

**ESTADO TRÓFICO DE LA COSTA NORORIENTAL DE ANTIOQUIA, COLOMBIA.
CUBRIENDO LA ÉPOCA CLIMÁTICA HÚMEDA Y SECA.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
OCEANÓGRAFO**

ESTUDIANTE:

Jorge Luis Atencio Mejía

ASESOR:

Mónica María Zambrano Ortiz, *Ph.D*

COASESOR:

Elkin Darío Castellón Castrillón, *Ph.D*

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
CORPORACIÓN ACADÉMICA AMBIENTAL
PREGRADO DE OCEANOGRFÍA
TURBO – ANTIOQUIA
2019**

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2.1 Problema de investigación	7
2.1.1 Pregunta de investigación	8
2.2 Marco teórico	8
2.3 Hipótesis	10
2.4 Objetivos	10
2.4.1 Objetivo general	10
2.4.2 Objetivos específicos	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1 Área de estudio	11
3.2 Metodología	12
3.2.1 Toma de muestras, almacenamiento y preservación.	13
3.3 Análisis de muestras	13
3.3.1 Clorofila a: método strickland y parsons.	13
3.3.2 Materiales y equipos	13
3.3.3 Preparación de reactivos	13
3.3.4 Procesamiento de la muestra	14
3.3.5 Cálculos	14
3.3.6 Determinación de nutrientes	14
3.3.7 Índice de eutrofización por nutriente de Karydis	15
3.3.8 Estado trófico Trix	16
3.3.9 Análisis estadístico	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1 Clorofila-a (Chl-a)	18
4.2 Parámetros físico-químicos	19
4.2.1 Temperatura	19
4.2.2 Salinidad	19
4.2.3 pH	22
4.2.4 Oxígeno disuelto (OD)	24
4.3 Correlaciones	25
4.3.1 Análisis de correlaciones entre Chl-a y parámetros fisicoquímicos	25
4.4 Nutrientes	28

4.5 Estado trófico	30
4.5.1 Estimación del estado trófico mediante el Índice de eutrofización por nutrientes de Karydis.	30
4.5.2 Estado trófico a partir del índice de eutrofización de TRIX.	33
5. CONCLUSIONES	35
6. RECOMENDACIONES	36
7. AGRADECIMIENTOS	37
8. REFERENCIAS	38

Lista de figuras

Figura 1. Sitios de monitoreo, litoral antioqueño. Golfo de Urabá.	11
Figura 2. Variabilidad espacio-temporal de la concentración de Chl-a en el costado nororiental de la costa Antioqueña.	18
Figura 3. variabilidad espacio-temporal de la temperatura superficial en el costado nororiental de la costa Antioqueña	20
Figura 4. variabilidad espacio-temporal de los valores de la salinidad en el costado nororiental de la costa Antioqueña	21
Figura 5. de la variabilidad espacio-temporal de los valores de pH en el costado nororiental de la costa Antioqueña.	23
Figura 6. variabilidad espacio-temporal de los valores de OD en el costado nororiental de la costa Antioqueña.	24
Figura 7. Correlación entre la concentración de Chl-a y Temperatura superficial.	27
Figura 8. Correlación entre los valores de salinidad y pH.	27
Figura 9. Correlación entre los valores de pH y OD.	28
Figura 10. Concentración de Nitratos en los seis sitios de monitoreo.	30
Figura 11. Concentración de Nitritos en los seis sitios de monitoreo.	31
Figura 12. Concentración de Ortofosfatos en los seis sitios de monitoreo.	31
Figura 13. Concentración de Nitrógeno amoniacal en los seis sitios de monitoreo.	32

Lista de tablas

Tabla 1. Escala de clasificación de estado trófico de Karydis.	16
Tabla 2. Índice de estado trófico de TRIX y calidad de agua.	17
Tabla 3. Correlaciones de Spearman para las variables muestreadas y las épocas climáticas en la costa nororiental de la costa Antioqueña.	26
Tabla 4. Concentración de nutrientes (Nitratos, nitritos, ortofosfatos y nitrógeno amoniacal) medidos en los seis sitios de monitoreo.	29
Tabla 5. Estado trófico de Karydis en los sitios de muestreo en época húmeda y época seca.	32
Tabla 6. Estado trófico de TRIX para los sitios de muestreo en época húmeda y época seca	34

1. RESUMEN

El estado trófico es un indicador de la salud de los ecosistemas marino-costeros, e cual es calculado mediante información biológica y fisicoquímica; este se determinó para el sector nororiental de Antioquia, Golfo de Urabá, a partir del seguimiento a seis sitios de monitoreo establecidos en: Punta las Vacas (Turbo), Zapata (Necoclí), Volcán de Lodo (Arboletes), Uveros (San Juan), Damaquiel (San Juan) y río Hobo (Arboletes); en los cuales se adelantaron mediciones mensuales de parámetros fisicoquímicos (pH, oxígeno disuelto, temperatura, salinidad) y clorofila-a, y trimestrales para nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos y ortofosfatos) entre agosto de 2018 y marzo de 2019. Se comparó el comportamiento de los parámetros determinados entre sitios de muestreo y épocas climáticas empleando las pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis y U de Mann Whitney respectivamente. La Chl-a, evidenció una variación en la entre épocas climáticas, registrando valores entre 3,0 y 17 mg/L en época húmeda y seca respectivamente. Los parámetros fisicoquímicos presentaron comportamiento variado entre sitios y épocas climáticas, la temperatura varió entre 27,5 y 32,5 °C para la época seca y húmeda respectivamente; la salinidad presentó el menor registro en enero con 4 PSU y el mayor, en el mes de noviembre con 35 PSU; el pH varió en el rango de 7 a 9; mientras que el O.D registró concentraciones que variaron entre 3 y 8 mg/L, ambos registros se obtuvieron durante el periodo de lluvias. De acuerdo con la época climática solo se registraron diferencias significativas en la concentración de Chl-a ($p= 0,024$) y la temperatura ($p= 0,00$). Entre sitios de muestreo únicamente el O.D registró diferencias significativas ($p= 0,005$). Los nutrientes registraron mayores concentraciones de Amonio (NH_3) en época húmeda variando entre 11,3 y 43,9 mg/L; en época seca las concentraciones variaron entre 2 y 34,06 mg/L con registros mínimos en Damaquiel y Punta de las Vacas, seguido en concentración de los nitratos, que registraron niveles entre 0,25-1,12 mg/L. El estado trófico se determinó empleando el Índice de Karidys, a partir del cual se evidenció que los sitios de muestreo presentaron condiciones mesotróficas en ambas temporadas climáticas, lo cual indica que se presentan características similares en cuanto a calidad del agua.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Problema de investigación

La zona costera es el punto límite de transición entre el mar y el continente, es una de las áreas más importantes a nivel mundial ya que provee servicios ecosistémicos valiosos tales como, manglares, playas turísticas, diversidad de especies marinas, pesca y materiales de uso para la construcción. Sin embargo, las costas están siendo afectadas por diferentes actividades que se desarrollan tanto en la zona marina como la zona costera, destacando las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, escurrimientos superficiales, contaminación del suelo, el turismo y las actividades portuarias (Yonglong, et al., 2018). Todas estas actividades que ocurren en la zona costera en conjunto con las descargas fluviales conforman un sistema dinámico, donde ocurre la dilución del agua de mar frente a la descarga de agua dulce de los continentes, involucrando en este entorno el desarrollo de procesos físicos, químicos y biológicos de gran importancia para los demás ecosistemas costeros (Correa-Arango y Vernet, 2004).

El Golfo de Urabá es un estuario, en él desembocan afluentes importantes como los ríos Atrato, León, Güadualito y Currulao, estos aportan nutrientes, los cuales son determinantes en la producción primaria que constituye la base alimenticia para todos los organismos marinos y afectan la calidad del cuerpo de agua, nutrientes importantes a considerar en el proceso de eutrofización en los ecosistemas, ya que pueden cambiar la dinámica biológica y productiva que incide en la disponibilidad de recursos y servicios (CORPOURABA, 2008).

La evaluación del estado trófico asociados a nutrientes y a los indicadores de la calidad del agua, constituye una de las formas más empleadas en el estudio de la contaminación marino costera (CORPOURABÁ 2011). Los sistemas costeros, según los TSI de sus aguas se clasifican en: oligotrófico, que corresponde a aguas claras con bajas concentraciones de nutrientes, poca materia orgánica, baja cantidad de sedimentos en suspensión y una mínima actividad biológica; mesotrófico, caracterizado por aguas con concentraciones mayores de nutrientes y por lo tanto, mayor actividad biológica y el estado eutrófico, que presenta aguas extremadamente ricas en nutrientes con alta productividad biológica (US EPA, 1997).

En los últimos años, el incremento de la eutrofización de cuerpos de agua ha sido provocada por el aumento en el suministro de nutrientes antrópicos a nivel global, proveniente de actividades humanas, lo cual promueve un exceso en la productividad primaria y en algunos casos se generan eventos de hipoxia o anoxia en el fondo de los cuerpos de agua (Justic et al., 1995), razón por la cual, resulta de gran importancia evaluar el estado trófico de los cuerpos de agua marino-costeros. El estado trófico o grado de eutrofización, se refiere a los cambios en los niveles de nutrientes (nitritos, nitratos, fosfatos, amonio), que causan cambios en la biomasa de microorganismos (fitoplancton) y que a su vez producen cambios en las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua (Justic et al. 1995, Paerl 1982, Tapia y Naranjo 2011).

El estado trófico puede ser determinado mediante la productividad primaria, la cual, a la vez, puede ser medida a través de la clorofila, que es la unidad nutricional y funcional del fitoplancton resultado del proceso de fotosíntesis, y constituye un indicador fundamental como recurso nutricional para todos los organismos marinos (Paerl y Ustach, 1982).

Para el Golfo de Urabá, Silva (2011) realizó una estimación de Chl-a mediante imágenes satelitales y modelos matemáticos, estimando valores entre 0–8 mg/m³ y determinando que los mismos deben oscilar entre 0-6 mg/m³ en condiciones ambientales y temporales similares. Posteriormente Zapata (2015), realizó un estimado en la Bahía de Marirríó, obteniendo un promedio máximo de 26,6 mg/m³ para el mes de abril y un mínimo equivalente a 0,59 mg/m³ para diciembre del año 2012. Ambos estudios determinaron que las concentraciones de Chl-a en el Golfo tienen gran variación de acuerdo con las condiciones ambientales y con épocas climáticas. Márquez y Ayala (2015), realizaron un análisis de Chl-a en varios sitios en el Golfo de Urabá, encontrando que los niveles de Chl-a aumentan en época húmeda debido a los aportes de nutrientes provenientes de las descargas fluviales, además estimaron mediante TSI que el estado mesotrófico fue predominante entre épocas y entre sitios, pese a la variabilidad de condiciones y características de cada sitio estudiado.

Dada la importancia de la concentración de clorofila y la escasa información que existe para la costa de Antioquia, ya que a partir de la misma se puede determinar el estado trófico de un cuerpo de agua, se evidencia la necesidad de contar con determinaciones *in situ*, que permitan hacer un seguimiento a la calidad del cuerpo de agua, teniendo en cuenta la relación existente con las variables fisicoquímicas, lo que a la vez permite hacer una estimación del estado trófico.

2.1.1 Pregunta de investigación

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación ¿cómo varía es el estado trófico de la costa nororiental del Golfo de Urabá de acuerdo con las épocas climáticas?

2.2 Marco teórico

Las zonas costeras son áreas reducidas de transición entre los ambientes marinos y terrestres, conformadas por estuarios, lechos marinos, marismas, manglares y arrecifes de coral; Estas zonas comprenden hábitats fundamentales en el ciclo de nutrientes, producción primaria, alimentos, materia prima y hábitats de crecimiento para los diferentes organismos marinos (Yonglong, et al., 2018).

De otro lado, los ecosistemas costeros son zonas altamente vulnerables ante las diferentes perturbaciones asociadas a la sobreexplotación, desastres naturales, cambios ambientales, estrés, degradación de los arrecifes, eutrofización costera,

aumento de metales pesados, altos niveles de nutrientes y contaminantes provenientes de la explotación costera y las actividades humanas de las zonas altas; por ello, la tensión constante sobre estos ecosistemas ha degradado los entornos costeros a nivel global (Kanti y Harun, 2017; Yonglong, et al., 2018;).

La contaminación y el enriquecimiento de nutrientes antropogénicos en los sistemas estuarinos y costeros se generan de fuentes puntuales relacionadas con descargas de aguas residuales, industriales y agrícolas; esto permite que el 28% de la producción primaria mundial total tenga lugar en estos ecosistemas, sin embargo, el enriquecimiento excesivo por nutrientes produce eutrofización del cuerpo de agua (Elliott y De Jonge, 2002).

La eutrofización en los ecosistemas marino-costeros es un fenómeno generado por el exceso de nutrientes como nitritos, nitratos, amonio y fosfatos en un cuerpo de agua. Los nutrientes como fósforo y nitrógeno son esenciales en la producción primaria, estos producen un aumento excesivo de biomasa del fitoplancton (Wilkinson, 2017; Yonglong, et., al 2018).

Cuando se presenta un aumento excesivo del fitoplancton, este ocasiona cambios en las condiciones físicas (como la transparencia, material orgánico y gases), químicas (como la salinidad y pH) y biológicas que pueden causar perturbaciones, disminución de diversidad biológica, muerte de peces y provoca cambios en la calidad del agua (Itsvánovics, 2009).

Entre los parámetros relacionados con el comportamiento de la clorofila se encuentran los nutrientes, por ello, la presencia de altas concentraciones de fósforo y nitrógeno (nutrientes limitantes) genera cambios significativos en los cuerpos de agua, razón por la cual los aportes de nutrientes a los ecosistemas son importantes para determinar su nivel trófico, de acuerdo a tres estados de clasificación propuestos por Ignatiades et al., (1992):

El estado Eutrófico es definido como un proceso asociado con el aumento de las tres formas nitrogenadas y del fósforo ($0,35\pm 0,22$ de N- NO_3^- , $0,34\pm 0,28$ P- $\text{PO}_4\text{-}3$, $1,15\pm 0,90$ N- NH_3^+ y 3-5 mg/m³ de Chl-a (Justic et al., 1995); de manera que cuando en el agua hay grandes cantidades de nutrientes, ocurre la eutrofización, reflejado en el crecimiento algal debido a las concentraciones de fósforo y nitrógeno (Justic, et al., 1995; Naranjo y Tapia, 2010).

El estado Mesotrófico ($0,26\pm 0,17$ de N- NO_3^- , $0,09\pm 0,05$ de P- $\text{PO}_4\text{-}3$, $0,84\pm 0,47$ de N- NH_3^+ y de 1-3 mg/m³ Chl-a) es definido como un estado intermedio relacionado con una pobre concentración de nutrientes y poco crecimiento fitoplanctónico (Ignatiades et al., 1992) mientras que el estado Oligotrófico ($0,23\pm 0,21$ de N- NO_3^- , $0,03\pm 0,03$ de P- $\text{PO}_4\text{-}3$, $0,38\pm 0,23$ de N- NH_3^+ y de <1 mg/m³ Chl-a) es un estado con ausencia de nutrientes y/o que no se pueden detectar y una limitada producción primaria (López-Cortés et al., 2003).

En Colombia, a partir de los estudios realizados por la Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM) se ha implementado el índice de calidad de agua marino costero como herramienta

para interpretar las variaciones de la calidad del agua, incorporando a la vez los resultados de nutrientes y Chl-a (Ricaurte-Villota, et al., 2017); si bien estos estudios se adelantan tanto en el Caribe como en el Pacífico colombiano, para el Golfo de Urabá esta red de monitoreo no genera información relacionada con la concentración de Chl-a, por lo cual, esta zona cuenta con pocos estudios en los que se ha involucrado la determinación de la misma.

Lo anterior evidencia la importancia de realizar seguimiento al estado trófico de los cuerpos de agua marino-costeros, información útil en diversas áreas (pesquerías, turismo, ciencia, calidad ambiental etc.) que tienen conexión e interés en estos ecosistemas como sitios de producción económica, científica o de protección.

2.3 Hipótesis

La época climática incide en el comportamiento de las variables fisicoquímicas en los cuerpos de agua marino costeros, por lo tanto, los niveles tróficos se verán afectados a lo largo de la costa Este de Antioquia, Golfo de Urabá durante la época seca con respecto al periodo húmedo debido las condiciones ambientales de cada época que ocasionan aumento o disminución de descargas fluviales con aportes de nutrientes dependiendo de la precipitación, acentuándose este comportamiento en áreas de influencia antrópica.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Caracterizar el estado trófico del cuerpo de agua en el sector nororiental de la costa Antioqueña, de acuerdo con las épocas climáticas (húmeda, seca) durante el periodo comprendido entre septiembre de 2018 y marzo de 2019.

2.4.2 Objetivos específicos

- Estimar la concentración de Chl-a en la costa nororiental de Antioquia, Golfo de Urabá en las dos épocas climáticas.
- Evaluar la relación entre parámetros físico-químicos, Chl-a y la concentración de nutrientes en el agua a través de mediciones *in situ* que permitan comprender la dinámica ecosistémica de la costa nororiental de Antioquia.
- Estimar el estado trófico del cuerpo agua de esta zona del Golfo de acuerdo con los tres estados de clasificación (Eutrófico, Mesotrófico y Oligotrófico) mediante el índice trófico de Karydis para cada época climática.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El ecosistema de estuario del golfo de Urabá está localizado en el extremo noroccidental de Colombia, geográficamente se encuentra enmarcado entre los 8° 37' y 7° 55' de latitud norte y 77° 25' y 76° 55' de longitud oeste (Figura 1); la zona costera del golfo de Urabá comprende 600 km de contorno costero entre el territorio de Cabo Tiburón, en la frontera con Panamá, hasta punta Arboletes, en el límite del departamento de Antioquia y Córdoba (Blanco-Libreros, 2016). En particular, el área de estudio está localizada en el margen Nororiental de la costa Antioqueña, comprendida entre los municipios de Arboletes y Turbo (Figura 1)

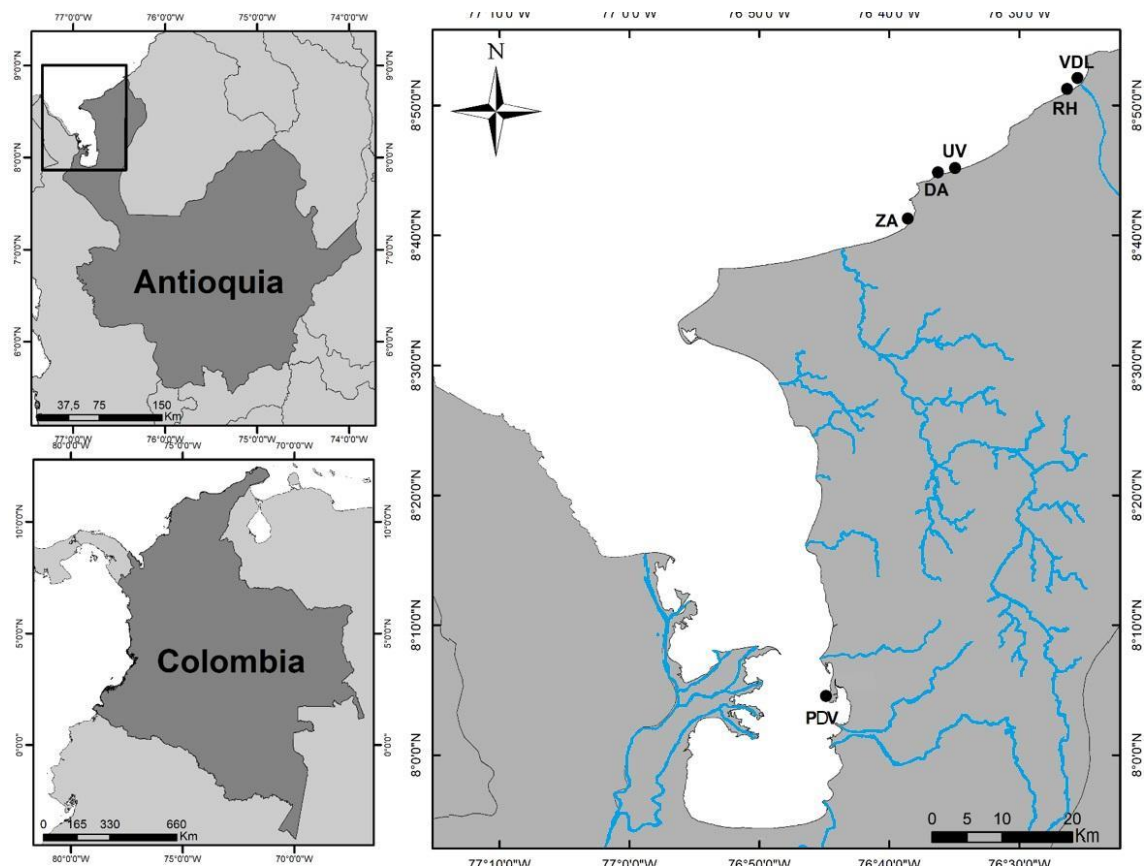


Figura 1. Sitios de monitoreo, litoral antioqueño. Golfo de Urabá.

La región de Urabá presenta una climatología influenciada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) la cual controla la ocurrencia de los periodos secos y temporadas de lluvia, regula las descargas fluviales de los ríos que desembocan en el Golfo (Blanco-Libreros, 2016); es así como las corrientes de los vientos Alisios del noreste, provenientes del mar Caribe en época seca, y los Alisios

del suroeste entran por la costa chocoana en dirección sur-norte hacia el golfo durante el periodo lluvioso de abril a noviembre (Lozano, 1998). La ZCIT tiene un desplazamiento oscilatorio alrededor del ecuador, ocupando la posición más septentrional en el océano Pacífico desde finales de diciembre hasta principios de abril (Thomas, Garcia, Cesaraccio y Rojas, 2007).

Debido a la geomorfología y dinámica costera del Golfo se puede encontrar una variedad de ecosistemas, ligados a la geología y la génesis marina, en los que se pueden distinguir playas, playones, acantilados, planicies aluviales, manglares, ciénagas, siendo las más dominantes en toda la franja litoral (Ricaurte-Villota, et al., 2017).

Los puntos de muestreo se distribuyeron a lo largo de la línea de costa del departamento de Antioquia, de la siguiente manera: Volcán de Lodo (VDL) y Desembocadura del Río Hobo (RH) en el municipio de Arboletes, Uveros (Uv) y Damaquiel (Da) en el municipio de San Juan de Urabá, Zapata (Za) en el municipio de Necoclí y Punta de las Vacas (PDV) en el municipio de Turbo (figura 1).

3.2 Metodología

Los seis sitios fueron monitoreados durante ocho meses, en el periodo comprendido entre agosto de 2018 y marzo de 2019. Se recolectaron muestras de agua superficiales para el análisis de Chl-a y nutrientes (nitritos, nitratos, amonio y fosfatos), las muestras para Chl-a se recolectaron con periodicidad mensual, las destinadas a la determinación de nutrientes con periodicidad trimestral.

A partir de los datos obtenidos durante los monitoreos se analizaron las características fisicoquímicas y la concentración de Chl-a en los puntos establecidos, se determinó el estado trófico a partir de la concentración de Chl-a y de nutrientes (Nitritos, nitratos, fosfatos, amonio) en el agua; así mismo se analizó la relación entre la Chl-a con los diferentes parámetros fisicoquímicos (pH, salinidad, temperatura, oxígeno disuelto) de acuerdo con la época climática (húmeda y seca).

Se realizó el análisis estadístico al conjunto de datos de Chl-a, se determinó que no se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, por lo tanto, para analizar el comportamiento entre sitios durante el periodo de estudio, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal y Wallis para la Chl-a y para el análisis del comportamiento entre épocas climáticas se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney teniendo en cuenta un valor $p = 0,05$.

Los datos de concentración de Chl-a y nutrientes se emplearon para estimar el estado trófico mediante el uso del índice de Karidys, así mismo se evaluó el índice de estado trófico de TRIX para realizar comparaciones entre los resultados obtenidos empleando ambos métodos, para establecer qué índice se asocia con las características particulares que posee el Golfo y cuál puede determinar con mayor claridad el estado trófico de los sitios monitoreados.

3.2.1 Toma de muestras, almacenamiento y preservación.

La recolección de muestras de agua para la determinación de Chl-a y nutrientes se realizó en superficie empleando una botella Niskin, en cada estación la muestra recolectada se transfirió a una botella plástica de 4.0 litros de capacidad, se rotuló debidamente para su adecuada identificación y se trasladó al laboratorio para su posterior análisis siguiendo la metodología descrita por el INVEMAR (2003).

Se determinaron las variables fisicoquímicas del agua en cada una de los sitios de muestreo empleando un equipo multiparamétrico HANNA para la determinación de:

- Temperatura
- Salinidad
- Potencial de hidrógeno – pH
- Oxígeno disuelto (OD)

3.3 Análisis de muestras

3.3.1 Clorofila a: método strickland y parsons.

Esta técnica ha sido obtenida con base en modificaciones hechas al método inicial formulado por Richards y Thompson (1952). Un volumen de agua de mar es filtrado en un filtro sintético o en uno de fibra de vidrio; los pigmentos son extraídos en acetona al 90% y su concentración es estimada espectrofotométricamente. Para alcanzar completa extracción de los pigmentos, es necesario destruir las células mecánicamente.

3.3.2 Materiales y equipos

- Carbonato de magnesio
- Agua destilada
- Acetona
- Balanza analítica
- Botella de vidrio 200 ml
- Espectrofotómetro VIS
- Celdas de 1 ó 10 cm de paso óptico
- Set de filtros con sus accesorios
- Filtro Millipore RAWP 0.47µm, 47 mm o de fibra de vidrio
- Balones aforados de 100 ml
- Homegenizador
- Centrífuga

3.3.3 Preparación de reactivos

Suspensión de carbonato de magnesio: Se pesó 1.0 g de carbonato de magnesio reactivo analítico y fue vertido en 100 ml de agua destilada

Solución de acetona al 90%: Se agregaron 20 ml de agua a 180 ml de acetona grado reactivo para análisis. El reactivo fue almacenado en una botella de vidrio.

3.3.4 Procesamiento de la muestra

Preparación de la muestra

- La muestra se filtró y se adicionaron unas pocas gotas de suspensión de carbonato de magnesio para evitar la acidificación del filtro
- Posteriormente se almacenaron en refrigerador a -20°C

Tratamiento de la muestra

- El filtro se depositó en un vial, fue cubierto con 2 – 3 ml de solución acuosa de acetona al 90% y se maceró con el homogenizador.
- Se enjuagó el homogenizador y se ajustó el volumen total a un nivel constante, 5 - 10 ml. Las muestras se dejaron toda la noche en la oscuridad
- Se clarificó el extracto centrifugando en los tubos tapados por 10 minutos a 1000 rpm, se dejó decantar el extracto clarificado en un tubo de centrifuga limpio de 15 ml y se midió el volumen total del extracto.
- Se transfirió el extracto a una celda de 1 cm y se midió la densidad óptica (DO) a 750, 663, 645 y 630 nm. Se seleccionó una dilución que presentara a 663 nm una DO mayor que 0.2 y menor que 1.0. Se sustrajo la lectura de cada uno de los valores de densidad óptica de las otras longitudes de onda antes de usarlos en las ecuaciones de cálculo.

3.3.5 Cálculos

Para calcular la concentración de Chl-a en cada extracto, se utilizaron los valores de OD corregidos en la siguiente ecuación:

$$\text{Clorofila } a = \text{Cla} = 11.64 (\text{OD}_{663}) - 2.16 (\text{OD}_{645}) + 0.10 (\text{OD}_{630})$$

La concentración de Chl-a en el agua de mar se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$$[\text{Cla}], \text{mg}/\text{m}^3 = \frac{\text{Cla} \times \text{Volumen del extracto (ml)}}{\text{Volumen de muestra (l)}}$$

3.3.6 Determinación de nutrientes

La determinación de nutrientes (Amonio, Nitritos, Nitratos y Fosfatos) se llevó a cabo empleando métodos analíticos en el laboratorio de CORPOURABA siguiendo los

protocolos de INVEMAR (2003). Los métodos analíticos usados en la determinación de nutrientes se relacionan a continuación:

Nitrógeno amoniacal: ISE - NH₄ – 18101.

Nitratos: SM 4500 - NO₃ – E

Nitritos: SM 4500-NO₂ - B

Ortofosfatos: SM 4500 P-E

3.3.7 Índice de eutrofización por nutriente de Karydis

El índice de eutrofización por nutriente (IE) de Karydis et al., (1983) fue propuesto a partir de los siguientes criterios:

- Especificidad para cada nutriente
- Considera el aporte del nutriente en áreas distintas
- Adimensional y se aplica en varios tipos de agua
- Altamente sensible a los efectos de eutrofización y sencillo al manipular datos y realizar su cálculo.

Los resultados de la ecuación proporcionan una valoración continua de la calidad del agua:

$$I_E = \frac{C}{C - \log X} + \log A$$

Dónde:

IE: Índice de eutrofización por nutrientes de cada estación de muestreo, durante el periodo de estudio, compuesto por *M* muestreos.

A: Número de sitios de muestreo durante el periodo de estudio.

C: Logaritmo de la concentración total del nutriente durante el periodo de estudio, es decir, es la suma de las concentraciones X_{ij} del nutriente obtenidas en cada una de las A_i sitios durante los M muestreos.

$$C = \log \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^M X_{ij}$$

X_i: Concentración total de nutrientes en la estación

A_i: Durante el periodo de estudio; es decir, es la suma de las concentraciones del nutriente obtenidas en los sitios A_i durante los M_j muestreos.

$$X_i = \sum_{j=1}^M X_{ij}$$

La escala de clasificación del estado trófico de acuerdo con Karydis se relaciona en la Tabla 1.

Tabla 1. Escala de clasificación de estado trófico de Karydis.

> 5	Eutrófico
3 >= IE <= 5	Mesotrófico
<3	Oligotrófico

3.3.8 Estado trófico Trix

Es un índice multivariado denominado índice del estado trófico TRIX, propuesto por Vollenweider et al. (1998).

$$\text{TRIX} = [\text{Log}_{10}((\text{Clorfa}) \times |\%OD| \times \text{NID} \times \text{PRS}) + K] m$$

Dónde: cada uno de los cuatro componentes representa un estado trófico variable a decir que:

Factores de productividad Clorf a = concentración de clorofila a (μgL^{-1})

|\%OD| = valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, es decir, [100 - \%OD]

Factores nutricionales NID = nitrógeno inorgánico disuelto N como: [Nitrato + nitrito + nitrógeno amoniacal], en ($\mu\text{g N/L}$)

PRS = fósforo reactivo soluble ($\mu\text{g P/L}$)

Las constantes

$$K = 1.5 \text{ y}$$

$$m = 12/10 = 1.2$$

son valores de escala introducidos para ajustar el valor límite más bajo del índice y la extensión de la escala trófica relacionada de 2 a 8 unidades TRIX (Tabla 2).

Tabla 2. Índice de estado trófico de TRIX y calidad de agua.

		Calidad del H ₂ O	
0--4	Oligotrófico	Alta	Pobre/ productiva bajo nivel trófico
4--5	Mesotrófico	Buena	moderadamente productiva, nivel trófico medio
5--6	Eutrófico	Mala	Entre moderado y alto, en productividad
6--10	Hipertrófico	Pobre	Altamente productivo, nivel trófico alto.

Fuente: Vollenweider et al., 1998.

3.3.9 Análisis estadístico

Los datos obtenidos en campo se analizaron estadísticamente con el fin de determinar si presentaban distribución normal, al no cumplir con los supuestos de normalidad se adelantaron pruebas no paramétricas. Para comparar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (Temperatura, pH, Oxígeno disuelto y Salinidad) y el estado trófico mediante la concentración de Chl-a entre los diferentes puntos de muestreo, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal y Wallis, así mismo se comparó el comportamiento entre épocas climáticas empleando la prueba no paramétrica U de Mann Whitney.

Se analizó la correlación entre la concentración de Chl-a y los parámetros fisicoquímicos (Temperatura, pH, Oxígeno disuelto y Salinidad), utilizando el coeficiente de correlación de Spearman. El coeficiente de Spearman indica que una correlación es escasa o nula cuando varía entre 0,00 y 0,25; es débil cuando los valores obtenidos se encuentran entre 0,26 y 0,50; es moderada y fuerte cuando el valor se encuentra en el rango de 0,51 a 0,75; es fuerte y perfecta de cuando el valor obtenido es de 0,76 a 1,00 (Martínez-Ortega *et al.*, 2009).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Clorofila-a (Chl-a)

El comportamiento de la Chl-a en la costa oriental de Antioquia evidenció que para la época húmeda comprendida entre agosto y noviembre del 2018 los valores de Chl-a registraron un comportamiento similar entre sitios con una significancia de 0,209; es así como Punta de las vacas (PDV) registró las mayores concentraciones, las cuales variaron entre 4,5 y 5,5 mg/L en época húmeda, y entre 4 y 10,47 mg/L durante la época seca, el mayor registro se determinó en el mes de marzo de 2019. La concentración mínima determinada fue de 3,43 mg/L en Río Hobo durante el muestreo realizado en el mes de diciembre de 2018. Los sitios restantes presentaron un patrón similar con valores entre 3 – 4,5 mg/L para la época húmeda y entre los 3,3 – 6,5 mg/L en la época seca (Figura 2).

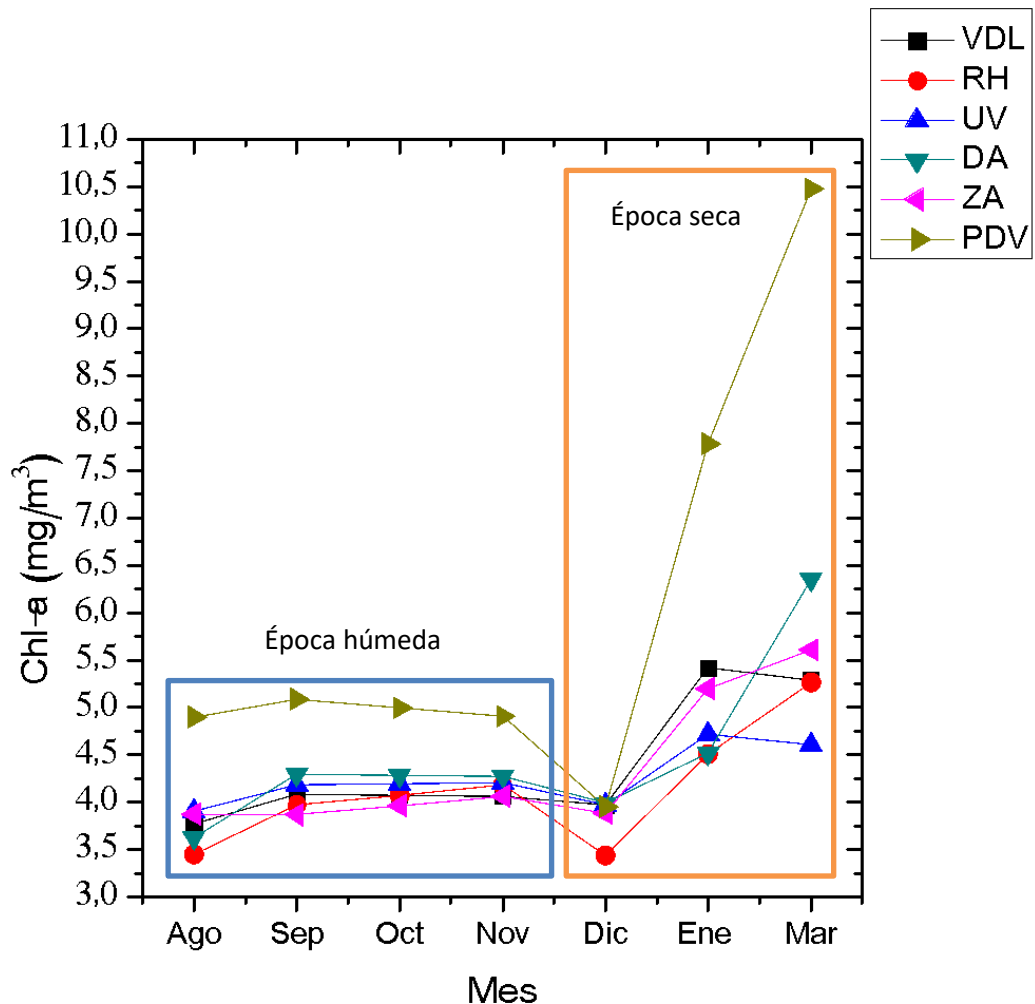


Figura 2. Variabilidad espacio-temporal de la concentración de Chl-a en el costado nororiental de la costa Antioqueña.

La Chl-a según la época climática registró concentraciones superiores durante la época seca con respecto a la época húmeda, es decir, presentaron diferencias significativas con un valor $p = 0,024$. Esto indica que las concentraciones de Chl-a es diferente para la época húmeda con respecto a los valores de la época seca, como se menciona anteriormente.

El comportamiento de la Chl-a está influenciado por la dirección de las corrientes de los vientos que desvían los aportes fluviales en época húmeda hacia el norte del Golfo, sacando esta contribución de los afluentes como materia orgánica y nutrientes que enriquecen la columna de agua, y al sur hacia bahía Colombia en época seca, mezclando y concentrando las descargas de sedimentos, materia orgánica y nutrientes al interior del golfo; esto favorece el enriquecimiento del agua con los aportes provenientes de la zona continental que sirven como fuente de energía para la producción primaria y el crecimiento de la biomasa de microorganismos fotosintéticos como el fitoplancton que, a su vez, responden a los cambios en los niveles tróficos del agua.

Este mismo comportamiento fue evidenciado por Pacheco (2018), quién encontró que la Chl-a es mayor en época seca y menor durante la época húmeda. Sin embargo, fue contrario a lo reportado por Márquez y Ayala (2015), quienes encontraron valores de clorofila altos en la época húmeda y menores registros en época seca, comportamiento que puede estar asociado a eventos como ENSO que inciden en las condiciones regulares del ambiente costero del Golfo.

4.2 Parámetros físico-químicos

4.2.1 Temperatura

Este parámetro presentó diferencias significativas entre épocas climáticas con una significancia de 0,00; para la época húmeda se obtuvieron valores entre los 29 y los 32,5°C mientras que para la época seca estos variaron entre 27,5 y 31,5°C., comportamiento encuentra relacionado con la dirección del viento en cada época climática, tal y como se mencionó previamente. De otra parte, la disposición de los aportes fluviales (ríos Atrato, León, Currulao y Turbo) también es influenciada por los vientos, y en conjunto inciden sobre el comportamiento de esta variable.

La estación Punta de las vacas (PDV) registró valores menores frente a los sitios de muestreo restantes (Figura 3), este comportamiento podría estar relacionado con la influencia que ejercen los aportes del río Atrato y otros afluentes que descargan sus aguas frías continentales en el Golfo y que inciden sobre la costa del municipio de Turbo.

4.2.2 Salinidad

La salinidad fue el único parámetro que presentó diferencias significativas entre sitios (valor- $p < 0,01$), encontrando que la estación con menores registros fue Punta de las Vacas (PDV), con variaciones entre 4 y 10 PSU entre los meses de agosto de 2018 a marzo de 2019, exceptuando el mes de noviembre, en el que se presentó un pico de

salinidad que alcanzó las 25,25 PSU (Figura 4), comportamiento relacionado con la descarga de aguas continentales del río Atrato que desemboca en frente de esta zona.

Los sitios restantes presentaron un patrón similar en valores de salinidad en el rango de 18 a 35 PSU, con un mismo pico registrado en todos los sitios en el mes de noviembre, el cual varió entre los 32 – 35 PSU, este comportamiento se relaciona con la gran influencia del agua marina y la baja influencia de agua continental durante este periodo, aunado a que durante este mes el viento se desplaza en dirección noroeste a sureste, lo que implica que los pocos aportes fluviales se dirigen hacia dentro del golfo, concentrando el agua marina al norte y el agua dulce al sur del mismo (Thomas et al., (2007) y Montoya, (2010); es así como los aportes fluviales tienen especial relevancia a la hora de definir la dinámica de este sector del golfo (POT Municipio de Turbo, 2000), en el que se encuentra localizada Punta de las Vacas, lo que explica el comportamiento de la salinidad.

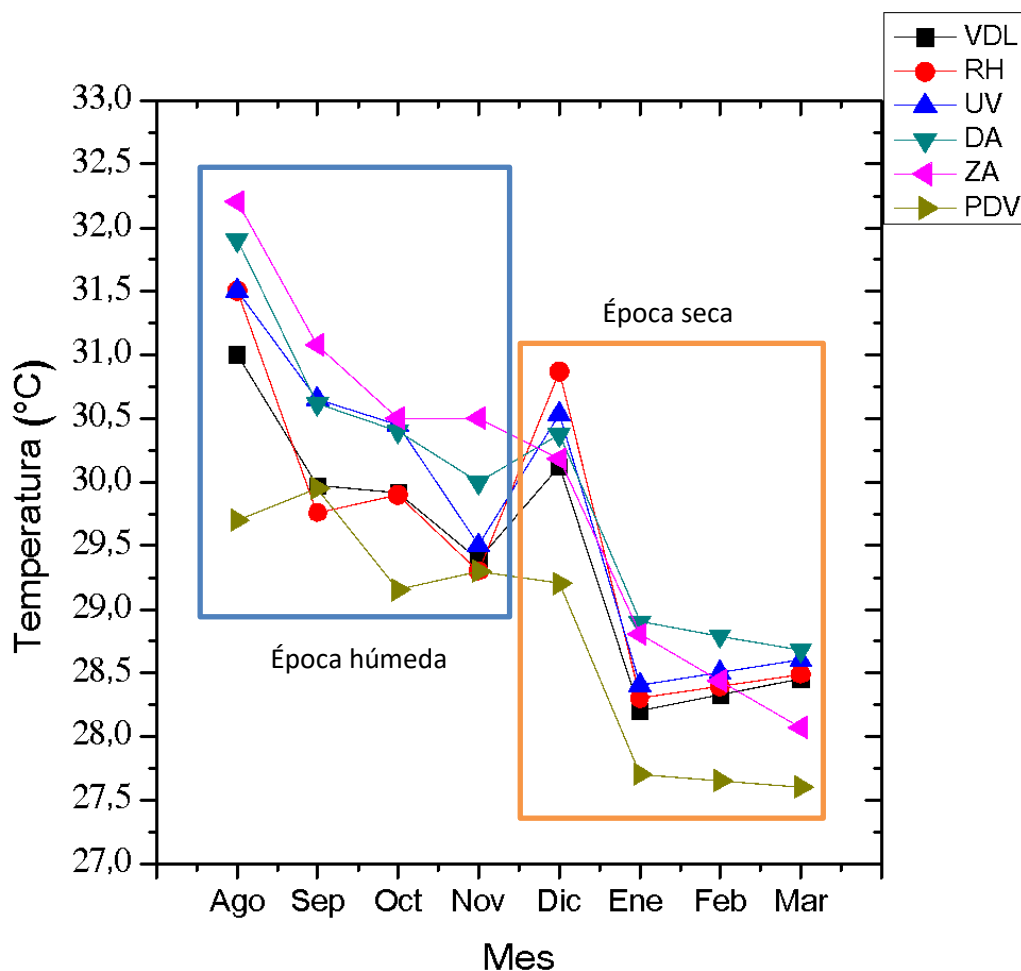


Figura 3. variabilidad espacio-temporal de la temperatura superficial en el costado nororiental de la costa Antioqueña

Para la época húmeda se presentó variación en los registros obtenidos en cada estación dentro del rango mencionado anteriormente y para la época seca hubo muy poca variación entre sitios con valores bajos en el mes de marzo del 2019 entre los 25 – 26 PSU. El comportamiento de los valores de salinidad de Punta de las Vacas con respecto a los demás sitios de muestreo se debe a que este sitio se encuentra dentro del Golfo de Urabá y está directamente influenciado por los aportes fluviales del Río Atrato y otros afluentes que descargan sus aguas dentro del Golfo, las estaciones Volcán de Lodo, Río Hóbo, Uveros, Damaquiel y Zapata se encuentran en la parte nororiental de la costa de Antioquia donde están altamente influenciados por las aguas salinas del mar Caribe.

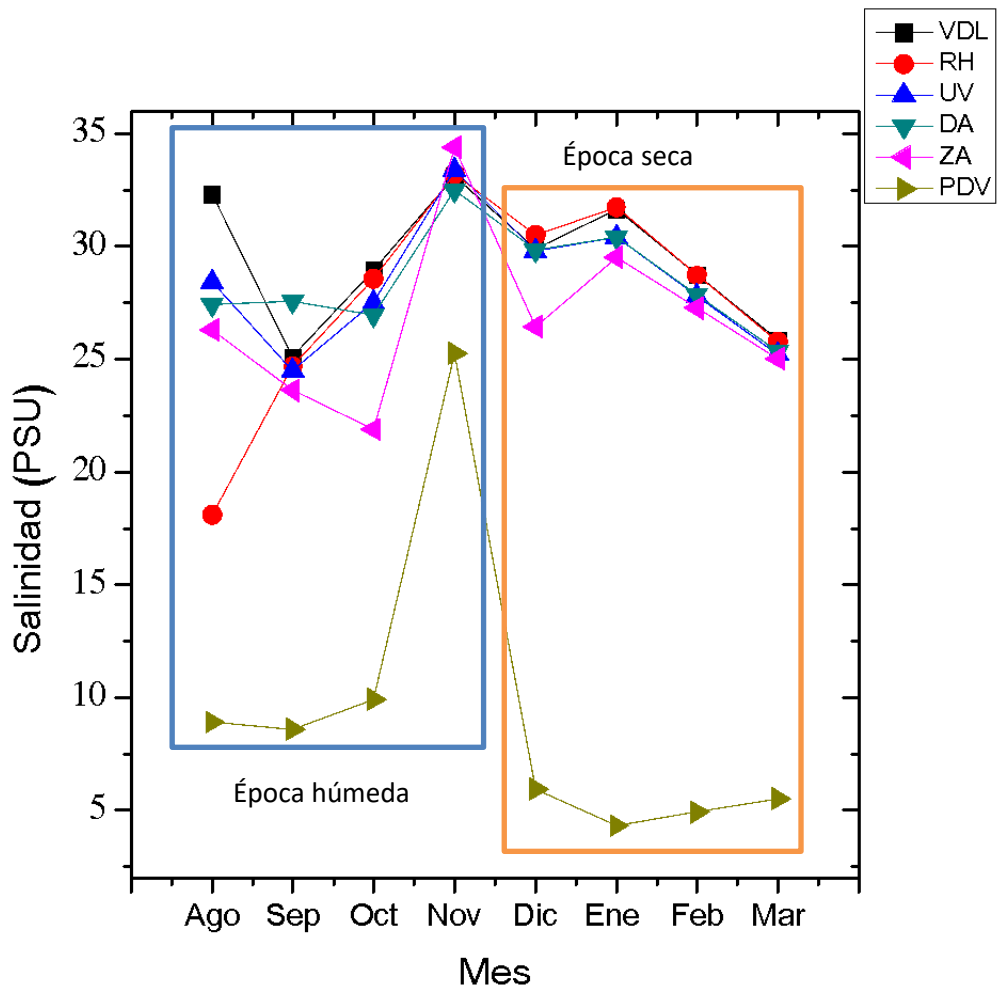


Figura 4. variabilidad espacio-temporal de los valores de la salinidad en el costado nororiental de la costa Antioqueña

De acuerdo con Montoya et al., (2005); Thomas et al., (2007); Montoya, (2010), Escobar, (2011) y Pacheco (2018), la salinidad del Golfo se ve influenciada por la dirección del viento y la distribución de los aportes fluviales durante cada época

climática. Durante la época húmeda los vientos provenientes del sur y sudoeste ocasionan que el agua dulce se disperse en las capas superficiales y circulen por el flanco oriental hacia fuera del golfo y en época seca los vientos circulan del norte y nordeste confinando y mezclando las aguas dulces y marinas; de esta manera, se genera una zona de mezcla de agua marina y agua continental ocasionando estratificación en la columna del agua.

Lonin y Vásquez (2005) indican que para el Golfo el campo de salinidad presenta variaciones significativas en los planos horizontal y vertical. La acción de los vientos alisios parece ser elemento fundamental en tales patrones. Cuando penetran estos vientos, se presenta una zona de aguas dulces superficiales que se extiende desde la línea Boca Tarena-Punta Caimán hasta el extremo sur de la Bahía Colombia, donde la salinidad es inferior a 5. La segunda zona se extiende desde la línea ya mencionada hasta la entrada al golfo, definida por la línea entre Cabo Tiburón y Punta Caribana. Hay aquí un gradiente de salinidad significativo, con valores extremos de 10 en el sur hasta 30 a la entrada del golfo.

A partir de lo anteriormente expuesto, se puede comprender el comportamiento registrado en la zona, pues explica los bajos valores de salinidad encontrados en la estación Punta de las vacas (PDV), que como se mencionó, están relacionados con la llegada de las aguas dulces del río Atrato que se encuentra a pocos kilómetros de este municipio costero. Las estaciones restantes no presentan mayor influencia de las masas de agua que son llevadas por los vientos debido a que se encuentran directamente influenciadas por el mar Caribe. Según lo descrito por García-Valencia, (2007), el Golfo de Urabá se comporta como un estuario en la parte sur comprendida entre punta Yerbazal (al occidente) y Caimán Nuevo (al oriente) presentando salinidades bajas resultado de los grandes aportes fluviales del río Atrato.

4.2.3 pH

Los valores de pH registrados durante el estudio no presentaron diferencias significativas entre épocas ni entre sitios de muestreo ($p > 0.05$), lo que indica que su comportamiento fue muy similar; este parámetro está directamente relacionado con los aportes de aguas continentales o agua marina que varían de acuerdo con las características particulares de cada sitio de muestreo.

Las estaciones de Volcán de Lodo y Punta de las Vacas, mayormente influenciadas por aportes de ríos registraron valores menores respecto a los demás sitios de muestreo. De acuerdo con Thomas et al. (2007), los valores de pH registrados para el Golfo de Urabá resultan propicios para brindar buenas condiciones de vida y salud al ecosistema costero, dado que posee características especiales y su variabilidad se debe a la dinámica natural de las aguas costeras influenciadas por los aportes fluviales.

En la Figura 5, se observa la variación en los valores de pH registrados en cada uno de los sitios de muestreo durante las dos épocas climáticas. Este parámetro varió entre los 7 – 9,5; la estación de Uveros (UV) registró un valor de 6 para el mes de

agosto de 2018, registro inferior a los valores anteriores, condiciones ácidas que se asocian con un predominio del gas CO₂ en el cuerpo de agua, a la vez, la estación de Damaquiel (DA) registró un valor de 11,4 en el mes de diciembre, por encima del rango, el cual puede estar relacionado con predominio de iones carbonatos, generado por un desbalance en el medio. De acuerdo con los criterios de calidad establecidos para la preservación de la fauna y flora marina, el rango de pH óptimo se encuentra entre valores de 6.5 y 8.5, evidenciando que los registros que se encuentran fuera del mismo de acuerdo con el Decreto 1584 del ministerio de Salud, pudiendo generar un pH superior a 9 efectos nocivos para algunas especies.

De otra parte, Punta de las Vacas presentó los menores registros (7 - 8,5) debido a que se encuentra influenciado por los aportes de los ríos Atrato, Currulao y León principalmente, lo que incide en el comportamiento del pH y las demás variables consideradas previamente, tal y como se ha venido mencionando.

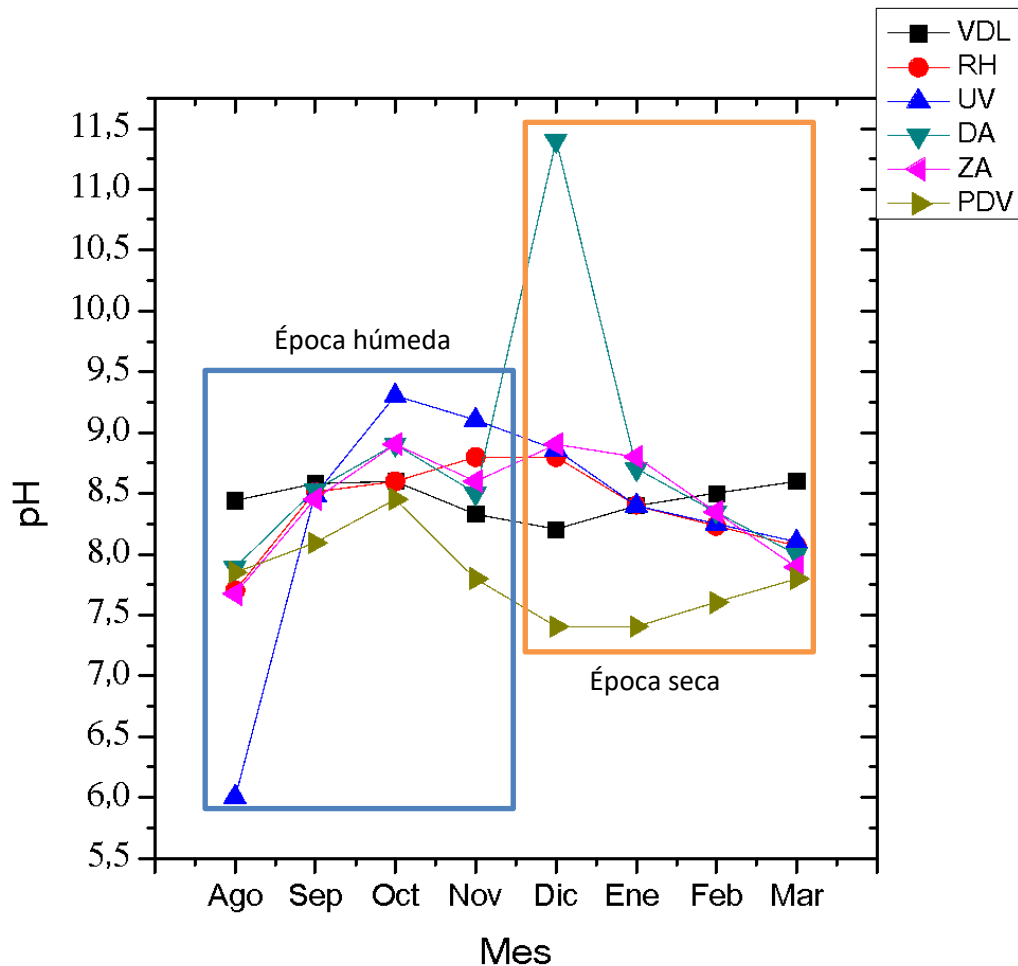


Figura 5. de la variabilidad espacio-temporal de los valores de pH en el costado nororiental de la costa Antioqueña.

4.2.4 Oxígeno disuelto (OD)

El comportamiento registrado por el OD en la zona evidenció tres picos máximos de concentración para los meses de agosto, diciembre y marzo (Figura 6), estos valores pueden estar relacionados con los periodos de altas velocidades de vientos que producen agitación de los cuerpos de agua del Golfo, aumentando la solubilidad de este gas en la zona superficial; además se registraron dos mínimos en los meses de octubre del 2018 y enero del 2019, valores que pueden relacionarse con las bajas

velocidades de las corrientes acopladas a vientos, que permitieron a los microorganismos degradar la materia orgánica durante estos periodos de baja turbulencia (CORPOURABA, 2011) y que, a la vez, generan menor intercambio de este gas en la interface agua-atmosfera.

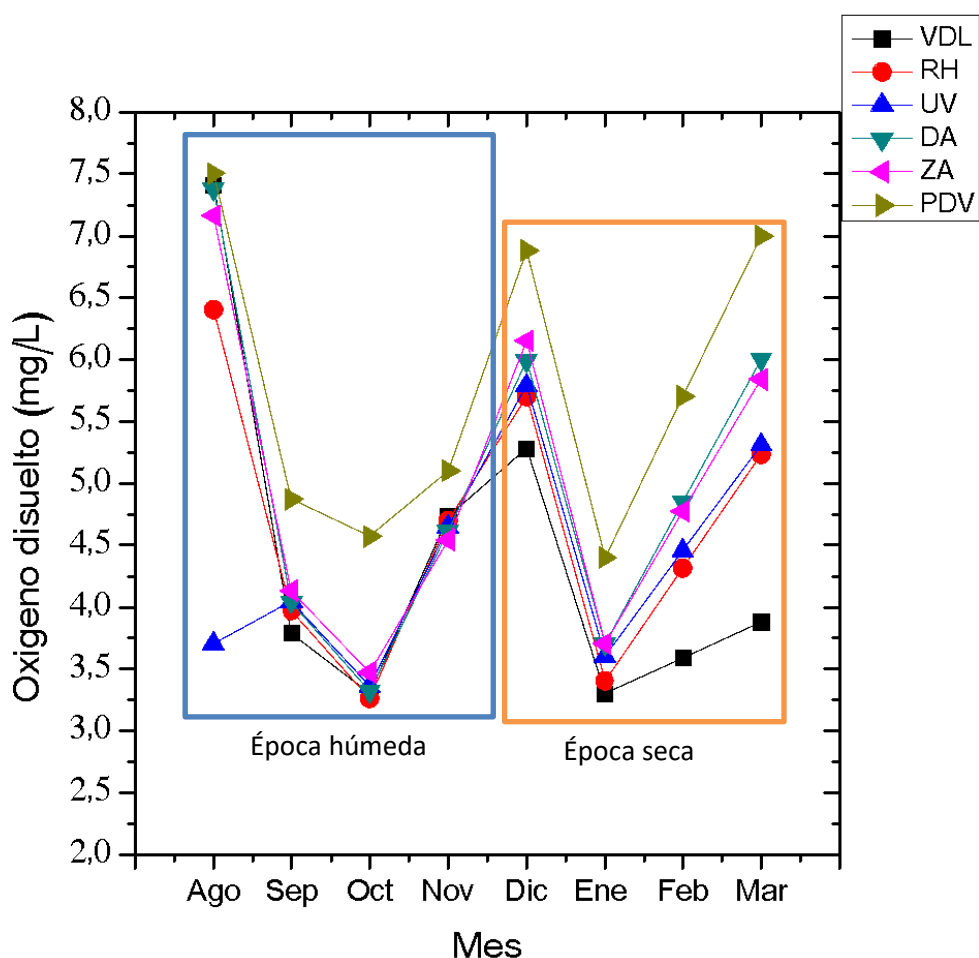


Figura 6. variabilidad espacio-temporal de los valores de OD en el costado nororiental de la costa Antioqueña.

Las mayores concentraciones de OD se registraron en la estación Punta de las vacas (PDV), en general, todos los sitios de muestreo presentaron un comportamiento variado pero similar entre sitios de muestreo en diferentes meses a lo largo del estudio. En el mes de agosto la concentración de OD varió entre los 6 – 8 mg/L con excepción

de la estación de Uveros (UV) que registró una concentración de 3,70 mg/L, por debajo de los valores anteriormente referenciados. Para el mes de octubre con excepción de Punta de las vacas (PDV) que presentó una concentración de 4,57 mg/L, los demás sitios registraron valores entre los 3 - 3,5 mg/L (Figura 6).

Las concentraciones de oxígeno disuelto se ven afectadas por la salinidad y la temperatura ya que cuando estos parámetros aumentan, el OD disminuye, esto está relacionado con la solubilidad de los gases en los fluidos; en el Golfo de Urabá los sitios con alta influencia de aportes fluviales poseen bajos valores de OD, debido a las descargas de materia orgánica degradable por microorganismos aeróbicos (consumidores de oxígeno), mientras que los valores más altos de OD cercanos al nivel de saturación, se encuentran en las zonas más alejadas de la influencia de los ríos, con alta influencia oceánica y de aguas claras, donde se produce alta tasa de aireación por la agitación del mar, las corrientes y los vientos presentándose valores promedio de 5,5 mg/L y máximos de 8,44 mg/L (CORPOURABA, 2011).

Los cambios en las concentraciones de OD influyen en el desarrollo de la vida de diferentes especies marinas y costeras que hacen parte de estos ecosistemas costeros y que brindan recursos importantes en este medio, los cuales pueden verse afectados por la disminución de la concentración de OD y dejar en estado crítico la diversidad ecosistémica en estas zonas (Blanco-Libreros, 2016).

4.3 Correlaciones

4.3.1 Análisis de correlaciones entre Chl-a y parámetros fisicoquímicos

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de correlación para las variables muestreadas, resaltando en azul significancias inferiores a 0,01 o 0,05.

Entre la Chl-a y la temperatura se registró una correlación negativa ($r = -0,827$) como se puede observar en la figura 7; esta correlación es fuerte y puede generarse por diversos factores, dada la dinámica de la zona costera de Antioquia y por los diferentes aportes fluviales que en conjunto con los parámetros ambientales ocasionan procesos que influyen en el comportamiento de estos parámetros. Márquez y Ayala (2017) analizaron información relacionada con la concentración de clorofila para diferentes sitios de muestreo ubicados en el Golfo de Urabá, encontrando que la correlación entre temperatura y Chl-a fue débil con un valor de 0,377.

Con respecto al pH, se encontró que este parámetro presentó una correlación positiva débil con la salinidad ($r = 0,441$) (figura 8); se encontró, además, que existe una correlación negativa débil entre este parámetro y el oxígeno disuelto con un coeficiente de correlación de -0,431 (figura 9). En particular, estas correlaciones evidencian que muchos procesos se encuentran interactuando en los estuarios y que influyen en la distribución de los nutrientes y otras variables relacionadas con los organismos como el oxígeno. Entre éstos procesos se encuentran la nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno atmosférico, precipitación y redisolución de fosfato, asimilación por productores primarios, mineralización de materia orgánica, floculación y adsorción. Todo esto hace que resulte difícil deducir los procesos

dominantes con la simple medida de la concentración espacial de las diferentes variables (Fraile, 1992); sin embargo, es posible realizar aproximaciones al comportamiento que registran las mismas, como las realizadas en este estudio.

Tabla 3. Correlaciones de Spearman para las variables muestreadas y las épocas climáticas en la costa nororiental de la costa Antioqueña.

		Temperatura	Salinidad	pH	OD	Clorofila
Rho de Spearman	Coeficiente de correlación	1,000	,106	,174	,163	-,827**
	Sig. (bilateral)	.	,506	,270	,302	,000
	N	42	42	42	42	42
Salinidad	Coeficiente de correlación	,106	1,000	,441**	-,226	-,209
	Sig. (bilateral)	,506	.	,003	,149	,183
	N	42	42	42	42	42
pH	Coeficiente de correlación	,174	,441**	1,000	-,431**	-,133
	Sig. (bilateral)	,270	,003	.	,004	,400
	N	42	42	42	42	42
OD	Coeficiente de correlación	,163	-,226	-,431**	1,000	-,213
	Sig. (bilateral)	,302	,149	,004	.	,176
	N	42	42	42	42	42
Clorofila	Coeficiente de correlación	-,827**	-,209	-,133	-,213	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	,183	,400	,176	.
	N	42	42	42	42	42

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

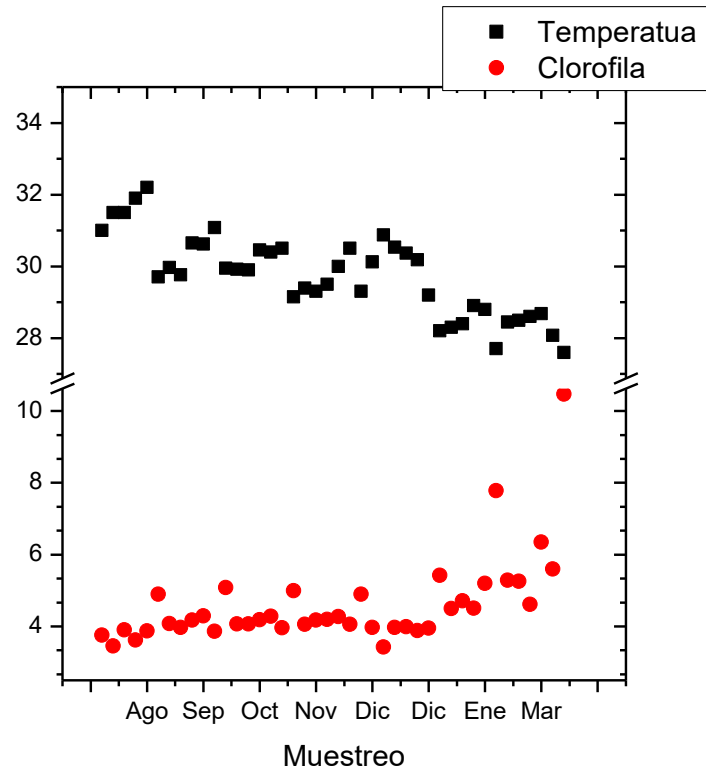


Tabla 4. Concentración de nutrientes (Nitratos, nitritos, ortofosfatos y nitrógeno amoniacal) medidos en los seis sitios de monitoreo.

Mes/ Época	Concentración (mg /L)	Estación de muestreo					
		VDL	RH	UV	DA	ZA	PDV
SEPTIEMBRE Época húmeda	NITRATOS	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	NITRITOS	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	ORTOFOSFATO S	0,061	1,8	0,061	0,061	0,061	0,061
	NITRÓGENO AMONICAL	38,9	37,7	37,8	43,9	32,5	11,3
DICIEMBRE Época seca	NITRATOS	0,12	0,11	0,41	0,16	0,12	0,14
	NITRITOS	0,003	0,0045	0,0057	0,003	0,003	0,003
	ORTOFOSFATO S	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	NITRÓGENO AMONICAL	27,1	23,9	21,7	1	15,5	1
MARZO Época seca	NITRATOS	0,26	0,14	0,15	0,22	1	0,14
	NITRITOS	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
	ORTOFOSFATO S	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	NITRÓGENO AMONICAL	6,96	5,37	7,33	1	8,99	1

El comportamiento de los nutrientes está relacionado con la fuerza de las corrientes fluviales, dado que el amonio es resultado de la oxidación de materia orgánica, la cual se encuentra estancada en el fondo del cuerpo de agua, durante la época húmeda debido a las fuertes corrientes es removida, ocasionando incremento en la dilución del amonio, es decir la concentración de nitrógeno amoniacal por volumen de agua es menor al llegar al mar, mientras que durante la época seca, las corrientes fluviales son lo suficientemente bajas para remover gran cantidad de materia orgánica acumulada en el fondo, y a la vez, se reduce el efecto de dilución, es decir, la concentración de nitrógeno amoniacal por volumen de agua es mayor al llegar al mar (Escobar, 2011).

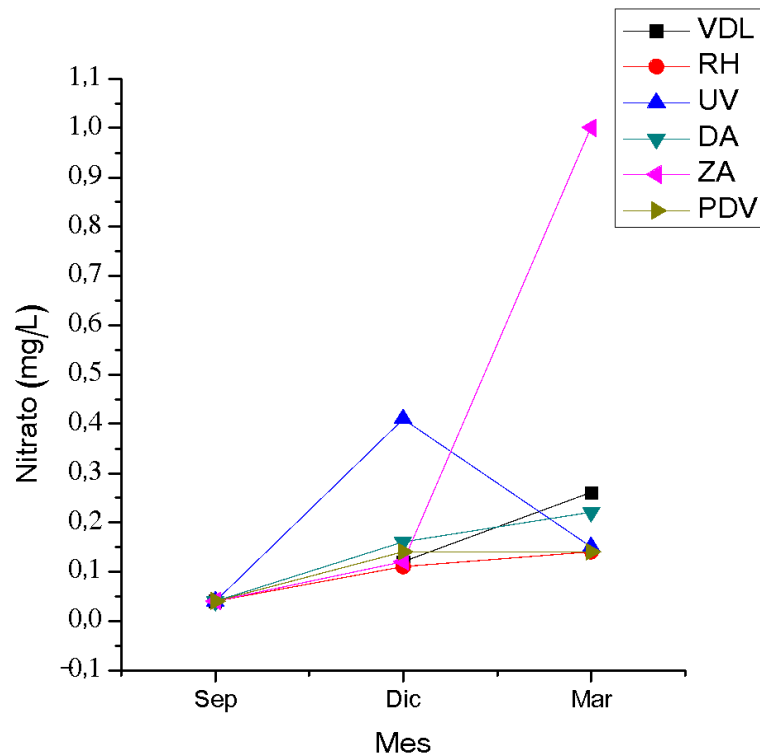


Figura 10. Concentración de Nitratos en los seis sitios de monitoreo.

4.5 Estado trófico

4.5.1 Estimación del estado trófico mediante el Índice de eutrofización por nutrientes de Karydis.

De acuerdo con los registros de concentración de Chl-a y nutrientes obtenidos en este estudio, se estimó el estado trófico de los sitios de muestreo para cada época climática con respecto a la escala de clasificación del índice de Karydis. A partir del índice Se evidenció para la época húmeda un estado mesotrófico de acuerdo con las concentraciones de nitritos, nitratos y ortofosfatos, excepto para los ortofosfatos en la estación RH (Tabla 5).

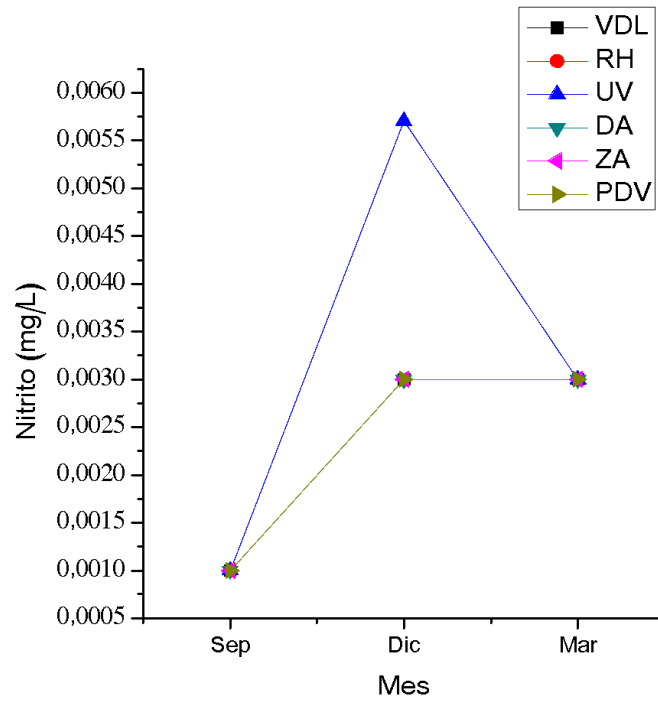


Figura 11. Concentración de Nitritos en los seis sitios de monitoreo.

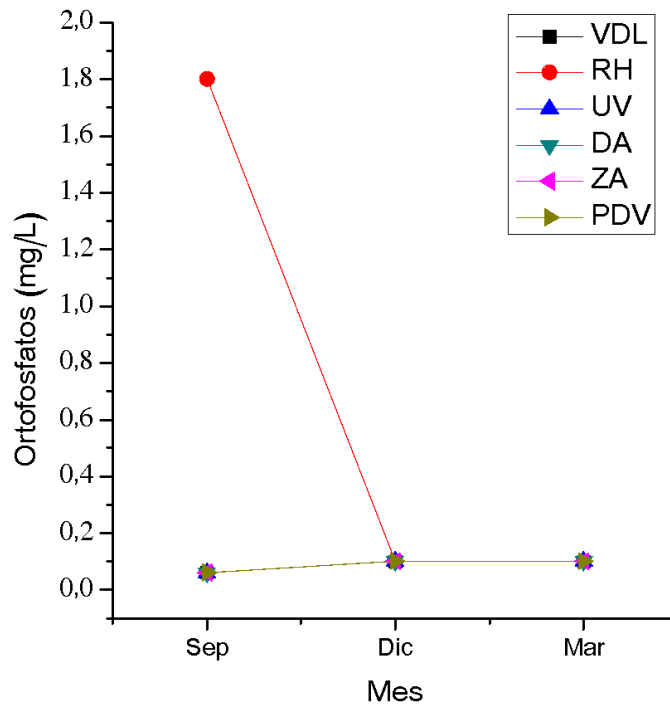


Figura 12. Concentración de Ortofosfatos en los seis sitios de monitoreo.

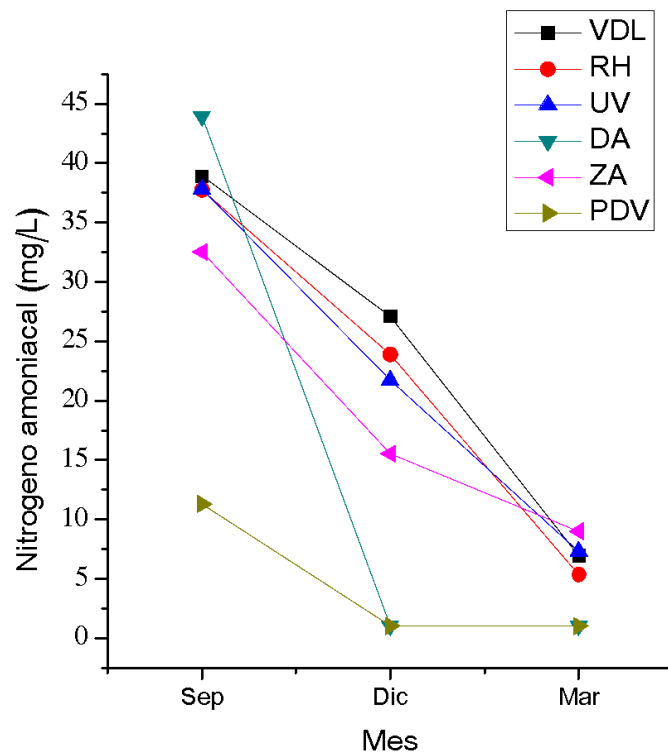


Figura 13. Concentración de Nitrógeno amoniaco en los seis sitios de monitoreo.

Tabla 5. Estado trófico de Karydis en los sitios de muestreo en época húmeda y época seca.

Época climática	Nutriente	VDL	RH	UV	DA	ZA	PDV
Húmeda	Nitrato	3	3	3	3	3	3
	Nitrito	5	5	5	5	5	5
	Ortofosfato	3	2	3	3	3	3
	Nitrógeno amoniaco	0	0	0	0	0	1
Seca	Nitrato	2	2	2	2	2	2
	Nitrito	4	4	4	4	4	4
	Ortofosfato	2	3	2	2	2	2
	Nitrógeno amoniaco	0	0	0	1	0	1

Para la época seca se determinó que el cuerpo de agua se encontró en estado mesotrófico y oligotrófico de acuerdo a las concentraciones de nitritos, nitratos y ortofosfatos. Pese al leve aumento entre época húmeda y seca en las concentraciones de nutrientes, el estado trófico resulta adecuado para los sitios de muestreo, cuando los nutrientes aumentan las descargas de agua dulce afectan significativamente el contenido en el mar de nutrientes y elementos traza producto de las precipitaciones en las cuencas de los ríos (Smith y Demaster, 1996; Franco *et al.*, 2006).

Los altos valores en las concentraciones de Chl-a en el Golfo de Urabá y las costas de Antioquia, indican que esta zona presenta alta productividad primaria, sin embargo, cabe resaltar que los altos valores en concentración de Chl-a pueden ocasionar disminución en los valores de oxígeno disuelto por la producción de floraciones algales, que a la vez pueden generar condiciones desfavorables en la calidad de los cuerpos de agua (Pacheco, 2018).

4.5.2 Estado trófico a partir del índice de eutrofización de TRIX.

Dentro de los métodos de determinación del estado trófico, se encuentran el índice de Carlson (1977) que emplea la transparencia Secchi, concentraciones de Chl-a o fósforo total; el índice de Karydis (1983) que se determina a partir de concentraciones de nutrientes, o la combinación de los dos índices anteriores Vollenweider (1981). Sin embargo, los métodos más reconocidos utilizan indicadores biológicos, pero de los antes mencionados, el primero es considerado el mejor indicador de los procesos costeros (Tsirtsis y Karydis 1998, Garmendia *et al.* 2013).

Los índices de Karydis y TRIX han sido muy utilizados para determinar el nivel trófico en diferentes lugares, tanto en Europa como en América, y han sido probados en ambientes tropicales, tal y como se evidencia en los estudios realizados en la zona costera del Golfo de México y en el Pacífico colombiano (Medina-Gómez y Herrera-Silveira 2003, Herrera-Silveira *et al.* 2004 y Tapia-González *et al.* 2008).

El estado trófico para las distintas estaciones de muestreo de acuerdo con el Índice de TRIX se presenta en la Tabla 6, a partir del mismo se estimó un nivel mesotrófico con valores entre 4-5 para la época húmeda, es decir, la calidad del agua es buena y moderadamente productiva. Para la época seca se encontraron valores del índice entre 6-8, con un estado hipereutrófico, lo que indica aguas en muy malas condiciones de calidad y con alta productividad.

De acuerdo a la estimación realizada mediante el índice de TRIX con respecto a la adelantada con el índice de Karydis se observa que no existe relación en el estado trófico para la época húmeda ni para la época seca entre ellos, la estimación con cada índice se torna muy diferente. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las características que posee el golfo de Urabá, dado que se comporta como un estuario y su dinámica es variable de acuerdo con la época climática, por tanto, dadas las particularidades hidrodinámicas que posee el Golfo se puede afirmar que este índice no hace una descripción cercana de las condiciones de estado trófico de los cuerpos de agua de los sitios monitoreados en este estudio.

Tabla 6. Estado trófico de TRIX para los sitios de muestreo en época húmeda y época seca

Época climática	Mes	VDL	RH	UV	DA	ZA	PDV
Húmeda	Ago	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5
	Sep	4,4	4,4	4,5	4,5	4,4	4,5
	Oct	4,4	4,4	4,5	4,5	4,4	4,5
	Nov	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,5
Seca	Dic	7,4	7,3	7,4	6,5	7,3	6,5
	Ene	7,6	7,4	7,5	6,5	7,4	6,7
	Mar	7,6	7,5	7,4	6,7	7,5	6,8

5. CONCLUSIONES

Las concentraciones de Chl-a presentaron diferencias significativas entre épocas climáticas, registrando concentraciones superiores durante la época seca con respecto a la época húmeda, comportamiento asociado a las condiciones de dirección de vientos, corrientes y aportes fluviales que caracterizan al Golfo de Urabá durante cada época climática.

Los aportes de aguas continentales que llegan al Golfo originan capas de mezcla que se distribuyen de acuerdo con la dirección de los vientos durante cada época climática, ocasionando cambios en los diferentes parámetros debido a las características que diferencian a las masas de aguas marinas y continentales que se encuentran e interactúan en el Golfo.

El incremento de los nutrientes entre septiembre del 2018 y marzo del 2019, puede asociarse al confinamiento de las descargas de los aportes fluviales durante esta época, en la que los vientos soplan en sentido noreste a suroeste, lo que ocasiona la acumulación de aportes de nutrientes, materia orgánica e inorgánica que traen estas descargas fluviales consigo.

El nitrógeno amoniacal tuvo un comportamiento inverso respecto a los demás nutrientes, su descenso se relacionó con el volumen de descarga de los ríos, dado que en época húmeda esta es mayor y por ende, el aporte procedente de aguas residuales pese a ser bajo por la dilución, tiene una mayor influencia sobre la masa de agua del Golfo, en contraste con la época seca en la que se reduce el volumen de descargas de los ríos y el nitrógeno amoniacal ingresa en bajas proporciones y/o no alcanza a llegar a la zona marina.

A partir del índice de estado trófico de Karydis no se registraron diferencias significativas ni entre sitios, ni entre épocas climáticas, siendo predominante el estado mesotrófico para la época húmeda y entre estado oligotrófico y mesotrófico para la época seca, indicando una buena calidad del cuerpo de agua.

Pese al incremento en la concentración de la Chl-a en época húmeda, el índice de Karydis registró una calidad del agua adecuada, lo que indica que este incremento no representa riesgo para la salud del ecosistema.

Las diferencias en la calidad del agua entre los índices aplicados, evidencia que el índice Karydis se adapta mejor a las condiciones del Golfo, puesto que las características del mismo distan notablemente de los resultados obtenidos mediante el uso del Índice de Trix.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar realizando investigaciones tendientes a realizar medición y monitoreo de la concentración de Chl-a, dada la escasa información relacionada con este parámetro para el Golfo, así mismo, debe complementarse dicha información con las mediciones de parámetros físico-químicos y nutrientes, ya que existen muy pocos referentes bibliográficos para el este sector evaluado, lo cual dificulta conocer la dinámica de productividad primaria y calidad de aguas, que sirven de base como información de soporte para llevar a cabo planes de desarrollo y ordenamiento costero para el Caribe de Antioquia – Golfo de Urabá.

Es importante que las diferentes entidades ambientales y competentes realicen estudios y monitoreos en época seca, húmeda y en transición de la concentración de Chl-a, ya que se podría estimar la disponibilidad alimentaria que tiene el Golfo de Urabá para sustentar la biomasa; es decir, su estado trófico, con el fin de ampliar información que sirva de ayuda para mejorar el uso, cuidado y protección de los servicios ecosistémicos que ofrece la zona.

Es importante el uso de distintos índices tróficos, por lo cual se recomienda su uso para una mejor comprensión e interpretación de los resultados de la dinámica de los cuerpos de agua de la zona costera, dado que las mismas son sistemas muy dinámicos y poseen características muy diferentes dadas por los diversos factores que inciden en estas zonas, además debido a estas particularidades ecosistémicas es importante evaluar cuál índice se ajusta mejor a las condiciones y dinámica de la zona.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios y a mi familia por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

A mis asesores Mónica María Zambrano Ortiz y Elkin Darío Castellón Castrillón y a las docentes Paula A. Quiceno, Heazel J. Grajales, por aportar su conocimiento, asesoría, tiempo, motivación, amistad y sobre todo por el apoyo incondicional para llevar a cabo este trabajo de grado.

El autor de este trabajo agradece a la Gobernación de Antioquia y al proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, Ascon 18-417” liderado por el CESET de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) y la Universidad del Norte.

A la Corporación Académica Ambiental, a los profesores Vladimir G. Toro, Fernando Parra, Jenny Leal, por sus correcciones y sugerencias para dar a conocer lo que hicimos en el Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (SENALMAR).

A mis colegas y amigos, Nelsy Patricia Villalba, Yerys J. Calderón, María Elena Álvarez, Noris Isabel Córdoba, Erica Zapata, Elizabeth Quiceno, que siempre estuvieron ahí brindándome la mano cuando más lo necesité.

8. REFERENCIAS

- Arango-Sánchez, L.B., Correa-Herrera, T. y Correa-Rendón, J.D., 2019.- Diversidad de peces en hábitats estuarinos delta del río Atrato, Golfo de Urabá. Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas, 23 (1): 191-207. DOI: 10.17151/bccm.2019.23.1.7.
- Bernal G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 30 (115): 195-208. 2006. ISSN 0370-3908.
- Blanco-Libreros, J. F. (2016). Introducción. pgs 28-39. En: Blanco-Libreros, J. F. y M. H. Londoño-Mesa (Eds.). Expedición Caribe sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano. Bogotá 323 pp
- Blanco-Libreros, J. F. (2016). Moluscos (gasterópodos y bivalvos) asociados a las raíces sumergidas en los manglares del golfo de Urabá. pgs 156-158. En: Blanco-Libreros, J. F. y M. H. Londoño-Mesa (Eds.). Expedición Caribe sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano. Bogotá 323 pp
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. Limnology and oceanography, 22(2), 361-369.
- CORPOURABÁ. (2008). Humedales, ecosistemas estratégicos: Plan de Manejo de Distrito de Manejo Integrado (DMI) de la ensenada de Rionegro y las ciénagas La Marimonda y El Salado, municipio de Necoclí, Departamento de Antioquia. Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 223 p.
- CORPOURABA. (2011). Evaluación y diagnóstico de la calidad ambiental marina, departamento de antioquia, Golfo de Urabá. Corporación para el desarrollo sostenible de Urabá. 167 p.
- Correa-Arango, I. D., y Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo), Costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR, Santa Marta, v. 33, n. 1, Dec. 2004, pp 07-28.
- Coca, O., Bastidas, M., Ordoñez, A., Ricaurte, C., Briceño, F., Obando, P., y otros. (2018). Estado del ambiente y ecosistemas marinos y costeros. Pp. 32-33. En: INVEMAR. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2017. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 180 p.
- Dodds, W. K., y Whiles, M. R. (2020). Trophic State and Eutrophication. Freshwater Ecology, 537–581. doi:10.1016/b978-0-12-813255-5.00018-1.
- Elliott, M., y de Jonge, V. N. (2002). The management of nutrients and potential eutrophication in estuaries and other restricted water bodies. 513–524.
- Escobar, C. (2011). Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe colombiano). Vol 40. 10.25268/bimc.invemar.2011.40.2.114. Bulletin of Marine and Coastal Research.

- EPA. 2002. National Recommended Water Quality Criteria. United States Environmental Protection Agency. EPA- 822-R-02-047. 36 pp.
- Garay-Tinoco, J.A., D.I. Gómez-López., y J. R. Ortiz-Galvis (Eds). 2006. Diagnóstico integral del impacto biofísico y socioeconómico relativo a las fuentes de contaminación terrestre en la bahía de Tumaco, Colombia y lineamientos básicos para un Plan de Manejo. Proyecto del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA - Programa de Acción Mundial PAM) y Comisión Permanente del Pacífico Sur CPPS. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR Centro Control Contaminación del Pacífico CCCP- Corporación Autónoma Regional de Nariño CORPONARIÑO. Santa Marta, 290 p.
- García-Valencia C (ed.). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó.
- Garmendia, M., A. Borja, J. Franco., y M. Revilla. 2013. Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: present state and challenges within the European directives. *Marine Pollution Bulletin* 661: 7-16.
- Ignatiades, L., Karydis, M., y Vounatsou, P. (1992). A possible method for evaluating oligotrophy and eutrophication based on nutrient concentration scales. *Marine pollution bulletin*, 24(5), 238-243.
- INVEMAR. (2003). Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). Santa Marta. p.148.
- Itsvánovics, V. (2009). Eutrophication of Lakes and Reservoirs. *Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary*.
- Justić, D., Rabalais, N. N., y Turner, R. E. 1995. Balance estequiométrico de nutrientes y el origen de la eutrofización costera. *Boletín de Polución Marina*, 30(1), 41-46.
- Justic, D., Rabalais N. N., y Turner, R. E. 1995. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin* 30(1): 41-46.
- Kanti, P., y Harun, R. (2017). Cambio climático y aumento del nivel del mar en Bangladesh, p. 83 - 119. En: *Riesgos climáticos en la costa de Bangladesh. Soluciones no estructurales y estructurales Libro 2016*.
- Karydis, M., Ignatiades, L., y Moschopoulou, N. (1983). An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 16(3), 339–344. doi:10.1016/0272-7714(83)90151-8.
- Lonin, S., y Vásquez, J. G. (2005). Hidrodinámica y distribución coliformes en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 23, 76-89
- López-cortes., Gárate-Lizárraga., Bustillos-Guzmán., Alonso-Rodríguez., Murillo-Murillo (2003). Variabilidad del estado trófico y la biomasa del fitoplancton de Bahía Concepción, Golfo de California (1997-1999). *Hidrobiológica*, 13 (3): 195-206.
- Lozano, L. H. (1998). Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera que comprende la bahía Colombia desde el río Turbo hasta Matuntugo. Escuela Naval Almirante Padilla, Facultad de Oceanografía Física, Cartagena de Indias, Colombia. 283 p.

- Márquez, V., y Ayala, T. (2017). Clorofila-a como indicador de calidad de agua en el área de influencia del río Atrato entre octubre 2015 y agosto 2016, golfo de Urabá-Caribe colombiano. (Tesis de pregrado) Universidad de Antioquia.
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, Leonel C, Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., y Cánovas, A. M. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACIÓN. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8 (2) Recuperado en 05 de octubre de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&lng=es&tying=es.
- Montoya, L. J., y Toro, M. (2005). Dinámica oceanográfica del Golfo de Urabá y su relación con la dispersión de sedimentos. 11-37. Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del Golfo de Urabá. Informe final, Fondo ISA–Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Municipio de Turbo (2000). Plan de Ordenamiento Territorial (POT), Libro I: Diagnóstico por componentes. En: Lonin, S., y Vásquez, J. G. (2005). Hidrodinámica y distribución coliformes en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 23, 76-89
- Naranjo, C., y Tapia, M. E. (2010). La clorofila a como un indicador biológico en las estaciones fijas durante el evento La Niña 1999-2000.
- Pacheco, W. (2018). Variabilidad estacional de la clorofila-a satelital, en el sur occidente del caribe colombiano. (Tesis de pregrado) Universidad de Antioquia.
- Paerl, H. W., y Ustach, J. F. (1982). Blue-green algal scums: An explanation for their occurrence during freshwater blooms. *Limnology and oceanography*, 27(2), 212-217.
- Ricaurte-Villota, C., Bastidas-Salamanca, M. L., Et al., (2017). Estado del ambiente y los ecosistemas marinos y costeros. (Pp. 28-65). En: INVEMAR. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2016. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 200 p.
- Silva, J. (2011). Estimación de la concentración de clorofila–a en el Golfo de Urabá.
- Strickland, J.D.H. y T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Fish. Res. Board of Canada. Segunda Edición. Ottawa.
- Thomas, Y., García Valencia, C., Cesaraccio, M y Rojas Giraldo, X. 2007. El paisaje en el golfo. Pp. 96-113 en García-Valencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costera–Invemar– y Gobernación de Antioquia. Santa Marta, Colombia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12
- Tsirtsis, G. y M. Karydis. 1998. Evaluation of phytoplankton community indices for detecting eutrophic trends in the marine environment. *Environmental Monitoring Assessment*. 50, 255–269.
- US-EPA. 1997. Protecting Coastal Waters from Nonpoint Source Pollution. In: U.S. Environmental Protection Agency. Washington D.C. USA. 841-F-96-004E. En: Bastidas Pantoja, G.D. (2011). Evaluación temporal del estado trófico y otros parámetros fisicoquímicos de la Bahía de Tumaco. *Boletín Científico CIOH*. 29, 129-136.

- Vollenweider, R. A., Giovanardi F., Montanari G., y Rinaldi, A. (1998). Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9:329-357.
- Vollenweider, R. A. y Janus, L. L. 1981. *Statistical models for predicting hypolimnetic oxygen* Research Institute. Canada Centre for Inland Waters. Ontario. 38 p.
- Wilkinson, G. (2017). *Eutrophication of Freshwater and Coastal Ecosystems*. Pages 145-152.
- Yonglong, L., Jingjing, Y., Et al., (2018). Major threats of pollution and climate change to global coastal ecosystems and enhanced management for sustainability. Pages 670-680.
- Zapata, M. (2015). *Abundancia y distribución espacio-temporal de larvas de Crassostrea (Mollusca: Bivalvia) en la bahía de Marirrío, golfo de Urabá (Caribe Colombiano) (Tesis de maestría)*. Universidad de Antioquia, Medellín.