

Evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.

Freiman Ayala Rivera.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Santa Marta

2020

Evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.

Freiman Ayala Rivera.

Trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director:

Fanny Matilde Pinzón Candelario.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Santa Marta

2020

Dedicado a:

Principalmente a Dios

Y a mis padres Elda Isabel y Andrés

Agradecimientos

Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, y a la Coordinación de Servicios Científicos CSC por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD y a su programa de Ingeniería Ambiental.

A la directora de Tesis Fanny Matilde Pinzón Candelario, por su apoyo, dedicación y orientación en la ejecución de este trabajo.

A mi jefe Julián Mauricio Betancourt por la colaboración, interés, apoyo y oportunidad para que desarrollar este trabajo.

A mis compañeros y grandes amigos:

Héctor Pertuz: Por su tiempo, apoyo y asesoría durante el desarrollo de este trabajo

Lina Ramos: Por sus valiosos aportes, sugerencias y revisiones para darle forma al documento.

Juan Carlos Márquez: Por su tiempo y su interés en ayudarme a realizar un excelente trabajo, por la orientación en la parte estadística.

Yoselin Nieto: por su tiempo, revisión y aportes al documento

A las empresas SHELL, PETROBRAS y GEOCOL, por el permiso de autorización para el uso de los datos.

A mis familiares, amigos y compañeros de trabajo que de alguna u otra forma me estuvieron apoyando y motivando durante el desarrollo de este trabajo.

Resumen analítico especializado (RAE)	
Título	Evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.
Modalidad de Trabajo de grado	Proyecto de investigación
Línea de investigación	Gestión Ambiental
Autor	Freiman Ayala Rivera
Institución	Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Fecha	18 de octubre de 2019
Palabras claves	Masas de agua, Calidad del agua, ciclos biogeoquímicos, nutrientes inorgánicos, solidos suspendidos totales, hidrocarburos.
Descripción.	Este documento presenta los resultados del trabajo de grado realizado en la modalidad de Proyecto de investigación, bajo la dirección de la Ingeniera Fanny Matilde Pinzón Candelario., inscrito en la línea de investigación de Gestión Ambiental de la ECAPMA.
Fuentes	<p>Para el desarrollo de la investigación se utilizaron las siguientes fuentes principales:</p> <p>Chester, R., y Jickells, T. (2012). <i>Marine Geochemistry</i>. Third Edition. Londres: Blackwell Publishing Ltd. Pp 438.</p> <p>MADS (2015). Decreto 1076 de 2015. "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible". Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. 654 p. Republica de Colombia. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/decretos</p> <p>Botello, A., Rendón Von Osten, J., Gold-Bouchot, G., y Agraz-Hernández, C. (2005). <i>Golfo de México, contaminación e impacto ambiental : diagnóstico y tendencias</i>. 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.</p> <p>Cifuentes, J. L., Torres, M. D., y Frías M, M. (1997). <i>El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química</i>. Obtenido de Fondo de cultura economica. México, D.F.170 pp.: http://www.bionica.info/biblioteca/Cifuentes1997b.pdf</p> <p>Vivas-Aguas, L. J. y S. M. Navarrete-Ramírez. (2014). <i>Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPFF). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)</i>. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 69, Santa Marta. 32 p.</p>

<p>Contenidos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Portada • RAE (Resumen Analítico Especializado) • Índice general • Índice de tablas y figuras • Introducción • Justificación • Definición del problema • Objetivos • Marco Teórico • Marco normativo • Aspectos metodológicos • Resultados y análisis • Conclusiones • Recomendaciones • Referencias bibliográficas • Anexos
<p>Metodología</p>	<p>Se desarrolló un proyecto de investigación de tipo cuantitativo, definiendo un conjunto de procesos secuenciales y probatorios (Hernández, et al. 2010, p.4); donde se emplearon métodos estadísticos para el análisis y cuantificación de un número limitado de variables fisicoquímicas de calidad del agua, que se compararon con Límites Máximos Permisibles (LMP) y criterios de calidad para evaluar el estado de la calidad del agua en ambientes oceánico, cuyos resultados a nivel superficial se interpretaron empleando un Índice de Calidad Ambiental de Aguas Marinas con fines de preservación de flora y fauna (ICAM_{PPF}).</p> <p>Esta investigación incluyó diferentes alcances, iniciando por el alcance exploratorio cuyo objetivo fue “examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, de igual manera presento un alcance descriptivo, el cual especifico las propiedades y características de un grupo limitado de variables, sometidas a un análisis estadístico. Asimismo, se explicaron, cuantificaron y evaluaron el grado de asociación entre dos o más variables que corresponde a un alcance correlacional; y finalmente se enfocó en el alcance explicativo, cuyo interés se centró en “explicar porque ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables” (Hernández, et al. 2003, p.84).</p> <p>En cuanto las fases del proyecto se inició con una fase diagnostico donde se realizó una revisión bibliográfica, se seleccionó un área oceánica y unas variables de estudio, al igual que permisos para el uso de datos; se continuo con una fase de investigación que incluyo un análisis preliminar de los datos, una comparación de las variables con la normatividad aplicable y análisis estadísticos de la información; finalmente se realizó una fase de análisis de información y resultados que concluyo con la escritura del documento.</p>

<p>Conclusiones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La concentración de variables in situ presentó características propias de ambientes oceánicos, con altos registros de transparencia y baja concentración de turbidez. La mayor concentración de oxígeno disuelto se determinó en la masa de agua superficial y la masa de agua profunda del caribe, disminuyendo a su mínima concentración en las masas de aguas intermedias, llegando incluso a valores por debajo de los criterios de calidad para la preservación de la vida acuática ($4,00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ocasionada principalmente por procesos de respiración y degradación de materia orgánica; rasgos característicos en la mayoría de los océanos. Por su parte la Salinidad presento mayor distribución de los datos en las masas de aguas superficiales, disminuyendo su concentración con la profundidad, para mantener valores constantes en la masa de Agua Profunda del Caribe (APC). El pH se mantuvo en un rango típico para aguas oceánicas, conservando sus características de alcalinidad debido principalmente al equilibrio entre los componentes del sistema de carbonatos y la absorción del dióxido de carbono. • Los nutrientes inorgánicos Nitratos, Ortofosfatos y Silicatos, presentaron una tendencia de aumento con relación a la profundidad creando una zona de sustento o soporte en los niveles profundos de la columna de agua, que a través de la dinámica oceánica que incluye las corrientes marinas, patrones de vientos alisios y procesos de surgencia, enriquecen las zonas superficiales del océano donde se desarrolla en mayor parte la vida acuática, derivada de procesos como la fotosíntesis y por consiguiente la productividad biológica. • La concentración de los contaminantes orgánicos evaluados (Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos) para la mayoría de las estaciones se encontró por debajo del criterio de calidad establecido por la UNESCO (10 ug/L) para definir aguas contaminadas por petróleo sólo en las estaciones E02 y E07 se registraron valores por encima de este criterio. • La aplicación del Índice de Calidad Ambiental Marina para Preservación de Flora y Fauna ICAMPFF determino una calidad del agua adecuada en el 88% de las estaciones. Los criterios de calidad inadecuado y aceptable que presentó el índice corresponden a estaciones donde los contaminantes orgánicos y los nutrientes sobrepasan los criterios de calidad para la preservación de la flora y fauna.

Referencias bibliográficas	<p>(Acosta y Franco-Zárate, 2005) (Acuña, Vargas, Gómez y García, 2004, p.44) (Andrade, 2015, p.32) (Balzarini et al., 2008) (Bernal, Poveda, Roldán y Andrade, 2006, p.196) (Betanzos, Capetillo, Lopeztequi y Martínez, 2013, p.25) (Bonilla et al., 2003) (Botello, Rendón, Gold y Agraz, 2005, p.264) (Castellanos, Lombana y Ortiz, 2017, p.91) (Chester y Jickells, 2012, p.128) (Cifuentes, Torres y Frías, 1997) (Diersing, 2009, p.1) (Emery, 2003, p.1650). (Emery y Meincke, 1986, p.385) (Garay, 2004) (Giraldo, 1994, p.21) (Hernández y Joyce, 2000, p.3498) (Hernández, Zirino, Marinone, Canino, y Galindo, 2003, p.498) (INVEMAR, 2013, p.50) (INVEMAR, 2016, p.97) (INVEMAR, 2017, p.40) (Jean-François, 2004, p.37) (Lozano, Medellín, y Navas, 2010, p.64) (MADS, 2010, p.4) (Mann y Lazier, 2006, p.3) (ONU, 2016) (Posada et al., 2012, p.43) (Ricaurte et al., 2017, p.35) (Silva, 2006, p.41) (UNESCO, 1976) (URS Holdings, 2005, p5-3) (Valdéz y Ortlieb, 2001) (Vivas-Aguas, 2014, p.10) (Zirino et al., 1986, p.118)</p>

Tabla de Contenidos

1.	Introducción	1
2.	Planteamiento del problema.....	3
3.	Justificación	5
4.	Objetivos.....	7
4.1.	Objetivo general.....	7
4.2.	Objetivos específicos	7
5.	Marco teórico.....	8
5.1.	Aguas oceánicas.....	8
5.2.	Calidad del agua.....	8
5.3.	Masas de agua en el Caribe Colombiano.....	8
5.4.	Variables In situ	10
	Transparencia y turbidez.....	10
	Temperatura.....	11
	Oxígeno Disuelto.....	11
	Salinidad.....	12
	pH.....	13
5.5.	Ciclos biogeoquímicos de los nutrientes.....	15
	Ciclo del Nitrógeno.....	15
	Ciclo del fósforo.....	17
	Ciclo del silicio.....	17
5.6.	Sólidos Suspendidos Totales SST.....	18
5.7.	Hidrocarburos del Petróleo, Disueltos y Dispersos - HPDD.....	20
5.8.	Índice de Calidad Ambiental de Aguas Marinas con fines de preservación de flora y fauna (ICAM _{PFF}).....	22
6.	Marco Normativo.....	24
7.	Metodología.....	25
7.1.	Descripción del área de estudio	25
7.1.1.	Oceanografía y Clima	26
7.2.	Tipo de estudio.....	27
7.3.	Alcance del proyecto.....	28
7.4.	Fases del proyecto.....	29
7.5.	Fuentes de Información.....	30
7.5.1.	Fuente primaria.....	30
7.5.2.	Fuentes secundarias.....	31
7.6.	Población objeto.....	31
7.7.	Muestra.....	31
7.7.1.	Selección de área oceánica, estaciones y variables de estudio.....	32
7.1.	Fase de campo.....	34
7.2.	Laboratorio.....	35
7.3.	Manejo de la Información.....	37
8.	Resultados y Análisis.....	38
8.1.	Análisis estadístico comparación entre masas de agua.....	38
8.2.	Comparación de las variables con la normatividad aplicable.....	39
8.3.	Descripción de las masas de agua.....	40

8.4.	Parámetros In situ	43
8.4.1.	Transparencia y turbidez.....	43
8.4.2.	Temperatura	45
8.4.3.	Oxígeno Disuelto	47
8.4.4.	Salinidad	49
8.4.5.	pH.....	50
8.5.	Nutrientes Inorgánicos.....	52
8.5.1.	Nitrato N-NO ₃	52
8.5.2.	Ortofosfato (PO ₄)	54
8.5.3.	Silicato (SiSO ₂)	56
8.6.	Solidos Suspendidos Totales (SST).....	58
8.7.	Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD).....	60
8.8.	Índice de Calidad Ambiental de Aguas Marinas con fines de preservación de flora y fauna (ICAM _{PFF}).....	61
9.	Conclusiones	64
10.	Recomendaciones	67
11.	Bibliografía	69
12.	Anexos	1

Lista de tablas

Tabla 5-1. Escala de valoración del Índice de Calidad de Aguas Marinas ICAM _{PFF} (Vivas-Aguas, 2014)	23
Tabla 5-2. Factor de ponderación de las variables que conforman el ICAM _{PFF}	23
Tabla 6-1. Relación de normatividad nacional y valores de referencia a nivel internacional	24
Tabla 7-1. Diagrama de Gantt. Fases de ejecución del proyecto.....	29
Tabla 7-2. Descripción de proyectos y números de expedientes del ANLA	31
Tabla 7-3. Identificación de estaciones de estudio.	33
Tabla 7-4. Relación de variables y métodos analíticos empleados en la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira	36
Tabla 8-1. Análisis de varianza Kruskal Wallis (no paramétrico) para la comparación entre masas de agua. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las fases ($p < 0,05$). A<B<C.....	39
Tabla 8-3. Normas de calidad del agua para preservación de la vida acuática en ambientes marinos y LMP.	40

Lista de figuras

Figura 5.1. Representación simplificada del ciclo del nitrógeno (Chester y Jickell, 2012)	16
Figura 7.1. Localización de área de estudio y estaciones de muestreo.	25
Figura 7.1. Set de botellas Niskin acopladas a roseta oceanográfica.....	35
Figura 8.1. Diagrama T-S Para clasificación de las masas de agua.....	41
Figura 8.2. Variación espacial de la transparencia en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.	43
Figura 8.3. Valores promedio de temperatura registrado en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT)	45
Figura 8.4. Valores promedio de Oxígeno disuelto registrado en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT)	47
Figura 8.5. Valores promedio de Salinidad registrado en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT)	49
Figura 8.6. Valores promedio de pH registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).....	50
Figura 8.7. Valores promedio de Nitrato registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).....	52
Figura 8.8 Valores promedio de Ortofosfato registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).	54
Figura 8.9 Valores promedio de Silicato registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).....	56
Figura 8.10 Valores promedio de SST registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).....	58
Figura 8.11. Valores promedio de HPDD registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).....	60
Figura 8.12 Calidad del agua en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC), en el departamento de La Guajira, evaluadas con el ICAM _{PFF}	61

1. Introducción

De acuerdo con el Programa Nacional de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2016). “Los océanos del mundo, su temperatura, composición química, corrientes y vida son el motor de los sistemas globales que hacen que la Tierra sea un lugar habitable para los seres humanos. Los océanos también absorben alrededor del 30 por ciento del dióxido de carbono generado por las actividades humanas y se ha registrado un 26 por ciento de aumento en la acidificación de los mares desde el inicio de la revolución industrial” (PNUD, 2016).

En Colombia, el interés por buscar nuevas reservas de hidrocarburos ha trasladado a los inversionistas del sector Exploración y Producción de hidrocarburos (E&P), a buscar los recursos disponibles en el mar, propiciado también por su escasez en la zona continental (Acosta y Franco-Zárate, 2005). Es así como, la exploración de hidrocarburos costa afuera (offshore), la cual incluye aguas profundas (300 a 1000 m) y ultra profundas (>1000 m) desde el 2012 ha aumentado considerablemente.

Para Colombia, se dio un avance importante de reglamentación en diciembre de 2014, con la promoción de las explotaciones offshore, al darles el carácter de zonas francas (Decreto 2682 de 2014, modificado por el Decreto 2129 de 2015), con el beneficio tributario resultante para las empresas interesadas. (Castellanos, Lombana y Ortiz, 2017, p.91)

Motivo por el cual se prevé que las empresas del sector E&P, aumenten sus operaciones de exploración y producción costa afuera en los próximos años.

En el Caribe colombiano y particularmente en el departamento de La Guajira una de las zonas con mayor proyección para la extracción de hidrocarburos, se han adelantado importantes estudios sobre la calidad del agua en ambientes oceánicos. El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (INVEMAR), en el marco de estos proyectos, ha desarrollado cruceros de investigación oceanográfica en los diferentes espacios marinos que han sido adjudicados por las autoridades ambientales con fines de exploración y producción de hidrocarburos. Por tal razón, existe un importante archivo de información que es útil como base para evaluar la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento y que posteriormente puede servir como instrumento para las autoridades ambientales, las empresas y comunidad en general.

Las investigaciones sobre calidad de aguas con fines de preservación de flora y fauna incluyen las mediciones de variables in situ (Temperatura, Oxígeno disuelto, Salinidad, pH) determinación de nutrientes inorgánicos (Nitrato -N-NO₃, Ortofosfato - PO₄, Silicato - SiO₃), Sólidos Suspendedos Totales (SST) e Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD).

2. Planteamiento del problema

Los océanos son ecosistemas esenciales para mantener la vida en el planeta, y así mismo se ha documentado que son sumideros de carbono y reguladores del clima (Mercado, 2002; Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Los países caribeños dependen fuertemente de sus recursos marinos y el desarrollo sostenible de estos recursos es un asunto decisivo para el desarrollo económico a largo plazo de la región. La degradación y cambios de la calidad del agua, produce a grandes escalas cambios en la productividad o diversidad, provocando pérdida de estabilidad biológica, disminución de la abundancia de especies importantes o explotables comercialmente (Botello, Rendón, Gold y Agraz, 2005). Sin embargo, más allá del daño ecológico y la amenaza a la salud humana, hay una pérdida seria de la calidad de vida de los habitantes (UNEP, 2000, Como se citó en Botello et al., 2005).

"La degradación de la calidad de agua puede ser causada por alteración en las características del agua de mar que mantiene y soporta la biota marina existente, así como sus procesos ecológicos "(Botello et al., 2005); Asimismo, "los parámetros de calidad del agua de mar varían con las mareas, los cambios estacionales y eventos meteorológicos, incluyendo a los organismos que se han adaptado a un intervalo específico de parámetros físico-químicos y condiciones oceanográficas" (Margalef, 1980. Como se citó en Botello et al., 2005).

Consecuentemente, se considera que el estudio sobre la calidad del agua es información útil para evaluar los cambios que se presentan en las condiciones naturales del medio en variables fisicoquímicas como Nutrientes Inorgánicos, Oxígeno disuelto,

Sólidos Suspendidos Totales, temperatura y pH, de igual modo, el análisis de contaminantes orgánicos; dado que, algunas de las sustancias consideradas como contaminantes, como los metales pesados y los hidrocarburos de petróleo, se producen naturalmente en el mar y las introducciones humanas aumentan las concentraciones naturales (Lalli y Parsons, 1993).

Las aguas oceánicas del departamento de La Guajira son una zona de interés nacional gracias a su ubicación geográfica y su aporte al desarrollo económico del país. Sin embargo, el desarrollo de proyectos de exploración de hidrocarburos en la zona, vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, las basuras, la actividad marítima y portuaria, (Garay, 2004) sitúa en un riesgo la dinámica del ecosistema acuático; Por lo tanto, es necesario conocer las características fisicoquímicas y el estado en que se encuentra la calidad del agua en los ambientes oceánicos del departamento como ecosistema esencial para el desarrollo de la vida. De igual modo, esta información servirá de soporte investigativo para la comunidad académica, las empresas del sector y las autoridades ambientales, en la toma de decisiones acertadas para el manejo integrado y adecuado de los recursos marinos. Esta investigación intenta aportar a la solución de la siguiente pregunta:

¿Cuál es el estado de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira?

3. Justificación

Con el auge que han tenido los proyectos de exploración de hidrocarburos en el país, se ha compilado un buen acervo informativo, sobre calidad de aguas. Todo esto como requisito para la adjudicación de licencias ambientales de exploración y producción de hidrocarburos. Por lo tanto, se cuenta con información suficiente para ser analizada en conjunto y presentar en detalle información actualizada sobre el estado de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento.

Es importante evaluar los cambios presentados en las características fisicoquímicas del agua ya sea de origen natural o antropogénico teniendo en cuenta que cualquier cambio en las condiciones naturales del medio pueden influir en procesos como la migración de especies (Cifuentes, Torres y Frías, 1997, p.76), en la productividad primaria y por ende en el desarrollo de la vida acuática en ambientes oceánicos, afectando actividades como la pesca y por tanto, el sustento económico de comunidades que viven de esta actividad.

Esta investigación permite ofrecer información científica como insumo para la definición de Términos de Referencia (TdR) en ambientes oceánicos, no solo para el departamento de La Guajira sino para todas las áreas oceánicas del caribe que corresponden al país y sobre las cuales se vienen otorgando Licencias Ambientales para proyectos de Exploración y Producción (E&P) de hidrocarburos costa afuera.

Conocer y divulgar el estado de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento con fines de preservación de flora y fauna, reviste gran importancia en las definiciones de políticas ambientales para el manejo integral de los recursos marinos y su

importancia dentro de la agenda 2030 relacionada con el objetivo 14 de desarrollo sostenible: “Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible” propuesta por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2016). Adicionalmente servirá de soporte investigativo como línea base para estudios de impacto ambiental, planes de manejo y definición de términos de referencia por autoridades ambientales.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar el estado de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira, Caribe colombiano.

4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las variables *in situ* de las aguas oceánicas del departamento de La Guajira.
- Establecer las concentraciones de nutrientes inorgánicas en las aguas oceánicas en el departamento de La Guajira.
- Establecer las concentraciones de contaminantes orgánicos tales como hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos- HPDD en las aguas oceánicas del departamento de La Guajira.
- Aplicar el Índice de calidad ambiental de aguas marinas ICAMPPF para evaluar el estado de la calidad del agua e interpretar los resultados de acuerdo a las características fisicoquímicas del agua superficial en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.

5. Marco teórico

5.1. Aguas oceánicas

El decreto 3930 de 2010 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en su artículo 3, define las aguas oceánicas como “las comprendidas entre las líneas de base recta y los límites de la zona económica exclusiva, de conformidad con el derecho internacional”(MADS, 2010, p.4).

5.2. Calidad del agua

“El término calidad del agua se utiliza para describir el estado del agua, incluida sus características químicas, físicas y biológicas, generalmente con respecto a su idoneidad para un propósito particular” (Diersing, 2009, p.1). En cuanto a su “estado”, depende tanto de la dinámica del cuerpo de agua, como de la incidencia de procesos naturales y actividades antropogénicas (Chiappone, 2001; Beamonte et al., 2004; Bianucci et al., 2005. Como se cito en Posada et al., 2012, p.43). Para su evaluación se emplean comparaciones con los límites máximos permisibles del conjunto de variables que definen la calidad del agua destinada a un uso en particular.

5.3. Masas de agua en el Caribe Colombiano

Una masa de agua es un volumen de agua de mar relativamente grande originado en un área determinada del océano (su origen) y caracterizada por la uniformidad casi permanente y continua de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que integran un complejo que se distribuye como una unidad durante un largo periodo. (Lozano, Medellín, y Navas, 2010, p.64)

Una de las herramientas empleadas en la clasificación de las masas de agua son los diagramas T-S ideado por el oceanógrafo Helland - Hansen, donde a partir de la relación Temperatura Vs Salinidad, como propiedades conservativas se puede determinar el origen de las masas de agua. La estratificación vertical del agua para el Caribe colombiano está constituida por cinco masas de agua:

- I. **Agua Superficial del Caribe (ASC):** Ubicada hasta una profundidad promedio de 30 m con temperaturas entre 27,0 °C y 28,5 °C y salinidad entre 35,1 y 36,1. (Lozano et al., 2010, p.66)
- II. **Agua Subsuperficial Subtropical (ASS):** De espesor variable y de alta salinidad, que ocupa profundidades no mayores a 150 m. (Lozano-Duque et al., 2010, p.66). Con temperaturas entre 22,0 °C y 23,0° C y salinidades mayores a 37,0 (Hernández y Joyce, 2000, p.3498).
- III. **Agua Central del Atlántico Norte (ACAN):** Localizada entre los 100 y 400 m, es una zona donde la temperatura y salinidad disminuyen (Lozano et al., 2010, p.66). Con valores de temperatura entre 4,0 y 7,0 °C y salinidad entre 35,0 y 36,7. (Emery y Meincke, 1986, p.385) y (Emery, 2003, p.1650).
- IV. **Agua Intermedia Subantártica (AIS):** Se ubica entre 450 y 680 m de profundidad. En la zona intermedia de la costa colombiana alcanza profundidades mayores a 1300 m (Lozano et al., 2010, p.67). Con temperaturas entre 3,0 °C y 9 °C y valores de salinidad entre 34,0 y 35,1 (Emery y Meincke, 1986,p.385) y (Emery, 2003, p.1650).

- V. **Agua Profunda del Caribe (APC):** Es la última capa que se registra con profundidades mayores a 1000 m, presenta temperaturas de 4,0°C y valores de salinidad de 35,0 a 35,2 (Giraldo, 1994, p.21).

5.4. Variables In situ

Transparencia y turbidez. “La turbidez constituye un indicador general de la calidad de las aguas y aunque no ofrece información sobre un contaminante específico” (Lenntech, 2009; Moreira et al., 2009. Como se citó en [Betanzos, Capetillo, Lopeztequi y Martínez, 2013, p.25](#)). Existe una relación estrecha entre la medida de transparencia y los valores de turbidez (como consecuencia de microorganismos, sólidos en suspensión y material orgánico en descomposición), debido al efecto que tiene sobre la penetración de la luz ([INVEMAR, 2016, p.97](#)).

La medida de transparencia del agua es importante biológicamente pues influye en la actividad fotosintética de organismos con pigmentos o simbiontes fotosintéticos. La transparencia disminuye cuando aumentan las poblaciones de bacterias, fitoplancton y otros organismos, o por incremento de los sólidos en suspensión y la materia orgánica en descomposición. ([INVEMAR, 2013, p.50](#))

“Las propiedades ópticas del agua influyen en la temperatura de la capa superficial oceánica y, por tanto, en su interacción con la atmósfera; asimismo, se encuentra directamente relacionada con la profundidad de la zona eufótica” ([Talley et al., 2011](#). Como se citó en [INVEMAR, 2013, p.50](#)) “En aguas naturales, la transparencia oscila entre unos pocos centímetros en ríos muy turbios, hasta 40 m en zonas arrecifales”

(INVEMAR, 2013, p.50). “Normas como la COPANI 24-99 de Panamá, relaciona valores de transparencia mayores a 1,5 metros y de 3,0 NTU en turbidez para la vertiente del Atlántico como requisito para garantizar la vida acuática en ambientes marinos” (URS Holdings, 2005, p5-3). Por su parte, la norma cubana NC-25 (1999) registra valores de turbidez con intervalos de 0 a 5 NTU en aguas marinas, para definirse como de buena calidad para uso pesquero.

Temperatura. Corresponde a una de las variables oceanográficas más utilizadas como indicador ambiental por estar relacionada con aspectos físicos como corrientes marinas, intensidad de los vientos superficiales, dinámica de la capa de mezcla, precipitación e intensidad de la radiación solar, procesos de surgencia y cambios del nivel del mar. (Bernal, Poveda, Roldán y Andrade, 2006, p.196)

“También tiene una profunda influencia en las velocidades a las que avanzan los procesos químicos y biológicos” (Mann y Lazier, 2006, p.3) lo que a su vez influye en la distribución de las especies marinas. Todo lo anterior le otorga a este parámetro especial importancia y relevancia desde los puntos de vista tanto físico y climático, como biológico y ambiental. (Bernal et al., 2006, p.196).

Oxígeno Disuelto. “El oxígeno disuelto es uno de los factores más importantes para el desarrollo y supervivencia de organismos en el medio acuático. La disponibilidad de este gas en el agua depende de varias condiciones como la temperatura y salinidad” (INVEMAR, 2017, p.40).

A su vez, se encuentra influenciada por forzantes físicos y procesos biogeoquímicos que afectan su distribución vertical; como son: la producción y consumo de oxígeno disuelto por parte de organismos acuáticos, el intercambio gaseoso océano-atmósfera, la mezcla vertical entre masas de agua y consumo de oxígeno disuelto por remineralización de la materia orgánica. (Silva, 2006, p.41)

El oxígeno disuelto presenta una concentración mínima en la profundidad intermedia del océano, por lo cual las aguas marinas alrededor de los 1000 metros son anóxicas, es decir que carecen de oxígeno. Esta circunstancia se encuentra estrechamente asociada al ciclo de los nitratos ya que los compuestos orgánicos se descomponen por oxidación, lo que consume el oxígeno disuelto. En consecuencia, la distribución vertical del oxígeno presenta un mínimo a esas profundidades, en tanto que los nitratos alcanzan su máxima concentración. (Jean-François, 2004, p.37)

Por el contrario, “la concentración de oxígeno disuelto en las capas superficiales, dependen sólo de las variaciones en la temperatura del agua y el intercambio gaseoso con la atmósfera” (Jean-François, 2004, p.37).

Salinidad. Es una medida del grado en que el agua en los océanos es salada, y es una función del peso de los sólidos totales disueltos en una cantidad de agua de mar. Los iones principales en el agua de mar, es decir, aquellos que contribuyen significativamente a la salinidad son el Na^+ , Mg^{+2} , Ca^+ , K^+ , Cl^- , y SO_4^{-2} y, aunque el contenido total de sal puede variar, las proporciones relativas de estos constituyentes son casi constantes. (Chester y Jickells, 2012, p.128)

“A partir de innumerables mediciones realizadas en diferentes puntos del océano, se ha podido determinar que 35 partes por mil o simplemente $S=35$ es la salinidad media del agua de mar” (Cifuentes et al., 1997, p.17).

A pesar del hecho de que los elementos principales son más o menos conservadores en el agua de mar, existen condiciones en las que sus relaciones de concentración pueden variar considerablemente, las cuales están asociadas con los estuarios y la influencia de agua dulce, los mares sin litoral, las cuencas anóxicas, la congelación del agua de mar, la precipitación y disolución de minerales carbonatados, el volcanismo submarino, mezcla con salmueras geológicas y evaporación en cuencas aisladas. (Chester y Jickells, 2012, p.129)

Mientras algunos de estos procesos como la escorrentía de agua dulce, la precipitación y la fusión del hielo aportan a la disminución del contenido de sal (S), por el contrario, procesos como la evaporación y la formación de hielo marino, la aumentan (Chester y Jickells, 2012).

“La salinidad interviene directamente sobre las características fisicoquímicas del agua del mar relacionándose con la temperatura, la densidad y el pH, caracteriza las masas de agua oceánicas e influye en la distribución de los seres vivos” (Cifuentes et al., 1997, p.75).

pH. Los valores de pH hacen referencia a la relación entre la concentración de iones hidrógeno (H^+) e hidroxilos (OH^-) que le confiere las características de alcalinidad o de acidez a una solución. El agua oceánica es ligeramente alcalina y su valor de pH está en un rango entre 7,5 y 8,4 y varía en función de la

temperatura; si ésta aumenta, el pH disminuye y tiende a la acidez. (Cifuentes et al., 1997, p.75).

“En ausencia de procesos biológicos, el valor de pH del océano llega a ser de 8.10 ± 0.02 (en la escala de protones totales) independiente de la temperatura” (Zirino et al., 1986, p.118).

Este es el pH obtenido cuando el dióxido de carbono, en forma de gas como ácido carbónico, y los iones carbonato o bicarbonato alcanzan el equilibrio con el CO_2 atmosférico. En general, el pH se parece a la temperatura porque, en la zona eufótica, la radiación solar calienta el agua y la fotosíntesis utiliza el CO_2 simultáneamente para aumentar el pH mediante $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$. (Zirino et al., 1997. Como se citó en Hernández, Zirino, Marinone, Canino, y Galindo, 2003, p.498)

En las aguas profundas, la reacción ocurre en la dirección opuesta. (Hernández et al., 2003, p.498)

“Por otro lado, también puede variar en función de la salinidad, de la presión y de la actividad vital de los organismos marinos” (Cifuentes et al., 1997, p.75).

La determinación de pH en aguas marinas tiene especial importancia en la oceanografía biológica, ya que muchos de los fenómenos biológicos pueden estar regulados por los cambios en el mismo; considerando incluso, que existe una influencia del pH en las migraciones de especies marinas. (Cifuentes et al., 1997, p.76)

5.5. Ciclos biogeoquímicos de los nutrientes

Ciclo del Nitrógeno. El nitrógeno en el agua de mar se encuentra presente en un amplio rango de estados de oxidación, como nitrógeno molecular N_2 , sales inorgánicas (NO_3 , NO_2 y NH_4), además de compuestos orgánicos asociados a los organismos, como los aminoácidos y urea, más los productos de degradación menos caracterizados de la materia orgánica, generalmente conocidos como nitrógeno orgánico disuelto (NOD) y nitrógeno particulado (NOP). (Chester y Jickells, 2012, p.164)

El nitrógeno es transportado a los océanos desde fuentes atmosféricas y fluviales, mediante la difusión desde los sedimentos y por la fijación de nitrógeno in situ, que hace referencia al proceso mediante el cual los organismos pueden asimilar o fijar el nitrógeno molecular N_2 . La fijación de nitrógeno en los océanos puede llevarse a cabo solo por unas pocas especies de fitoplancton, principalmente las cianobacterias. (Chester y Jickells, 2012, p.164)

La mayor parte del nitrógeno para la fotosíntesis se suministra mediante ciclos internos dentro de los océanos; Es así como la utilización del nitrógeno fijado por el fitoplancton tiene lugar en la zona eufótica y algunos de los nutrientes nitrogenados se liberan en forma soluble dentro de esta zona. (Chester y Jickells, 2012, p.164)

“El resto de esta materia orgánica en partículas se transporta fuera de la zona eufótica mediante el hundimiento de la materia en partículas” (Chester y

Jickells, 2012, p.164). “Finalmente y una gran fracción de este nitrógeno se libera nuevamente en la profundidad” (Chester y Jickells, 2012, p.164).

El nitrógeno orgánico disuelto y particulado (NOD y NOP) liberado en la columna de agua en profundidad, o en la zona eufótica, se remineraliza a través de la mediación bacteriana. El producto final inorgánico de la remineralización es el amonio NH_4^+ , la forma termodinámicamente estable de nitrógeno dentro de las aguas oceánicas bien oxigenadas. (Chester y Jickells, 2012, p.164)

Finalmente, la oxidación de amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-) se denomina nitrificación y está mediada por bacterias nitrificantes. El proceso inverso, que se denomina desnitrificación, está mediado por bacterias desnitrificantes, principalmente en sedimentos anóxicos y regiones oceánicas con bajo contenido de oxígeno disuelto en la columna de agua. (Chester y Jickells, 2012, p.164)

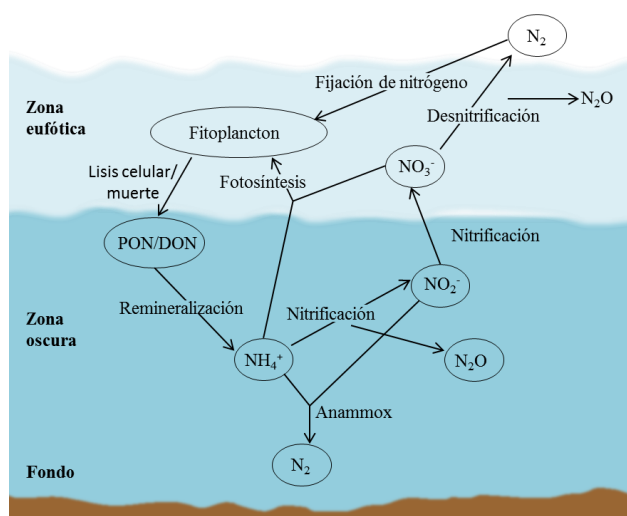


Figura 5.1. Representación simplificada del ciclo del nitrógeno (Chester y Jickell, 2012)

Ciclo del fósforo. “El Fosforo es considerado como el factor más crítico y complejo de los ciclos biogeoquímicos del océano” (Pérez, 2010, p.7).

Con solo un estado de oxidación, existe una variedad de fosforo en el agua de mar, los cuales incluyen el fósforo inorgánico disuelto (predominantemente iones ortofosfato, HPO_4^{2-}), fósforo orgánico disuelto (FOD) y fósforo particulado. Sin embargo, el fitoplancton normalmente satisface sus necesidades de fósforo mediante la asimilación directa de ortofosfato. (Chester y Jickells, 2012, p.165)

Al igual que el nitrógeno, el fosfato es liberado en la columna de agua durante la destrucción oxidativa de los tejidos orgánicos. Por tanto, la mayor parte de la regeneración del fósforo probablemente tiene lugar a través de la descomposición bacteriana, lo que conduce a la formación de ortofosfatos. (Chester y Jickells, 2012, p.165)

No obstante “las principales fuentes del fosfato se asocian a la disolución de rocas ígneas o sedimentarias marinas, a los fertilizantes fosfatados y a la descarga de aguas residuales de origen humano (detergentes)” (Pérez, 2010, p.7).

Ciclo del silicio. El silicio, al igual que el nitrógeno y el fósforo, está ampliamente distribuido en el océano, es suministrado al medio marino tanto en forma disuelta como en forma de partículas a través de la escorrentía del río, la deposición atmosférica y la meteorización glacial (especialmente de la Antártida). (Chester y Jickells, 2012, p.165)

Algunos organismos del plancton como las diatomeas y los radiolarios requieren silicato para la formación de la capa opal. Por ello, el suministro de silicio influye

en el crecimiento de algunos grupos de organismos y no de otros. Por lo tanto, el silicio es importante para regular la composición de las especies, pero no necesariamente la productividad general de los océanos. (Chester y Jickells, 2012, p.165) “El silicio disuelto en el agua de mar está presente como ácido ortosilícico, (H_4SiO_4), que es a menudo referido como silicato (SiO_4^{4-})” (Chester y Jickells, 2012, p.165).

Por otro lado, las formas particuladas del elemento incluyen una amplia variedad de silicio y minerales de aluminosilicato, junto con las capas de diatomeas y radiolarios, que contienen sílice en forma de ópalo. La sílice opalina de las partes esqueléticas o duras de los organismos se libera nuevamente dentro de la columna de agua por simple disolución física sin ningún compromiso bacteriano directo. (Chester y Jickells, 2012, p.165)

“Su distribución y concentración en el océano está controlada por procesos biológicos, al igual que por efectos físicos como el hundimiento de organismos muertos y fenómenos de surgencia que provocan la redistribución de estos compuestos en la columna de agua” (Papush y Danielsson, 2006. Como se citó en INVEMAR, 2013, p.71).

5.6. Sólidos Suspendidos Totales SST

“Los sólidos suspendidos totales (SST), son ampliamente empleados como indicador de la calidad del agua. El aumento de este parámetro incrementa la turbidez y disminuye la penetración de la luz, limitando la producción primaria” (Weber-Scannell y Duffy, 2007. Como se citó en INVEMAR, 2017, p.41). “En la práctica, este material está

integrado por fitoplancton, detrito y partículas inorgánicas” (Chester, 1990. Como se citó en [INVEMAR, 2016, p.99](#)).

En ambientes oceánicos las distribuciones espaciales y temporales de material suspendido, son controladas por parámetros oceanográficos clásicos, como el transporte de material desde los continentes, la producción primaria y los principales patrones de circulación de las masas de agua. La distribución vertical de material suspendido en la columna de agua se puede describir en términos de un modelo de tres capas en el que las características principales son: (i) una capa de agua superficial; (ii) una capa mínima de agua clara; y (iii) una capa de aguas profundas. ([Chester y Jickells, 2012, p.209](#))

En aguas superficiales, las concentraciones de material suspendido son más altas y más variables en las regiones costeras y estuarinas que en el océano abierto. Lo anterior, debido a los efectos combinados de la entrada de partículas por la escorrentía de fuentes superficiales, el transporte atmosférico y la generación interna de partículas de producción primaria. ([Chester y Jickells, 2012, p.209](#))

Por su parte en la zona subsuperficial (capa mínima de agua clara), se presenta una disminución de las partículas en suspensión causada por la destrucción del material particulado cuando se hunde desde las aguas superficiales. Esta disminución en la concentración de partículas con la profundidad es en gran medida el resultado de procesos que afectan la materia orgánica (destrucción oxidativa) y las fracciones de la cáscara (disolución) del material suspendido. ([Chester y Jickells, 2012, p.209](#))

Asimismo, en la capa de agua profunda las partículas cercanas al fondo son elevadas y mantenidas en suspensión. Este proceso incluye el suministro desde las plataformas continentales por corrientes de turbidez, el transporte advectivo, y la resuspensión directa de los sedimentos por las corrientes de fondo donde las partículas son levantadas y desplazadas hacia arriba. (Chester y Jickells, 2012, p.209)

5.7. Hidrocarburos del Petróleo, Disueltos y Dispersos - HPDD

“Las fuentes por las cuales los hidrocarburos son introducidos al ambiente marino son numerosas y el número de los componentes individuales en los diferentes tipos de petróleo es muy grande, esto crea enormes retos para su identificación y caracterización” (Botello, Rendón, Gold y Agraz, 2005, p.264).

Dentro de los hidrocarburos existe una fracción de interés ambiental a la que pertenecen los hidrocarburos aromáticos totales (HAT) o Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD), debido a que son sustancias altamente tóxicas y permanecen por largos periodos de tiempo en el ambiente. (Kostopoulou et al., 2007; Walker y Livingstone, 1992; Holladay et al., 1998; Carlson et al., 2004; Reynaud y Deschaux, 2006. Como se citó en INVEMAR, 2016, p.108).

Asimismo; “se encuentran aquellos de tipo biogénico, es decir, sintetizados por la biota en el mar. Los microorganismos, el plancton (fito y zooplancton), las algas bentónicas y los peces son ejemplos de organismos que sintetizan hidrocarburos” (Botello et al., 2005, p.271).

De igual manera; “existen los hidrocarburos diagenéticos provenientes de una transformación microbiana o química que ocurre en los sedimentos a partir de moléculas biogénicas precursoras como terpenos, esteroides, carotenos” (Botello et al., 2005, p.271).

“La vigilancia de la contaminación por hidrocarburos en el ambiente acuático puede basarse en el análisis tanto del agua, como de las partículas suspendidas, los sedimentos y la biota” (Botello et al., 2005, p.271).

Se considera que en el océano las concentraciones de HPDD superiores a 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ referidas a equivalentes de criseno, son típicas de aguas definitivamente contaminadas por petróleo. Se estiman concentraciones bajas alrededor de 5.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para aguas costeras, y hasta 1.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ corresponde a aguas marinas sin una contaminación por petróleo significativa. (Acuña, Vargas, Gómez y García, 2004, p.44)

5.8. Índice de Calidad Ambiental de Aguas Marinas con fines de preservación de flora y fauna (ICAM_{PPF})

El índice de calidad ambiental de agua es un indicador de estado que facilita la interpretación de las condiciones naturales y el impacto antropogénico de las actividades humanas sobre el recurso hídrico marino y costero, con un enfoque para la preservación de flora y fauna. Integra un conjunto de ocho variables (pH, Oxígeno disuelto, SST, N-NO₃, PO₄, DBO₅, HPDD, CTE) en una ecuación de promedio geométrico ponderado (Ecuación 1), que condicionan el estado de la calidad del agua para la preservación de la vida acuática. Emplea como referencia los valores máximos permisibles en la legislación ambiental nacional y valores de referencias a nivel internacional. La formulación del índice presenta cinco categorías de calidad (óptima, adecuada, aceptable, inadecuada, pésima) definidas en una escala adimensional de 1 a 100 (Tabla 5-1). (Vivas-Aguas, 2014, p.10)

Ecuación 1. Ecuación de ponderación para el cálculo del ICAM_{PPF}

$$ICAM_{PPF} = \left(\prod_{i=1}^n X_i^{W_i} \right)^{\frac{1}{\sum_i W_i}}$$

Dónde:

X_i = Subíndice de calidad de la variable i

W_i = Factor de ponderación para el subíndice i (valor ponderado entre 0 y 1)

Tabla 5-1. Escala de valoración del Índice de Calidad de Aguas Marinas ICAM_{PFF} (Vivas-Aguas, 2014)

<i>Escala de calidad</i>	<i>Color</i>	<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
Óptima	Azul	100 – 90	Calidad excelente del agua
Adecuada	Verde	90 – 70	Agua con buenas condiciones para la vida acuática
Aceptable	Amarillo	70 – 50	Agua que conserva buenas condiciones y pocas restricciones de uso
Inadecuada	Naranja	50 – 25	Agua que presenta muchas restricciones de uso
Pésima	Rojo	25 – 0	Aguas con muchas restricciones que no permiten un uso adecuado

Tabla 5-2. Factor de ponderación de las variables que conforman el ICAM_{PFF}

<i>Variable</i>	<i>Unidad de medida</i>	<i>Factor de ponderación</i>
pH	Unidad	0.12
Oxígeno Disuelto	mg/L	0.16
Solidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	0.13
Nitratos (N-NO ₃)	μg/L	0.09
Ortofosfatos (PO ₄)	μg/L	0.13
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	0.13
Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD)	μg/L	0.12
Coliformes Termotolerantes (CTE)	NMP/100 mL	0.14

6. Marco Normativo

Tabla 6-1. Relación de normatividad nacional y valores de referencia a nivel internacional

<i>Norma</i>	<i>País de origen</i>	<i>Descripción</i>	<i>Variables asociadas</i>
Decreto 1076 de 2015	Colombia	Por el cual se expide el Decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	pH, Oxígeno disuelto
COPANI 24-99	Panamá	Por el cual se reglamentan los valores máximos permisibles – requisitos de calidad del agua marina para vida acuática y acuicultura	Transparencia, Turbidez
DS-004-2017	Perú	Decreto supremo que estable los estándares de calidad ambiental, con el objetivo de establecer los niveles de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos presentes en el agua.	Sólidos Suspendedos Totales - SST, Nitrato (NO ₃)
DS-002-2008	Perú	Decreto supremo que estable los estándares de calidad ambiental, con el objetivo de establecer los niveles de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos presentes en el agua.	Silicatos (Si-SiO ₂)
AG-CC-01	República Dominicana	Norma de calidad del agua y control de descarga. Los objetivos de esta norma son proteger, preservar, conservar y mejorar; la calidad de las fuentes de suministro de agua a la población, la propagación y el mantenimiento de la vida acuática.	Ortofosfatos (PO ₄)
UNESCO, 1976	-	guía de procedimientos operacionales para el proyecto experimental de vigilancia de la contaminación del mar (petróleo) como parte del Sistema Global Integrado de Estaciones Oceánicas IGOSS	Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos - HPDD

7. Metodología

7.1. Descripción del área de estudio

Al extremo norte de Colombia, la región oceánica de La Guajira se extiende geográficamente entre los meridianos (71°W este) y (73°W oeste), que corresponde a límites oceánicos entre Venezuela y el departamento de Magdalena. A su vez, limita al norte con aguas oceánicas de República Dominicana y Haití, y por el sur con la isobata de 200 m de la plataforma continental del departamento. (Figura 7.1)

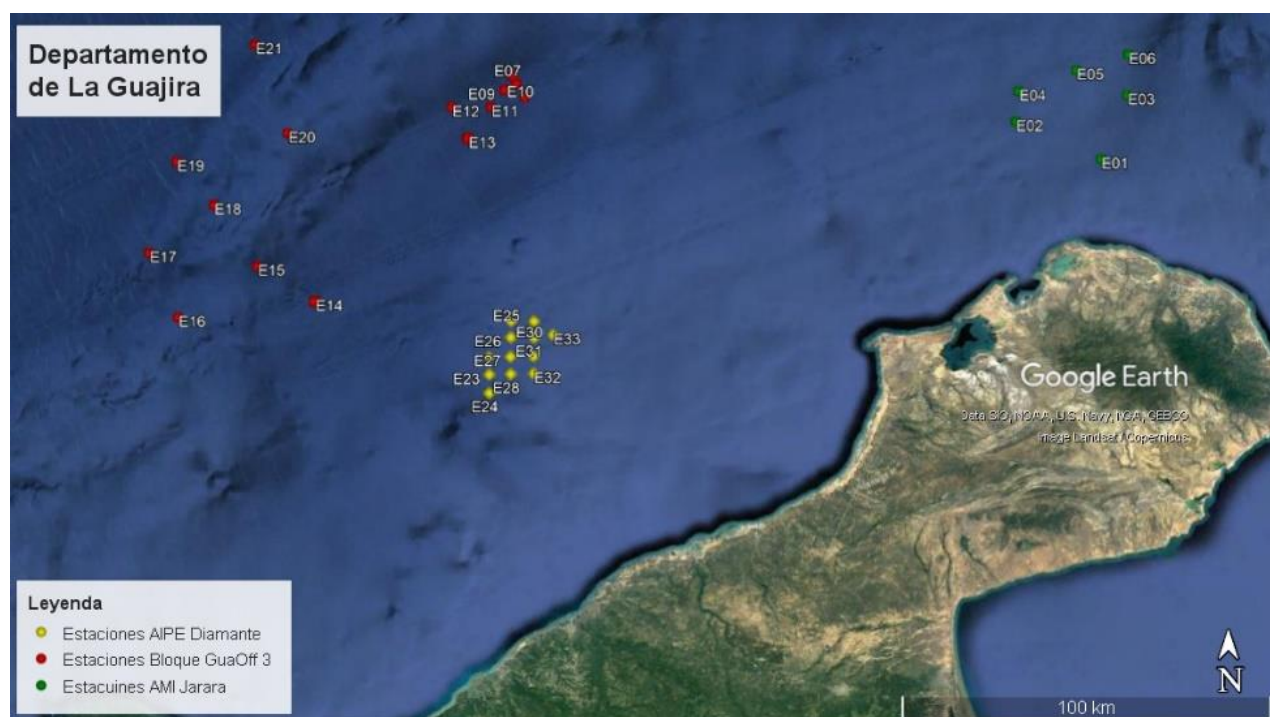


Figura 7.1. Localización de área de estudio y estaciones de muestreo.

7.1.1. Oceanografía y Clima

La región oceánica de La Guajira es influenciada por varios procesos oceanográficos que la distinguen de algunas zonas marinas del Caribe colombiano. Se encuentra influenciada por la corriente del Caribe, la cual transporta hasta 20 Sv (1 Sv = Sverdrup = $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$) desde el este a todo el Caribe. (Ricaurte et al., 2017, p.35)

Otro de los procesos que hacen parte de la dinámica oceánica de La Guajira es la contracorriente Panamá-Colombia con intensidades que varían con la profundidad, al igual que la corriente profunda del Caribe que presenta un lento movimiento hacia el oriente sobre el talud y el fondo abisal. (Andrade et al., 2003. Como se citó en Lozano et al., 2010, p.64)

Igualmente, las condiciones oceanográficas de la zona son controladas por la presencia de vientos provenientes del noroeste, generando un fenómeno de surgencia. Este fenómeno consiste en el movimiento ascendente del agua subsuperficial ocasionado por la fricción del viento sobre la capa superficial del océano (transporte de Ekman). (Corredor 1979, Fajardo 1979, Alvarez-Leon et al. 1995, Andrade-Amaya y Barton, 2005. Como se citó en Lozano et al., 2010, p.60)

“En La Guajira, la dirección, el periodo y la altura del oleaje está determinado por el patrón de vientos alisios, con direcciones predominantes este y noreste; en esta zona la altura promedio de la ola es de 2,1 m” (Lozano et al., 2010, p.59). Asimismo, los valores van disminuyendo a medida que cambia la época climática.

“A nivel atmosférico, la zona oceánica de La Guajira está influenciada por el movimiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)” (Ricaurte et al., 2017, p.35). “Un cinturón continuo de baja presión atmosférica que rodea el planeta cerca del Ecuador y que ejerce un control importante en los regímenes de viento y de precipitación” (Andrade, 2015, p.24), “cuyo desplazamiento hacia el norte trae consigo mayor precipitación hacia los meses de septiembre y octubre sobre la costa Caribe colombiana, ocasionada por el cambio en los centros de baja presión” (Schneider et al., 2014. Como se citó en Ricaurte-Villota et al., 2017, p.35).

En La Guajira, se reconoce una época seca de vientos fuertes (diciembre a abril), una época de transición (mayo a julio) y una época lluviosa (agosto a noviembre); estas épocas climáticas pueden cambiar tanto en duración como en intensidad debido a la influencia del Sistema de Monzones Americanos, las corrientes de vientos atmosféricos de bajo nivel y los eventos de El Niño y La Niña. (Lozano et al., 2010, p.55)

7.2. Tipo de estudio

Corresponde a un proyecto de investigación de tipo cuantitativo, que define un conjunto de procesos secuenciales y probatorios (Hernández, Fernández & Baptista, 2010, p.4), donde “se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica” (Hernández, et al. 2010, p.4). Se emplearon métodos estadísticos para el análisis y cuantificación de un número limitado de variables fisicoquímicas de calidad del agua, que se compararon con Límites Máximos Permisibles (LMP) y criterios de calidad para evaluar el estado de la calidad del agua en

ambientes oceánicos; de igual manera a nivel superficial se interpretaron los resultados empleando el Índice de Calidad de Ambiental Marina para preservación de Flora y Fauna (ICAM_{PF}).

7.3. Alcance del proyecto

Corresponde a un estudio de investigación que incluyó diferentes alcances, iniciando por el alcance exploratorio cuyo objetivo es “examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes (Hernández, et al. 2003, p.79). Tal es el caso que para este estudio se evaluó la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira, realizando una descripción vertical de la columna de agua en una zona de estudio que ha sido poco estudiada y de la cual se ha divulgado poca información.

También presento un alcance descriptivo, el cual especifico las propiedades y características de un grupo limitado de variables fisicoquímicas, sometidas a un análisis estadístico (Hernández, et al. 2003, p.85). De igual manera se explicaron, cuantificaron y evaluaron el grado de asociación entre dos o más variables que corresponde a un alcance correlacional (Hernández, et al. 2003, p.81).

Finalmente se enfocó en el alcance explicativo, cuyo interés se centró en “explicar porque ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables” (Hernández, et al. 2003, p.84). Estos alcances permitieron describir y evaluar las condiciones de calidad del agua con fines de preservación de flora y fauna en

ambientes oceánicos del departamento de la Guajira empleando información primaria obtenida en cruceros de investigación oceanográfica desarrollados por INVEMAR.

7.4. Fases del proyecto

Tabla 7-1. Diagrama de Gantt. Fases de ejecución del proyecto.

Fase	Actividad	Meses												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Diagnostico	Revisión de información bibliográfica	■												
	Selección de área oceánica, estaciones y variables de estudio		■											
	Solicitud de permisos		■											
Investigación	Análisis preliminar de bases de datos			■	■									
	Comparación de variables con normatividad aplicable					■								
	Análisis estadístico de la información						■							
Análisis de la información y resultados	Análisis de resultados							■	■					
	Discusión y escritura final del documento.									■	■	■		

7.5. Fuentes de Información

7.5.1. Fuente primaria.

Se empleó información de tres cruceros de investigación oceanográfica desarrollados por el INVEMAR con previa autorización para el uso de los datos.

Autorización para el uso de datos.

Para la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira, se empleó información disponible de tres proyectos desarrollados por la Coordinación de Servicios Científicos (CSC) del INVEMAR a solicitud de las firmas, PETROBRAS INTERNATIONAL BRASPETRO B.V. SUCURSAL COLOMBIA, GEOCOL S.A., y SHELL EXPLORATION AND PRODUCTION COLOMBIA GMBH, con previa autorización para el uso de los datos solicitado por la Dirección General del INVEMAR (DGI). De igual manera se solicitó a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA, los expedientes de cada uno de los proyectos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). De los tres proyectos solicitados, dos se encuentran como información pública nacional para ser consultados (GEOCOL y PETROBRAS); Para el caso de SHELL, contamos con la autorización por parte de la empresa para el uso de los datos.

Tabla 7-2. Descripción de proyectos y números de expedientes del ANLA

<i>Zona</i>	<i>Empresa</i>	<i>No Expedientes ANLA</i>	<i>Proyecto</i>	<i>Año</i>
AMI Jarara – Bloque Tayrona	PETROBRAS	LAM5901	Aguas, sedimentos y comunidades marinas en el área de mayor interés de perforación exploratoria (AMI) Jarara - Caribe colombiano	2012
Guajira Gua Off 3	SHELL	NA	Caracterización Ambiental del Área de Interés del Bloque Offshore Guajira # 3, Caribe Colombiano.	2013, 2015
AIPE DIAMANTE	GEOCOL	LAV0015-00-2016	Caracterización ambiental del Área de Perforación Exploratoria marina diamante – APEM diamante - bloque RC10, caribe colombiano	2015

7.5.2. Fuentes secundarias.

Legislación ambiental que incluye Límites Máximos Permisibles (LMP) y criterios de calidad para la preservación de flora y fauna en ambientes marinos.

7.6. Población objeto

Aunque el presente proyecto tiene como objetivo la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos para la preservación de flora y fauna en ambientes oceánicos, tenemos como población objeto las comunidades costeras del departamento de La Guajira, desde punta gallinas hasta Palomino en los límites con el departamento del Magdalena.

7.7.Muestra.

Con la información disponible de los tres proyectos, se logró definir bajo una nueva nomenclatura un total de 33 estaciones (**¡Error! No se encuentra el origen de la**

referencia.), las cuales se ubican por fuera de la plataforma continental en zonas oceánicas del departamento, con profundidades que van desde los 498 m hasta los 3800 m del talud continental.

7.7.1. Selección de área oceánica, estaciones y variables de estudio.

En la selección de los proyectos se tuvo en cuenta aquellos localizados en zonas oceánicas del departamento y que tuvieran una amplia distribución espacial, lo que nos permitió cubrir un área significativa de la zona de estudio. Para evitar errores en el análisis de la información se seleccionaron proyectos cuyo interés fue la caracterización ambiental de la zona antes de cualquier alteración antrópica. Se tuvieron en cuenta las similitudes de los proyectos en lo referente a la distribución vertical de las profundidades de muestreo en la columna de agua.

Se seleccionaron variables fisicoquímicas definidas como indicadoras de calidad del agua con fines de preservación de flora y fauna, que además aportaran información sobre la dinámica del ecosistema acuático y sus interacciones con las actividades de exploración y producción de hidrocarburos. De igual manera se tuvo en cuenta aquellas variables cuantificadas de manera similar en los tres proyectos con relación a los métodos de muestreo y las técnicas analíticas de laboratorio.

Tabla 7-3. Identificación de estaciones de estudio.

<i>Estaciones</i>	<i>Zona</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Profundidad (m)</i>
E01	AMI Jarara	12°39'30.963"N	71°35'38.052"O	498
E02	AMI Jarara	12°44'59.805"N	71°48'21.643"O	792
E03	AMI Jarara	12°48'48.866"N	71°31'35.731"O	810
E04	AMI Jarara	12°49'24.557"N	71°47'50.653"O	997
E05	AMI Jarara	12°52'27.728"N	71°39'12.464"O	995
E06	AMI Jarara	12°54'45.774"N	71°31'22.582"O	1010
E07	Bloque GuaOff-3	12°51' 41.306"N	73°3' 4.911"O	2600
E08	Bloque GuaOff-3	12°50' 33.378"N	73°2' 27.799"O	2600
E09	Bloque GuaOff-3	12°49' 40.707"N	73°4' 13.753"O	2600
E10	Bloque GuaOff-3	12°48' 41.118"N	73°1' 11.985"O	2600
E11	Bloque GuaOff-3	12°47' 12.665"N	73°6' 11.985"O	2600
E12	Bloque GuaOff-3	12°47' 10.281"N	73°11'59.985"O	2600
E13	Bloque GuaOff-3	12°42' 39.624"N	73°9' 35.297"O	2600
E14	Bloque GuaOff-3	12° 19' 3.276"N	73° 32' 13.862"O	3799
E15	Bloque GuaOff-3	12° 24' 09.618"N	73° 40' 50.689"O	3100
E16	Bloque GuaOff-3	12° 16' 43.778"N	73° 52' 38.747"O	3800
E17	Bloque GuaOff-3	12° 26' 3.613"N	73° 57' 0.763"O	3487
E18	Bloque GuaOff-3	12° 33' 1.680"N	73° 47' 22.011"O	3170
E19	Bloque GuaOff-3	12° 39' 19.159"N	73° 52' 58.335"O	2800
E20	Bloque GuaOff-3	12° 43' 25.914"N	73° 36' 23.436"O	2730
E21	Bloque GuaOff-3	12° 56' 21.393"N	73° 41' 22.238"O	3700
E22	AIPE Diamante	12° 10' 59.73"N	73° 6' 30.03"O	1450
E23	AIPE Diamante	12° 8' 29.835"N	73° 6' 26.78"O	1300
E24	AIPE Diamante	12° 5' 49.432"N	73° 6' 27.57"O	1500
E25	AIPE Diamante	12° 16' 14.59"N	73° 3' 13.89"O	1230
E26	AIPE Diamante	12° 13' 52.60"N	73° 3' 15.78"O	1200
E27	AIPE Diamante	12° 11' 4.312"N	73° 3' 19.10"O	1140
E28	AIPE Diamante	12° 8' 34.412"N	73° 3' 17.00"O	1050
E29	AIPE Diamante	12° 16' 11.18"N	72° 59' 50.6"O	960
E30	AIPE Diamante	12° 13' 50.50"N	72° 59' 51.2"O	930
E31	AIPE Diamante	12° 11' 8.793"N	72° 59' 54.5"O	835
E32	AIPE Diamante	12° 8' 38.900"N	72° 59' 53.8"O	730
E33	AIPE Diamante	12° 14' 13.48"N	72° 57' 1.40"O	700

7.1.Fase de campo.

Muestreo.

Las muestras fueron colectadas siguiendo el procedimiento de Toma, preservación y almacenamiento de muestras de la Unidad de Laboratorios de Calidad Ambiental Marina LABCAM del INVEMAR bajo las metodologías establecidas en el Estándar Métodos. Para el muestreo en ambientes oceánicos, se utilizó una embarcación oceanográfica acondicionada para tal fin. Se empleó una serie de botellas tipo Niskin con capacidad de 10 litros acoplados a una roseta oceanográfica (**¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.**), Las muestras fueron preservadas y almacenadas siguiendo los protocolos de muestreo descritos por LABCAM ([APHA, 2012](#)).

Para las variables medidas *in situ* como pH, Temperatura (°C), Salinidad (S), y Oxígeno disuelto (mg/L), se empleó una sonda multiparamétrica CTD SBE 19 plus acoplada a la roseta. En el caso de la Traspirencia (m) las mediciones se realizaron empleando un disco Secchi desde la cubierta de la embarcación.

La lectura de turbidez se realizó en campo empleando un turbidímetro portátil teniendo en cuenta que esta variable presenta un tiempo de análisis menor a 24 horas. Se realizaron también extracciones para hidrocarburos a bordo de la embarcación debido a la complejidad que tiene transportar las muestras hasta el laboratorio en tierra y además que la norma “*Manual 13 UNESCO/COI*” indica que las extracciones deben realizarse en el menor tiempo posible ([UNESCO, 1976](#)).

Los Solidos Suspendidos Totales (SST) y las muestras para nutrientes inorgánicos (N-NO₃, P-O₄ y SiO₃) fueron filtradas en campo y conservadas para su posterior análisis en el laboratorio.



Figura 7.2. Set de botellas Niskin acopladas a roseta oceanográfica.

7.2. Laboratorio.

El análisis de las muestras fue realizado por personal de la Unidad de Laboratorios de Calidad Ambiental Marina LABCAM que cuenta con acreditación ante IDEAM para la matriz marina. Las técnicas analíticas empleadas en la determinación de las diferentes variables se describen en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4. Relación de variables y métodos analíticos empleados en la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira

Variable	Unidad	Técnica analítica	Referencia
Transparencia	m	Medición con disco Secchi	Garay, 2003
Temperatura	°C	Medición electrométrica con termocupla acoplada a CTD o sonda portátil	Standard Methods N° 2550-B
Oxígeno disuelto	mg/L	Medición en campo con electrodo de membrana	Standard Methods N° 4500-O, G
Salinidad	Unidad	Medición electrométrica de la conductividad con CTDO o sonda portátil.	Standard Methods 2520-B, A
pH	Unidad	Medición potenciométrica con CTDO o sonda portátil	Standard Methods N° 4500-H, B
Turbidez	NTU	Medición Nefelométrica con turbidímetro	Standard Methods N°2130-B
Nitrato (N-NO ₃)	µg/L	Reducción con cadmio y método colorimétrico de la sulfanilamida	Strickland y Parsons, 1972
Ortofosfato (PO ₄)	µg/L	Método colorimétrico del ácido ascórbico	Strickland y Parsons, 1972
Silicatos (Si-SiO ₂)	µg/L	Molibdato-ácido ascórbico según Koroleff	Método de Koroleff, Manual 12, UNESCO/COI 1983
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	Filtración en membrana de fibra de vidrio, secado 103-105°C y gravimetría	Standard Methods N° 2540-D,
Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD)	µg/L	Extracción líquido-líquido con hexano y determinación fluorométrica.	Manual UNESCO/COI 13

7.3. Manejo de la Información.

Los datos obtenidos en las 33 estaciones fueron clasificados por masas de agua, excepto para la variable transparencia, que fue muestreada en la capa superficial del océano, y turbidez, donde la mayoría de los datos reportados se encuentran por debajo del límite de cuantificación del método (LCM); Los límites de detección para las técnicas de Turbidez, Nitratos (N-NO_3) y Ortofosfatos (PO_4) cambiaron, como consecuencia de los periodos de tiempo en los que se desarrollaron los proyectos. Por tanto, como ejercicio académico en el análisis de la información, se asumió el mayor límite de detección reportado en los Informes de Resultados (IRs). Asimismo, en el análisis estadístico se tuvo en cuenta las variables que cuantificaron en más de un 70% de sus datos. Los valores por debajo del límite de cuantificación del método ($<\text{LCM}$) de las técnicas analíticas, se asumieron como cero, debido al error sistemático que se presenta cuando se divide el límite de detección o de cuantificación entre 2 ($\text{LD}/2$), técnica muy empleada en análisis estadístico de información biológica.

En el análisis de la información de la transparencia se empleó estadística descriptiva con diagrama de barra. Se representaron los valores de cada variable en diagramas de cajas y bigotes, representando de manera gráfica la media, mediana y los cuantiles. No fueron graficadas las variables donde las concentraciones no pudieron ser cuantificadas en más de un 50 % de sus observaciones. Ninguna de las variables contempladas se distribuyó de manera normal aún al transformarlas (ver Anexo 12.2). Las variaciones entre los niveles de la columna de agua se evaluaron mediante un Análisis de Varianza o su análoga no paramétrica de Kruskal-Wallis, previa verificación

de los supuestos de normalidad y homegeneidad de varianzas. Todos los análisis fueron desarrollados en el programa estadístico INFOSTAT (Balzarini et al., 2008). En la interpretación de los datos a nivel superficial, se aplicó el Índice de Calidad Ambiental Marina ICAMPPF. Para calcular el indicador en ambientes oceánicos se emplearon seis variables (Oxígeno disuelto, pH, N-NO₃, P-PO₄, SST, HPDD) de las ocho con las que se calcula el indicador, para obtener una confianza del resultado del 73%.

8. Resultados y Análisis

Se presenta en detalle los resultados obtenidos de la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira que incluyo el análisis de datos de 33 estaciones distribuidas en la zona de estudio y clasificadas por masas de agua.

8.1. Análisis estadístico comparación entre masas de agua

A través de un análisis de varianza no paramétrico - Kruskal Wallis, se realizó la comparación entre masas de agua, siendo las variables de Solidos Suspendidos Totales (SST) e Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispensos (HPDD) las que no presentan diferencias estadísticas entre masas de agua y que no aportaron información sobre la distribución vertical entre masas de agua (Tabla 8-1). Las letras A, B, C y D, representan diferencias significativas entre las fases; masas de agua con letras en común no son significativamente diferentes. Se rellenaron con (*) los espacios de las variables que no presentaron diferencias significativas entre masas de agua.

Tabla 8-1. Análisis de varianza Kruskal Wallis (no paramétrico) para la comparación entre masas de agua. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las fases ($p < 0,05$). $A < B < C$.

<i>Variable</i>	<i>Valor del estadístico</i>	<i>Valor de p</i>	<i>Prueba de comparación múltiple</i>			
			<i>ASC</i>	<i>ACAN</i>	<i>AIS</i>	<i>APC</i>
Temperatura (°C)	H = 104,47	< 0,0001	D	C	B	A
Oxígeno disuelto (mg·L ⁻¹)	H = 66,98	< 0,0001	C	B	A	C
Salinidad	H = 90,18	< 0,0001	C	D	A	B
pH	H = 50,58	< 0,0001	C	B	A	A
N-NO ₃ (μg·L ⁻¹)	H = 90,35	< 0,0001	A	B	C	C
P-PO ₄ (μg·L ⁻¹)	H = 98,27	< 0,0001	A	B	C	C
SiO ₃ (μg·L ⁻¹)	H = 86,55	< 0,0001	A	B	C	C
HPDD (μg·L ⁻¹)	H = 0,40	0,9405	*	*	*	*
SST (mg·L ⁻¹)	H = 2,16	0,5403	*	*	*	*

ASC: Agua Superficial del Caribe. **ACAN:** Agua Central del Atlántico Norte. **AIS:** Agua Intermedia Subantártica. **APC:** Agua Profunda del Caribe.

8.2. Comparación de las variables con la normatividad aplicable

Las concentraciones de las variables se compararon con los límites máximos permisibles (LMP) de la normatividad aplicable para preservación de la vida marina. Se trataron de seleccionar normas internacionales de países con jurisdicción en el mar caribe; sin embargo, por falta de normatividad aplicable en el país y a nivel internacional se tuvo en cuenta dos normas de Perú. Para los Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD) la referencia normativa consultada es la guía UNESCO, 1976.

Tabla 8-2. Normas de calidad del agua para preservación de la vida acuática en ambientes marinos y LMP.

<i>Norma</i>	<i>País de origen</i>	<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límite máximo permisible (LMP)</i>
Decreto 1076 de 2015	Colombia	pH	Unidad	6,50 a 8,50
		Oxígeno disuelto	mg/L	4,00
COPANI 24-99	Panamá	Transparencia	M	> 1,5
		Turbidez	NTU	3,00
DS-004-2017	Perú	SST	mg/L	30,0
		Nitrato (N-NO ₃)	µg/L	886.000
DS-002-2008	Perú	Silicatos (Si-SiO ₂),	µg/L	700
AG-CC-01	República Dominicana	Ortofosfatos (PO ₄)	µg/L	400
UNESCO, 1976	-	HPDD	µg/L	10,0

8.3. Descripción de las masas de agua.

Existen cinco masas de agua claramente identificadas para el Caribe colombiano que se confirmaron con los perfiles oceanográficos medidos *in situ* a través de un diagrama T-S (Temperatura Vs Salinidad). Sin embargo, por la distribución vertical en la que se tomaron las muestras, solo se lograron describir cuatro de ellas, dejando por fuera la masa de Agua Subsuperficial Subtropical (ASS). (Figura 8.1).

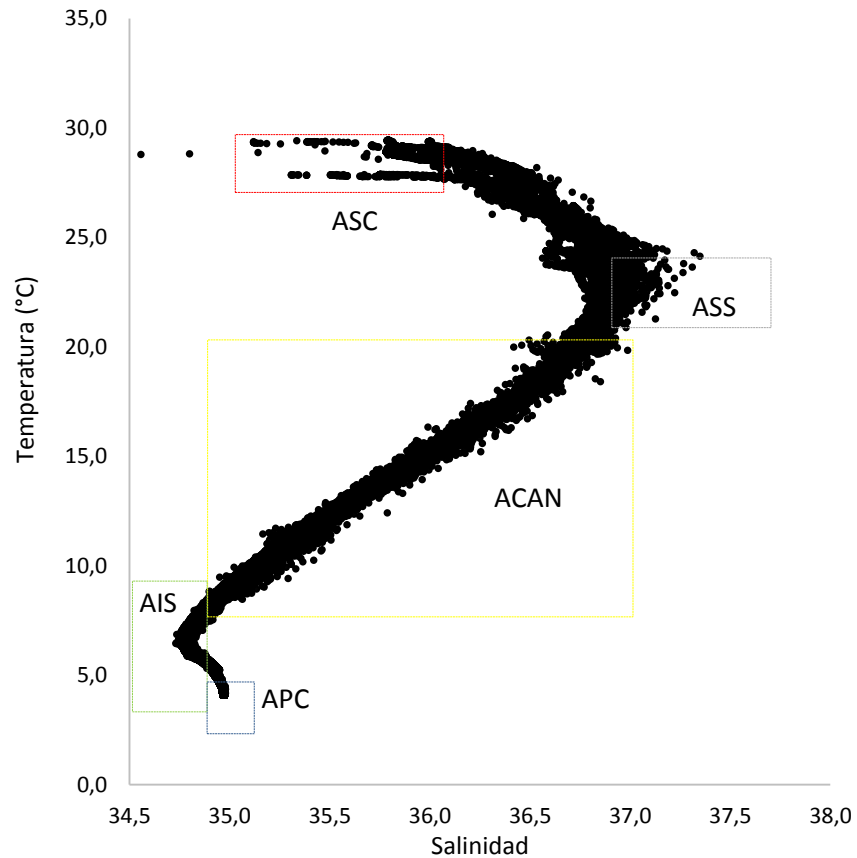


Figura 8.1. Diagrama T-S Para clasificación de las masas de agua

La capa superficial del océano es una zona de alta perturbación debido a la interacción océano-atmósfera, caracterizada por la poca precipitación y la alta evaporación. Lo que influye significativamente en las características físicas de la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) y que dificulta su descripción. Sin embargo, por temas de practicidad académica las muestras tomadas a nivel superficial entre 1-5 m y con temperaturas entre 24,4°C y 29,4 °C y valores de salinidad de 35,1 – 36,8, se agruparon dentro de esta clasificación.

La masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN), como masa de agua predominante, que agrupa el mayor número de mediciones debido al volumen de agua que ocupa dentro la distribución vertical del océano, identifico a profundidades entre los 150 y 500 m, con valores de temperatura entre los 9,11°C a 20,9 °C; Es una zona donde la salinidad presenta una gradiente de 45° con respecto a la temperatura. Por su parte la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) registrada a profundidades entre los 496 m y 1000 m, registro valores de salinidad alrededor de 35,0 y temperatura entre los 5,81 °C y 9,18 °C. Es la masa de agua que alrededor de los 6,5°C de temperatura presenta un marcado cambio en el curso de la salinidad con respecto a la temperatura, para mantenerse constante en la zona de mezcla con la masa de Agua Profunda del Caribe (APC), que se identificó a profundidades entre los 1955 m y 2162 m, manteniendo valores constantes de salinidad de 35,0 y temperaturas alrededor de 4°C.

8.4. Parámetros In situ

8.4.1. Transparencia y turbidez

La transparencia y la turbidez como propiedades ópticas e indicadores de la calidad del agua presentan una estrecha relación debido a que ambas se ven alteradas por procesos antrópicos y naturales como la presencia de sólidos en suspensión, microorganismos o material orgánico en descomposición.

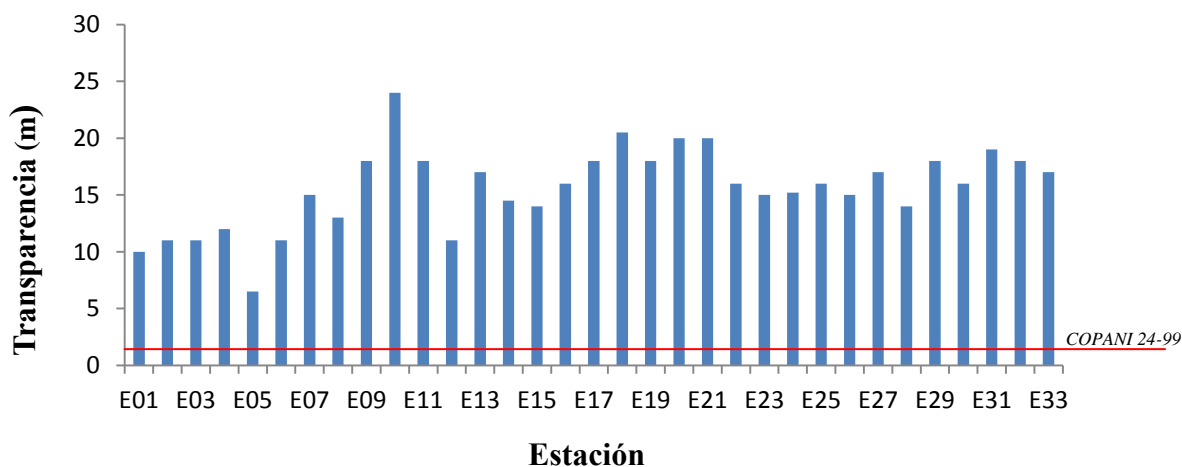


Figura 8.2. Variación espacial de la transparencia en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.

La transparencia, medida en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC), registro un valor promedio de $15,6 \pm 3,6$ m; con un valor mínimo de 6,5 m en la estación E05, ubicada al norte del departamento y una de las estaciones más cercanas a la costa, y 24 m en la estación E10 que hace parte del grupo de estaciones más alejadas de la línea de costa (Figura 8.2).

Aunque no existe una relación directa entre la transparencia y la profundidad de la estación, si se presentan valores más bajos en las estaciones cercanas a la línea de costa. Lo que se traduce en una capa de menor penetración de luz en estas estaciones,

posiblemente, a la contribución de material suspendido por escorrentía de fuentes superficiales de agua dulce que ingresan al mar o por el aporte de material particulado, arrastrado por los patrones de vientos alisios predominantes en la zona desértica de La Guajira.

Comparando los valores de transparencia para esta zona, con el Límite Máximo Permisible (LMP). Todas las mediciones se encuentran por encima de 1,5 m, valor de referencia según la norma panameña COPANI 24-99 (Tabla 8-2), para la preservación de la vida acuática en ambientes marinos.

Todas las mediciones de turbidez se encontraron por debajo del Límite de Cuantificación del Método (LCM). No obstante, el hecho que los datos se encuentren por debajo del límite de cuantificación, para este ejercicio académico se considera como información valiosa para describir las condiciones ambientales en la que se encuentra el medio oceánico, ya que esto garantiza que todas las determinaciones se encuentran por debajo del Límite Máximo Permisible (3,0 NTU) para garantizar el normal desarrollo de la vida acuática en ambientes marinos según la normatividad Panameña COPANIT 24-99 ([URS Holdings, 2005, p.83](#)) lo cual se relaciona con la poca actividad antrópica en la zona.

8.4.2. Temperatura

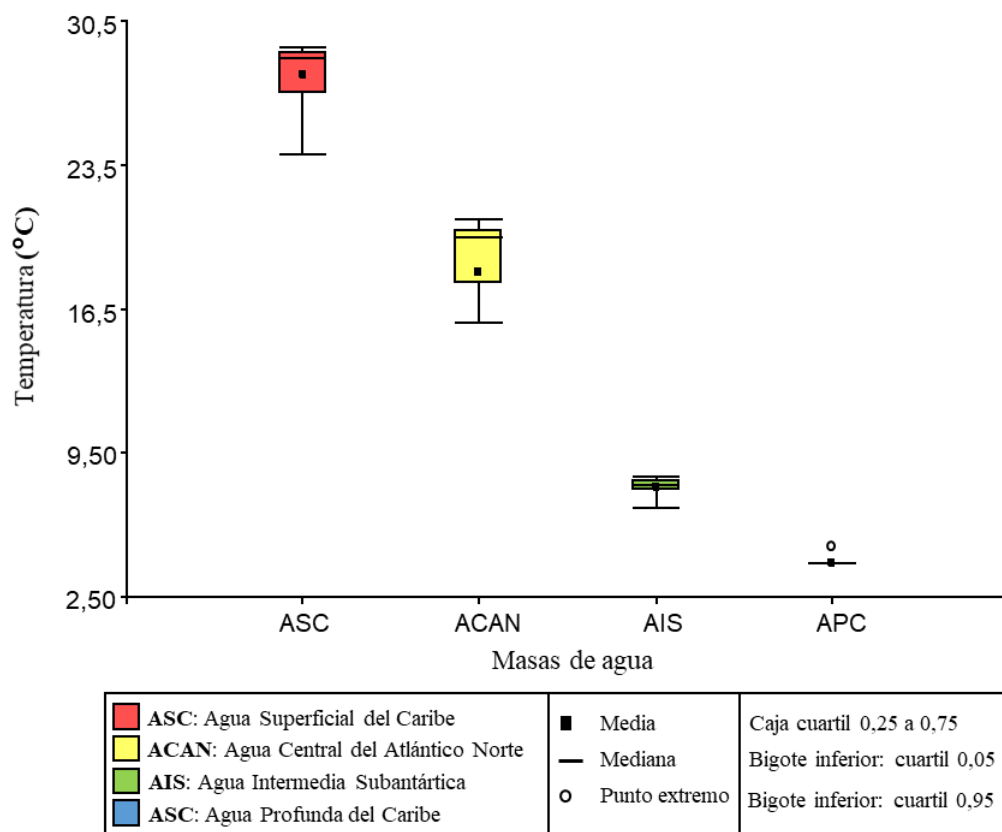


Figura 8.3. Valores promedio de temperatura registrado en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT)

Aunque en el marco legal, tanto a nivel nacional como en países con jurisdicción en el mar caribe, no se cuenta con un límite de referencia sobre esta variable; la temperatura del océano constituye una de las variables oceanográficas más empleadas para evaluar la condición ambiental del medio acuático.

La variación vertical de la temperatura en ambientes oceánicos de La Guajira, clasificada por masas de agua, presenta diferencias significativas ($H=104,47$; $p < 0,0001$).

Confirmando la relación que existe entre la temperatura y la profundidad, donde la radiación solar disminuye con el incremento de la profundidad (INVEMAR, 2016, p.91). Lo que permite registrar temperaturas en el fondo del océano cercanas a los 4°C (Figura 8.3).

El promedio de temperatura en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) fue de $27,9 \pm 1,68$ °C, zona con mayor perturbación debido a la interacción océano-atmosfera. La masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) presento un promedio de temperatura de $18,2 \pm 3,59$ °C, esta masa de agua registra la mayor desviación estándar con relación al grupo de datos, debido al volumen de agua que ocupa dentro de la distribución vertical del océano, agrupando un amplio rango de temperatura.

Para la masa de Agua Intermedia Subantártica el valor promedio de temperatura fue de $7,81 \pm 0,73$ °C a una profundidad promedio de 680 m. Por su parte la masa de Agua Profunda del Caribe (APC), donde se registran los valores más bajos de temperatura, con un promedio de $4,15 \pm 0,21$ °C y la menor desviación estándar del conjunto de datos, por ser una zona muy homogénea de poca perturbación.

8.4.3. Oxígeno Disuelto

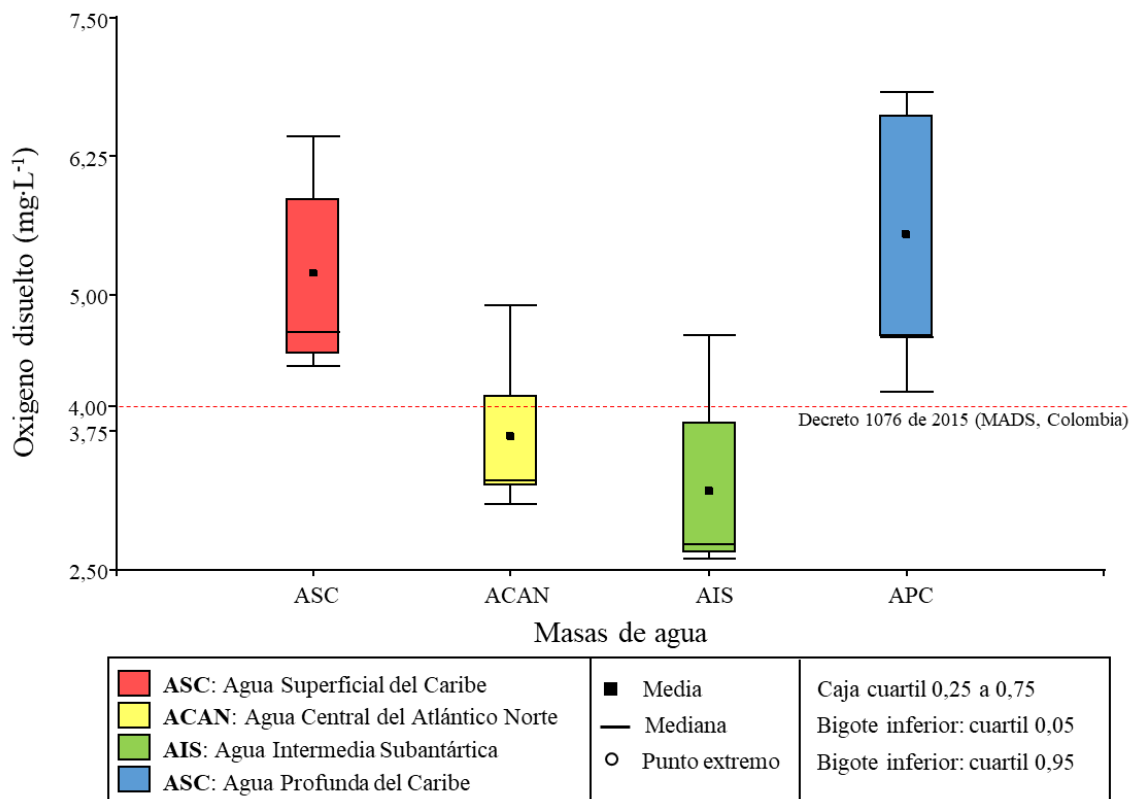


Figura 8.4. Valores promedio de Oxígeno disuelto registrado en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT)

La concentración de Oxígeno disuelto presento diferencias significativas con relación a la distribución vertical de las masas de agua ($H = 66,98$; $p < 0,0001$). El promedio de Oxígeno disuelto en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC), fue de $5,19 \pm 0,81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 8.4.). Estos valores se encuentran dentro de los rangos de oxígeno disuelto a nivel superficial del océano “debido al intercambio de CO_2 en la interacción océano-atmosfera” (Chester y Jickells, 2012, p.179). La concentración de Oxígeno disuelto en la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) fue de

$3,70 \pm 0,63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, muy cercano al promedio de la mínima concentración determinado en la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) que en promedio fue de $3,21 \pm 0,71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Los mínimos de oxígeno son un rasgo característico en zonas intermedias en la mayoría de las áreas oceánicas, debido a “la respiración de organismos y a la degradación de compuestos orgánicos”. (Chester y Jickells, 2012, p.181). Por su parte en la masa de Agua Profunda del Caribe (APC), formada a partir del agua profunda del Atlántico que ingresa al Caribe y se ubica más bajo de los 1.000 m (Giraldo, 1994, p.21). La concentración promedio de Oxígeno disuelto fue de $5,54 \pm 1,13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Esta masa de agua se caracteriza por ser rica en Oxígeno disuelto, ubicarse en las zonas profundas de la columna de agua y presentar bajas temperaturas (Chester y Jickells, 2012, p.183). Lo que dificultan que el oxígeno contenido sea metabolizado o liberado ya que la solubilidad del oxígeno está controlada por procesos físicos, efectos de la temperatura y la salinidad (Chester y Jickells, 2012, p.183).

La concentración de Oxígeno disuelto de la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) y de la masa de Agua Profunda del Caribe (APC) se encuentran por encima de $4,00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ criterio de calidad para la preservación de flora y fauna en ambientes acuáticos según el de Decreto 1076 de 2015; No obstante el 70 % de la determinación Oxígeno disuelto en la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) y el 100% de las concentraciones de Oxígeno disuelto en la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) se encuentran por debajo de este criterio.

8.4.4. Salinidad

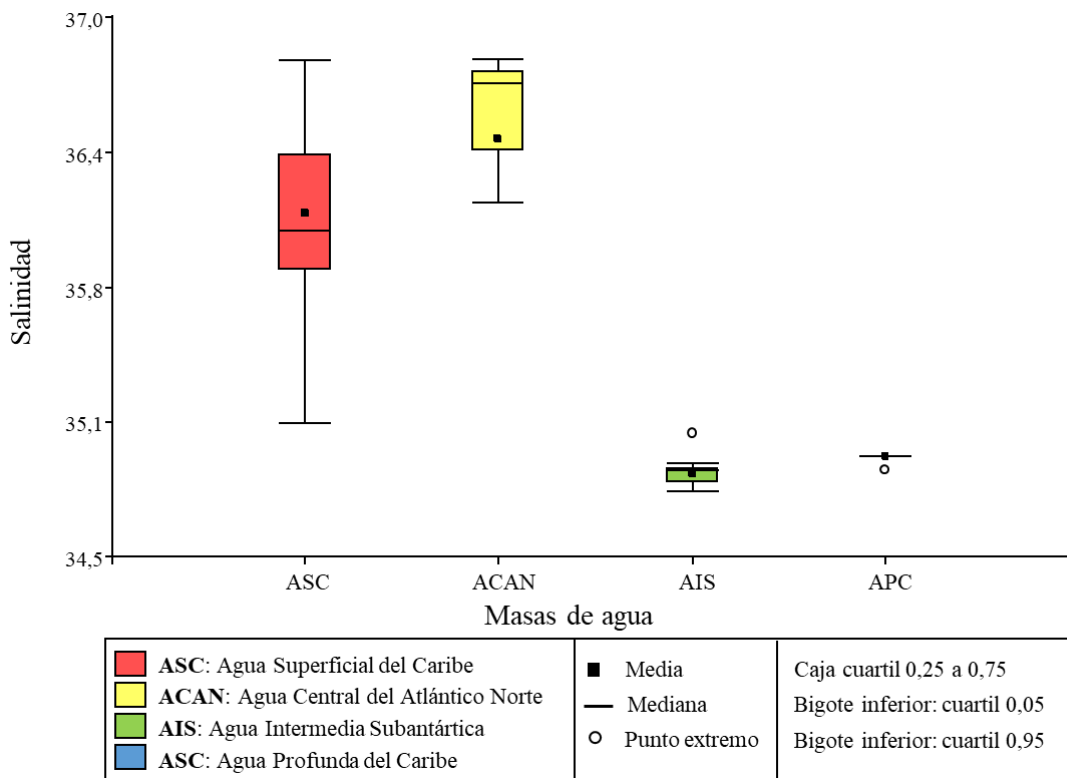


Figura 8.5. Valores promedio de Salinidad registrado en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT)

La zona superficial del océano presentó el mayor rango de salinidad, de 35,1 a 36,8 (Figura 8.5). La concentración de salinidad en su distribución vertical, presento diferencias significativas ($H = 90,18$; $p < 0,0001$) en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) registró un promedio de $36,1 \pm 0,44$. En la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) el promedio de salinidad fue de $36,4 \pm 0,54$, aunque la mayoría de los datos en esta masa de agua se agruparon con valores de salinidad por encima de 36,0; las estaciones E04, E05 y E06 registraron valores de 35,1 debido a la profundidad de las estaciones y a su cercanía con la masa de agua Intermedia Subantartica (AIS) que

junto a la masa de Agua de Profunda del Caribe (APC), registran promedios de salinidad de $34,9 \pm 0,05$ y $35,0 \pm 0,02$ respectivamente. Aunque no se cuenta con un criterio de calidad para la evaluación de este parámetro, se infiere que la salinidad del agua presenta características propias de ambientes oceánicos que varían con la profundidad caracterizando las masas de agua. Las altas concentraciones de salinidad registrados a nivel superficial son debido a procesos de evaporación, baja precipitación y la poca influencia de aporte de agua dulce por fuentes superficiales; Condiciones climáticas que caracteriza al departamento de La Guajira (Ricaurte et al., 2017)

8.4.5. pH

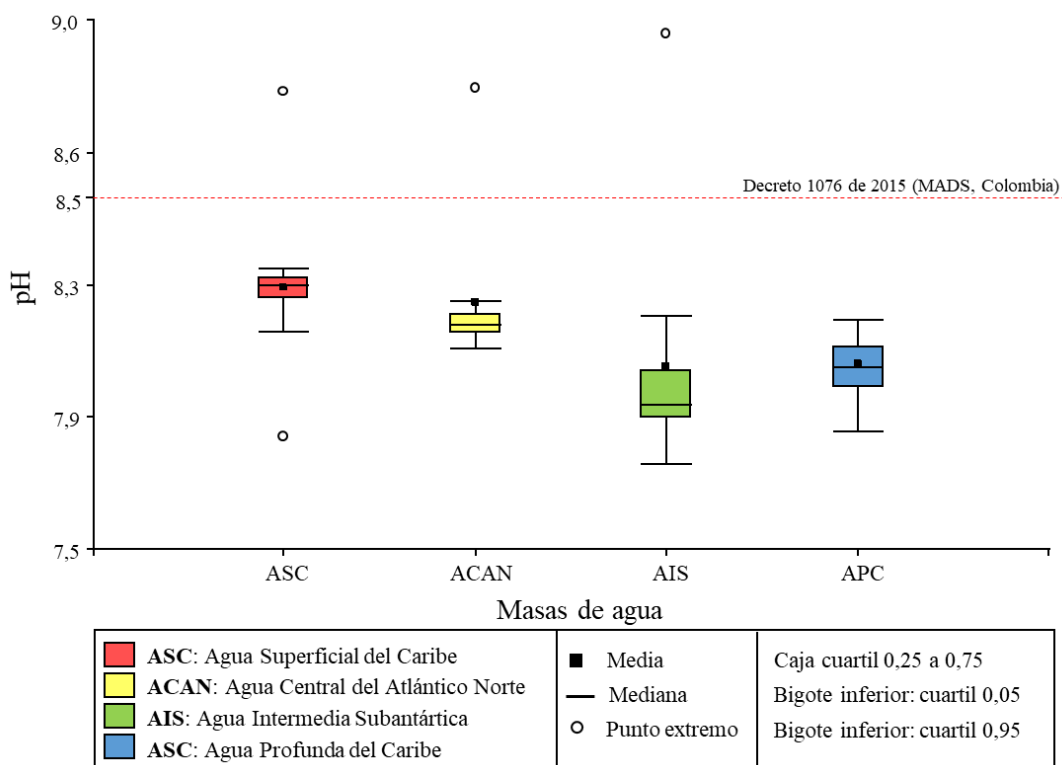


Figura 8.6. Valores promedio de pH registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).

Los valores de pH registrados en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira, Presentaron diferencias significativas ($H=50,58$; $p < 0,0001$) entre las masas de agua superficiales del océano en comparación con la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) y la masa de Agua profunda del Caribe (APC), donde no se presentaron diferencias significativas entre estas dos, evidenciando una tendencia de disminución en los valores de pH con relación a la profundidad en la columna de agua.

En la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) el promedio de pH fue de $8,25 \pm 0,14$; Valor muy cercado al registrado en la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) que fue de $8,20 \pm 0,20$. Por su parte la masa de agua Intermedia Subantártica (AIS) y la masa de agua Profunda del Caribe (APC) registraron valores de pH de $8,02 \pm 0,30$ y $8,03 \pm 0,09$ respectivamente. La distribución vertical de pH en la columna de agua presenta características propias de ambientes oceánicos, el cual tienden a ser alcalino; “debido al equilibrio de la absorción de dióxido de carbono y su sistema de carbonatos” (INVEMAR, 2016, p.94). Todos los valores de pH registrados en las diferentes masas de agua se encuentran dentro del rango de referencia de la norma colombiana Decreto 1076 de 2015, que establece criterios de calidad en un rango de pH de 6,50 a 8,50 para preservación de flora y fauna en ambientes marinos.

8.5. Nutrientes Inorgánicos.

8.5.1. Nitrato N-NO₃

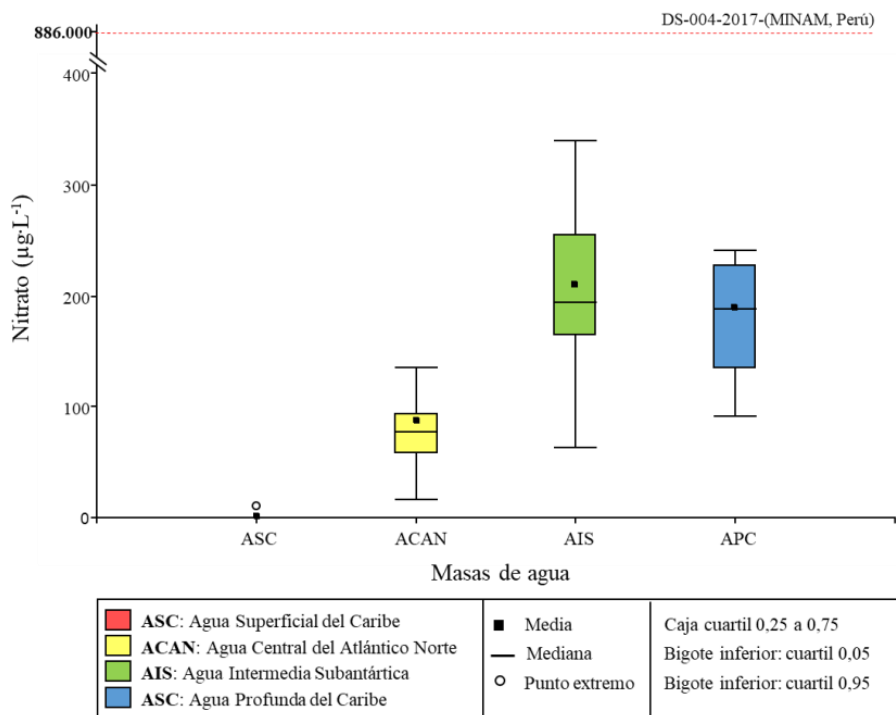


Figura 8.7. Valores promedio de Nitrato registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).

La concentración de Nitrato (N-NO₃⁻) en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira presento diferencias significativas entre masas de agua ($H=98,27$; $p < 0,0001$). La concentración más baja se registró en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) donde el 85% de los datos estuvieron por debajo del Límite de Cuantificación del Método ($<2,10$). La concentración de Nitrato aumento con la profundidad, registrando un promedio de $87,8 \pm 49,1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ en la masa Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) y una concentración promedio de $210 \pm 73,5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ en la masa de Agua Intermedia

Subantártica (AIS). Asimismo, en la masa de Agua Profunda del Caribe, la concentración promedio fue de $189 \pm 52,69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Los aportes de nutrientes a nivel oceánico y su distribución en las masas de agua se asocian a procesos naturales de circulación y acumulación de nutrientes en las profundidades del océano (Chester y Jickells, 2012, p.164). Esta acumulación actúa como soporte para el desarrollo de la vida acuática en la superficie o zona eufótica, donde se concentra la mayoría de los organismos acuáticos; la cual es enriquecida por las aguas frías del fondo que aportan nutrientes a las capas superficiales, debido a procesos de surgencia muy característicos de esta zona (Andrade, 2015, p.32).

Debido a que la legislación ambiental colombiana no establece un criterio de calidad para Nitratos en aguas marinas; Las concentraciones determinadas en la columna de agua se compararon con la normatividad peruana, que establece un Límite Máximo Permisible para aguas marinas, con fines de preservación de flora y fauna ($886.000 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) (referenciar norma) observándose valores menores a este límite para todas las estaciones evaluadas

8.5.2. Ortofosfato (PO₄)

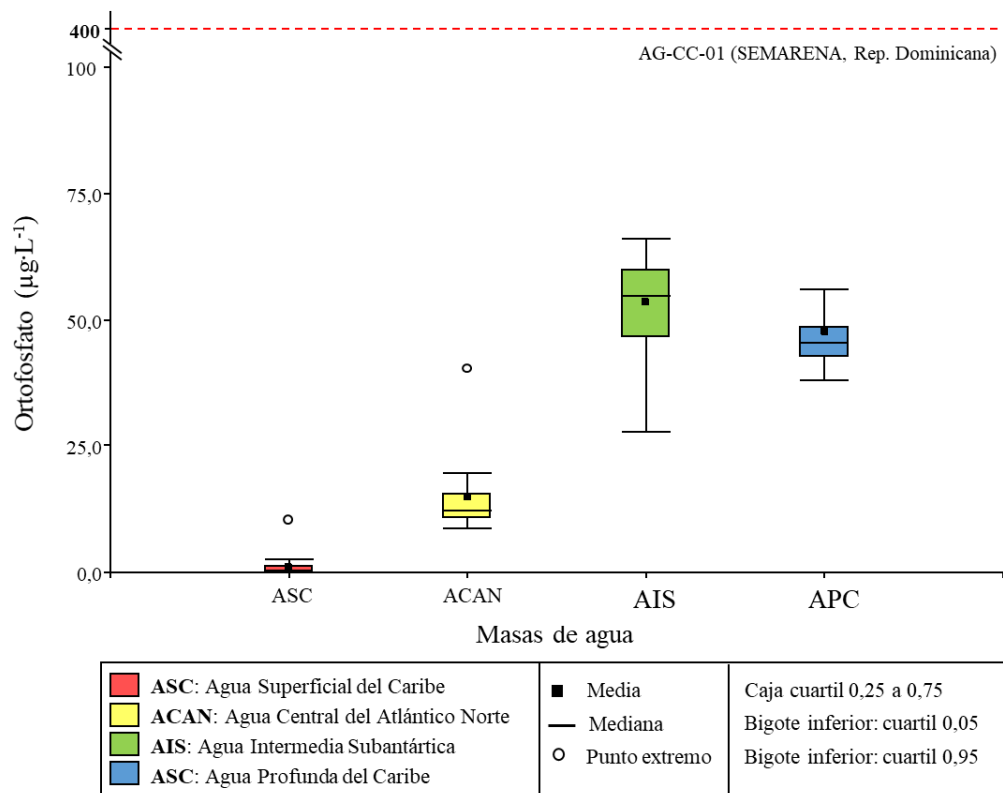


Figura 8.8 Valores promedio de Ortofosfato registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).

La concentración de Ortofosfato en ambientes oceánicos del departamento registro una tendencia similar a la registrada con los nitratos; Presentando diferencias significativas entre masas de aguas ($H=98,27$; $p < 0,0001$) y un aumento en la concentración de Ortofosfatos con la profundidad. El 82 % de las determinaciones en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) se encontraron por debajo del Límite de Cuantificación del Método (LCM: $<2,4$). En la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) la concentración promedio de Ortofosfato fue de $14,7 \pm 6,95 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ aumentando sustancialmente en la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) donde se determinó

un promedio de $53,3 \pm 15,16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; Siendo esta, la mayor concentración de Ortofosfatos registrada en el área de estudio. En la masa de Agua Profunda del Caribe (APC), la concentración promedio fue de $47,6 \pm 8,20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Al igual que en nitratos, la distribución de Ortofosfato en la columna de agua en ambientes oceánicos se encuentra influenciada por procesos naturales, patrones de circulación de corrientes debido al transporte de Ekman, (proceso de surgencia) que permiten el enriquecimiento de nutrientes en la capa superficial del océano, estimulando el crecimiento del fitoplancton ([Andrade, 2015, p.32](#)).

La zona de estudio presenta características propias de ambientes oceánicos donde se evidencia el consumo de Ortofosfato en la zona eufótica por parte de organismos fotosintetizadores, registrando la mayor concentración de este nutriente a medida que aumenta la profundidad.

Comparando la determinación de Ortofosfatos en ambientes oceánicos con los criterios de calidad según la norma AG-CC-01-SEMARENA de Republica Dominicana que establece un Límite Máximo Permisible (LMP) de $400 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para preservación de la vida acuática en ecosistemas marinos; Todos los valores se encuentran por debajo de este criterio de calidad.

8.5.3. Silicato (SiSO₂)

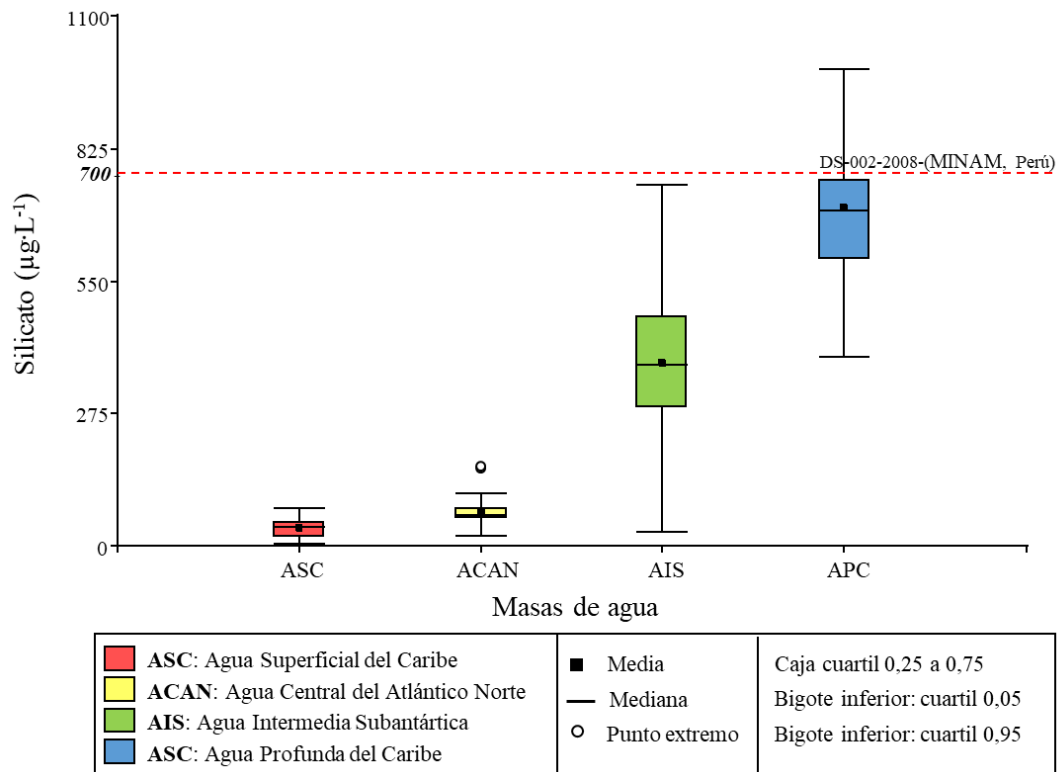


Figura 8.9 Valores promedio de Silicato registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).

La concentración de Silicato en la distribución vertical del océano presentó diferencias significativas ($H=86,55$; $p < 0,0001$). El promedio de silicatos determinado en la masa de Agua Superficial del Caribe fue de $36,2 \pm 21,454 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. La concentración de silicato aumento con la profundidad, registrando en promedio concentraciones de $71,0 \pm 29,17 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN) y de $377 \pm 162,58 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS); por su parte en la

masa de Agua Profunda del Caribe (APC) la concentración determinada fue de $699 \pm 192,75 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Los silicatos, aunque no hacen parte de los nutrientes limitantes que determinan el crecimiento del fitoplancton, si cumplen una función esencial para un grupo de ellas, las diatomeas y radiolarios; quienes requieren el silicato para la formación de la capa opal (Chester y Jickells, 2012). La distribución de este nutriente en la columna de agua está determinada por la profundidad de la estación, la deposición atmosférica y el hundimiento de organismos muertos (Chester y Jickells, 2012).

Comparando la determinación de Silicato en la columna de agua, con el criterio de calidad para la preservación de la vida acuática en ecosistemas acuáticos de Perú Decreto Supremo DS-002-2008 MINAN, el 97% de las estaciones se encuentran por debajo de este límite. Las determinaciones de Silicatos en la masa de Agua Profunda del Caribe (APC) que sobrepasan el criterio de calidad, corresponden a las estaciones más profundas, ubicadas por encima de los 2000 metros.

8.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

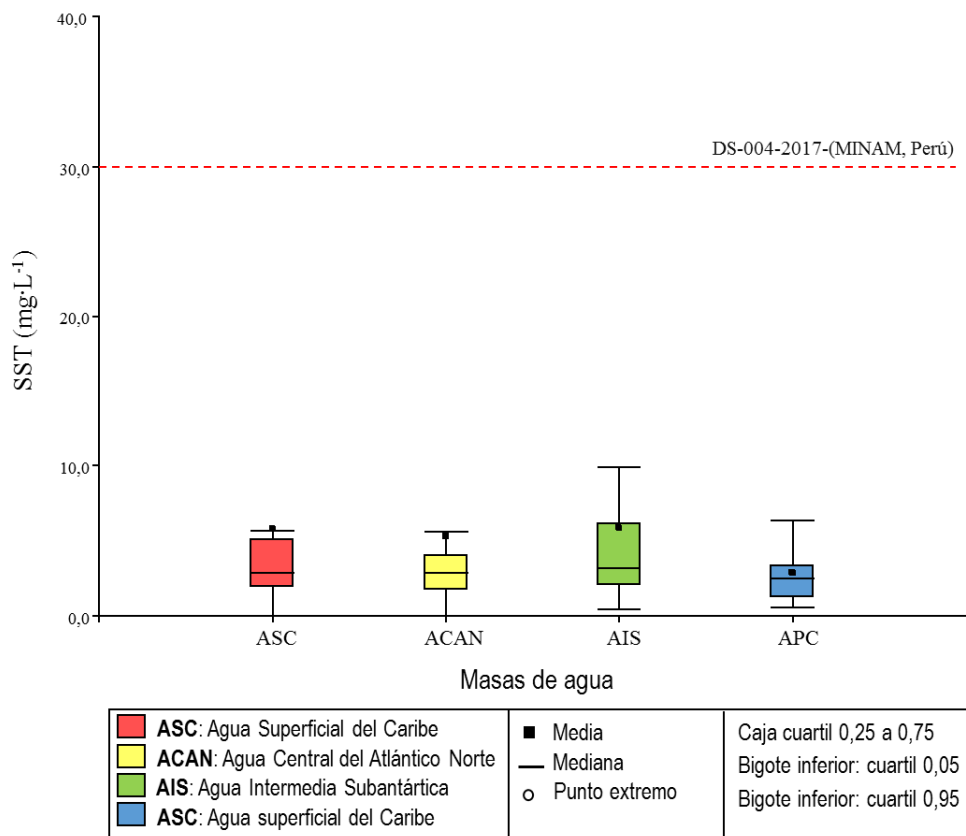


Figura 8.10 Valores promedio de SST registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).

La concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST), no presento diferencias significativas entre masas de agua ($H=2,16$; $p 0,5403$). El mayor promedio de Sólidos Suspendidos Totales (SST), se determinó en la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS), con un valor de $5,94 \pm 6,27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ en un rango de ($<0,50$ a $20,2$) a una profundidad entre los 490 y 1000 metros; Lo que registró una amplia desviación estándar entre los datos. Por su parte en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) el promedio de Sólidos fue de $5,76 \pm 6,88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Asimismo, en la masa de Agua Central de Atlántico

Norte (ACAN) el promedio de SST fue de $5,28 \pm 6,17$. En la masa de Agua Profunda del Caribe (APC) se determinó la menor concentración de sólidos, con un promedio de $2,91 \pm 1,93$.

La disminución de sólidos en la columna de agua en gran parte se debe a procesos relacionados con la materia orgánica (destrucción oxidativa) y disolución del material suspendido (Chester y Jickells, 2012, p.210). Ya que, en aguas oceánicas de baja turbidez, este material “está integrado principalmente por fitoplancton, detrito y partículas inorgánicas” (Chester, 1990. Como se citó en INVEMAR, 2016, p.99).

La mayor concentración de SST se determinó en las estaciones ubicadas al norte del departamento, más cercanas a la costa y de menor profundidad; coincidiendo con los bajos registros de transparencia en esta zona. Comparando las concentraciones de SST con los criterios de calidad ambiental para la preservación de la vida acuática, todos los datos se encuentran por debajo del límite.

8.7. Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD)

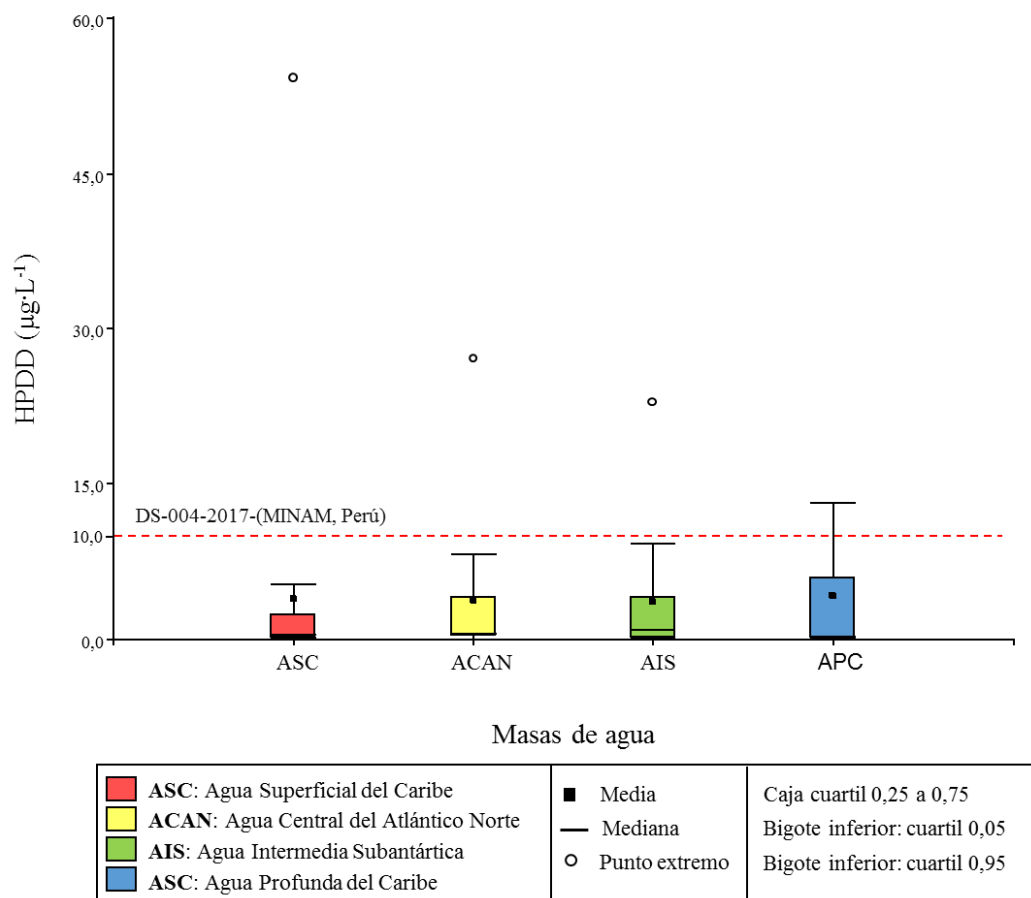


Figura 8.11. Valores promedio de HPDD registrados en ambientes oceánicos del departamento de la Guajira (representaciones gráficas BOX-PLOT).

La concentración de Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos HPDD, no presenta diferencia significativa ($H=0,40$; $p 0,9405$) en la distribución vertical de la columna de agua; registro valores en promedio de $3,95\pm 9,87$ en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC) y $3,70\pm 6,02$ en la masa de Agua Central del Atlántico Norte (ACAN); asimismo, se registraron valores en promedio de $3,68\pm 6,01$ y $4,20\pm 6,38$ en las

masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) y la masa de Agua Profunda del Caribe (APC) respectivamente.

La alta desviación presentada en el conjunto de datos es debido a valores atípicos registrados en la estación E02 con valores de $54,2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ a nivel superficial, y de $27,1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ y $22,8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en la masa de Agua Central del Atlántico Norte y la masa de Agua Intermedia Subantártica (AIS) respectivamente. El 88 % de las determinaciones de HPPD estuvieron por debajo del criterio de calidad de la Guía UNESCO – 1976, que establece un límite máximo de $10,0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para definir las aguas marinas como no contaminadas por petróleo.

8.8. Índice de Calidad Ambiental de Aguas Marinas con fines de preservación de flora y fauna (ICAM_{PFF})

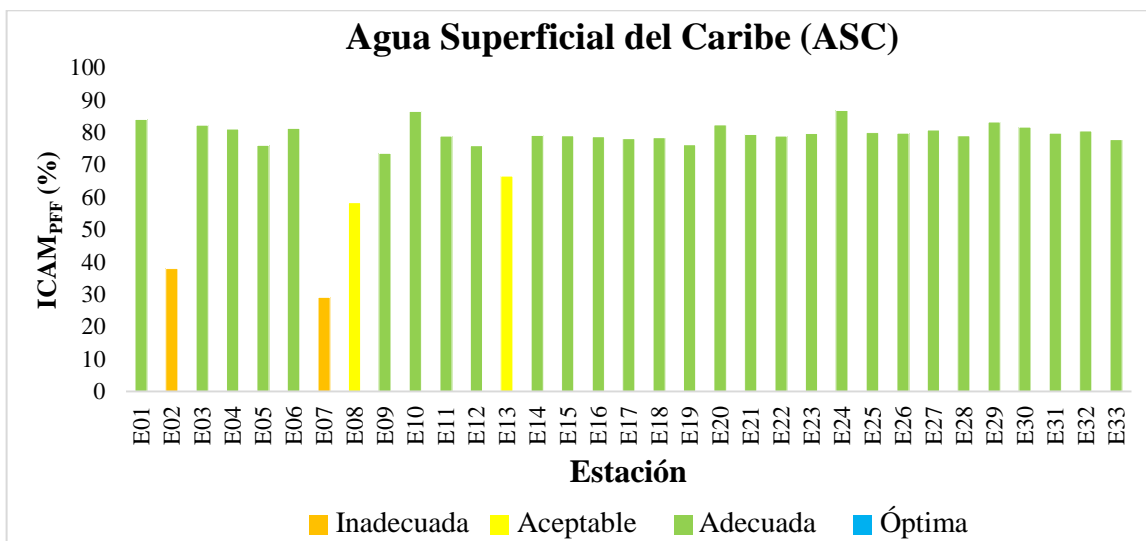


Figura 8.12 Calidad del agua en la masa de Agua Superficial del Caribe (ASC), en el departamento de La Guajira, evaluadas con el ICAM_{PFF}.

En el análisis de la calidad del agua en ambientes oceánicos a nivel superficial del departamento de La Guajira, el 88% de las estaciones presentaron una calidad del agua adecuada; dos de las estaciones evaluadas (E08, E13), tuvieron una calidad del agua aceptable; A su vez, las estaciones E02 y E07 presentaron un resultado Inadecuado en la escala de calidad para este indicador (Figura 8.12).

La calidad del agua adecuada en el 88% de las estaciones, se debió a que las variables fisicoquímicas en estas estaciones conservan propiedades apropiadas para el desarrollo de la vida acuática en ambientes oceánicos, ya que las concentraciones promedio de los parámetros evaluados, se encuentran por debajo de las normas de calidad del agua para preservación de la vida acuática en ambientes marinos tanto en Colombia como en países con jurisdicción en el mar Caribe, conservando niveles adecuados de Oxígeno disueltos, bajas concentraciones de nutrientes inorgánicos y de contaminantes orgánicos.

Por su parte, la categoría de calidad aceptable (E08, E13) e inadecuada (E02 y E07) ubicadas en el rango de 29 al 66% en la escala del indicador, es debido particularmente a las altas concentraciones de Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD) determinadas a nivel superficial en esas estaciones. La presencia de estos compuestos se atribuye al uso de combustibles fósiles y sus derivados y al tráfico de embarcaciones, teniendo en cuenta que las aguas oceánicas de La Guajira son una zona activa de tráfico marítimo.

La evaluación de la calidad del agua a partir del ICAM_{PFF}, se realizó con la evaluación de seis de las ocho variables con el cual fue diseñado el indicador, se excluyen las variables DBO y CTE, las cuales presentan poca relevancia a nivel oceánico. La

Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO, es una variable más aplicada a aguas continentales con altos contenidos de materia orgánica y es muy útil en la evaluación de plantas depuradoras de aguas residuales, así mismo los CCE que evalúan la calidad sanitaria de cuerpos de agua, tiene énfasis especial en actividades de contacto primario que pongan en riesgo la salud del ser humano.

En términos generales la calidad del agua a nivel superficial en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira presento un estado de calidad adecuada para la preservación de flora y fauna derivado de la naturaleza misma de las aguas y la poca intervención antrópica; La calidad adecuada para la mayoría de las estaciones (88%) se debe a concentraciones adecuadas de pH y Oxígeno disuelto, al aporte natural de nutrientes inorgánicos derivados de la dinámica oceánica en el intercambio océano – atmosfera y procesos de surgencia que enriquecen las aguas superficiales. Asimismo, a la baja concentración de Solidos Suspendidos Totales (SST) y de contaminantes orgánicos como los Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos (HPDD), siendo esta la variables que más apporto para que la calidad del agua en las estaciones E02 y E07 se clasificaran como inadecuada, y que las estaciones E08 y E13 presentaran una clasificación aceptable ya que en estas estaciones las concentraciones de HPDD sobrepasaron los Límites Máximos Permisibles (LMP) para garantizar como adecuada la calidad del agua, que según la Guía UNESCO – 1976, estable un límite máximo de $10,0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para definir las aguas marinas como no contaminadas por petróleo.

9. Conclusiones

La concentración de variables in situ presentó características propias de ambientes oceánicos, con altos registros de transparencia y baja concentración de turbidez. La mayor concentración de oxígeno disuelto se determinó en la masa de agua superficial y la masa de agua profunda del caribe, disminuyendo a su mínima concentración en las masas de aguas intermedias, llegando incluso a valores por debajo de los criterios de calidad para la preservación de la vida acuática ($4,00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ocasionada principalmente por procesos de respiración y degradación de materia orgánica; rasgos característicos en la mayoría de los océanos. Por su parte la Salinidad presento mayor distribución de los datos en las masas de aguas superficiales, disminuyendo su concentración con la profundidad, para mantener valores constantes en la masa de Agua Profunda del Caribe (APC). El pH se mantuvo en un rango típico para aguas oceánicas, conservando sus características de alcalinidad debido principalmente al equilibrio entre los componentes del sistema de carbonatos y la absorción del dióxido de carbono.

La concentración de Solidos Suspendidos Totales SST no presento diferencias significativas en la columna de agua y aunque se determinó una mayor concentración de sólidos en las estaciones más cercanas a la costa y de menor profundidad, relacionada con posibles aportes de materia suspendido por el transporte atmosférico y procesos de escorrentía de aguas superficiales; estos valores fueron bajos en comparación con los criterios de calidad según el decreto supremo DS-004-2017 MINAN-Perú.

Los nutrientes inorgánicos Nitratos, Ortofosfatos y Silicatos, presentaron una tendencia de aumento con relación a la profundidad creando una zona de sustento o soporte en los niveles profundos de la columna de agua, que a través de la dinámica oceánica que incluye las corrientes marinas, patrones de vientos alisios y procesos de surgencia, enriquecen las zonas superficiales del océano donde se desarrolla en mayor parte la vida acuática, derivada de procesos como la fotosíntesis y por consiguiente la productividad biológica.

La concentración de los contaminantes orgánicos evaluados (Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos) para la mayoría de las estaciones se encontró por debajo del criterio de calidad establecido por la UNESCO (10 ug/L) para definir aguas contaminadas por petróleo sólo en las estaciones E02 y E07 se registraron valores por encima de este criterio.

La aplicación del Índice de Calidad Ambiental Marina para Preservación de Flora y Fauna ICAM_{PPF} determino una calidad del agua adecuada en el 88% de las estaciones. Los criterios de calidad inadecuado y aceptable que presentó el índice corresponden a estaciones donde los contaminantes orgánicos y los nutrientes sobrepasan los criterios de calidad para la preservación de la flora y fauna.

En general, debido a la poca interacción por actividades antrópicas que se registran en la zona; Las aguas oceánicas del departamento de La Guajira conservan

características naturales del medio para garantizar la vida acuática, esto se deriva de las comparaciones de las variables con los criterios de calidad para la preservación de flora y fauna donde la mayoría de las determinaciones se encuentran por debajo o dentro de los criterios establecidos.

Aunque los ambientes oceánicos del departamento de La Guajira han sido poco intervenidos por procesos antrópicos relacionados con la exploración y producción de hidrocarburos y que en la actualidad las aguas oceánicas del departamento de la guajira son una zona activa para el transporte marítimo; La dinámica oceánica y los ciclos biogeoquímicos siguen siendo las mayores aportantes en los cambios de la calidad del agua que se registra tanto a nivel superficial como en toda la columna de agua.

10. Recomendaciones

Complementar los estudios sobre la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos que incluya elementos que dependiendo de su nivel de concentración pueden llegar a ser tóxicos para los organismos como es el caso de algunos metales pesados que pueden ingresar a través del aporte fluvial, atmosférico y actividades antropogénicas (Botello et al., 2005, p.330). Aunque la mayor concentración de metales pesados se encuentra en ambientes costeros, el monitoreo en ambientes oceánicos reviste gran importancia por los efectos toxicológicos y de bioacumulación que se ha registrado sobre las especies marinas. (Botello et al., 2005).

Integrar los estudios de la evaluación de la calidad del agua en ambientes oceánicos con la calidad de los sedimentos marinos ya que estos actúan como “trampas”, acumulando grandes cantidades de metales pesados, facilitando la obtención de información de la fuente contaminante (Bonilla et al., 2003); de igual manera, la relación que existe entre el nivel de oxígeno de fondo y la concentración de algunos metales como el Cadmio (Cd) y Molibdeno (Mo) en los sedimentos ofrece una buena oportunidad para estudiar la evolución oceanográfica del margen continental ya que las variaciones de estos metales a lo largo de una columna de sedimento permiten interpretar cambios en la concentración de oxígeno disuelto de las aguas subsuperficiales y relacionarlos, por ejemplo, con la productividad biológica, la surgencia y con la dinámica de las masas de aguas (Valdéz y Ortlieb, 2001). Teniendo en cuenta que la naturaleza, granulometría y

características fisicoquímicas de los sedimentos de la plataforma continental son típicas para cada área del fondo oceánico (Bonilla et al., 2003).

Partiendo de las características oceanográficas del Pacífico y el Caribe Colombiano; se recomienda actualizar la legislación ambiental colombiana con criterios de calidad en ambientes oceánicos para la preservación de flora y fauna que incluya variables indicadoras de contaminación como los hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos, Metales Pesados, Sólidos Suspendedos Totales (SST), Nutrientes Inorgánicos y Turbidez; ya que la falta de normatividad en el país aplicable al medio marino obliga a realizar comparaciones con normas internacionales que fueron validadas en ecosistemas diferentes incurriendo en errores de comparación al momento de interpretar los resultados.

Estandarizar un Índice de Calidad Ambiental aplicado a ambientes oceánicos que permita interpretar mejor los resultados, que tenga en cuenta la dinámica oceánica y los cambios que se presentan en la columna de agua. ya que hasta el momento el único índice que existe en Colombia en la matriz marina se validó con datos costeros y solo aplica para las masas de agua a nivel superficial excluyendo las condiciones o cambios que se registran en las masas de agua.

11. Bibliografía

- Acosta Ramos, C., y Franco-Zárate, J. (2015). *Extracción de hidrocarburos costa afuera en Colombia: panorama legal y retos a partir de las zonas francas costa afuera u offshore*. Obtenido de Revista e-mercatoria. 14, 1 (jul. 2015), 57-92. : DOI:<https://doi.org/10.18601/16923960.v14n1.03>
- Acuña-González, J., Vargas-Zamora, J., Gómez-Ramírez, E., y García-Céspedes, J. (2004). *Hidrocarburos de petróleo, disueltos y dispersos, en cuatro ambientes costeros de Costa Rica*. Rev. biol. trop vol.52 suppl.2 San José Dec. 2004. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/26575/26784>
- Andrade Amaya, C. (2015). *Oceanografía Dinámica de la Cuenca Colombia*. Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”. Facultad de Oceanografía Física. Cartagena de Indias, Colombia. 205 p.
- APHA (American Public Health Association), AWWWA (American Water Works Association) y WEF (Water Environment Federation). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed. United States of America. 981 p.
- Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., Robledo C.W. (2008). *Manual del Usuario*, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P., y Andrade, C. (2006). *Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana*. . Obtenido de REV. ACAD. COLOMB. CIENC.: VOLUMEN XXX, NÚMERO 115-JUNIO DE 2006: <http://www.docentes.unal.edu.co/gpoveda/docs/Bernal%20et%20al%20ACCEFY N%202006.pdf>
- Betanzos, A., Capetillo N., Lopeztequi A., y Martínez, B. (2013). *Variación espacio-temporal de la turbidez y calidad en cuerpos de agua marina de uso pesquero, región norcentral de Cuba, 2008-2010* . Obtenido de Serie Oceanológica. No. 12, 2013: <https://www.oceandocs.org/handle/1834/5383>
- Bonilla, J., Aranda, S., Ramírez, C., Moya, J., y Marquez, A. (2003). *Calidad de los sedimentos superficiales de la Ensenada Grande del Obispo. Estado Sucre-Venezuela*. Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela. 42(1/2): pp.3–27.

- Botello, A., Rendón Von Osten, J., Gold-Bouchot, G., y Agraz-Hernández, C. (2005). *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental : diagnóstico y tendencias*. 2da Edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Castellanos, A., Lombana, J. y Ortiz, M. (2017). *Exploración y explotación de hidrocarburos aguas afuera (offshore): estrategia logística para Barranquilla, una ciudad en transformación*. *Equidad & Desarrollo*, (28), 85-111. doi: <http://dx.doi.org/10.19052/ed.4082>
- Chester, R., y Jickells, T. (2012). *Marine Geochemistry*. Third Edition. Londres: Blackwell Publishing Ltd. Pp 438.
- Cifuentes, J. L., Torres, M. D., y Frías M, M. (1997). *El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*. Obtenido de Fondo de cultura economica. México, D.F.170 pp.: <http://www.bionica.info/biblioteca/Cifuentes1997b.pdf>
- Cuatecontzi, D. H., & Gasca, J. (2004). Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Cambio climático: una visión desde México, 87. <https://www.iies.unam.mx/wp-content/uploads/2016/03/Victor-Jaramillo-Cambio-Climatico-Una-Vision-desde-Mexico-.pdf>
- Diersing, N. (2009). *Water Quality: Frequently Asked Questions*. Obtenido de Florida Keys National Marine Sanctuary, Key West, FL: <https://nmsfloridakeys.blob.core.windows.net/floridakeys-prod/media/archive/scisummaries/wqfaq.pdf>
- Emery, W. (2003). *Water Types and Water Masses*. Obtenido de OCEAN CIRCULATION. University of Colorado, Boulder, CO, USA. Pp 1556 - 1567: http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter11/Ency_Atmos/Ocean_Circ_Water_Types_Masses.pdf
- Emery, W., y Meincke, J. (1986). *Global water masses: Summary and review* . Obtenido de Oceanologica Acta 1986. Vol 9 - N° 4. Pp.383–391.: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00110/22090/19731.pdf>
- Garay Tinoco, J. A. (2004). *Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar PNICM*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" - INVEMAR. Santa Marta. 110 p.: http://www.cco.gov.co/docs/cont_marina/pnicm-01.pdf

- Garay, J., G. Ramírez, J. Betancourt, B. Marín, B. Cadavid, L. Panizzo, J. Lesmes, H. Sánchez y A. Franco. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: Aguas, sedimentos y organismos*. INVEMAR. Santa Marta. 177 p.
- Giraldo, L. (1994). *Análisis de masas de agua y control de la calidad de información oceanográfica*. Obtenido de Boletín Científico CIOH (15). Pp. 17-38.:
http://cecoldigital.dimar.mil.co/144/1/dimarcioh_1994_boletincioh_15_17-38ok.pdf
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. Quinta edición. México: Mc Graw Hill.
- Hernández-Ayón, J., Zirino, A., Marinone, S., Canino-Herrera, R., y Galindo-Bect, M. (2003). *Relación pH-densidad en el agua de mar*. Obtenido de Ciencias Marinas, vol. 29, núm. 4, octubre, 2003, pp. 497-508:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48029412>
- Hernández-Guerra, A., y Joyce, T. (2000). *Water Masses and Circulation in the Surface Layers of the Caribbean at 66° W*. Obtenido de GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 27, NO. 21, PAGES 3497-3500, NOVEMBER 1, 2000 :
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1999GL011230>
- INVEMAR (2013). *Aguas, sedimentos y comunidades marinas antes de la perforación exploratoria del pozo Orca*. Ruiz-López, J., García, L., Tigreiros, P., Martínez, M., Uribe, C., Posada, T., . . . Parrado, P. Coordinación de Servicios Científicos. INVEMAR. Informe Técnico Final para Petrobras Colombia Ltd. Santa Marta, D.T.C.H. 346 p. + Anexos.
- INVEMAR (2016) *Caracterización Ambiental del Área de Perforación Exploratoria Marina Diamante - APEM DIAMANTE - Bloque RC10. Caribe Colombiano*. Editores: Betancourt, J., Castañeda, J., Morales, D., Murcia, M., Ordóñez, A., Bastidas, M., . . . Fundacion Omacha. Coordinación de Servicios Científicos, INVEMAR, Informe Técnico Final para la empresa GEOCOL S.A. Santa Marta. 371 p. + Anexos.
- INVEMAR. (2017). *Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras en el Caribe y Pacífico colombianos*. Garcés, O. y L. Espinosa (Eds.). Obtenido de Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM: INVEMAR, MADS y CAR costeras. Informe técnico 2016. Serie de Publicaciones Periódicas No. 4 (2017) del INVEMAR, Santa Marta. 260 p.: <https://doi.org/10.21239/V9HW3X>

- ISTAS. (2012). *Informe sobre los principales impactos de las prospecciones petrolíferas en el mar*. Recuperado el 15 de agosto de 2018, de Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud. :
<http://www.istas.ccoo.es/descargas/Informe%20prospecciones%20petroliferas-final.pdf>
- Jean-François , M. (2004). *Los océanos*. . SIGLO XXI Editores (1 de enero de 2004). 120 p.
- Lozano, Medellín J, y Navas, G. (2010). *Contexto climatológico y oceanográfico del mar caribe colombiano*. Pp 52-85. INVEMAR (Eds.). 2010 Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales Invenmar No. 20 p. 458:
http://www.invenmar.org.co/redcostera1/invenmar/docs/8868Version_Final_Libro_Invenmar-ANH.pdf
- MADS (2015). *Decreto 1076 de 2015. "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible"*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. 654 p. Republica de Colombia. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/decretos>
- MADS (2018). *Decreto 703 de 2018. "Por el que se efectúan unos ajustes al Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y se dictan otras disposiciones"*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. 15 p. Republica de Colombia. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/decretos>
- MADS. (2010). *Decreto 3930 de 2010. Usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible MADS. Recuperado el noviembre de 2018, de http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf
- Mafla, J. F., y Bernate, J. C. (2015). *Zonas Francas Offshore en Colombia. Oportunidades y desafíos de un nuevo marco regulatorio*. Recuperado el 10 de septiembre de 2018, de Revista Instituto Colombiano de Derecho Tributario - Núm. 73 - Año 52 :
http://www.icdt.co/publicaciones/revistas/revista73/PUB_ICDT_ART_MAFLAJoseFrancisco_BERNATEJuanCamilo_ZonasFrancasOffshoreenColombia.Oportunidadesydesafiosdeunnuevomarcoregulatorio_Revista%20ICDT73_Bogota_15..pdf
- Mann, K. H., y Lazier, J. (2006). *Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical interactions in the Oceans*. Obtenido de Blackwell Publishing Ltd:

- http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/OF_files/Dynamics%20of%20Marine%20Ecosystems%203era%20edicio%CC%81n.pdf
- Mercado, J. M. (2002). Ecofisiología y bomba biológica en el océano. *Interciencia*, 27(10), 537-543. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33907305.pdf>
- MINAM (2008). *Decreto Supremo No. 002-2008-MINAM. por el cual se aprueban los estándares nacionales de calidad ambiental para agua*. Normas legales. 6 p. Lima Perú. Obtenido de http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/ds_002_2008_eca_agua.pdf
- NC 25. (1999). *Evaluación del objetos hidricos para uso pesquero. Especificaciones. Ciudad de la Habana, Cuba*. Obtenido de Oficina Nacional de Normalización (NC). 12 p.
- ONU. (2016). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 14: Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas.: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>
- Pérez Cruz, C. (2010). *Evaluación de la calidad del agua de mar en playas recreativas en el corredor turístico de Los Cabos B.C.S* (Tesis de maestría). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur.: https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/243/1/perez_c.pdf
- PNUD. (2016). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivo 14: Vida Submarina*. Recuperado el 15 de agosto de 2018, de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-14-life-below-water.html>
- Posada, B., Dias, M., Navas, R., Batista-Morales, A., Vivas-Aguas, L., Narváez, S., . . . Vega-Sequeda, J. (2012). *Capítulo II. Estado del ambiente abiótico, calidad de aguas y biodiversidad marina: indicadores de estado. Pp. 27- 78*. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2011. Serie de Publicaciones Periódicas del Invemar No. 8, Santa Marta. 203 p.: http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/IER_2011.pdf
- Ricaurte, C., Bastidas, M., & (Eds.). (2017). *Regionalización oceanográfica: una visión dinámica del Caribe*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés (INVEMAR). Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 14. Santa Marta, Colombia 180 p.

- Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G. (2014). *Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone*. *Nature*, Vol 513 Num 45.
doi:10.1038/nature13636.
- SEMARENA. (2001). *SECRETARIA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DE REPÚBLICA DOMINICANA. Norma de calidad del agua y control de descargas AG-CC-01*. 53 p. Obtenido de https://www.elaw.org/sites/default/files/content_type_law_attachment/do.calidad.del_agua_.pdf
- Silva, N. (2006). *Oxígeno disuelto, pH y nutrientes en canales y fiordos australes*. Obtenido de Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 37-43, 2006.:
<http://www.cona.mil.cl/revista/spanish/3-2%20Ox%C3%ADgeno-nutrientes.pdf>
- Talley, L., Pickard, G., Emery, W., y Swift, J. (2011). *Descriptive physical oceanography*. Elsevier Ltd. Sexta Edición. Estados Unidos. 106 p.
- UNESCO. (1976). *Guía de Procedimientos Operacionales para el Proyecto Experimental de Vigilancia de la Contaminación del mar como parte de IGOSS, Manuales y Guías N° 7,13 COI/OMN*. Obtenido de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000059970_spa
- URS Holdings. (2005). *Elaboración de tres (3) Anteproyectos: Normas de Calidad de Aguas Marinas y Costeras, Norma para el Control de Olores Molestos y Normas de Calidad del Aire – Contrato PAN-09-2003*. URS Holdings, Inc.:
<http://gracilarias.org/wp-content/uploads/2014/06/Normas%20de%20Calidad%20de%20Aguas%20Marinas%20y%20Costeras.pdf>
- Valdés, J., y Ortlieb, L. (2001). *Paleoxigenación subsuperficial de la columna de agua en la bahía Mejillones del sur (23°S): Indicadores geoquímicos en testigos de sedimento marino*. *Investigaciones marinas*, 29(1), pp. 25-35. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-71782001000100003>
- Vivas-Aguas, L. J. y S. M. Navarrete-Ramírez. (2014). *Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPPF). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 69, Santa Marta. 32 p.
- Zirino, A., Fuhrmann, R., Oksanen-Gooden, D., Lieberman, S., Clavell, C., y Seligman, P. (1986). *pH-temperature-nutrient relationships in the eastern tropical Pacific Ocean*. *Science of The Total Environment*. Volume 58, Issues 1–2, 15 December 1986 p. 117-137: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(86\)90082-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(86)90082-3)

Zirino, A., Hernández Ayón, J., Fuhrmann, R., Bernstein, R., Lara Lara, J., Gaxiola Castro, G., y Álvarez Borrego, S. (1997). *Estimaciones superficiales de PCO₂ en el Golfo de California a partir de mediciones continuas de pH e imágenes de satélite*. *Cienc. Mar.*, 23(1): pp.1-22. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, México. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/480/48023101.pdf>

12. Anexos

Anexo 12.1. Datos Fisicoquímicos de las estaciones en ambientes oceánicos del departamento de La Guajira.

<i>Estación</i>	<i>Masa de agua</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Transp. (m)</i>	<i>Temp. (m)</i>	<i>Salinidad</i>	<i>pH</i>	<i>OD (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>N-NO₃ (µg/L)</i>	<i>PO₄ (µg/L)</i>	<i>Si-SiO₂ (µg/L)</i>	<i>HPDD (mg/L)</i>
E01	ASC	2	10,0	27,9	27,9	8,29	5,88	18,0	0,00	2,40	17,9	1,41
E01	ACAN	250	-	15,9	15,9	8,07	4,44	17,2	23,6	16,0	22,8	3,32
E01	AIS	496	-	9,2	9,18	7,96	3,83	17,9	62,4	24,5	35,1	2,46
E02	ASC	2	11,0	27,8	27,8	8,19	6,28	22,8	0,00	2,44	8,16	54,2
E02	ACAN	390	-	11,2	11,2	8,19	4,05	12,6	74,9	25,4	43,0	27,1
E02	AIS	785	-	7,4	7,40	8,15	4,11	20,2	88,7	33,6	42,5	22,8
E03	ASC	2	11,0	24,4	24,4	8,22	5,88	19,3	3,84	0,00	7,27	1,56
E03	ACAN	400	-	12,7	12,7	8,81	4,11	19,8	135	23,3	88,6	4,95
E03	AIS	820	-	7,0	6,97	8,74	3,98	15,9	281	67,4	301	2,56
E04	ASC	2	12,0	24,5	24,5	7,82	5,82	16,4	0,00	0,00	4,40	2,41
E04	ACAN	500	-	9,3	9,30	8,75	3,82	15,9	166	25,1	111	1,46
E04	AIS	1000	-	5,9	5,89	8,87	4,59	16,7	284	52,4	360	1,45
E05	ASC	2	6,50	24,1	24,1	8,80	6,25	18,2	0,00	0,00	16,2	0,94
E05	ACAN	500	-	9,5	9,54	8,73	3,83	20,6	184	30,4	164	2,39
E05	AIS	1000	-	5,8	5,81	8,96	4,63	19,9	174	35,4	290	1,58
E06	ASC	2	11,0	25,8	25,8	8,12	5,74	23,4	0,00	4,21	10,5	2,60
E06	ACAN	500	-	9,1	9,11	8,31	3,80	20,1	229	40,1	161	2,59
E06	AIS	1000	-	5,9	5,89	8,39	4,48	19,7	324	64,8	327	4,41
E07	ASC	2	15,0	25,2	25,2	8,20	6,43	0,00	10,6	0,00	2,14	16,3
E07	ACAN	150	-	17,6	17,6	8,16	4,80	0,66	87,9	11,8	77,9	14,6
E07	AIS	550	-	7,9	7,85	8,03	3,82	2,10	162	29,1	129	20,7

<i>Estación</i>	<i>Masa de agua</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Transp. (m)</i>	<i>Temp. (m)</i>	<i>Salinidad</i>	<i>pH</i>	<i>OD (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>N-NO₃ (µg/L)</i>	<i>PO₄ (µg/L)</i>	<i>Si-SiO₂ (µg/L)</i>	<i>HPDD (mg/L)</i>
E07	APC	2028	-	4,1	4,10	8,07	6,62	1,61	237	42,7	595	22,4
E08	ASC	2	13,0	25,2	25,2	8,27	6,42	2,69	2,74	0,00	2,14	12,4
E08	ACAN	150	-	17,5	17,5	8,16	4,79	1,26	101	12,9	60,7	11,0
E08	AIS	550	-	7,9	7,90	7,96	3,82	9,92	227	47,4	341	6,90
E08	APC	2140	-	4,1	4,10	8,15	6,61	0,57	222	44,9	454	7,85
E09	ASC	3	18,0	25,4	25,4	8,28	6,36	4,58	0,00	0,00	13,6	7,02
E09	ACAN	150	-	18,1	18,1	8,20	4,88	2,00	125	13,2	63,6	7,45
E09	AIS	550	-	7,9	7,88	8,01	3,83	0,51	266	56,3	479	6,27
E09	APC	2035	-	4,1	4,10	8,13	6,62	1,23	212	42,7	679	6,43
E10	ASC	2	24,0	28,7	28,7	8,25	6,32	1,80	0,00	0,00	40,6	1,65
E10	ACAN	150	-	19,0	19,0	8,16	4,63	1,90	62,8	14,6	56,9	1,27
E10	AIS	550	-	8,1	8,05	8,00	3,88	2,80	114	65,9	168	1,15
E10	APC	2091	-	4,1	4,10	8,07	6,80	2,20	134	48,4	451	1,35
E11	ASC	2	18,0	26,5	26,5	8,11	5,62	0,84	0,00	10,3	16,3	5,39
E11	ACAN	150	-	18,3	18,3	7,99	4,89	1,53	96,7	12,3	40,6	8,33
E11	AIS	550	-	7,6	7,60	7,76	3,83	1,44	294	59,5	325	7,46
E11	APC	2129	-	4,1	4,09	7,91	6,62	0,97	228	56,2	776	5,99
E12	ASC	2	11,0	29,4	29,4	8,24	6,28	0,46	5,75	0,00	64,9	7,56
E12	ACAN	150	-	19,3	19,3	8,15	4,56	1,40	42,8	14,1	75,6	3,78
E12	AIS	550	-	7,7	7,73	7,93	3,93	1,22	232	63,1	468	5,34
E12	APC	1980	-	4,1	4,11	8,10	6,78	6,36	131	41,1	605	4,44
E13	ASC	2	17,0	28,5	28,5	8,24	6,26	0,61	5,08	0,00	41,3	10,7
E13	ACAN	150	-	18,9	18,9	8,13	4,63	2,89	43,7	15,6	81,8	14,8
E13	AIS	550	-	7,8	7,83	7,96	3,91	2,80	211	59,9	437	9,23
E13	APC	1955	-	4,1	4,11	7,89	6,83	6,00	239	42,0	409	13,1
E14	ASC	5	14,5	29,1	29,1	8,22	4,40	2,00	0,00	0,00	51,9	0,18

<i>Estación</i>	<i>Masa de agua</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Transp. (m)</i>	<i>Temp. (m)</i>	<i>Salinidad</i>	<i>pH</i>	<i>OD (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>N-NO₃ (µg/L)</i>	<i>PO₄ (µg/L)</i>	<i>Si-SiO₂ (µg/L)</i>	<i>HPDD (mg/L)</i>
E14	ACAN	150	-	20,4	20,4	8,07	3,10	1,20	90,3	11,5	67,6	0,00
E14	AIS	550	-	8,0	8,02	7,74	2,60	2,05	265	58,1	479	0,40
E14	APC	2100	-	4,9	4,90	7,84	4,10	3,16	212	45,1	739	0,15
E15	ASC	5	14,0	29,2	29,2	8,23	4,40	2,30	0,00	0,00	47,6	0,13
E15	ACAN	150	-	20,3	20,3	8,10	3,10	3,41	83,9	11,0	67,6	0,20
E15	AIS	550	-	8,1	8,10	7,89	2,60	2,21	181	58,3	510	0,11
E15	APC	2116	-	4,1	4,10	8,01	4,60	3,41	148	45,3	755	0,30
E16	ASC	5	16,0	29,4	29,4	8,25	4,47	2,80	0,00	0,00	79,0	0,36
E16	ACAN	150	-	20,0	20,0	8,09	3,20	4,02	53,3	14,7	79,0	0,29
E16	AIS	550	-	7,8	7,80	7,86	2,60	1,41	255	62,7	510	0,21
E16	APC	2162	-	4,1	4,10	8,00	4,59	0,94	122	47,3	820	0,16
E17	ASC	5	18,0	29,4	29,4	8,22	4,40	5,70	0,00	0,00	51,9	0,17
E17	ACAN	150	-	20,6	20,6	8,10	3,10	4,00	82,9	11,5	79,0	0,46
E17	AIS	550	-	8,0	8,04	7,89	2,60	3,61	253	59,5	533	0,21
E17	APC	2101	-	4,1	4,10	8,00	4,60	5,00	163	45,8	760	0,17
E18	ASC	5	20,5	28,3	28,3	8,22	4,40	2,71	0,00	0,00	50,4	0,41
E18	ACAN	150	-	19,0	19,0	8,12	3,50	3,29	104	15,5	87,6	0,27
E18	AIS	550	-	8,2	8,15	7,88	2,60	3,14	340	82,4	700	0,12
E18	APC	2152	-	4,1	4,09	8,02	4,60	2,74	265	60,7	1006	0,11
E19	ASC	5	18,0	29,2	29,2	8,47	4,40	1,09	0,00	0,00	44,7	0,47
E19	ACAN	150	-	20,9	20,9	8,45	3,10	0,00	69,6	9,26	49,0	0,23
E19	AIS	550	-	8,2	8,20	8,16	2,60	1,14	231	57,5	499	0,23
E19	APC	2104	-	4,1	4,10	8,14	4,60	1,61	147	45,3	713	0,20
E20	ASC	5	20,0	27,9	27,9	8,18	4,42	5,71	0,00	0,00	40,4	0,18
E20	ACAN	150	-	19,6	19,6	8,07	3,20	5,56	78,1	10,7	61,9	0,15
E20	AIS	550	-	8,2	8,24	7,87	2,60	5,00	159	59,0	503	0,09
E20	APC	2150	-	4,1	4,10	8,03	4,60	5,38	116	38,2	622	0,24

<i>Estación</i>	<i>Masa de agua</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Transp. (m)</i>	<i>Temp. (m)</i>	<i>Salinidad</i>	<i>pH</i>	<i>OD (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>N-NO₃ (µg/L)</i>	<i>PO₄ (µg/L)</i>	<i>Si-SiO₂ (µg/L)</i>	<i>HPDD (mg/L)</i>
E21	ASC	5	20,0	27,5	27,5	8,20	4,40	1,69	0,00	0,00	74,7	0,11
E21	ACAN	150	-	19,9	19,9	8,11	3,23	3,37	82,3	19,5	91,9	0,22
E21	AIS	550	-	8,4	8,35	7,90	2,61	2,71	393	97,3	758	0,10
E21	APC	2153	-	4,1	4,10	8,02	4,60	2,47	255	69,0	1105	0,14
E22	ASC	5	16,0	28,9	28,9	8,25	4,59	2,80	0,00	0,00	24,7	0,70
E22	ACAN	150	-	20,6	20,6	8,11	3,33	1,59	70,3	10,4	54,7	0,12
E22	AIS	550	-	8,2	8,23	7,85	2,73	5,98	177	49,5	190	2,90
E23	ASC	5	15,0	29,0	29,0	8,26	4,60	1,48	0,00	0,00	56,1	0,49
E23	ACAN	150	-	20,6	20,6	8,15	3,30	1,54	76,6	11,5	77,6	0,46
E23	AIS	550	-	8,2	8,22	7,95	2,72	1,11	248	57,8	488	0,19
E24	ASC	5	15,2	28,8	28,8	8,13	5,77	3,70	0,00	0,00	64,0	0,51
E24	ACAN	150	-	20,2	20,2	8,12	3,30	2,13	215	11,0	66,1	11,1
E24	AIS	550	-	8,2	8,17	7,84	2,69	1,98	220	51,5	445	0,86
E25	ASC	5	16,0	28,9	28,9	8,28	4,65	3,10	0,00	0,00	36,1	0,13
E25	ACAN	150	-	20,5	20,5	8,17	3,28	3,75	71,3	8,69	49,0	1,68
E25	AIS	550	-	8,5	8,45	7,80	2,71	3,20	194	48,1	383	0,21
E26	ASC	5	15,0	28,8	28,8	8,27	4,63	2,68	0,00	0,00	43,3	0,32
E26	ACAN	150	-	20,3	20,3	8,14	3,30	2,56	60,6	8,69	54,7	0,51
E26	AIS	550	-	8,2	8,20	7,91	2,71	2,86	185	30,1	318	3,13
E27	ASC	5	17,0	29,1	29,1	8,30	4,82	2,93	0,00	0,00	49,0	0,24
E27	ACAN	150	-	20,3	20,3	8,16	3,29	2,91	73,8	9,54	66,1	1,37
E27	AIS	550	-	8,0	8,04	7,88	2,71	3,50	103	53,3	383	18,3
E28	ASC	5	14,0	28,7	28,7	8,25	4,62	3,61	0,00	0,00	24,7	0,59
E28	ACAN	150	-	20,5	20,5	8,12	3,29	2,11	77,4	10,4	61,9	0,62
E28	AIS	550	-	8,4	8,36	7,91	2,68	3,70	180	29,5	253	0,44
E29	ASC	5	18,0	28,9	28,9	8,27	4,66	3,16	0,00	3,26	43,3	0,14
E29	ACAN	150	-	20,1	20,1	8,15	3,27	3,65	17,3	12,1	56,1	0,21

<i>Estación</i>	<i>Masa de agua</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>Transp. (m)</i>	<i>Temp. (m)</i>	<i>Salinidad</i>	<i>pH</i>	<i>OD (mg/L)</i>	<i>SST (mg/L)</i>	<i>N-NO₃ (µg/L)</i>	<i>PO₄ (µg/L)</i>	<i>Si-SiO₂ (µg/L)</i>	<i>HPDD (mg/L)</i>
E29	AIS	550	-	7,9	7,89	7,99	2,73	3,47	164	49,5	388	0,18
E30	ASC	5	16,0	28,8	28,8	8,28	4,49	4,38	0,00	3,54	53,3	0,40
E30	ACAN	150	-	20,2	20,2	8,15	3,26	3,02	53,9	13,3	61,9	0,24
E30	AIS	550	-	7,9	7,89	7,92	2,73	4,44	138	60,1	458	0,16
E31	ASC	5	19,0	29,0	29,0	8,27	4,64	2,99	0,00	0,00	27,6	0,29
E31	ACAN	150	-	20,7	20,7	8,13	3,28	2,89	56,1	10,7	59,0	0,62
E31	AIS	550	-	8,3	8,27	7,89	2,69	3,55	195	45,0	282	0,10
E32	ASC	5	18,0	29,1	29,1	8,27	4,68	2,47	0,00	0,00	33,3	0,12
E32	ACAN	150	-	20,0	20,0	8,12	3,31	2,00	58,6	9,83	40,4	0,16
E32	AIS	600	-	7,5	7,45	7,85	2,76	3,12	156	39,3	215	0,33
E33	ASC	5	17,0	28,9	28,9	8,28	4,36	3,67	0,00	0,00	53,3	0,18
E33	ACAN	150	-	20,1	20,1	8,14	3,26	3,30	52,1	9,50	64,7	0,11
E33	AIS	600	-	7,6	7,59	7,88	2,73	6,63	166	49,8	456	0,63

Anexo 12.2. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (W) para la serie de datos y Análisis de varianza no paramétricos (H)- Kruskal Wallis. Para comparación entre masas de agua.

<i>Variable</i>	<i>Valor del estadístico W</i>	<i>Valor de p</i>	<i>Valor del estadístico H</i>	<i>Valor de p</i>
Temperatura	0,84	< 0,0001	H = 104,47	< 0,0001
Oxígeno disuelto	0,90	< 0,0001	H = 66,98	< 0,0001
Salinidad	0,79	< 0,0001	H = 90,18	< 0,0001
pH	0,88	< 0,0001	H = 50,58	< 0,0001
Sólidos Suspendidos Totales SST	0,67	< 0,0001	H = 2,16	0,5403
Nitratos N-NO ₃	0,89	< 0,0001	H = 90,35	< 0,0001
Ortofosfatos PO ₄	0,87	< 0,0001	H = 98,27	< 0,0001
Silicatos Si-SiO ₂	0,79	< 0,0001	H = 86,55	< 0,0001
Hidrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos HPDD	0,58	< 0,0001	H = 0,40	0,9405