.

Paramo, J., S. Bertrand, H. Villalobos y F. Gerlotto. (2007). A three-dimensional approach to

school typology using vertical scanning multibeam sonar. *Fisheries Research* 84(2): 171–79.

Paramo, J., R. A. Quiñones, A. Ramirez y R. Wiff. (2003). Relationship between abundance of

small pelagic fishes and environmental factors in the Colombian Caribbean sea: an analysis based on hydroacoustic information. *Aquatic Living Resources* 16(3): 239–45.

Paramo, J. y R. Roa. (2003). Acoustic-Geostatistical assessment and habitat-abundance relations

of small pelagic fish from the Colombian Caribbean. *Fisheries Research* 60(2-3): 309–19.

Paramo, J. y J. Viaña. (2002). Evaluación hidroacústica del machuelo (*Opisthonema oglinum*) y

la sardina (*Sardinella aurita*), en la zona norte del Caribe colombiano, durante julio-agosto y diciembre de 1997. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 31: 33–52.

Parsons, T. R., Y. Maita, y C. M. Lalli. (1984). A manual of chemical and biological methods for

seawater analysis. New York: Pergamon Press.

Petitgas, P. (1993). Geostatistics for fish stock assessments: a review and an acoustic application.

*ICES of Journal Marine Science* 50: 285-298.

Petitgas, P. y T. Lafont. (1997). EVA 2: Estimation variance. Version 2: a geostatistical software on Windows 95 for the precision of fish stock assessment surveys. ICES CM-1997/Y:22.

Petitgas, P. y A. Prampart. (1995). EVA: Estimation variance: a geostatistical software for structure characterization and variance computation, *Editions Orstom. logOrstom*, Paris.

Pieper, R. E., D. V. Holliday y G. S. Kleppel. (1990). Quantitative zooplankton distributions from multifrequency acoustics. *Journal of Plankton Research* 12(2):433-441.

Pinel-Alloul, B. y D. Pont. (1991). Spatial distribution patterns in freshwater macrozooplankton: variation with scale. *Canadian Journal of Zoology* 69:1557-1570.

Pollom, R. A. y G. A. Rose. (2015). Size-Based hydroacoustic measures of within-season fish abundance in a boreal freshwater ecosystem. *PLoS ONE* 10(4): 1-13.

Postel, L., H. Fock y W. Hagen. (2000). Biomass and abundance. En: *ICES Zooplankton Methodology Manual*, Academic Press, London, pp 83-192.

Quintana, X. D. (2002). Measuring the intensity of disturbance in zooplankton communities of Mediterranean salt marshes using multivariate analysis. *Journal of Plankton Research* 24(3): 255- 265.

Rae, K. M. (1952). Continuous plankton records: explanation and methods, 1946-1949. *Hull Bull Marine Ecology Progress Series* 3:135-155.

Ragnarsson-Stabo, H., T. Vrede, T. Axenrot, A. Sandström. (2014). Can multi-frequency acoustics improve the monitoring of large zooplankton in large temperate lakes?. *Aquatic*

*Ecosystem Health & Management*, 17(4): 374-381.

- Ramírez-Barón, J. S., A. Franco-Herrera, L. M. García-Hoyos y D. A. López. (2010). La comunidad fitoplanctónica durante eventos de surgencia y no surgencia, en la zona costera del Departamento del Magdalena, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 39(2):233-263.
- Ramírez, G. (1983). Características fisicoquímicas de la bahía de Santa Marta (Agosto, 1980 – Julio, 1981). *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betún* 13:111-121.
- Ramírez, G. (1990). Distribución de nutrientes inorgánicos en las aguas costeras de la región de Santa Marta, Caribe colombiano. En: SEMINARIO NACIONAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DEL MAR. (7º: 1990: Bogotá): *Memorias VII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar. Comisión Colombiana de Oceanografía. Bogotá* 1:244-254.
- Restrepo, J. D., P. Zapata, J. M. Díaz, J. Garzón-Ferreira y C. B. García. (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change* 50(1-2): 33-49.
- Rivoirard, J., J. Simmonds, K. G. Foote, P. Fernandes y N. Bez. (2000). Geostatistic for Estimating Fish Abundance. *Blackwell Science Ltd* 1:205.
- Rodríguez, J. (1994). Some comments on the size-based structural analysis of the pelagic ecosystem. *Scientia Marina(Barcelona)* 58(2): 1–10.
- Rodríguez, J. (2005). “La Estructura de tamaños del plancton: un tópico interdisciplinar y Margalefiano. *Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*

14(1): 40–51.

- Rodríguez-Sánchez, V., L. Encina, A. Rodríguez-Ruiz, R. Sánchez-Carmona, A. Monteoliva Herreras, G. Alonso de Santocildes y A. Monná Cano. (2012). La hidroacústica horizontal utilizada en la gestión de las comunidades de peces : en busca de la firma acústica de barbos y carpas. *Chronica nature* 2: 32-40.
- Rolke, M. y J. Lenz. (1984). Size structure analysis of zooplankton samples by means of an automated image analyzing system. *Journal of Plankton Research* 6(4): 637–45.
- Rossi, R. E., D. J. Mulla, A. G. Journel y E. H. Franz. (1992). Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62(2): 277-314.
- Rueda-Roa, D. (2012). On the Spatial and temporal variability of upwelling in the southern Caribbean sea and its influence on the ecology of phytoplankton and of the Spanish sardine (*Sardinella aurita*). *University of South Florida, PhD dissertation* 153.
- Rueda-Roa, D. y F. Muller-Karger. (2013). The southern Caribbean upwelling system: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns. *Deep-Sea Research* 78:102-114.
- Ruiz-Ochoa, M., E. Beier, G. Bernal y E. D. Barton. (2012). Sea surface temperature variability in the Colombian Basin. *Caribbean Sea Deep-Sea Research* 64:43-53.
- Sato, K., K. Matsuno, D. Arima, Y. Abe y A. Yamaguchi. (2015). Spatial and temporal changes in zooplankton abundance, biovolume, and size spectra in the neighboring waters of Japan: analyses using an optical plankton counter. *Zoological Studies*, 54(1):18.
- Sawada, K., T. Mukai, Y. Fukuda, T. Matsuura. (2016). Comparison of zooplankton density

- estimated by acoustic inversion method and net sampling. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4): 3243-3243.
- Simard, Y. y D. Lavoie. (1999). The rich krill aggregation of the saguenay-st. lawrence marine park: hydroacoustic and geostatistical biomass estimates, structure, variability, and significance for whales. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56(7): 1182–97.
- Simmonds, E. J., N. J. Williamson, F. Gerlotto y A. Aglen. (1992). Acoustic survey design and analysis procedure: A comprehensive review of current practice. *ICES Cooperative Research Report: Rapport des Recherches Collectives* 187: 112.
- Simmonds, E. J., y R. J. Fryer. (1996). ¿Which are better, random or systematic acoustic surveys?. A simulation using North Sea herring as a example. *ICES Journal of Marine Science* 53: 39-50.
- Smith, S. J. (1990). Use of statistical models for the estimation of abundance from ground fish trawl survey data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic* 47: 894-903.
- Stanton, T., P. Wiebe, D. Chu, M. Benfield, L. Scanlon, L. Martin y R. Eastwood. (1994). On acoustic estimates of zooplankton biomass. *ICES Journal of Marine Science* 51(1): 505–12.
- Stanton, T., D. Chu y P. H. Wiebe. (1996). Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups. *ICES Journal of Marine Science* 53(2): 289–95.
- Stanton, T. (2012). 30 years of advances in active bioacoustics: A personal perspective. *Methods in Oceanography* 1(2): 49-77.
- Sutcliffe, W. H. (1957). An improved method for the determination of preserved plankton

volumes. *Limnological Oceanography* 2(3): 295–96.

Szczucka, J, E. Trudnowska, L. Hoppe y K. Blachowiak-Samolyk. (2016). Comparison of acoustical and optical zooplankton measurements using an acoustic scattering model: a case study from the arctic frontal zone. *Polish Polar Research* 37(1): 67–88.

Thiebaut, M. L. y L. M. Dickie. (1993). Structure of the body-size spectrum of the biomass in aquatic ecosystems: a consequence of allometry in predator–prey interactions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 50(6): 1308–17.

Thurman, H. (1996). *Essentials of Oceanography*. Prentice may, New Jersey, EUA.

Trevorrow, M. V. (2005). The use of moored inverted echo sounders for monitoring meso-zooplankton and fish near the ocean surface. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62(5): 1004-1018.

Uye, S. (1982). Length-Weight relationships of important zooplankton from the inland sea of Japan. *Journal of the Oceanographical Society of Japan* 38(3): 149–58.

Vadrucci, M. R., M. Cabrini y A. Basset. (2007). Biovolume determination of phytoplankton guilds in transitional water ecosystems of Mediterranean ecoregion. *Transitional Waters Bulletin* 1(2): 83–102.

Valencia, B., y A. Giraldo. (2012). Structure of hyperiid amphipod assemblages on isla gorgona, eastern tropical pacific off Colombia. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 92(7): 1489–99.

Viaña, J., E. Manjarrés, L. Rodriguez y G. Galvis. (1998). Analisis de los

resultados de las campañas acústicas de evaluación de peces pelágicos pequeños en el Caribe colombiano. INPA-VECEP/UE/PELAG/97-98. *Boletín Científico INPA 6: 95-108.*

Vives, F. (1985). Sobre las poblaciones del zooplancton del Atlántico Africano, *Instituto de investigaciones Pesqueras de Barcelona 449 - 470.*

Wanzenböck, J., T. Meher, M. Schulz, H. Gassner y I. Winfield. (2003). Quality assurance of hydroacoustic surveys: the repeatability of fish-abundance and biomass estimates in lakes within and between hydroacoustic systems. *ICES Journal of Marine Science 60: 486-492.*

Warren, J. D., T. H. Leach y C. E. Williamson. (2016). Measuring the distribution, abundance, and

biovolume of zooplankton in an oligotrophic freshwater lake with a 710 kHz scientific echosounder. *Limnology and Oceanography: Methods, 14(4):231-244.*

Wheeland, L. J., G. Rose. (2016). Acoustic measures of lake community size spectra. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 73(4):557-564.*

Wiebe, P. H., D. G. Mountain, T. K. Stanton, C. H. Greene, G. Lough, S. Kaartvedt, y N. Copley. (1996). Acoustical study of the spatial distribution of plankton on Georges Bank and the relationship between volume backscattering strength and the taxonomic composition of the plankton. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 43(7):1971-(2001).*

Williams, R., y D. B. Robins. (1982). Effects of preservation on wet weight, dry weight, nitrogen and carbon contents of *Calanus helgolandicus* (Crustacea: Copepoda). *Marine Biology*

71(3): 271–81.

Wilson, S. G., T. Pauly y M. G. Meekan. (2002). Distribution of zooplankton inferred from hydroacoustic backscatter data in coastal waters off ningaloo reef, western australia. *Marine and Freshwater Research* 53(6): 1005–15.

Zhou, M. (2006). What determines the slope of a plankton biomass spectrum?. *Journal of Plankton Research* 28(5):437-448.

Zhou, M. y M. E. Huntley. (1997). Population dynamics theory of plankton based on biomass spectra. *Marine Ecology Progress Series* 159(1): 61–73.

Zhou, M., Y. Zhu, S. Putnam y J. Peterson. (2001). Mesoscale variability of physical and biological fields in Southeastern Lake Superior. *Limnology and Oceanography* 46:679-688.