



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Mérida-Departamento de Recursos del Mar

**Evaluación del efecto del sargazo pelágico en la calidad del agua de la
laguna arrecifal de tres sitios del Caribe mexicano**

Tesis de Maestría en Biología Marina

Alumno

Biol. Mar. Rodolfo Rodríguez Muñoz

Directores de tesis

Dr. Jesús Ernesto Arias González

Dra. Reyna Cristina Collí Dulá

Mérida, Yucatán a Octubre de 2020

RESUMEN

Desde 2011 las costas del Caribe mexicano han experimentado afluencias masivas de macroalgas cafés conocidas comúnmente como “*Sargassum* o Sargazo”. Estas arribazones han generado daños a nivel ecológico, económico y ambiental. Uno de sus efectos se observa principalmente en la calidad del agua de los ecosistemas costeros, ya que se ha identificado una reducción importante en los niveles de oxígeno disuelto (O_2) y pH, un incremento de la turbidez y la generación de compuestos como el amonio (NH_4), fosfato (PO_4) y ácido sulfhídrico (H_2S). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del sargazo en la calidad del agua de la laguna arrecifal de tres sitios ubicados al sur de Quintana Roo: Mahahual, Xcalak y Xahuayxol. La laguna arrecifal de estos sitios está compuesta de camas de pastos marinos y pequeños parches coralinos susceptibles a afectaciones por este fenómeno. No obstante, la condición de salud de la laguna varía entre los sitios. Mahahual es un sitio que ha sido impactado por el turismo debido al arribo constante de cruceros internacionales mientras que Xahuayxol y Xcalak pertenecen al Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. Asimismo, Xahuayxol cuenta con una población pequeña que se dedica principalmente a la pesca de langosta y el ecoturismo. Xcalak tiene un número reducido de habitantes cuyas principales fuentes económicas son la pesca y el turismo, el cual ha aumentado en los últimos años debido a las actividades de buceo que se practican en este arrecife. En este estudio se analizaron 27 imágenes multiespectrales Landsat 8 de 2018 y 2019 correspondientes a los sitios de estudio que abarca dos escenas diferentes (019-047 y 018-047), a las cuales se les aplicó una clasificación supervisada para estimar el comportamiento de la cobertura de sargazo. Se determinó la turbidez mediante el cociente de dos bandas (banda roja y la infrarroja de onda corta o SWIR) y se correlacionó con la cobertura de sargazo. Adicionalmente, se realizaron dos muestreos en los meses de julio y octubre de 2019 donde se midieron las concentraciones de oxígeno disuelto, pH, amonio, fosfato y sólidos disueltos totales (SDT), en las zonas con mayor influencia del sargazo. El análisis de sensores remotos reveló una mayor cobertura de sargazo en 2019, principalmente durante los meses de enero, febrero y marzo. El modelo de regresión lineal de la escena 019-047 mostró que la cobertura de sargazo y la turbidez incrementan proporcionalmente y que la variable cobertura de sargazo explicó en un alto porcentaje (80%) el aumento de la turbidez. El modelo de regresión de la escena 018-047 mostró que la turbidez incrementa

independientemente de la cantidad de cobertura de sargazo, es por ello que la variable cobertura de sargazo explicó en un bajo porcentaje (47%) el aumento de la turbidez. Los parámetros de calidad del agua mostraron que los niveles de pH y O₂ disminuyeron en la zona con mayor acumulación de sargazo. Se observó que las concentraciones de amonio y fosfato incrementaron por la presencia de sargazo en descomposición. Se identificó que los SDT no fueron buenos indicadores de la presencia del sargazo. De igual forma Xcalak y Mahahual presentaron una mayor reducción de pH y altas concentraciones de amonio, mientras que en Xcalak y Xahuayxol se registraron las mayores concentraciones de fosfato. Respecto a los niveles de oxígeno disuelto, todos los sitios se vieron afectados. El uso de herramientas de sensores remotos y la evaluación de parámetros de la calidad del agua en este estudio contribuyeron en información relevante sobre el efecto del sargazo en la parte sur del Caribe mexicano.

Palabras clave: Caribe mexicano, calidad del agua, Costa Maya, laguna arrecifal, sensores remotos, sargazo, turbidez.

ABSTRACT

Since 2011 the Mexican Caribbean coasts have experienced massive influxes of brown macroalgae commonly known as "*Sargassum* or Sargasso". These arrivals have generated damage at the ecological, economic and environmental levels. One of their effects is mainly observed in the water quality of coastal ecosystems, since a significant reduction in the levels of dissolved oxygen (O_2) and pH, an increase in turbidity and the generation of compounds such as ammonium (NH_4), phosphate (PO_4) and hydrogen sulfide (H_2S) have been identified. The objective of the present study was to evaluate the effect of *Sargassum* on the water quality of the reef lagoon in three sites located at south of Quintana Roo: Mahahual, Xcalak and Xahuayxol. The reef lagoon at these sites is composed of seagrass beds and small coral patches susceptible to this phenomenon. However, the health condition of the lagoon varies between sites. Mahahual is a site that has been impacted by tourism due to the constant arrival of international cruise ships while Xahuayxol and Xcalak belong to the marine protected area Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. Likewise, Xahuayxol has a small population that is mainly dedicated to lobster fishing and ecotourism. Xcalak has a small number of inhabitants whose main economic sources are fishing and tourism, which has increased in recent years due to the diving activities practiced in this reef. In this study, 27 Landsat 8 multispectral images from 2018 and 2019 were analyzed corresponding to the study sites covering two different scenes (019-047 and 018-047), to which a supervised classification was applied to estimate the behavior of *Sargassum* coverage. Turbidity was determined by the quotient of two bands (red band and short wave infrared or SWIR) and correlated with the *Sargassum* coverage. In addition, two samplings were realized in July and October 2019, where the concentrations of dissolved oxygen, pH, ammonium, phosphate and total dissolved solids (TDS) were measured in the areas with higher influence of *Sargassum*. The analysis of remote sensors revealed a higher coverage of *Sargassum* in 2019, mainly during the months of January, February and March. The linear regression model of scene 019-047 showed that the *Sargassum* coverage and turbidity increase proportionally and that the *Sargassum* coverage variable explained in a high percentage (80%) the increase in turbidity. The regression model of scene 018-047 showed that turbidity increases independently of the amount of *Sargassum* coverage, so the *Sargassum* coverage variable explained a low percentage (47%) of the increase in turbidity. The water quality parameters showed that the

pH and O₂ levels decreased in the area with the highest accumulation of *Sargassum*. Ammonium and phosphate concentrations were observed to increase due to the presence of decomposing *Sargassum*. It was identified that TDS were not good indicators of the presence of *Sargassum*. Similarly, Xcalak and Mahahual showed a greater reduction in pH and high concentrations of ammonium, while Xcalak and Xahuayxol showed the highest concentrations of phosphate. In terms of dissolved oxygen levels, all sites were affected. The use of remote sensing tools and the evaluation of water quality parameters in this study contributed relevant information on the effect of *Sargassum* in the south of the Mexican Caribbean.

Key words: Mayan Coast, Mexican Caribbean, reef lagoon, remote sensors, *Sargassum*, turbidity, water quality.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen de Guadalupe que siempre permanecen a mi lado y que me han ayudado a alcanzar todas mis metas personales y profesionales. Gracias a ellos he tenido la fortaleza y voluntad de continuar haciendo lo que más me gusta, que es continuar en esta hermosa profesión.

A mis padres Maricruz Muñoz y Rodolfo Rodríguez, por ser el pilar de mi familia y por inculcarme con su ejemplo todos los valores que me han permitido avanzar paso a paso. Por brindarme su apoyo incondicional (a pesar de mis errores) para cumplir mis metas personales y profesionales. Con mucho amor y cariño les dedicó este trabajo.

A mis abuelos (Maria Cruz y Rafael) a mis hermanas (Melisa e Yvette), a mi sobrina (Ana Julia), mi tía (Diana), mis primas (Yunuen y Lizbeth) y a Miriam, por ser parte fundamental de mi vida y estar presentes en momentos de júbilo como en aquellos difíciles.

A la memoria de mi gran amigo y hermano (Anibal Leyva Ojeda), porque tu presencia se mantiene siempre en mi corazón.

Al mar y a la vida que alberga, porque son una de mis mayores motivaciones diarias para seguir explorando y conociendo todo lo que brindan a este hermoso planeta. Sin duda es esa bella parte del mundo la que hace que este se mantenga y perdure. Es por ello que me honra aportar una pequeña semilla que sirva para cuidar y proteger ese preciado baluarte.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) Unidad Mérida, por permitirme llevar a cabo mis estudios de Maestría y contribuir con mi formación académica. Por proporcionarme las herramientas y las instalaciones necesarias para culminar mi proyecto de tesis. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca de manutención con la cual pude cubrir mis gastos durante la Maestría. Al proyecto Resiliencia de los arrecifes coralinos del Caribe por brindarme fondos para realizar los muestreos de campo.

Al Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos (LEEAC), por abriermé las puertas, brindarme el apoyo, el material y las herramientas necesarias para poder elaborar mi proyecto de tesis.

A mis directores de tesis, Dr. Jesús Ernesto Arias González y Dra. Reyna Cristina Collí Dulá por aceptar dirigir mi tesis, por su apoyo incondicional y por darme la confianza para llevar a cabo este trabajo. Por sus aportaciones, comentarios, sugerencias y correcciones para poder mejorar este trabajo. Doy gracias porque sus consejos, enseñanzas y paciencia, me permitieron crecer tanto personal como profesionalmente. Agradezco también la amistad brindada por ambos.

Al Dr. Jorge Iván Euan Ávila porque además de formar parte de mi comité sinodal y realizar correcciones y comentarios a este trabajo (que fueron importantes para mejorarlo), fue también quién me introdujo a una técnica muy útil e interesante como es la percepción remota. De igual forma, me dió acceso al software TNTmips® y aclaró muchas dudas que tenía respecto a las herramientas de sensores remotos.

Al Dr. David Sergio Valdés Lozano, que me proporcionó el material y la ayuda necesaria para el procesamiento de muestras de agua dentro del Laboratorio de Química Marina. Por formar parte de mi comité sinodal, ya que con sus comentarios y correcciones ayudo a mejorar este trabajo.

Al Dr. Emanuel Hernández Núñez por ser parte de mi comité sinodal y con sus comentarios y sugerencias ayudar a mejorar este trabajo.

Al Ing. Héctor Hernández Núñez por su apoyo y enseñanzas durante el procesamiento de las imágenes satelitales. Le doy gracias por su paciencia y tiempo para poder aclarar todas mis dudas. Al M. en C. Aaron Israel Muñiz Castillo, por su apoyo y consejos durante el procesamiento de las imágenes satelitales. Por brindarme su ayuda y conocimientos en los análisis estadísticos, los cuales fueron muy útiles para el enfoque de este trabajo.

A la M. en C. Silvia Puerto Granados por su apoyo en el análisis de las muestras de agua y por aclararme algunas dudas respecto a ello.

Al M. en C. Jose Luis Cabrera Pérez, al Dr. Camilo Cortés Useche, a la M. en C. Nacira Anahí Albornoz Abud y al Biol. Víctor Castillo Escalante por su gran apoyo en los muestreos de campo y por su amistad.

A mis profesores de las asignaturas que cursé durante la Maestría, por transmitirme sus conocimientos, los cuales me permitieron tener una gran formación académica.

A mis compañeros de la generación 2018-2020 de la Maestría en Ciencias con Especialidad en Biología Marina por su amistad y por compartir momentos y experiencias agradables durante esta etapa.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Biología del <i>Sargassum</i>	1
1.2. Distribución geográfica.....	2
1.3. Importancia ecológica	2
1.4. Origen del sargazo que llega al Golfo de México y el mar Caribe	3
1.5. Efecto del sargazo en la calidad del agua del mar Caribe	4
1.6. Daños ecológicos por la presencia de sargazo	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Afluencias masivas de sargazo.....	5
2.2. Aplicación de sensores remotes en la detección del sargazo	5
2.3. Estimación de la turbidez a través de imágenes satelitales	7
2.4. Sargazo y sus efectos en la calidad del agua	9
2.5. Impactos del sargazo a la flora y fauna marina	11
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. HIPOTESIS	13
5. OBJETIVOS	14
5.1. General	14
5.2. Específicos	14
6. METODOLOGÍA	14
6.1. Área de estudio.....	14
6.2. Trabajo de campo	17
6.2.1. Toma de muestras de agua, sargazo y parámetros fisicoquímicos	17
6.3. Laboratorio	19
6.3.1. Análisis de las imágenes de satélite	19
6.3.2. Análisis de las muestras de agua	26
6.4. Análisis estadísticos	26

6.4.1. Percepción remota.....	26
6.4.2. Determinación de la calidad de agua en los sitios de estudio.....	27
7. RESULTADOS.....	29
7.1. Clasificación de las imágenes	29
7.2. Cobertura de sargazo.....	30
7.3. Estimación de la turbidez.....	33
7.4. Relación sargazo-turbidez.....	36
7.5. Calidad de agua.....	38
8. DISCUSIÓN.....	42
8.1. Detección satelital de sargazo en el Caribe mexicano.....	42
8.2. Efecto del sargazo en la turbidez del agua	47
8.3. Efecto del sargazo en la calidad del agua.....	50
9. CONCLUSIONES.....	55
10. RECOMENDACIONES GENERALES	58
11. REFERENCIAS.....	60
12. ANEXO	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características morfológicas del sargazo. a) Coloración café claro, b) Neumatóforos y ausencia de estructura de soporte (marcados en azul), c) Ramificaciones laterales, d) Ausencia de criptostomas en la superficie del filoide (marcado en azul).	2
Figura 2. a) Procedencia del sargazo y b) Corrientes que lo llevan a las costas del Caribe mexicano (tomado de Franks et al., 2016 y Johns et al., 2020). NBC: Corriente Norte de Brasil, GC: Corriente de Guyana, CA: Corriente del Caribe. Otras corrientes SEC: Corriente Sur-Ecuatorial, NECC: Contracorriente Nor-ecuatorial, NEC: Corriente Norecuatorial, CC: Corriente de las Canarias, LC: Corriente de Lazo, GS: Corriente del Golfo.....	4
Figura 3. Mapa de área de estudio.	16
Figura 4. Metodología de campo y laboratorio.	17
Figura 5. Método de muestreo aplicado en julio de 2019 para evaluar la calidad del agua en la laguna arrecifal de Mahahual, Xcalak y Xahuayxol.	18
Figura 6. Método de muestreo de octubre de 2019 para evaluar la calidad del agua en Mahahual, Xcalak y Xahuayxol (modificado de van Tussenbroek et al., 2017).....	19
Figura 7. a) Escenas que se analizaron para la detección del sargazo, b) Sargazo detectado con composición RGB (Rojo, Verde y Azul) de las imágenes Landsat 8.	20
Figura 8. Metodología aplicada a las imágenes Landsat 8 para estimar la cobertura de sargazo y la turbidez.....	25
Figura 9. Cobertura de sargazo de la escena 019-047 en 2018 y 2019.	31
Figura 10. Cobertura de sargazo de la escena 018-047 en 2018 y 2019.	32
Figura 11. Cobertura de sargazo en las escenas 019-047 y 018-047 en 2018 y 2019.....	32
Figura 12. Cambios temporales en la turbidez escena 019-047.	34
Figura 13. Cambios temporales en la turbidez escena 018-047.	34
Figura 14. Tipo de distribución y cambios temporales de los datos de turbidez de la escena 019-047.....	35
Figura 15. Tipo de distribución y cambios temporales de los datos de turbidez de la escena 018-047.....	36
Figura 16. Modelo de regresión lineal simple, de relación entre la cobertura de sargazo y la turbidez de la escena 019-047.	37
Figura 17. Modelo de regresión lineal simple, de relación entre la cobertura de sargazo y la turbidez en la escena 018-047.	38
Figura 18. Respuesta espectral en el IPVI de la clase sargazo y mar de la escena 019-047.	86
Figura 19. Respuesta espectral en el IPVI de la clase sargazo y mar de la escena 018-047.	87

Figura 20. Respuesta espectral de las bandas roja e infrarroja de la clase sargazo y mar de la escena 019-047.	87
Figura 21. Respuesta espectral de las bandas roja e infrarroja de la clase sargazo y mar de la escena 018-047.	88
Figura 22. Distribución de los residuales de la escena 019-047 que muestra una distribución normal de los mismos.	89
Figura 23. Distribución de los residuales de la escena 018-047 donde se muestra una distribución sesgada de los mismos.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bandas espectrales del Landsat 8 con su resolución espacial y longitud de onda.....	19
Tabla 2. Estandarización en la magnitud del cambio de transparencia.	24
Tabla 3. Resumen de los modelos de regresión lineal simple de la relación sargazo-turbidez.	37
Tabla 4. Valores promedio (\pm Desv.est.) de los parámetros medidos en los tres sitios de estudio y las diferentes zonas de muestreo, datos de julio de 2019.	39
Tabla 5. Resumen del PERMANOVA entre zonas y los tres sitios de muestreo, datos de julio 2019.....	39
Tabla 6. Valores promedio (\pm Desv.est.) de los parámetros medidos en los tres sitios de estudio y en las diferentes zonas de muestreo, datos de octubre de 2019.	40
Tabla 7. Resumen del PERMANOVA entre zonas y los tres sitios de muestreo, datos de octubre 2019.....	41
Tabla 8. Matrices de error-confusión escena 019-047.	73
Tabla 9. Matrices de error-confusión de la escena 018-047.....	74
Tabla 10. Gráficos de dispersión elipsoidal escena 019-047.*Elipse roja=clase sargazo, elipse azul oscuro=clase mar, elipse azul claro= clase sombras de las nubes.	76
Tabla 11. Gráficos de dispersión elipsoidal de la escena 018-047.*Elipse roja=clase sargazo, elipse azul oscuro=clase mar, elipse azul claro=clase sombras de las nubes, elipse morada= clase banco Chinchorro.....	79
Tabla 12. Estadísticas de la clasificación de la escena 019-047.....	81
Tabla 13. Estadísticas de la clasificación de la escena 018-047.....	83
Tabla 14. Comparación múltiple PERMANOVA entre zonas y sitios de las diferentes variables ambientales, muestreo octubre 2019.	88
Tabla 15. Comparación múltiple PERMANOVA entre zonas y sitios de las diferentes variables ambientales, muestreo octubre 2019.	89
Tabla 16. Supuestos del modelo de regresión lineal de la escena 019-047.....	89
Tabla 17. Supuestos del modelo de regresión lineal de la escena 018-047.....	90

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Biología del *Sargassum*

En el mundo existen alrededor de 500 especies del género *Sargassum*, que se distribuyen en mares tropicales, subtropicales y templados. Las especies de este género de macroalgas pueden llegar a formar florecimientos masivos y crecer en sustratos rocosos, fangosos y arenosos (Núñez-López y Casas-Valdez 1996). Cuentan con pigmentos como la clorofila a, c y fucoxantina, responsables de la captación de luz (Manrique, 2003, Wu *et al.*, 2014, Wang *et al.*, 2018).

Dentro de este género existen dos especies de sargazo pelágico que son *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* que son capaces de formar grandes tapetes de materia flotante conocidos como “marea dorada”. Estas especies se consideran holopelágicas (desarrollan todo su ciclo de vida en la zona pelágica) y se reproducen de manera asexual por fragmentación. (Bluter *et al.*, 1983, Stoner, 1983, Gower y King, 2011). Morfológicamente comparten ciertas características como: coloración café claro, ausencia de una estructura de soporte para adherirse al fondo, ramificaciones extensas y de forma lateral, ausencia de criptostomas (pequeños puntos café similares a los conceptáculos pero estériles) en la superficie de los filoides y numerosos neumatóforos (Fig.1) que contienen oxígeno, nitrógeno y carbono que les permiten flotar (Hurka, 1971, Littler y Littler, 2000).

Estas especies son fotosintéticas, por lo que su crecimiento depende de la energía luminosa así como de la presencia de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno y de otros factores ambientales como la temperatura y la salinidad (Erickson *et al.*, 2015, Li, 2019, Wang *et al.*, 2019).

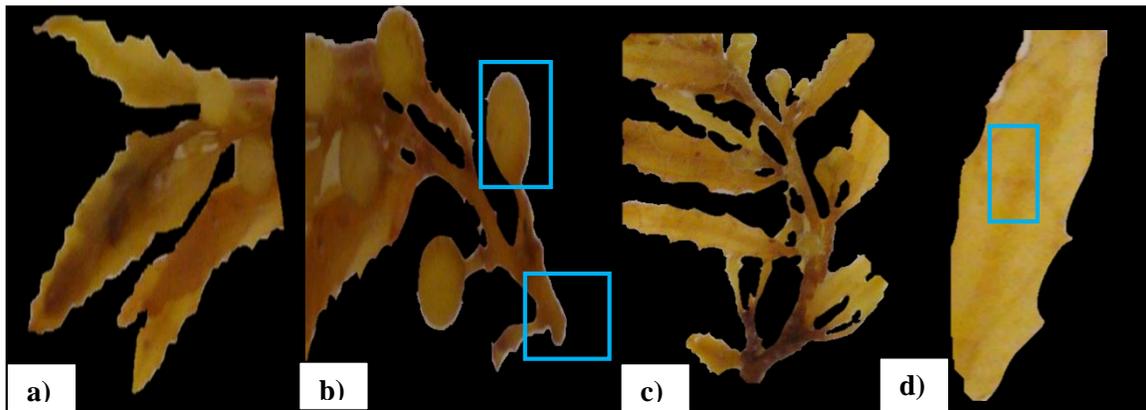


Figura 1. Características morfológicas del sargazo. a) Coloración café claro, b) Neumatóforos y ausencia de estructura de soporte (marcados en azul), c) Ramificaciones laterales, d) Ausencia de criptostomas en la superficie del filoide (marcado en azul).

1.2. Distribución geográfica

El ámbito de distribución de *S. fluitans* y *S. natans* comprende la región del Caribe, el Golfo de México, la parte norte de Brasil y de África, el Indo-Pacífico y en el Atlántico norte (Dawes y Mathieson, 2008, Guiry y Guiry, 2011). Sin embargo, en el “Mar del Sargazo” ubicado en el Atlántico Norte tropical y subtropical se concentra la mayor cantidad de sargazo pelágico del mundo. Este sitio abarca aproximadamente 3.5 kilómetros cuadrados y forma un gran remolino de contorno elíptico limitado por un sistema de corrientes circulares, como la corriente Norecuatorial, la corriente de las Antillas, la corriente del Golfo y la corriente de las Canarias (Bula-Meyer, 2004, Laffoley, 2011).

1.3. Importancia ecológica

La importancia ecológica del sargazo pelágico se observa principalmente en el “Mar del Sargazo”, donde esta alga funciona como sitio de reproducción, alimentación y crianza para diversos organismos como macro y micro-epifitas, bacterias, tortugas marinas, peces algunos de ellos de importancia comercial (como atunes, barracudas, macarelas, pez espada, entre otros), así como invertebrados móviles y sésiles (Manzella y Williams, 1991, Pendleton *et al.*, 2014, Hu *et al.*, 2016) Esto se debe a que el “Mar del Sargazo” en una zona muy productiva, ya que existen giros a mesoescala y surgencias que inducen el ascenso de nutrientes del fondo hacia la superficie (Ulman *et al.*, 2007). Esta zona está ubicada en la

Zona de Convergencia Subtropical, donde confluyen corrientes cálidas y corrientes frías que traen consigo organismos de ambos tipos de ambientes (Ulman *et al.*, 2007).

Del mismo modo, esta zona provee refugio a diversas especies protegiéndolas de depredadores, corrientes marinas o huracanes (Butler *et al.*, 1983). Además, alberga especies endémicas como el pez (*Histrion histrio*) y el cangrejo del sargazo (*Planes minutes*) (Coston-Clements *et al.*, 1991) y contribuye al secuestro de carbono a nivel global (Laffoley, 2011) la productividad primaria y la remineralización de nutrientes (Rowe y Staresinic, 1979).

1.4. Origen del sargazo que llega al Golfo de México y el mar Caribe

Desde 2011 a 2018 se han reportado llegadas atípicas de sargazo a las costas del Caribe y Golfo de México, que han ocasionado daños a nivel económico, ecológico y ambiental (Wang *et al.*, 2019). Esto ha generado una creciente preocupación a la comunidad científica que ha indagado y propuesto hipótesis sobre la procedencia del alga.

En principio, se planteaba que por efecto de las corrientes el sargazo llega a la costa oeste de Estados Unidos proveniente del “Mar del Sargazo” y en esta zona incrementa su biomasa gracias a la descarga de nutrientes del río Mississippi, posteriormente este viaja a las costas del Golfo de México (Gower y King, 2011, Smetacek y Zingone, 2013). También se asumía que a causa del calentamiento global el “Mar del Sargazo” se ha movido ligeramente hacia el sur y que esta más cerca del Caribe (Valesco, 2015). Aunque, estudios recientes han confirmado que el sargazo que llega al Caribe y Golfo de México proviene de la Región de Recirculación Norecuatorial (NERR) que se ubica frente a las costas de África y Brasil. A esta zona se le conoce actualmente como el “Nuevo Mar de Sargazo” (Gower y King, 2008, Johnson *et al.*, 2013, Méndez-Tejeda y Rosado-Jiménez, 2019), ya que la descarga de nutrientes de los ríos Amazonas, Orinoco y Congo, así como del polvo del Sahara (que contiene nutrientes como el K, Fe y PO₄) ayudan a la proliferación del sargazo.

Parte de la biomasa de sargazo generada en esta región, se moviliza al Caribe a través de vientos, mareas y corrientes como la corriente norte de Brasil, la corriente de Guyana y la corriente del Caribe (Fig. 1) (Richardson y Reverdin, 1987, Muller *et al.*, 1995, Johns *et al.*, 2020). En su recorrido hacia las costas del Caribe, el sargazo encuentra la temperatura adecuada y los nutrientes necesarios (C, N y P) para su crecimiento (NOAA, 2016) y muestra

una alta capacidad para soportar elevadas intensidades de luz y continuar con su proceso fotosintético (Phlips *et al.*, 1986).

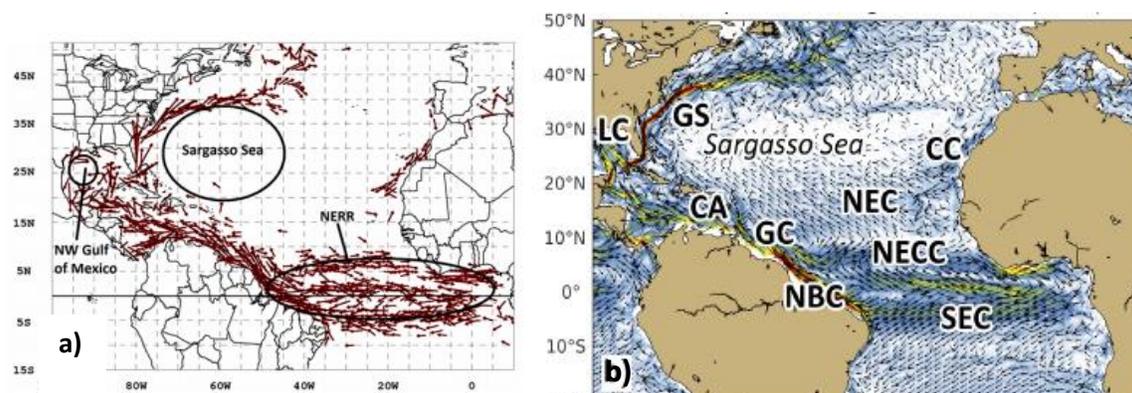


Figura 2. a) Procedencia del sargazo y b) Corrientes que lo llevan a las costas del Caribe mexicano (tomado de Franks *et al.*, 2016 y Johns *et al.*, 2020). NBC: Corriente Norte de Brasil, GC: Corriente de Guyana, CA: Corriente del Caribe. Otras corrientes SEC: Corriente Sur-Ecuatorial, NECC: Contracorriente Nor-ecuatorial, NEC: Corriente Norecuatorial, CC: Corriente de las Canarias, LC: Corriente de Lazo, GS: Corriente del Golfo.

1.5. Efecto del sargazo en la calidad del agua del mar Caribe

Cuando el sargazo llega a las costas del Caribe, impacta negativamente la calidad del agua, esto es debido a que las grandes arribazones de alga se acumulan cerca de la playa, obstruyendo la penetración de la luz a la columna de agua e impidiendo el intercambio de oxígeno con la atmósfera, lo cual causa una reducción en la iluminación y en la concentración de oxígeno. Asimismo, se generan condiciones de potencial REDOX negativas (por la pérdida de oxígeno), un aumento de la temperatura y en la turbidez en la columna de agua (van Tussenbroek *et al.*, 2017, Rodríguez Martínez *et al.*, 2019).

El periodo prolongado de tiempo que permanece el sargazo cerca de la playa hace que este se descomponga y produzca una serie de compuestos químicos como el amonio (NH_4) y el ácido sulfhídrico (H_2S) (van Tussenbroek *et al.*, 2017), lo cual provoca una disminución del pH (Antonio-Martínez *et al.*, 2020).

1.6. Daños ecológicos por la presencia de sargazo

La producción de NH_4 y H_2S , así como las condiciones hipóxicas generadas a partir de la degradación y acumulación del sargazo han causado la muerte de organismos marinos clave en los ecosistemas costeros entre ellos: peces, moluscos, equinodermos, poliquetos y crustáceos (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

De igual forma, las arribazones de sargazo han alterado la salud de los ecosistemas costeros (principalmente la playa y la laguna arrecifal) y la función que estos brindan. En ese sentido, se ha observado que la deposición de enormes cantidades de sargazo en la playa provoca que ésta se erosione y que se pierdan sitios de anidación para las tortugas marinas. También, los parches coralinos y las camas de pastos marinos que componen la laguna arrecifal han presentado mortalidad total o parcial, debido a la disminución de la luz, fuente vital de energía para estos organismos (López *et al.*, 2008, Hoang *et al.*, 2016, van Tussenbrok *et al.*, 2017, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

2. ANTECEDENTES

2.1. Afluencias masivas de sargazo

En la NERR existen una serie de factores que permiten que el sargazo prolifere (Wang *et al.*, 2019), entre ellos se encuentran las: temperaturas por debajo del promedio, surgencias de la costa este de África y descargas de nutrientes (en menor o mayor medida) provenientes de los ríos Amazonas, Congo y Orinoco. Principalmente, nutrientes como el nitrógeno y fósforo usados en el sector agrícola de Brasil, son los que aceleran mayormente el crecimiento del sargazo (Wang *et al.*, 2019).

Parte de la biomasa que se genera en la NERR, llega al Caribe y el Atlántico Central por medio de vientos y corrientes (Johns *et al.*, 2020). Sin embargo, en los últimos años la cantidad de sargazo que arriba a esta región ha crecido gradualmente. Se han presentado eventos de arribazón masivos en 2011, 2015 y 2018, donde llegaron 3, 10 y 20 millones de toneladas de sargazo respectivamente, que en términos de cobertura representan entre 2000 y 6000 km² (Wang *et al.*, 2019).

2.2. Aplicación de sensores remotes en la detección del sargazo

La teledetección o detección remota ha sido una herramienta muy útil para el monitoreo de la superficie terrestre y el conocimiento de su dinámica (De Jong y Van Der Meer, 2005). Actualmente, esta herramienta cuenta con mucho auge en la investigación y ha ayudado para mapear e identificar material flotante presente en la superficie marina (Wang y Hu, 2016, Cuevas *et al.*, 2018, Wang *et al.*, 2019). Específicamente, el sargazo ha sido monitoreado

mediante imágenes de satélite provenientes de diversos sensores como el MODIS-Aqua, Sentinel 2A y el Landsat 8 (Cuevas *et al.*, 2018, Wang *et al.*, 2019). El sensor MODIS-Aqua proporciona imágenes de una resolución espacial de 1 km, característica útil en la determinación de la distribución del sargazo en zonas de gran extensión (Arellano-Verdejo *et al.*, 2019). Por otra parte, los sensores Sentinel 2A y Landsat 8 cuentan con resoluciones espaciales de 10 y 30 m (Ferreira, 2016) respectivamente y estos se han utilizado principalmente para detectar sargazo en regiones menos extensas (ej. parte noreste de Yucatán) (Cuevas *et al.*, 2018).

Las imágenes de satélite han sido de gran utilidad para conocer la trayectoria que sigue el sargazo desde su punto de origen hasta el Caribe. Con relación a esto, se ha observado mediante imágenes MODIS-Aqua, que el sargazo proviene de una zona conocida como la NERR ubicada frente a las costas de Brasil y África (Gower y King 2008). Se ha identificado que desde esta región se genera una línea continua de sargazo que llega hasta el Caribe y se denomina el gran cinturón de sargazo cuya extensión es de 8850 km (Wang *et al.*, 2019).

Con la aplicación de métodos analíticos de percepción remota se ha podido estimar la cobertura de sargazo en ciertas regiones del Golfo de México y el Caribe (Wang y Hu, 2016, Cuevas *et al.*, 2018, Wang *et al.*, 2019). En un estudio realizado por Cuevas *et al.* (2018) se analizaron 91 imágenes Landsat 8 de los años 2014 y 2015 del noreste de la península de Yucatán y utilizando el método de clasificación supervisada de Bosque Aleatorio (Random Forest) en combinación con diferentes índices de vegetación y bandas multiespectrales (NDVI, ARVI, SAVI, FAI y bandas 2 y 5) estimaron la cobertura de sargazo. Estos autores identificaron que el índice ARVI y las bandas 2 y 5 fueron más efectivos para este cálculo. Adicionalmente, detectaron que en diciembre de 2014 y en el verano de 2015 se presentaron las mayores arribaciones del alga con coberturas de 4000 y 6000 hectáreas, respectivamente.

Del mismo modo, Wang y Hu (2016), determinaron la cobertura de sargazo en el Atlántico Central y el Caribe, mediante imágenes MODIS-Aqua. Ellos utilizaron un índice alternativo de algas flotantes conocido como AFAI, para la detección de sargazo, mediante la aplicación de este índice, clasificaron píxeles pertenecientes a nubes, así como aquellos con y sin cobertura de sargazo. En ese sentido, detectaron las coberturas más bajas durante 2009, 2010 y 2013 (entre 59.6 y 83.5 km²) y las más altas durante 2011, 2012, 2014 y 2015 (entre 199.5

y 956.2 km²). Estos autores, identificaron que las mayores arribazones están íntimamente relacionadas con un aumento de la descarga de nutrientes, así como con bajas anomalías de temperatura (temperaturas por debajo del promedio).

Wang *et al.* (2018) estimaron en términos de biomasa la cantidad de sargazo que llega al Caribe y el Atlántico Central. Para ello, se obtuvieron imágenes MODIS-Aqua de julio de 2015 y colectaron muestras de sargazo, las cuales se dividieron en 29 densidades diferentes. Posteriormente, calcularon la biomasa mediante la división del área superficial de una cubeta donde se colocaba el sargazo entre el peso húmedo de la muestra de sargazo. De estas 29 densidades-biomasas distintas se obtuvo la reflectancia. Una vez obtenidos estos valores se hizo el cálculo de la biomasa en las imágenes MODIS mediante un índice conocido como modelo de biomasa-densidad AFAI. Este modelo fue validado a través de un modelo de incertidumbre. Esto permitió detectar una biomasa aproximada de 4.4 millones de toneladas y un área de $3.15 \times 10^3 \text{ m}^2$ para el Caribe y el Atlántico central, con una incertidumbre del modelo de 12%.

Debido a la gran utilidad que tiene la aplicación de herramientas satelitales, se ha buscado complementar estas con otras técnicas clasificatorias para mejorar la detección del sargazo. Por lo cual, recientemente se utilizó un algoritmo de redes neuronales recurrentes y convolucionales llamado ERISNet, el cual fue diseñado con el fin de detectar sargazo a lo largo la costa con mayor precisión. Este algoritmo fue capaz de clasificar los píxeles con sargazo y sin sargazo de imágenes MODIS-Aqua con un 90 % de exactitud, por lo cual resultó ser una herramienta novedosa que permite el estudio de florecimientos algales (Arellano-Verdejo *et al.*, 2019).

2.3. Estimación de la turbidez a través de imágenes satelitales

La determinación de la turbidez mediante imágenes satelitales contribuye a evaluar la calidad del agua en sistemas impactados por diversos factores. Existen estudios donde por medio de modelos y algoritmos aplicados a datos satelitales se puede estimar la turbidez en la superficie marina y detectar en en que puntos hay un incremento de este parámetro (Constantin *et al.*, 2017, Gunasekara *et al.*, 2016, Quang *et al.*, 2017, Caballero *et al.*, 2019). Pese a ello, no se han realizado estudios donde se utilicen datos satelitales para conocer el efecto del sargazo sobre la turbidez, a pesar de que se ha observado que esta alga tiende a

desprender lixiviados que generan que la columna de agua pierda transparencia (van Tussenbroek *et al.*, 2017).

En la mayor parte de los estudios se calcula la turbidez (a través de datos satelitales) para conocer que efecto provocan las escorrentías, las plumas de los ríos o la construcción de diques en la transparencia del agua (Gunasekara *et al.*, 2016, Constantin *et al.*, 2017, Quang *et al.*, 2017).

En ese sentido, Constantin *et al.* (2017) evaluaron el efecto que causa la pluma del río Danubio sobre la turbidez del agua en la parte noroeste del Mar Negro. Para lo cual, utilizaron datos de reflectancia de las bandas roja e infrarroja de imágenes MODIS-Aqua. Con estos datos, así como de datos de radiación solar y del agua estimaron una medida semicuantitativa de turbidez, la cual fue comparada con datos de turbidez medidos en campo. Constantin *et al.* (2017) observaron que la pluma del río Danubio tiene un efecto en la turbidez del agua del Mar Negro, con valores por encima de los 4 FTU (Unidades de Turbidez de Formacina) incluso hasta 75 km mar adentro, principalmente en meses de primavera como abril y mayo. De igual forma, se identificó que en los meses de marzo, abril y mayo se registraron valores de 30 FTU cercanos a la boca del río, esto atribuido al aporte de nutrientes y a la resuspensión de sedimento en esa área. También, identificaron una correlación de 0.85 y 0.96 entre la medida de turbidez de las bandas roja e infrarroja y los datos tomados *in situ*.

En un estudio similar al anterior, realizado en la bahía de Hai Phong en Vietnam, se analizó el impacto del río Rojo sobre la turbidez del agua de la bahía. Para tal fin se usaron imágenes satelitales del sensor MODIS correspondientes a varios años desde el 2000 hasta el 2015. Estas imágenes se corrigieron atmosféricamente y posteriormente se utilizaron los valores de reflectancia de las bandas del rojo e infrarrojo y los datos de campo de turbidez para calcular la turbidez. Los resultados indicaron un decremento (de 110 a 50 FTU) de la turbidez a través de los años, como resultado de la construcción de diques que impidieron el paso de sedimentos a la bahía y que disminuyeron la entrada de materia orgánica proveniente de ríos aledaños (Gunasekara *et al.*, 2016).

Quang *et al.* (2017) realizaron un estudio para determinar el efecto temporal (secas y lluvias) en la turbidez del agua en la bahía de Cam Rahn y la laguna de Thuy Trieu. Para lo cual

usaron imágenes Landsat 8 y calcularon la turbidez con los valores de reflectancia de las bandas del rojo e infrarrojo y lo compararon con mediciones *in situ* de la turbidez. Como resultado, determinaron que la turbidez fue mayor en lluvias (hasta 44.2 FTU) debido a que durante esta época se abren los diques aledaños a estas bahías y esto permite la entrada de sólidos suspendidos. En este trabajo los autores obtuvieron una correlación de 0.84 entre las medidas de campo y los cálculos realizados a partir de bandas multiespectrales.

Se han realizado también estudios donde se utiliza la batimetría como indicador de la turbidez. En relación a ello, Caballero *et al.* (2019) evaluaron el impacto de la turbidez en la transparencia del agua de las bahías de Key West y West Palm ubicadas al sur de la Florida. Ellos usaron imágenes satelitales Sentinel-3 OLCI y Sentinel 2A-MSI. A ambos tipos de imágenes les aplicaron una corrección atmosférica y tomaron los valores de reflectancia de las bandas del rojo y el infrarrojo cercano. Posteriormente, emplearon un modelo conocido como Batimetría derivada de satélite (SDB, por sus siglas en inglés), el cual se calibró mediante datos vectoriales obtenidos de la carta batimétrica. Respecto a lo anterior, observaron que aspectos de rugosidad y de irregularidades del fondo son detectados por el sensor del Sentinel 2 y mostraron que en promedio se podría observar el fondo a una profundidad de 10 metros, con un máximo de 18 metros en aguas prístinas y un mínimo de 2.50 m en aguas turbias.

2.4. Sargazo y sus efectos en la calidad del agua

Aunado a un incremento en la turbidez, las arribazones de sargazo han causado cambios en otros parámetros de la calidad del agua. Principalmente, se ha registrado una reducción en la concentración de oxígeno disuelto y pH y la generación de compuestos con potencial tóxico como el amonio y el ácido sulfhídrico (van Tussenbroek *et al.*, 2017, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

Se ha reportado que en zonas con alta acumulación de sargazo disminuye la concentración de oxígeno disuelto hasta niveles de 0.67 a 2 mg/l, mientras que en condiciones normales se reportan concentraciones de hasta 7 a 9 mg/l (Torres-Alvarado y Calva Benítez, 2012, van Tussenbroek *et al.*, 2017). También, se identificó que los niveles de pH se reducen a causa

de la acumulación del alga llegando a valores de 7.4, sin embargo en zonas sin sargazo se observan valores hasta de 8.9 (van Tussenbroek *et al.*, 2017).

Durante las afluencias de sargazo de 2011, 2014 y 2015 a la costas del Caribe mexicano, se reportó que la concentración de nitrógeno inorgánico (amonio) que llegó al mar fue de 3.8 a 11.6 veces mayor que la que llega proveniente del continente a lo largo de un año (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Esto ha contribuido a la eutrofización de ecosistemas marinos cercanos a la costa como los arrecifes coralinos y pastos marinos (Hernández-Terrones *et al.*, 2011).

De igual forma, se ha reportado que ante la presencia de una gran masa de sargazo ubicada desde la playa de Puerto Morelos hasta 480 metros mar adentro, las concentraciones de amonio (4.6-8.8 $\mu\text{mol/L}$) y de fosfato (3.9-6.2 $\mu\text{mol/L}$) sobrepasaron por mucho las concentraciones (0.03-0.24 $\mu\text{mol/L}$ y 0.32-0.57 $\mu\text{mol/L}$, respectivamente) previamente reportadas sin la presencia de sargazo (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

Una de las grandes preocupaciones por la presencia del sargazo es su capacidad de bioacumular elementos como ceniza, I, N, C, K y P y metales pesados (Milledge y Harvey, 2016). Wang *et al.* (2018), reportaron que el sargazo colectado proveniente del Golfo de México y Florida durante 2017 tuvo concentraciones promedio de 26.07% para C, de 1.06 para N% y 0.10 % de P. Esto puede ocasionar una pérdida de nutrientes (N y P) para el fitoplancton y así afectar la producción primaria del océano, causando un daño adverso en las redes tróficas (Paytan y McLaughlin, 2007).

En relación a los metales pesados, se ha identificado que el sargazo es capaz de bioacumular en su tejido: arsénico, oro, plomo, cadmio, zinc, mercurio, cadmio, níquel, plomo, escandio, cadmio, berilio e ytrio (Milledge y Harvey, 2016). También se ha visto que puede bioacumular compuestos provenientes de industrias como el azul de metileno y otros compuestos fenólicos que en altas concentraciones son dañinos para la calidad del agua, los organismos marinos y la salud humana (Milledge y Harvey, 2016, Fernández *et al.*, 2017). En el Caribe mexicano, Rodríguez-Martínez *et al.* (2020) analizaron muestras de tejido de sargazo mediante Fluorescencia de rayos-X (XRF) para detectar los metales pesados y otros elementos provenientes del alga. En total detectaron 28 elementos entre los cuales

encontraron metales tales como: Al, Cu, Pb, Zn, Mg, Si, Sr y As. De estos elementos, tres de ellos presentan potencial tóxico (As, Mg, Pb). Aunque, el As fue el que se encontró en mayores concentraciones y es el más dañino para la calidad del agua y la biota marina.

2.5. Impactos del sargazo a la flora y fauna marina

El efecto generado en la calidad del agua debido a las arribazones masivas de sargazo ha repercutido en los ecosistemas y organismos marinos.

La llegada de sargazo durante 2014-2015 a las costas de Xcalak y Xahuayxol, provocó un cambio de fase en la laguna arrecifal donde las camas de pastos dominadas por la especie *Thalassia testudinum* fueron reemplazadas por algas calcáreas y epifitas (van Tussenbroek *et al.*, 2017). De acuerdo a estos autores, las razones principales de esto fueron las condiciones de hipoxia, la reducción de luz y de pH que provocaron la mortalidad total o parcial de los pastos marinos. Aunado a esto, pequeños parches arrecifales situados cerca de la costa presentaron mortalidad total o parcial. Se observó también un decremento en el número de colonias coralinas, lo cual se atribuye a la reducción de la iluminación (van Tussenbroek *et al.*, 2017).

Durante esa misma arribazón se reportó en Puerto Morelos la muerte peces, langostas, pepinos de mar, tortugas y poliquetos, debido a las condiciones de hipoxia provocadas por el sargazo (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016)

Un caso similar ocurrió durante la arribazón de 2018 donde se registró la muerte de 78 especies en un monitoreo desde Cancún a Xcalak. Entre ellos, los peces demersales y los crustáceos fueron los grupos más afectados, a causa de las altas concentraciones de amonio y de ácido sulfhídrico, así como de bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

También, se ha observado que la presencia de sargazo es capaz de alterar la dinámica trófica de una población. En ese sentido, Cabanillas-Terán *et al.* (2019) observaron un cambio en la dieta del erizo *Diadema antillarum*. La mayor parte de las macroalgas que consume esta especie se vieron afectadas por las condiciones de hipoxia y los lixiviados (sustancias que desprende el sargazo debido a su descomposición) que produce el sargazo. Estos autores

identificaron además mediante un análisis de isotopos estables que los niveles de nitrógeno y carbono asimilados por estas algas disminuyeron. Como consecuencia, se identificó que la dieta del erizo se compuso principalmente de algas como *Halimeda*, *Dyctiota* y *Udotea*, especies que soportaron la limitante de recursos y la presencia de sargazo.

3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, la región del Caribe y del Atlántico Central ha experimentado grandes afluencias masivas de sargazo. En 2015 y 2018 se reportó la arribazón de 10 y 20 millones de toneladas, respectivamente. Particularmente, en el Caribe mexicano se estimó la llegada de 71,353 m³ del alga durante 2015 (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016). Ante tal problemática, los sectores turístico y gubernamental se han visto afectados económicamente, a causa de la disminución del turismo y de la contratación de personal para limpieza de las playas (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016, Wang *et al.*, 2019).

No obstante, la llegada masiva de sargazo también ha provocado daños a nivel ecológico ya que ha vulnerado e impactado los ecosistemas marinos aledaños a la costa, principalmente la playa y la laguna arrecifal (van Tussenbroek *et al.*, 2017, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

Diversos estudios han reportado que las playas se han erosionado por la continua deposición del alga (Doyle y Franks, 2015, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016, Louime *et al.*, 2017). Mientras que en los primeros 25-50 m de la laguna arrecifal, la calidad del agua se ha modificado debido a que en esta zona se acumula el sargazo y esto ocasiona que se reduzcan los niveles de oxígeno disuelto, pH e iluminación y que se generen lixiviados del alga que producen compuestos químicos con potencial toxico como el H₂S y NH₄ (Maréchal *et al.*, 2017, Cuevas *et al.*, 2018, Ferreira *et al.*, 2009).

A causa de estos factores se ha identificado que los dos tipos de hábitats que componen la laguna arrecifal como son las camas de pastos marinos y los pequeños parches arrecifales, así como los organismos que habitan en ellos han sufrido una mortalidad total o parcial (Hernández-Terrones *et al.*, 2011, van Tussenbroek *et al.*, 2017, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

Con el uso de herramientas satelitales se ha podido identificar la magnitud de las afluencias de sargazo, mediante cálculos de su cobertura y biomasa. Adicionalmente, se ha logrado visualizar la trayectoria del sargazo desde la NERR hasta el Caribe (Gower y King, 2008, Webster y Linton, 2013, Wang *et al.*, 2019). Sin embargo, la mayor parte de estos estudios detectan el sargazo a escalas muy amplias (miles de kilómetros) y abarcan zonas como Sudamérica, el Caribe y Atlántico Central. Por otra parte, se han utilizado las herramientas de teledetección para evaluar la turbidez por efecto de las plumas de ríos y de la época lluviosa (Constantin *et al.*, 2017, Quang *et al.*, 2017). Por lo cual, no se ha evaluado el efecto del sargazo sobre este parámetro usando herramientas de sensores remotos.

Con base en lo mencionado anteriormente, se planteó estimar mediante datos satelitales de imágenes Landsat 8 la cobertura de sargazo y su relación la turbidez del agua en la parte sur de Quintana Roo, conocida como Costa Maya. Además, debido a los daños ecológicos, económicos y ambientales que ha provocado el sargazo, resulta importante e imprescindible conocer si este afecta la calidad del agua y por consecuencia tiene un efecto en la salud de los ecosistemas costeros y en los organismos que albergan. Por lo cual, en este trabajo se midieron las concentraciones de parámetros fisicoquímicos como el pH, el oxígeno disuelto, el amonio, el fosfato y los sólidos disueltos totales en la laguna arrecifal de tres arrecifes localizados en la Costa Maya: Mahahual, Xcalak y Xahuayxol.

El conocimiento de la cobertura de sargazo que llega a estos sitios, así como su efecto en la turbidez, la concentración de oxígeno, de pH, amonio, fosfato y Sólidos Disueltos Totales, contribuirá en información relevante para la toma de medidas de manejo para el control y mitigación de los efectos de esta alga.

4. HIPOTESIS

En los últimos años la presencia del sargazo ha afectado la calidad del agua de las zonas costeras del Caribe mexicano. Por lo tanto, la presencia de arribazones masivas de sargazo está asociada con un aumento en la turbidez así como con un efecto en otros parámetros de calidad del agua como el pH, oxígeno disuelto, amonio, fosfato y sólidos disueltos totales, de la laguna arrecifal de Mahahual, Xcalak y Xahuayxol.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Evaluar el efecto que generan las arribazones de sargazo en la calidad del agua de las lagunas arrecifales de Mahuahual, Xcalak y Xyahuayxol.

5.2. Específicos

- Detectar cambios temporales en la cobertura de sargazo y en la turbidez mediante la comparación de imágenes satelitales que abarcan la zona de estudio.
- Determinar la relación entre la cobertura de sargazo y la turbidez.
- Evaluar la calidad del agua en la laguna arrecifal de los sitios de muestreo a través de la medición de variables fisicoquímicas (pH, oxígeno disuelto, amonio, fosfato y sólidos disueltos totales).

6. METODOLOGÍA

6.1. Área de estudio

En este estudio se analizó la calidad del agua en tres arrecifes localizados al sur del estado de Quintana Roo: Mahahual, Xcalak y Xahuayxol. Esta zona presenta un clima de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano. Una temperatura superficial marina promedio que varía de los 25.5 °C a los 29.9°C y una precipitación anual promedio entre 1009 y 1489 mm (Camarena-Luhrs y Salazar-Vallejo, 1991, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010). De igual forma, se identifican tres temporadas: secas (febrero-junio), lluvias (julio-octubre) y nortes (noviembre-enero) (Sima-Morales, 2004).

En cuanto a características oceanográficas, la región del Caribe se encuentra dominada por la corrientes del Caribe y de Yucatán, así como por la influencia de vientos alisios del este (Hernández-Arana *et al.*, 2015). Particularmente, la zona sur del estado de Quintana Roo presenta corrientes rápidas e intensas con una velocidad promedio de 3 nudos (Sima-Morales, 2004).

El efecto ambiental por actividades humanas se ha observado principalmente en Mahahual, ya que al ser un sitio turístico tiene alrededor de 25 hoteles y un arribo constante de cruceros internacionales que genera una población transitoria que aumenta significativamente por temporadas (CONANP, 2004, Daltabuit *et al.*, 2007). Mientras que las localidades menos impactadas antropogenicamente son Xcalak y Xahuayxol debido a que pertenecen al Parque Nacional Arrecifes de Xcalak (PNAX). Xahuayxol, es un ejido con pocos habitantes y con pequeños desarrollos eco-turísticos, cuya población se dedica a la pesca (de langosta principalmente), pero esta actividad no es tan intensa como en Mahahual (Núñez-Lara *et al.*, 2005, Sosa-Cordero *et al.*, 2009). Xcalak es una población reducida, cuyas principales fuentes económicas son la pesca y el turismo, el cual ha crecido en los últimos años debido a las actividades de buceo que se practican en sus arrecifes (López-Jiménez, 2016).

Mahuahual

Se ubica entre los 18° 41' 45" N y 87° 42' 5" O y los 18° 43' 33" N y 87° 42' 03" O al noreste de la Bahía de Chetumal. El ambiente costero de esta área cuenta con una colina baja y estrecha que separa la playa del manglar. Después de la playa se localizan las lagunas arrecifales conformadas por grandes camas de pastos marinos y que se caracterizan por presentar poca profundidad y extensión. El arrecife de Mahahual es de tipo marginal con una extensión de 3600 m aproximadamente y con una profundidad promedio de 7 m (Aguilar, 1998).

Xcalak

Se localiza entre los 18.5 ° y 18.18° N y 87.76° 87.85 ° O. En este sitio la temperatura promedio del agua de mar es 29.3 °C, observándose variaciones diurnas y cambios significativos de la temperatura (de hasta 2.8°C) por tormentas o huracanes. La salinidad en la región es 35 a 36 ups. La marea presenta intervalos de -0.12 a 0.12 m. El nivel del mar varía hasta 0.5 m por efecto de las tormentas. Este sitio cuenta con una laguna arrecifal extensa (de hasta 1.75 km de ancho y con una profundidad de hasta 5 m), con pequeños parches arrecifales y extensas camas de pastos marinos (Hernández-Arana, 2010). La cresta arrecifal está bien desarrollada y se compone de tres zonas; el arrecife posterior, la rompiente y la transición a barlovento o arrecife anterior (Hernández-Arana, 2010).

Xahuayxol

Está ubicado a 58 km al este de Chetumal y al sur de Mahahual, con las coordenadas geográficas $18^{\circ} 30' 15''$ N y $87^{\circ} 44' 58''$ O, es un arrecife marginal que se continúa hacia el sur con Xcalak. En esta zona se presenta una barrera arrecifal semicontinua a lo largo de la costa, que divide la laguna arrecifal (dominada por pastos marinos y parches de corales pétreos) del frente arrecifal. (Fig. 2) (Núñez-Lara *et al.*, 2003).

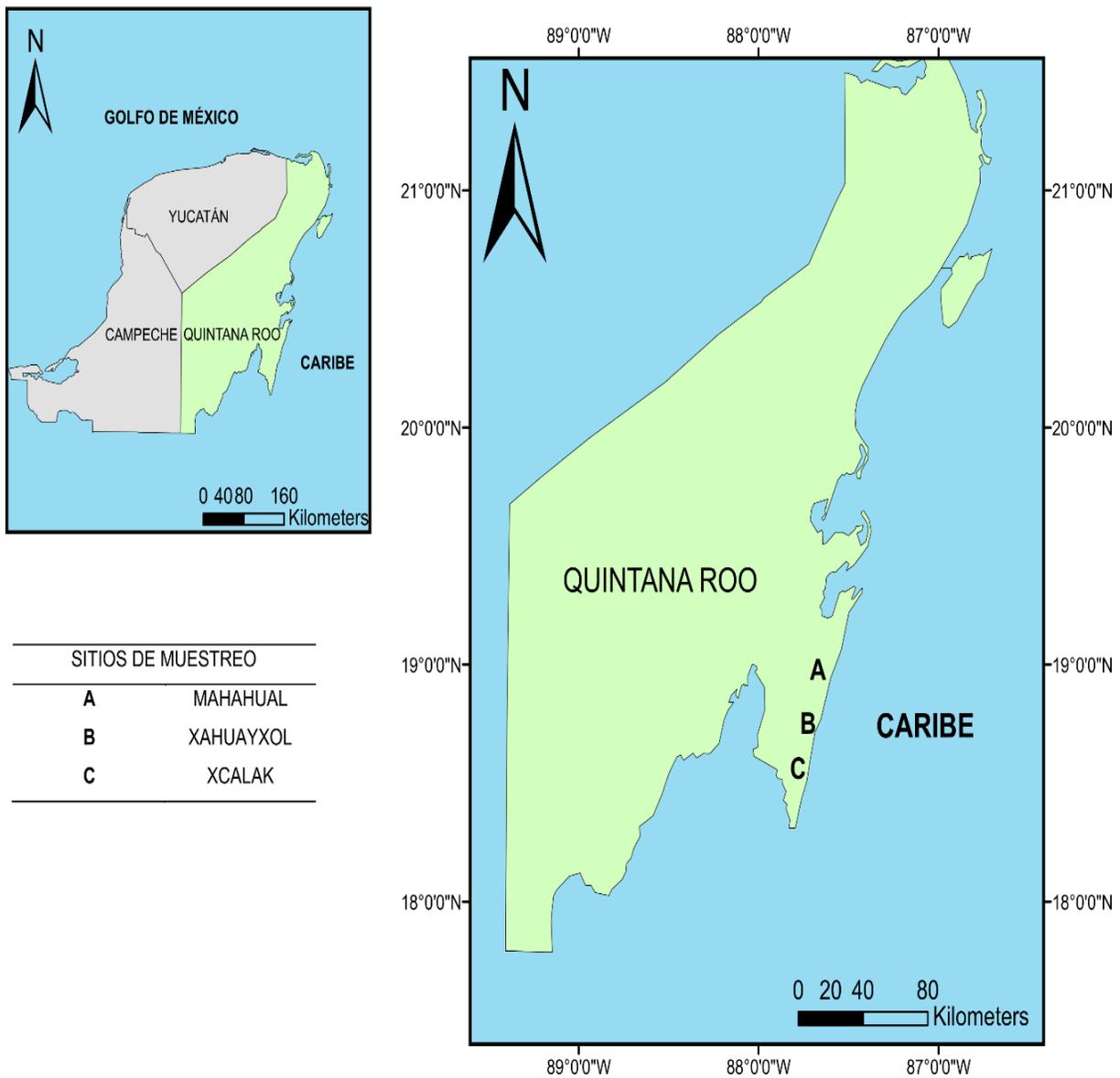


Figura 3. Mapa de área de estudio.

6.2. Trabajo de campo

A continuación se muestra una síntesis de la metodología utilizada en este estudio.

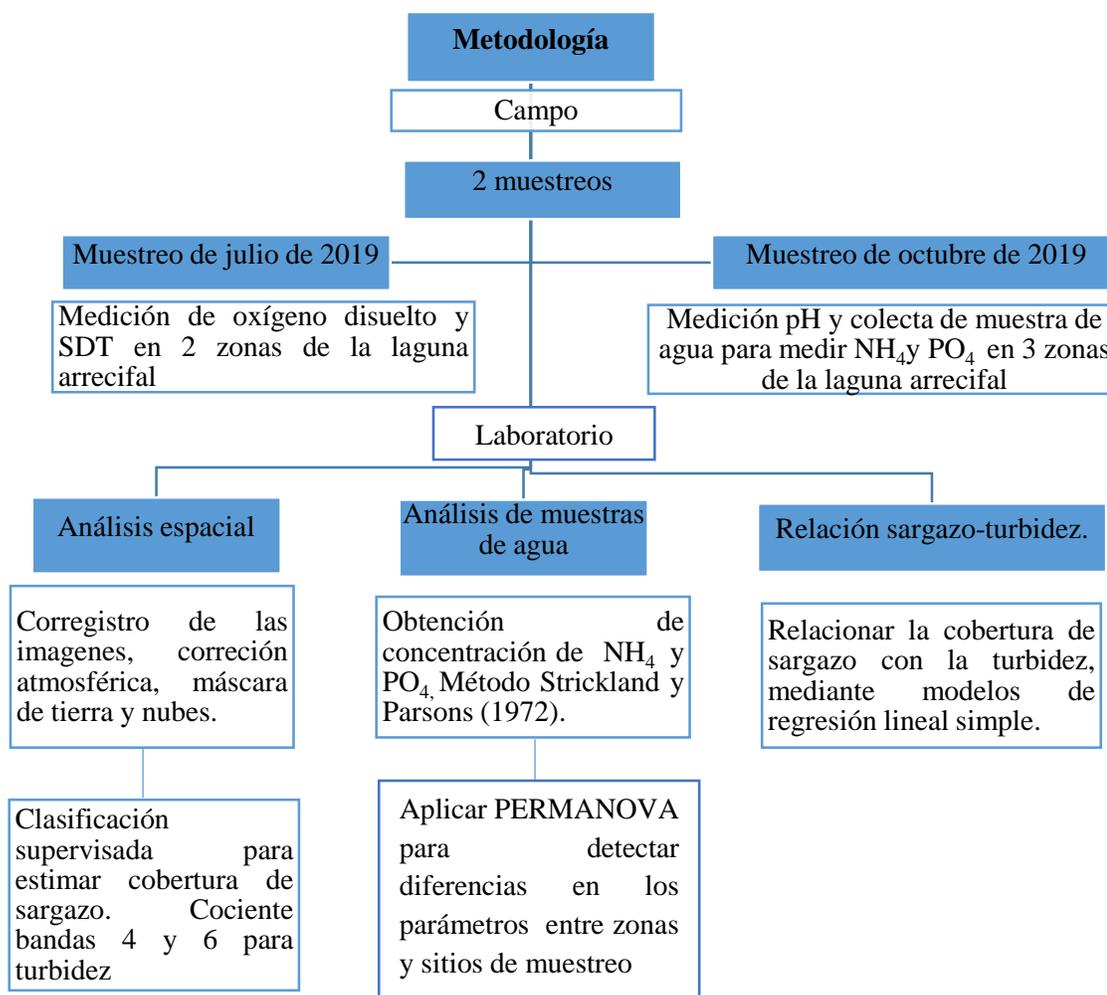


Figura 4. Metodología de campo y laboratorio.

6.2.1. Toma de muestras de agua, sargazo y parámetros fisicoquímicos

En este estudio se llevaron a cabo dos muestreos con el objetivo de evaluar el efecto del sargazo en la calidad del agua de la laguna arrecifal de Mahahual, Xcalak y Xahuayxol. El primer muestreo se realizó en julio de 2019 y se centró en caracterizar las concentraciones de oxígeno disuelto y Sólidos Disueltos Totales (SDT) en los primeros 15 metros de la laguna arrecifal de los sitios de estudio. Para ello, se delimitaron 2 zonas paralelas a la línea de costa. Zona 1) de la playa a los 5 metros mar adentro y zona 2) de la playa a los 15 metros

mar adentro (Fig. 4). En cada zona se marcaron tres puntos de muestreo (cada 50 metros) donde se tomaron los parámetros por triplicado con un multiparámetro YSI modelo 556 MPS.

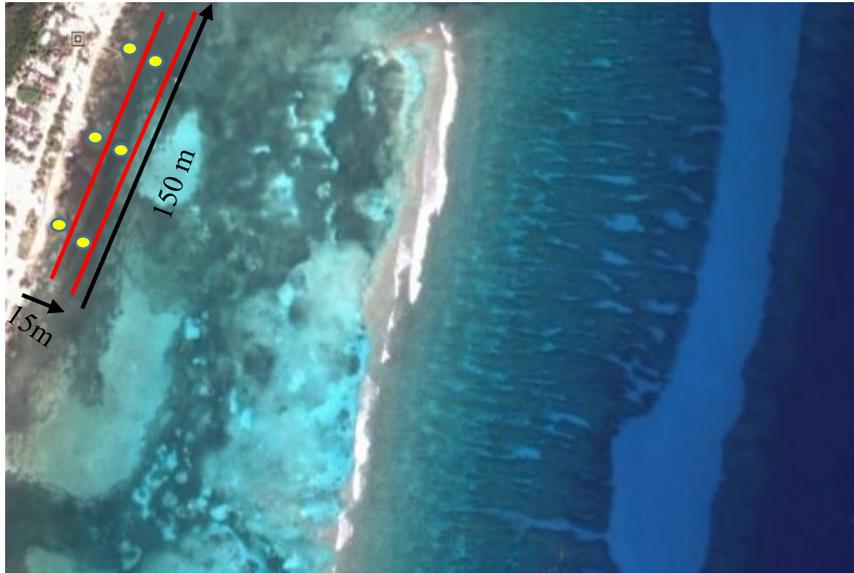


Figura 5. Método de muestreo aplicado en julio de 2019 para evaluar la calidad del agua en la laguna arrecifal de Mahahual, Xcalak y Xahuayxol.

El segundo muestreo se realizó en octubre de 2019, el cual abarcó los primeros 100 metros de la laguna arrecifal de las localidades de estudio. Para la toma de muestras de agua (para medir amonio y fosfato) y del pH se utilizó el método de muestreo propuesto por van Tussenbroek *et al.* (2017). Este consistió en delimitar tres transectos paralelos a la línea de costa, los cuales se subdividieron de la siguiente forma; zona 1) de la playa a los 10 metros mar adentro, zona 2) de la playa a los 20 metros mar adentro y zona 3) de la playa a los 100 metros mar adentro (Fig. 5). Todos los transectos fueron de 150 metros de ancho y cada 30 metros se hizo la toma de datos. Dentro de cada punto se tomaron muestras de agua en botellas de 500 ml para medir las concentraciones de amonio y fosfato. Estas muestras se conservaron en hielo para su posterior análisis en el Laboratorio de Química Marina del CINVESTAV, Mérida. Del mismo modo, se midió el pH en cada punto con un multiparámetro YSI modelo 556 MPS.

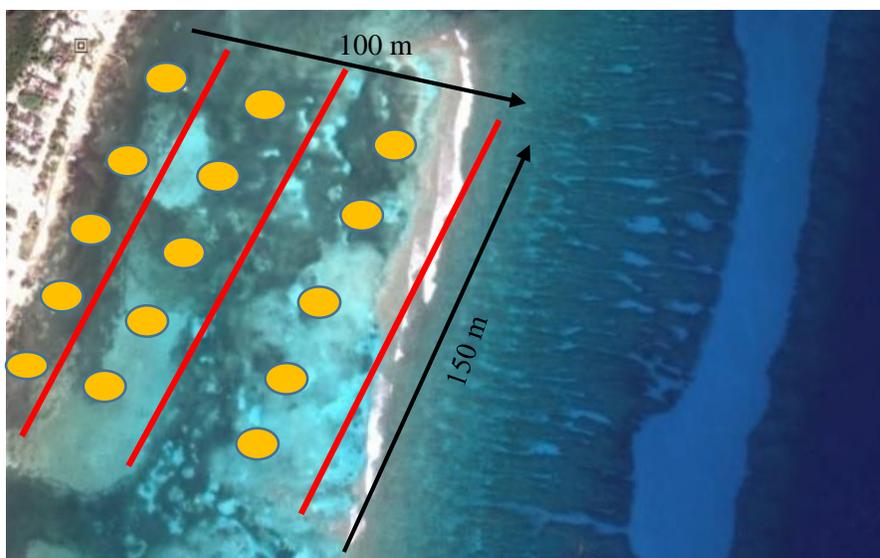


Figura 6. Método de muestreo de octubre de 2019 para evaluar la calidad del agua en Mahahual, Xcalak y Xahuayxol (modificado de van Tussenbroek *et al.*, 2017).

6.3. Laboratorio

6.3.1. Análisis de las imágenes de satélite

Para el análisis espacial se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8. Este satélite cuenta con dos sensores, el OLI (Operational Landa Imager) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor). Cubre escenas de aproximadamente 170 km de largo y 183 km de ancho, cuenta con una resolución temporal de 16 días (tiempo en el que pasa por el mismo punto), una resolución radiométrica de 16 bits y espacial de 30 m (en algunas bandas). Se compone de once bandas multiespectrales cuatro de ellas en el visible y las siete restantes en el infrarrojo cercano, medio y térmico (Tabla 1).

Tabla 1. Bandas espectrales del Landsat 8 con su resolución espacial y longitud de onda.

Banda	Resolución espacial	Longitud de onda (μm)
Banda 1	30 m- Aerosol	0.435-0.451
Banda 2	30 m-Azul	0.452-0.512
Banda 3	30 m-Verde	0.533-0.590
Banda 4	30 m-Rojo	0.636-0.673
Banda 5	30 m-NIR	0.851-0.879
Banda 6	30 m-SWIR-1	1.566-1.671
Banda 10	100 m-TIR-1	10.60-11.19
Banda 11	100 m-TIR-2	11.50-12.51
Banda 7	30 m-SWIR-2	2.107-2.294
Banda 8	15 m-Pancromática	0.503-0.676
Banda 9	30 m-Cirrus	1.363-1.384

Las imágenes se descargaron del portal GLOVIS (USGS Global Visualization Viewer), www.earthexplorer.usgs.gov. En total se adquirieron 40 imágenes de 2018 y 2019 de las escenas Paths 018 y 019 Row 047 que incluyeron la zona de interés. Posteriormente, se importaron cada una de las bandas espectrales (de los diferentes meses de los años que se analizaron) de formato GeoTIFF a la estructura de datos del TNTmips®. A las imágenes de la escena Path 019 Row 047 se les realizó un correregistro para delimitar el área que se quería analizar (Mahahual, Xcalak y Xahuayxol). Como resultado se obtuvieron imágenes de una dimensión de 1793 columnas por 2152 filas. Las imágenes Path 018 Row 047 también fueron corregistradas y se obtuvieron escenas de 3667 columnas por 4196 filas (Fig. 7). Estas escenas cubrieron más allá de la zona de interés, con la finalidad de determinar la cantidad de sargazo que llegó de una zona de mayor extensión (Path 018 Row 047) a una de menor extensión y donde únicamente se encontraron los sitios de muestreo (Path 019 Row 047).

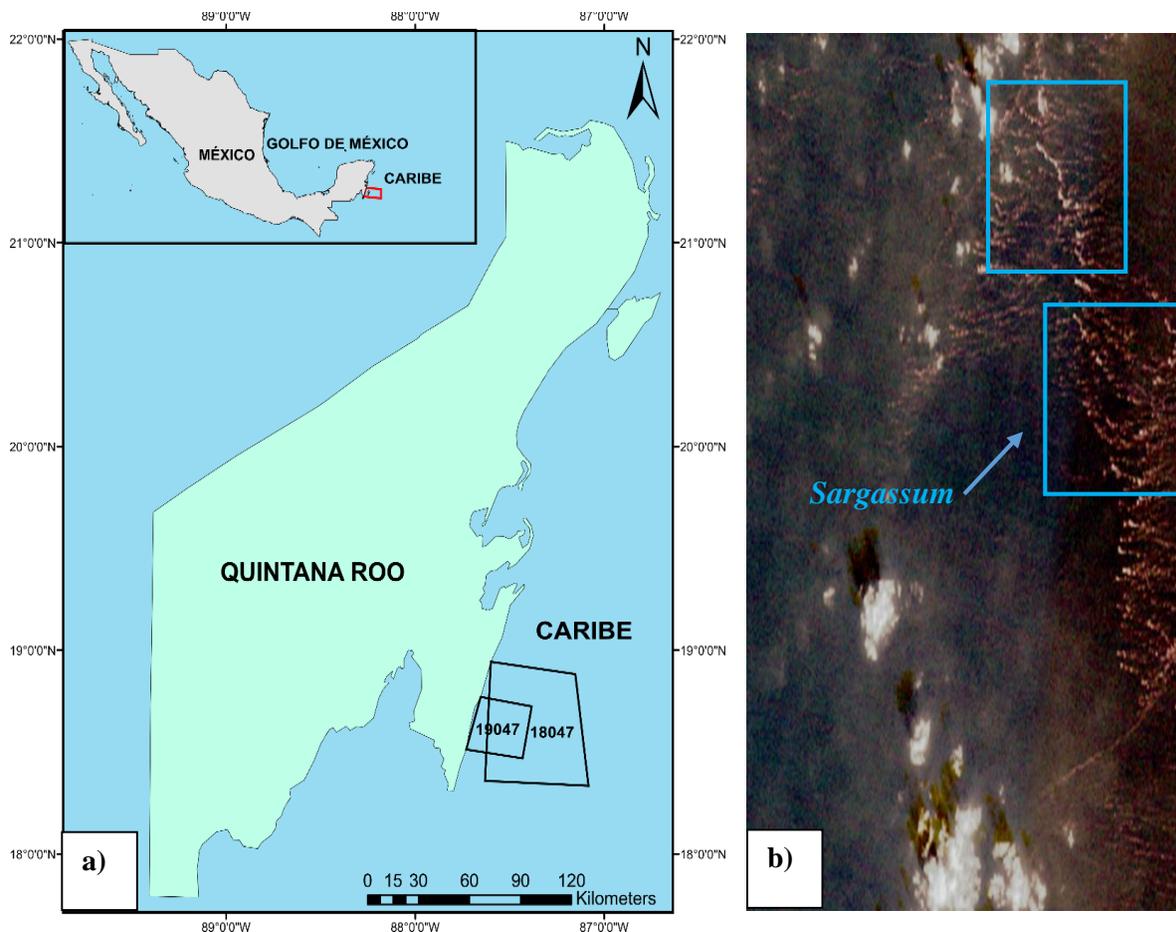


Figura 7. a) Escenas que se analizaron para la detección del sargazo, b) Sargazo detectado con composición RGB (Rojo, Verde y Azul) de las imágenes Landsat 8.

Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica de las imágenes. Este paso es importante debido a que las imágenes provenientes de sensores pasivos como el Landsat 8 están afectados por condiciones atmosféricas (Olaya, 2012), por lo que es necesaria la minimización de estas perturbaciones (como gases o partículas suspendidas en la atmósfera). Para ello, se transformaron los ND de los pixeles que componen la imagen a valores de radiancia y reflectancia. Es muy útil convertir la radiancia a reflectancia para ajustar los valores de brillo (los cuales son diferentes en todas las imágenes) y para el cálculo de los índices multispectrales (Corrales-Andino y Ochoa-López, 2016).

Para realizar la corrección atmosférica y calcular los valores de reflectancia se utilizó el método TOA (Bravo-Morales, 2017) (Techo de la Atmosfera).

Primero se convirtieron los valores de ND a radiancia mediante la siguiente formula:

$$L_{\lambda} = ML * Qcal + AL$$

Donde:

L_{λ} : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

ML: Factor multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (Radiance Multi Band x, donde x es el número de banda)

AL: Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (Radiance Multi Band x, donde x es el número de banda)

Qcal: Valor de pixeles discretizados y calibrados del producto estándar (Valor digitales ND).

Después se transformaron los valores radiancia a reflectancia con las siguientes formulas:

$$\rho_{\lambda} = \frac{M\rho * Qcal + A\rho}{SEN(\theta_{SE})} \qquad \rho_{\lambda} = \frac{M\rho * Qcal + A\rho}{COS(\theta_{ZE})}$$

Donde:

ρ_{λ} = Reflectancia TOA del sensor, con corrección del ángulo solar.

Qcal: Valor de pixeles discretizados y calibrados del producto estándar (Valores digitales ND).

Mp: Factor de cambio de escala multiplicativo (Reflectance Multi Band x, donde x es el número de bandas).

A_p : Banda específico-aditiva, reescala el factor de los metadatos ($Reflectance_Add_Band_x$, donde x es el número de bandas).

θ_{SE} : Ángulo de elevación solar local (Sun elevation).

θ_{ZE} : Ángulo zenital solar, el cual es equivalente a: $90^\circ - \theta_{SE}$.

Se crearon máscaras de nubes y de tierra, ya que estos componentes pueden generar sesgo al momento de la detección del sargazo y del cálculo de la turbidez. En el caso de las nubes se utilizó la banda BQA. Esta banda mejora la calidad de la imagen ya que indica los píxeles que pueden verse afectados por las condiciones de la superficie, la contaminación de las nubes o las condiciones del sensor. Toma valores entre 0 y 1. Donde 0 indica aquellas condiciones que pueden afectar la escena, mientras que como 1 se toma aquello que es objeto del análisis (Ariza, 2013). Para eliminar la porción terrestre se observó el histograma de la banda 5 y se identificó el pico de los valores de reflejo de la parte terrestre, los cuales se excluyeron para que únicamente fuera analizable la parte marina (Fig.8).

Para la detección del sargazo se empleó el índice de Vegetación de Porcentaje Infrarrojo (IPVI, por sus siglas en inglés) el cual utilizó las bandas 4 (rojo) y 5 (infrarrojo cercano). Este índice es similar al NDVI (índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), pero se substraen la banda del rojo del numerador por lo cual su cálculo es más rápido (Crippen, 1990). Los valores de este índice van de 0 a 1. Además, el IPVI considera la medición del porcentaje de radiación infrarroja cercana en relación a la luminosidad combinada, tanto en el rojo y el infrarrojo cercano (Crippen, 1990). Este índice se calculó a través de la siguiente expresión.

$$IPVI = \frac{NIR}{NIR + RED}$$

Una vez aplicado el índice de vegetación, se realizó una clasificación supervisada mediante el método Suit's Maximum Relative. Se definieron 3 clases para la escena 019-047 (sargazo, mar, sombras). Para la escena 018-047 se determinaron 4 clases (sargazo, mar, sombras y Banco chinchorro). Para clasificar cada imagen se asignaron puntos de entrenamiento a cada clase. Particularmente, a la clase sargazo se le asignaron entre 6 y 216 dependiendo la cantidad de píxeles de sargazo que se encontraron en las escenas (Fig.8).

El algoritmo Suit's Maximum Relative se utilizó para clasificar todas las imágenes. Este método calcula el brillo compuesto y la relación entre el brillo de cada banda y el brillo compuesto. La desviación media y estándar de cada uno de estos parámetros se calcula para una clase y se utiliza para definir los límites de la clase.

Una vez realizada la clasificación, se utilizaron las matrices de error para determinar el nivel de exactitud de la clase sargazo. Estas matrices se calculan a partir de los puntos de entrenamiento seleccionados. La matriz de error mostró dos tipos de error. Los valores de cada columna indicaron el porcentaje de píxeles en esa clase que fueron correctamente clasificados. Valores menores a 100% señalaron errores de omisión (puntos de entrenamiento omitidos de la clase de salida). Este valor comúnmente es llamado error del productor. Por el contrario, los valores de cada fila mostraron el porcentaje de sitios de entrenamiento (de cada clase de salida) que fueron correctamente clasificados. Valores menores a 100% indicaron errores de comisión (píxeles incorrectamente incluidos en la clase de salida). Este valor en algunas ocasiones se conoce como error del usuario. En la matriz de error también se indicó la exactitud general (overall accuracy) y el parámetro Khat. El primero de ellos representa la precisión con la que se realizó la clasificación y se calcula mediante la división de la suma de las entradas que forman la diagonal mayor por el número total de muestras tomadas (Congalton *et al.* 1983). Mientras que el segundo indicador, refleja que tan bien la clasificación concuerda con los datos de referencia (Congalton y Green, 2002).

Para observar si existió traslape entre clases se usaron los gráficos de dispersión elipsoidal, los cuales muestran en un plano bidimensional elipses (de diferente color) que representan a cada clase y que mientras mayor es la separación entre ellas, menor será el traslape y la similitud entre clases. De igual forma, se calcularon los estadísticos de clasificación que permiten determinar la media de las clases y la distancia entre ellas, así como la desviación estándar de cada clase.

También, se relizaron los gráficos de las respuestas espectrales de la clase mar y sargazo utilizando las bandas roja, infrarroja (NIR, Near Infrared) y el IPVI que fueron usadas para realizar la clasificación. Para ello, se seleccionaron aleatoriamente 30 polígonos (píxeles) para cada clase y se tomaron los valores de reflectancia de las bandas y el índice de vegetación previamente citados. A estos valores se les calculó su media y desviación estándar

y se realizó un gráfico de tendencia. Estos gráficos de respuestas espectrales se hicieron en el programa Excel, para las imágenes clasificadas de la escena 019-047 y 018-047. Cabe señalar que en algunas imágenes (agosto de 2018 y octubre de 2019 de la escena 019-047) se seleccionaron menos de 30 polígonos de sargazo (10 píxeles), debido a la poca cantidad de cobertura del alga presente en la imagen.

Para estimar la cobertura de sargazo en las escenas, se utilizó el histograma de frecuencias que se obtuvo después de que se realizó la clasificación. En el histograma se mostraron el número de píxeles que el algoritmo (Suit's Maximum Relative) asignó a la clase sargazo. Estos píxeles se multiplican por el tamaño del píxel (30 m) y de esta manera se calcula el área (Fig.8).

Finalmente se estimó la turbidez de las escenas 019-047 y 018-047 a través del método propuesto por Barret y Frazier (2016), el cual consistió en la división de las bandas 4 (roja) y 6 (infrarroja de onda corta o SWIR) (Fig.8). A partir de este cociente se obtuvieron 5 intervalos (Tabla 2) para delimitar una característica semicuantitativa en la transparencia del agua. Para la estimación de la turbidez y de la cobertura de sargazo se utilizó el software TNTmips de MicroImages® versión 2016.

Tabla 2. Estandarización en la magnitud del cambio de transparencia.

Índice de turbidez	Valor estandarizado	Nivel de sensibilidad
1.24-2.12	1	Muy bajo
2.12-3.01	2	Bajo
3.01-3.89	3	Medio
3.89-4.78	4	Alto
4.78-5.67	5	Muy alto

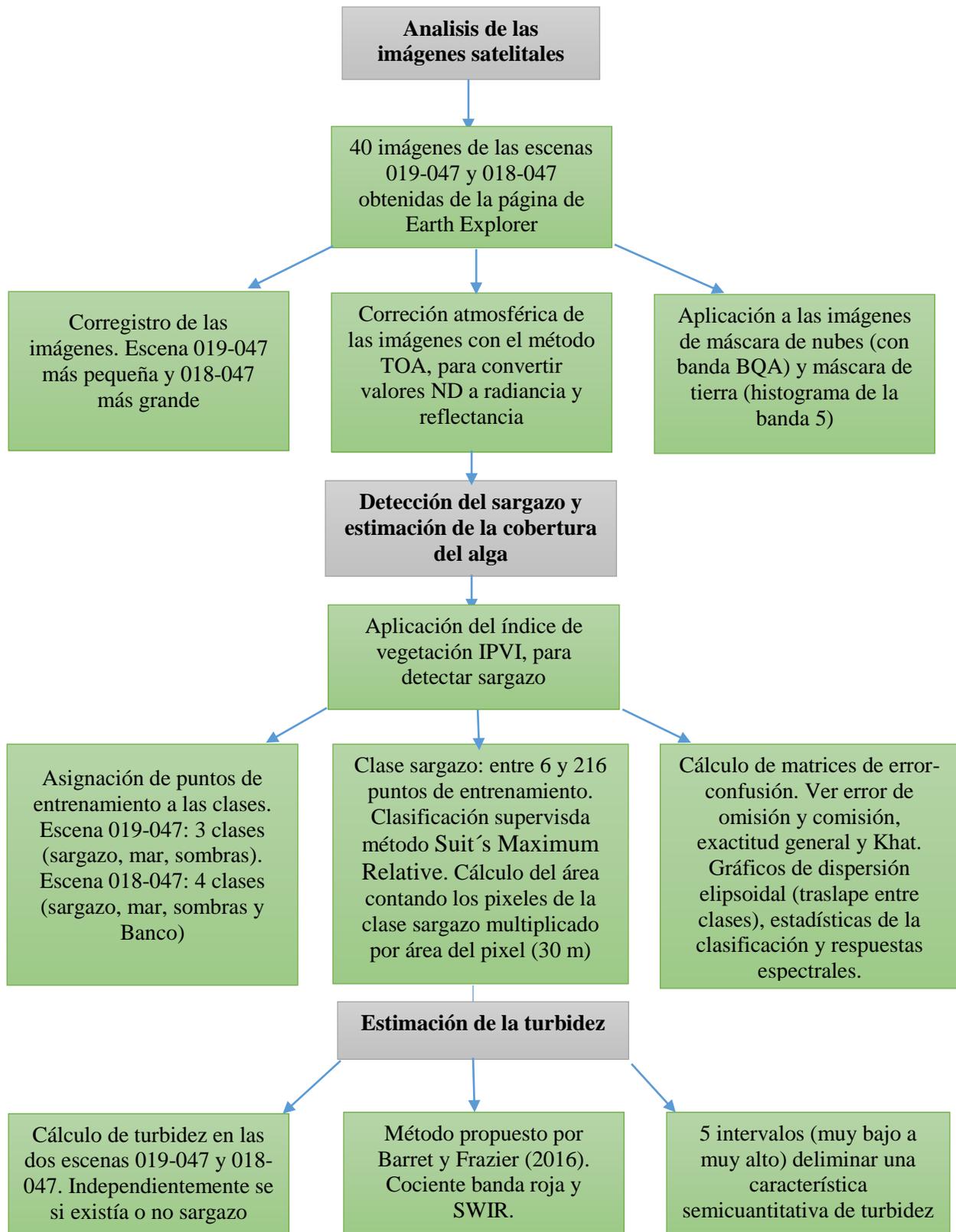


Figura 8. Metodología aplicada a las imágenes Landsat 8 para estimar la cobertura de sargazo y la turbidez.

6.3.2. Análisis de las muestras de agua

Para la medición de amonio se utilizó el método propuesto por Riley (1953) modificado por Strickland y Parsons (1972). Este método es ampliamente conocido como el método del azul de indofenol. Antes de realizar el análisis se filtraron las muestras de agua para disminuir la cantidad de materia en suspensión y que pudiera generar cierto sesgo en el análisis. Una vez filtrada la muestra, se colocaron 25 ml de la misma en un vial de 40 ml. Después, se añadió 1 ml de solución de fenol (compuesta por 25 g de fenol 25 y 250 ml de etanol) y se agitó la muestra, después se adicionó 1 ml de nitropusiato de sodio (previamente disuelto en 500 ml de agua desionizada) y se agitó nuevamente la muestra. Como siguiente pasó se adicionaron 2.5 ml de solución oxidante (compuesta de 100 g de citrato de sodio y 5 g de hidróxido de sodio y 15 ml de hipocorito de sodio disueltos en 500 ml de agua desionizada). Las muestras se mantuvieron en los viales cubiertas con aluminio en obscuridad y a una temperatura no mayor a los 27 °C durante una hora. Posteriormente, se leyeron a una absorvancia de 640 nm en una celda de 5 cm y se obtuvo la concentración de amonio.

Para la medición de fosfato se utilizó el método de Murphy y Riley (1962), modificado por Strickland y Parsons (1972). El método consistió en añadir 35 ml de la muestra en un matraz Erlenmeyer, después se adicionó 1 ml de ácido molidbato (compuesto de 200 ml de ácido sulfúrico 4.75 M, 45 ml de heptamolidbato de amonio y 5 ml de antimoniltartrato de potasio 0.1 M). Posteriormente, se agregó 1 ml de ácido ascórbico 0.4 M (preparado con 100 ml de agua destilada y 7 gramos de ácido ascórbico), se agitó bien la muestra y se esperó durante 10 minutos hasta la formación de complejo molidbato. La lectura de la absorvancia se realizó a 880 nm en una celda de 5 cm y se obtuvo la concentración de fosfato. Para ambos análisis se empleó el espectrofotómetro Shimadzu UV/VIS -1201.

6.4. Análisis estadísticos

6.4.1. Percepción remota

Con el propósito de identificar los picos de la arribazón de sargazo, se realizó una serie temporal de la cobertura de sargazo (detectada mediante imágenes satelitales de 2018 y 2019) a través de gráficos de tendencia.

Para detectar cambios temporales en la turbidez y hacer una posible asociación con la presencia de sargazo se realizaron gráficos de caja y bigote y el llamado gráfico de “violín”.

Los gráficos de caja y bigote son una técnica gráfica útil que permite hacer una exploración de los datos y tener una mejor comprensión de la información analizada. Estas representaciones muestran el primer, segundo (mediana) y tercer cuartil así como el rango intercuartílico. En los extremos se presentan el valor mínimo y máximo de los datos y se excluyen los datos atípicos (McGill *et al.*, 1978).

Los gráficos de “violín” son una variación del gráfico de caja y bigote, ya que presentan un diagrama de caja rodeado por la subyacente distribución de los datos (Hintze y Nelson, 1998). De esta manera, es posible identificar si los datos se distribuyen de manera normal, uniforme o bimodal. Este gráfico al igual que el de caja y bigote cuenta con estadísticas resumidas alrededor de la mediana. La razón por la cual ambas técnicas trabajan con la mediana es porque permite explorar datos sin normalidad y es menos susceptible a los datos extremos (Rosenberg y Gasko, 1983).

Para explicar como afecta el incremento en la cobertura de sargazo sobre la turbidez se aplicó un modelo de regresión lineal simple tanto para la escena 019-047 como para la 018-047. Este modelo mide la relación lineal entre una variable predictora (x) sobre una variable respuesta (y) (Ernst y Albers, 2017). En este caso la variable predictora fue la cobertura de sargazo y la variable respuesta fue la turbidez. Para graficar el modelo de regresión se utilizó la cobertura de sargazo de cada mes, así como el valor de la mediana de la turbidez de cada mes (de cada escena).

Posteriormente, se probaron los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza de los residuales. Así, como el estadístico global, la curtosis, la simetría y la función de enlace del modelo (ver Anexo).

Estos análisis se realizaron en el programa R versión 3.5.0 (R Core Team, 2018).

6.4.2. Determinación de la calidad de agua en los sitios de estudio

Para ambos muestreos (julio y octubre de 2019) se realizó un análisis de los resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos por zona de muestreo y por sitio de estudio, con

el objetivo de identificar variaciones en los valores debido a la presencia del sargazo. Para ello, se obtuvieron las medias de cada parámetro y su respectiva desviación estándar.

Se aplicaron las pruebas de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilks) y homogeneidad de varianza (Prueba de Levene) a los datos de pH, oxígeno, amonio, fosfato y SDT. Debido a que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza, se realizó un análisis de la varianza por permutaciones (PERMANOVA) para detectar diferencias estadísticas entre sitios y zonas de muestreo. Adicionalmente, se realizó la prueba de comparaciones múltiples para ver entre que sitios y zonas existieron diferencias.

El PERMANOVA es una prueba estadística que muestra la respuesta simultánea de una o más variables a diversos factores en un diseño experimental, sobre la base de cualquier medida de distancia y utiliza métodos de permutación. Dicho análisis permite seleccionar el tipo de distancia multivariante, por lo cual se eligieron distancias Euclidianas. La significancia de los resultados se determinó mediante 9999 permutaciones de Monte Carlo, apropiadas cuando el número de réplicas es bajo (Anderson, 2001). Este análisis se realizó en el programa PAST 3.

7. RESULTADOS

7.1. Clasificación de las imágenes

De las 40 imágenes analizadas, 27 (67.50%) evidenciaron la presencia de sargazo, por lo que a estas se les aplicó una clasificación supervisada mediante el método Suit's Maximum Relative para estimar la cobertura del alga. Por el contrario, 13 (32.50%) imágenes no mostraron la presencia de sargazo.

Al clasificar las imágenes se obtuvieron dos valores de precisión: la exactitud general y el parámetro Khat. Dichos valores reflejaron el grado de precisión con el que se realizó la clasificación, así como su concordancia con los datos de referencia. Para la escena 019-047 la exactitud general fue 97.78% y el parámetro Khat 91.87%. Mientras que para la escena 018-047 la exactitud general fue 77.84% y el indicador Khat 61.60%. De forma general, la exactitud fue 86.70% y el parámetro Khat 75.05% (ver Anexo).

Se evaluaron los errores de omisión y de comisión únicamente de la clase sargazo ya que es el objeto de interés. Cabe señalar que los errores de omisión reflejaron el porcentaje de píxeles de la clase sargazo, lo cuales no fueron clasificados como tal. Mientras que los errores de comisión indicaron el porcentaje de píxeles clasificados en la clase sargazo, cuando en realidad no pertenecieron a esta.

En la escena 019-047 del año 2018 los errores de omisión fluctuaron entre 0-14.81%, mientras que los errores de comisión fueron de 0%. Para el año 2019 los errores de omisión fueron de 0-41.85% y los errores de comisión de 0-29.17%. Para esta escena, el error de omisión promedio fue de 8.69% y el error de comisión promedio fue de 2.43%.

Para la escena 018-047 del año 2018 los errores de omisión variaron entre 1-42.71%, y los errores de comisión entre 0-6.15%. En el caso del año 2019, los errores de comisión fluctuaron de 0-21.91% y los errores de omisión de 0-95.64%. El error de omisión promedio para esta escena fue de 16.73% y el de comisión de 11.96%. De forma general el error de omisión para las dos escenas fue de 13.15% y el de comisión fue de 7.72%.

Los gráficos de dispersión elipsoidal de la escena 019-047 muestran que la clase sargazo se traslapa parcialmente con la clase mar (en mayor o menor medida). Esto se debe a que

compartieron valores de reflectancia. No obstante, en las imágenes del 21 de agosto y 6 de septiembre de 2018, así como del 11 octubre de 2019, las clases mostraron una completa separación, lo cual indicó que no hubo similitud entre los valores de reflectancia de las clases.

Respecto a los gráficos de dispersión elipsoidal de la escena 018-047, se muestra que la clase sargazo se asemejó a la clase mar. Aunque, en las imágenes del 11 de abril y 13 de mayo de 2019, la clase sargazo se separó completamente de las otras clases.

Las estadísticas de las escenas 018-047 y 019-047, muestran que la distancias de las medias entre la clase sargazo y mar fueron menores que respecto a la clase sargazo con las demás clases. Es por ello, que en el análisis de dispersión elipsoidal existió un traslape parcial entre la clase mar y sargazo. Se observó que las medias de la clase sargazo fueron mayores que las de las otras clases. Esto se debe a que al aplicar el IPVI, incrementaron los valores de reflectancia de la clase sargazo. Sin embargo, la clase sargazo también mostró mayores desviaciones estándar, lo cual indicó que esta clase tuvo una mayor variación en sus valores de reflectancia (ver Anexo).

Los gráficos de respuesta espectral de la escena 019-047 de la clase mar y sargazo permiten identificar que ambas clases comparten valores de reflectancia en las bandas roja e infrarroja, traslapándose sus respuestas espectrales. Por otra parte, la respuesta espectral del IPVI difiere entre clases, ya que no se asemejan sus valores de reflectancia.

Los gráficos de respuesta espectral de la escena 018-047 de la clase mar y sargazo muestran que ambas clases comparten valores de reflectancia principalmente en la banda roja, ya que en algunos puntos se cruzan sus respuestas espectrales. Aunque, la respuesta espectral del IPVI y de la banda NIR varía entre ambas clases (ver Anexo).

7.2. Cobertura de sargazo

La figura 9 corresponde a la cobertura de sargazo de la escena 019-047 y se observa que durante enero, noviembre y diciembre de 2018 se registró una cobertura de entre 1.44 y 1.79 km². En cambio en 2019 se reportó una cobertura de sargazo de entre 5.49 y 9.55 km² en enero y de 2.15 km² en marzo. En esta escena la cobertura total de sargazo en 2018 fue de 6.18 km² y de 17.26 km² en 2019.

La figura 10 muestra la cobertura de sargazo de la escena 018-047 y se observa que en julio, agosto, septiembre y diciembre se registraron coberturas entre 12.22 y 25.66 km². En contraste, durante enero, febrero y marzo de 2018 se reportaron coberturas de 17.33 a 74.69 km². En esta escena la cobertura total de sargazo en 2018 fue de 112.91 km² y en 2019 de 119.75 km².

Al sumar ambas escenas se detectó una cobertura de sargazo de 137.01 km² en 2019 y de 119.09 km² en 2018.

En la figura 11 se puede observar que la cobertura de sargazo de la escena 019-047 fue mínima comparada con la de escena 018-047, debido a la diferencia de dimensión entre ambas escenas. También, es posible distinguir que algunos de los meses con mayor cobertura coincidieron entre ambas escenas. Por ejemplo, concordaron los picos de diciembre de 2018 y enero y marzo de 2019. En la escena 018-047 se registraron altas coberturas durante la época de verano (julio-septiembre), lo cual no fue posible identificar en la escena 019-047.

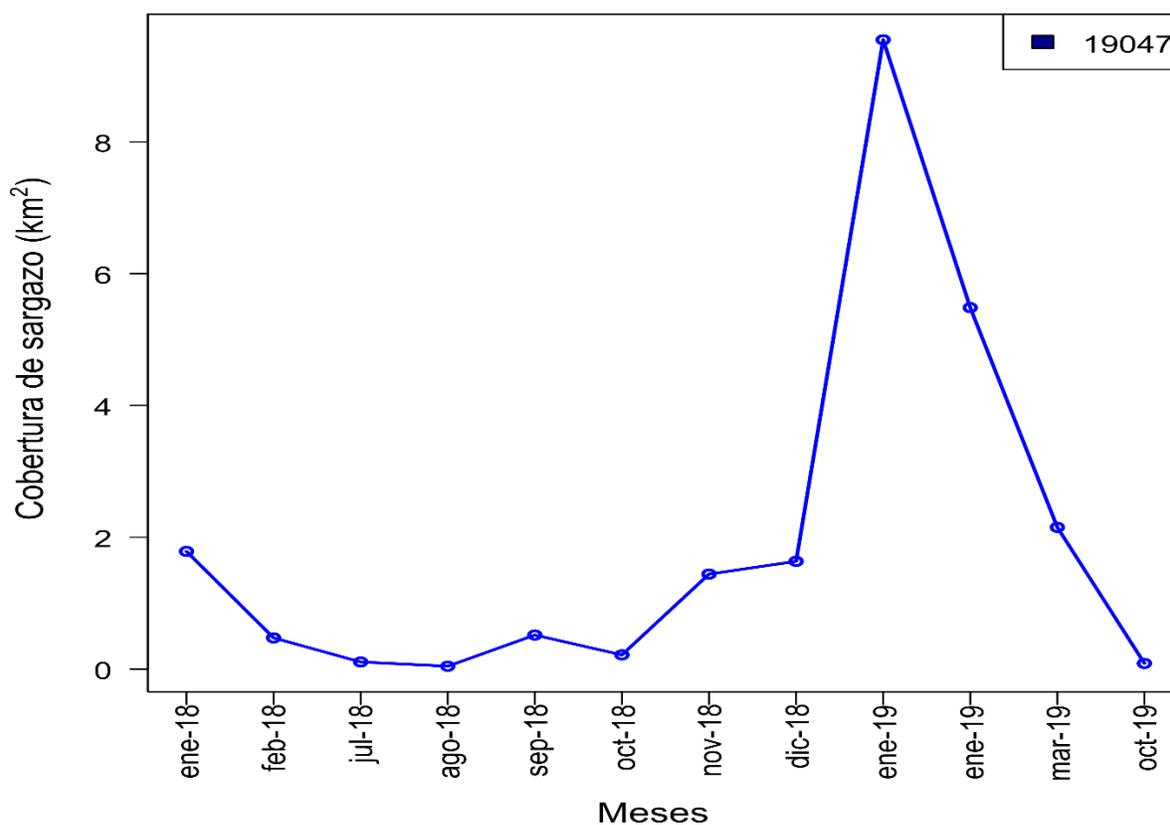


Figura 9. Cobertura de sargazo de la escena 019-047 en 2018 y 2019.

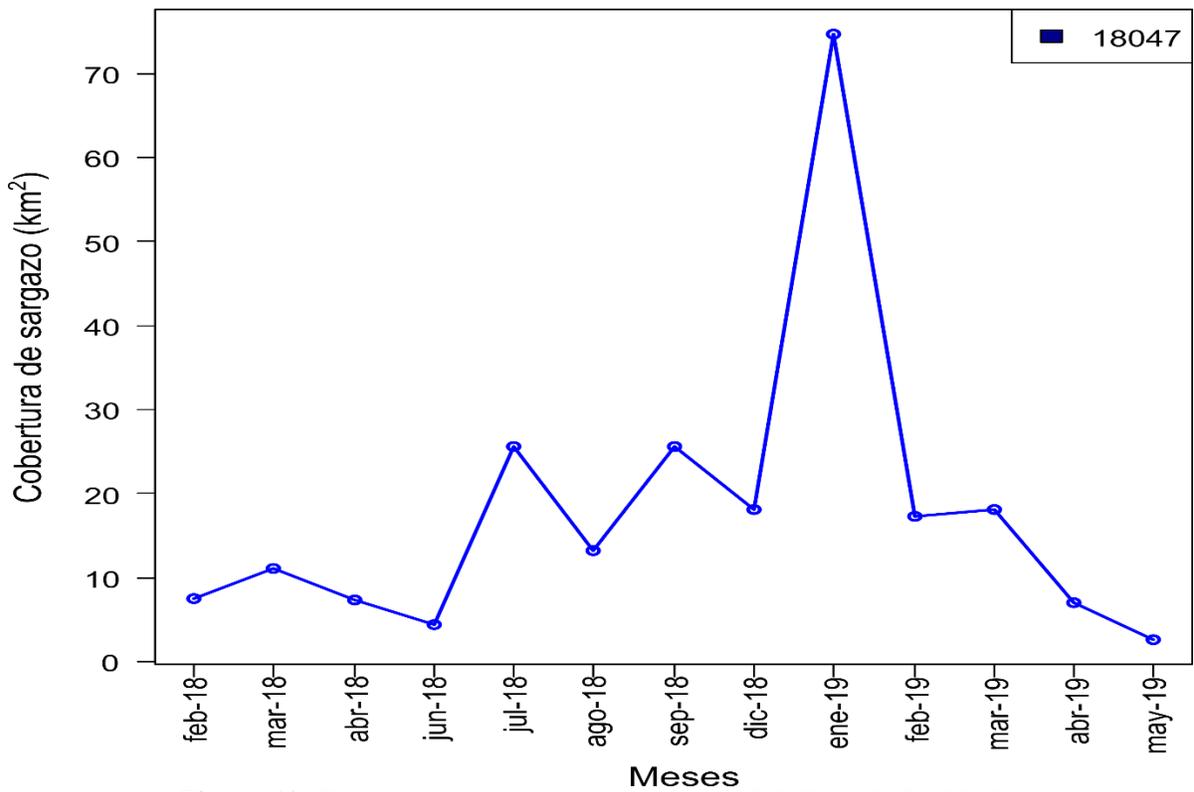


Figura 10. Cobertura de sargazo de la escena 018-047 en 2018 y 2019.

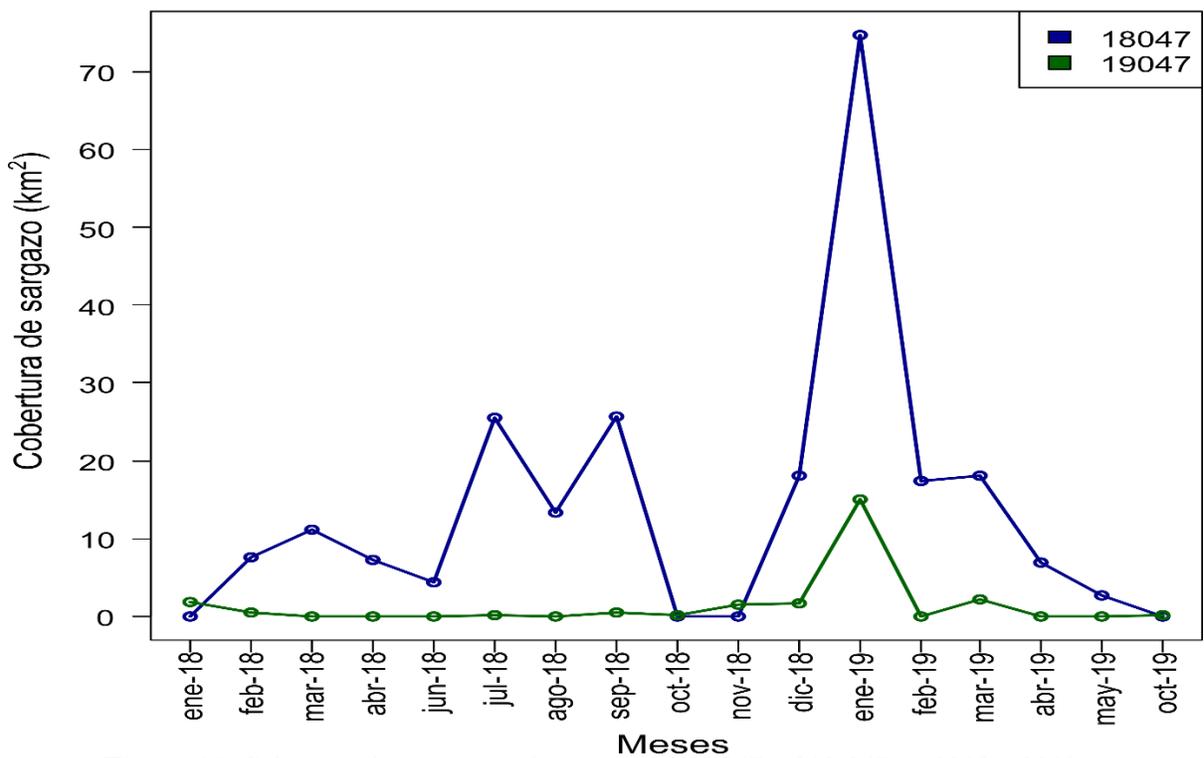


Figura 11. Cobertura de sargazo en las escenas 019-047 y 018-047 en 2018 y 2019.

7.3. Estimación de la turbidez

Los gráficos de caja y bigote muestran la variación temporal de la turbidez de las escenas 019-047 y 018-047 (menor y mayor extensión, respectivamente). Estas representaciones se realizaron en todas las imágenes de ambas escenas independientemente de si existió o no la presencia de sargazo. Esto tuvo dos finalidades, la primera de ellas fue distinguir si los meses con mayor turbidez correspondían con aquellos con mayor cobertura de sargazo. La segunda, fue determinar si la turbidez podía estar asociada con otros factores (temporalidad o eventos oceanográficos) independientes a la presencia del alga.

En ese sentido, se observó que en la escena 019-047, los meses con valores de turbidez más altos fueron enero (10.21 ± 6.21) y noviembre (8.43 ± 4.95) de 2018, así como enero (12.11 ± 7.12) y marzo de 2019 (8.44 ± 5.11). Estos meses también correspondieron con las coberturas de sargazo más altas (1.79 - 9.55 km^2). En cambio, en meses como octubre de 2018 y 2019 donde la turbidez fue alta, hubo una baja cobertura de sargazo (0.07 km^2) (Fig. 9 y 12).

En la escena 018-047, hubo altos valores de turbidez durante septiembre (7.18 ± 3.75) y diciembre de 2018 (6.22 ± 3.20) y enero de 2019 (8.08 ± 4.11), los cuales se relacionaron con las mayores coberturas de sargazo (18.11 - 74.69 km^2). Por el contrario, en meses como febrero de 2018 y febrero, noviembre y diciembre de 2019 se reportó una alta turbidez a pesar a de la baja o nula cobertura de sargazo (0 - 7.55 km^2) (Fig. 10 y 13).

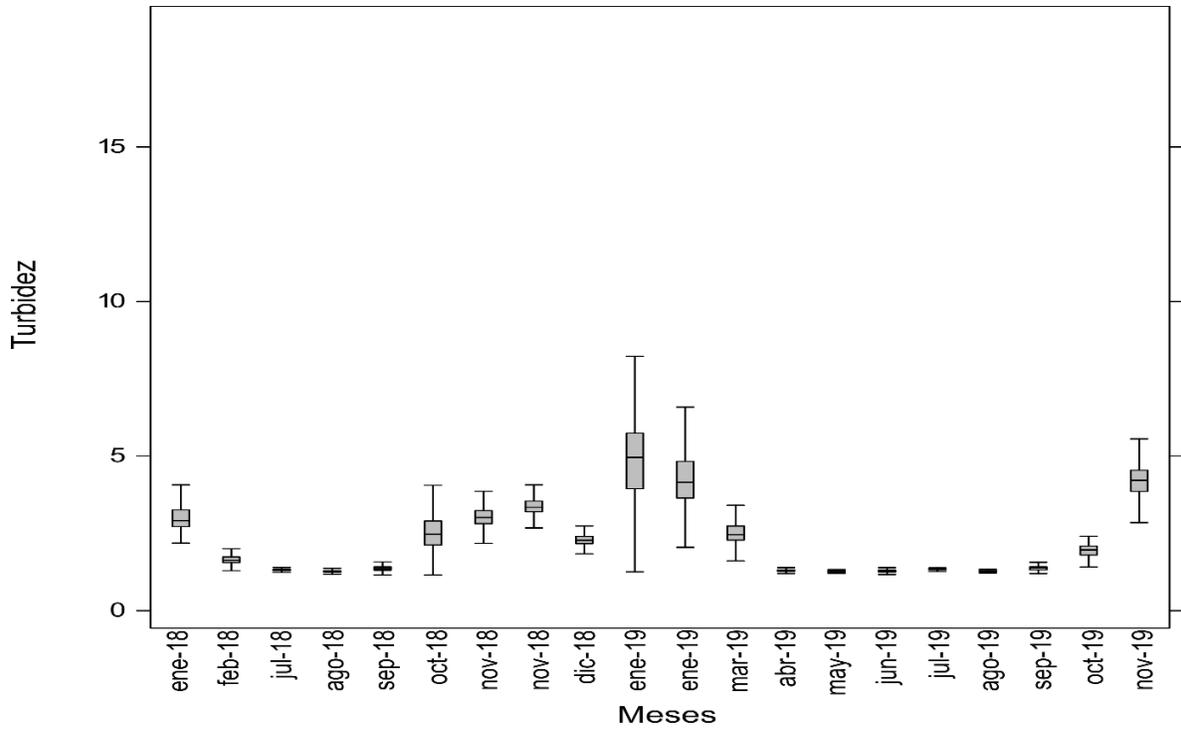


Figura 12. Cambios temporales en la turbidez escena 019-047.

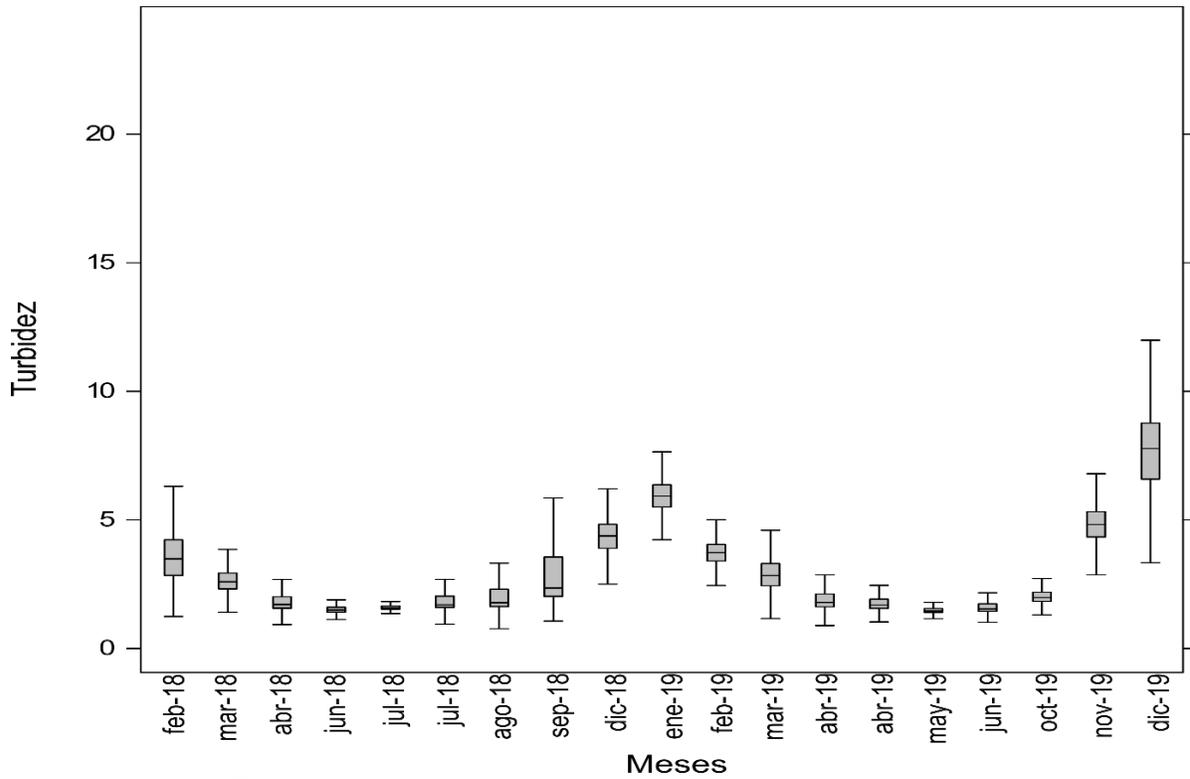


Figura 13. Cambios temporales en la turbidez escena 018-047.

Los gráficos de violín, permitieron distinguir valores atípicos y el tipo de distribución de los datos.

En relación con lo anteriormente mencionado, se observó que en la escena 019-047 se registraron valores de turbidez muy altos durante enero, octubre y noviembre de 2018, así como en enero y noviembre de 2019 (>10). Aunque, en los meses de noviembre de 2018 y enero y noviembre de 2019 se obtuvieron valores cercanos a cero, por lo cual la distribución de los valores de turbidez en estos meses tuvo un intervalo muy amplio. La mayoría de los meses presentó una distribución de los datos de turbidez de tipo normal (Fig.14).

Respecto a la escena 018-047, se obtuvieron valores muy altos de turbidez en febrero y septiembre de 2018 y en enero, febrero noviembre y diciembre de 2019 (>15). Del mismo modo, estos meses presentaron valores cercanos a cero, dando como resultado una amplia distribución de los datos de turbidez. La mayor parte de los meses tuvo una distribución de los datos de turbidez de tipo normal (Fig.15).

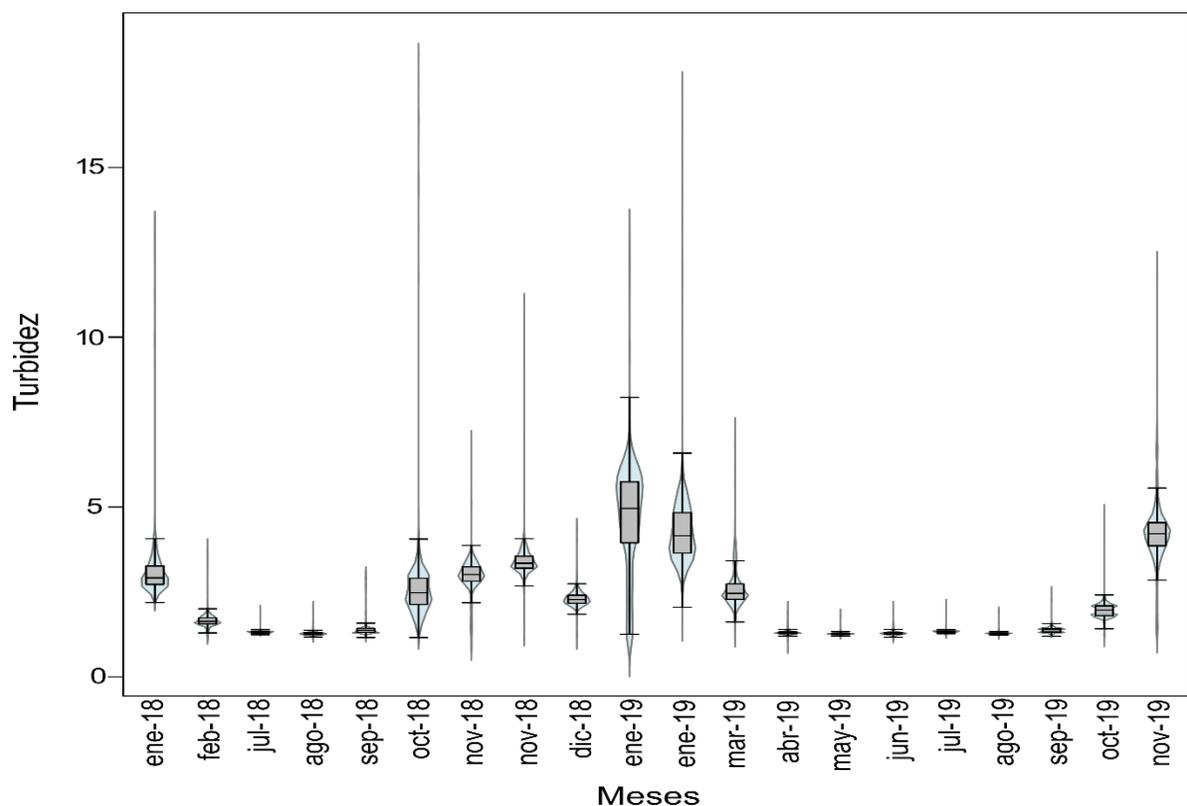


Figura 14. Tipo de distribución y cambios temporales de los datos de turbidez de la escena 019-047.

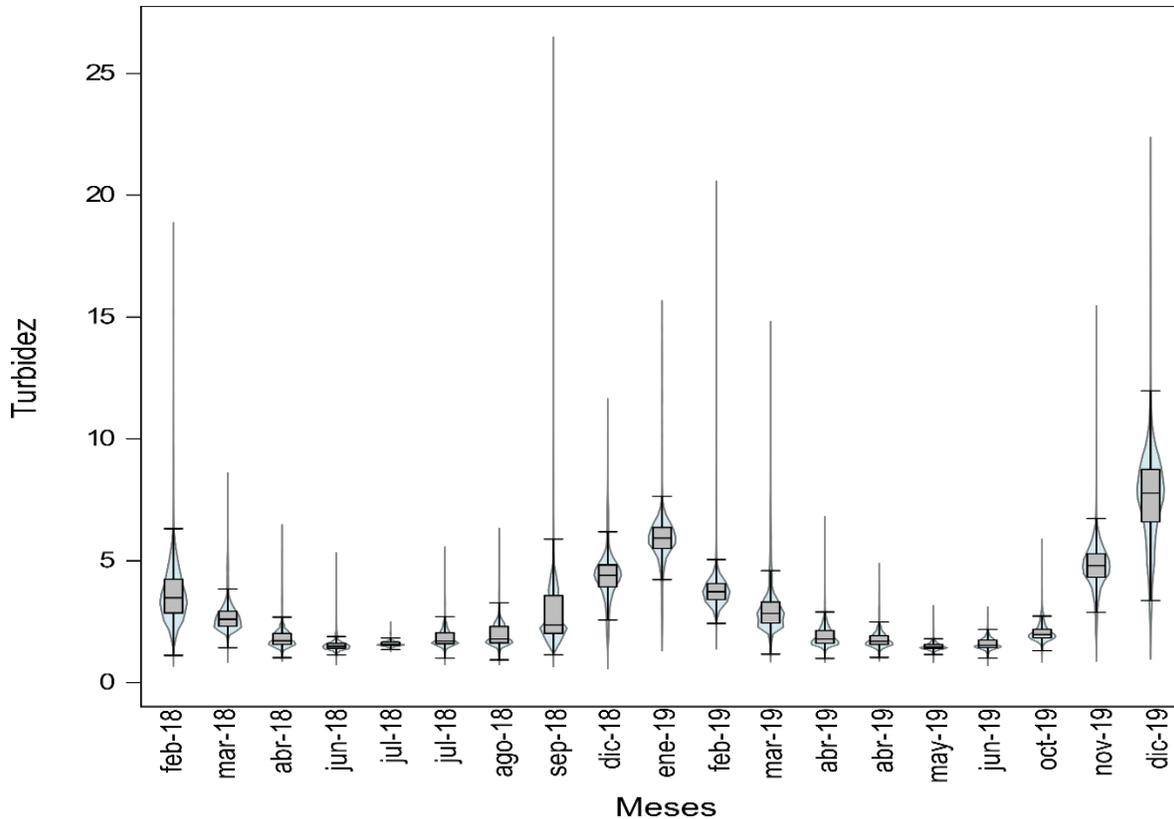


Figura 15. Tipo de distribución y cambios temporales de los datos de turbidez de la escena 018-047.

7.4. Relación sargazo-turbidez

El modelo de regresión lineal que corresponde a la escena 019-047, permite distinguir un incremento proporcional entre la cobertura de sargazo y la turbidez. Adicionalmente, la mayor parte de los datos estuvo dentro del intervalo de confianza (Fig. 16). El modelo presentó una pendiente e intercepto diferente de cero, un valor de R^2 ajustado que mostró un alto porcentaje de explicación de la variable cobertura de sargazo sobre el incremento de la turbidez. De igual forma, el error estándar de los residuales indicó que en promedio las observaciones (datos) variaron muy poco respecto a la línea de regresión (Tabla 3).

El modelo de regresión de la escena 018-047 muestra que la cantidad de cobertura de sargazo no influye sobre el aumento en la turbidez. También, el gráfico permite visualizar que muchos de los datos se encontraron fuera del intervalo de confianza (Fig.17). Este modelo presentó una pendiente e intercepto diferente de cero y un valor de R^2 ajustado que indicó que la variable cobertura de sargazo tuvo bajo porcentaje explicativo sobre el incremento en la turbidez. También, el error estándar de los residuales señaló que en promedio las

observaciones tuvieron mayor variación respecto a la línea de regresión en relación al modelo de la escena 019-047 (Tabla 3).

Tabla 3. Resumen de los modelos de regresión lineal simple de la relación sargazo-turbidez.

Escena	Pendiente	Intercepto	R ² -ajustado	E.E. Residuales
19047	p=0.000002*	p=0.00006*	0.80	0.50
18047	p=0.00004*	p=0.002*	0.47	0.95

*E.E.= Error estándar.

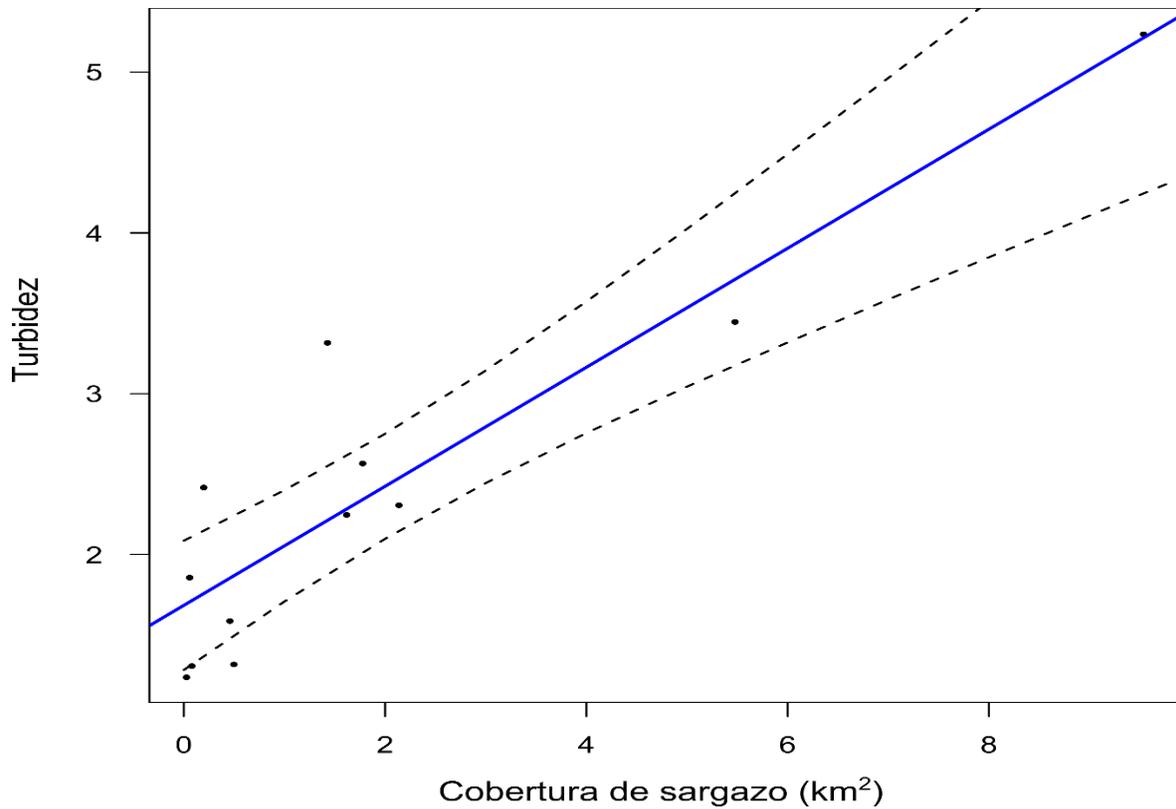


Figura 16. Modelo de regresión lineal simple, de relación entre la cobertura de sargazo y la turbidez de la escena 019-047.

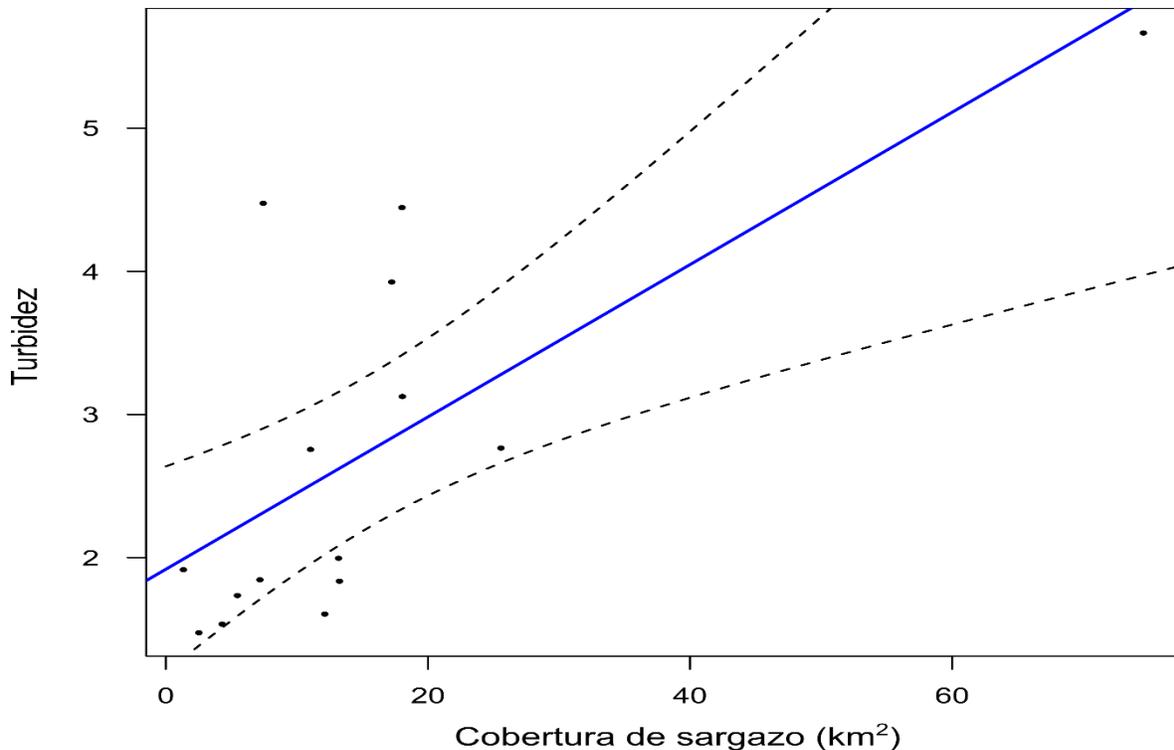


Figura 17. Modelo de regresión lineal simple, de relación entre la cobertura de sargazo y la turbidez en la escena 018-047.

7.5. Calidad de agua

En el muestreo de julio de 2019, se registraron concentraciones promedio de oxígeno bajas en la zona 1, donde se observó una alta cantidad de sargazo conglomerado. En la zona 2 (donde se observó el agua de una tonalidad marrón debido al desprendimiento de lixiviados del sargazo) se observó un incremento en la concentración promedio de oxígeno en relación a la zona 1 (Tabla 4). Con base en lo anterior, se pudieron detectar diferencias significativas en la concentración de oxígeno entre zonas de muestreo (zona 1 y 2) con base en el PERMANOVA (Tabla 5).

En contraste, los valores promedio de oxígeno disuelto entre Xcalak y Xahuayxol fueron similares pero fueron diferentes a lo reportado en Mahahual, ya que en esta última localidad se presentaron las concentraciones promedio de oxígeno más altas y bajas (Tabla 4). El PERMANOVA no detectó diferencias significativas en la concentración de oxígeno entre los tres sitios de estudio (Tabla 5).

Los valores promedio de Sólidos Disueltos Totales (SDT), fueron similares entre las zonas de muestreo de los tres sitios de estudio evaluados (Tabla 4) y no se detectaron diferencias

significativas entre estas con base en el PERMANOVA (Tabla 5). Por el contrario, las concentraciones promedio de SDT entre sitios de estudio fueron diferentes. En Xcalak se registraron los valores promedio de SDT más altos y en Xahuayxol los más bajos (Tabla 4). En ese sentido, se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de SDT entre sitios de muestreo con base en el PERMANOVA (Tabla 5) y se mostró por comparaciones múltiples que todos los sitios de estudio fueron diferentes entre sí (ver Anexo).

Tabla 4. Valores promedio (\pm Desv.est.) de los parámetros medidos en los tres sitios de estudio y las diferentes zonas de muestreo, datos de julio de 2019.

Sitio/zona	Oxígeno disuelto (mg/L)	Sólidos Disueltos Totales (g/L)
Xcalak		
Zona 1	0.17 \pm 0.15	37.59 \pm 0.66
Zona 2	3.42 \pm 0.38	36.84 \pm 0.30
Mahahual		
Zona 1	0.05 \pm 0.04	36.37 \pm 0.04
Zona 2	4.16 \pm 0.72	36.47 \pm 0.03
Xahuayxol		
Zona 1	0.29 \pm 0.41	35.50 \pm 0.06
Zona 2	2.62 \pm 0.16	35.57 \pm 0.07

Tabla 5. Resumen del PERMANOVA entre zonas y los tres sitios de muestreo, datos de julio 2019.

Factor	S.C.T	S.C.D	F	p
Zonas de muestreo				
Oxígeno	159	18.05	406.10	0.0001*
SDT	32.36	31.35	0.83	0.3667
Sitios de muestreo				
Oxígeno	159	155.20	0.62	0.5305
SDT	32.36	6.89	94.13	0.0001*

S.C.T= Suma de Cuadrados Total, S.C.D.= Suma de Cuadrados Dentro, * 0.05. SDT= Sólidos Disueltos Totales.

Los valores promedio de los parámetros de calidad de agua del muestreo de octubre de 2019, mostraron que en la zona donde se observó el agua de una tonalidad marrón oscuro debido al desprendimiento de lixiviados del sargazo (zona 1) el valor promedio de pH disminuyó. Mientras que en las zonas donde se observó el agua de una tonalidad marrón más claro y turquesa debido a un menor y nulo efecto de los lixiviados (zonas 2 y 3) el valor promedio de pH aumentó (Tabla 6). En Xcalak hubo mayor reducción de pH entre zonas de muestreo y en Xahuayxol existió una menor reducción de pH (Tabla 6).

Las concentraciones promedio de amonio fueron más altas en la zona 1 respecto a las zonas 2 y 3. Sin embargo, en Xahuayxol la concentración de amonio fue muy similar entre la zona

1 y 3. Además, en Xcalak se registraron las concentraciones promedio de amonio más elevadas y en Xahuayxol las más bajas (Tabla 6).

Las concentraciones promedio de fosfato en Xcalak y Mahahual fueron más altas en la zona 1 respecto a las zonas 2 y 3. Mientras que en Xahuayxol las zonas 2 y 3 tuvieron mayores concentraciones de fosfato en relación a la zona 1. Esta última localidad fue la que presentó concentraciones más altas de fosfato (Tabla 6).

Respecto a lo anterior se detectaron diferencias significativas en el pH y la concentración de amonio entre las zonas de muestreo con base en el PERMANOVA (Tabla 7). La prueba de comparaciones múltiples mostró que todas las zonas fueron diferentes entre sí (ver Anexo). Por el contrario, en la concentración de fosfato no se detectaron diferencias entre zonas mediante el PERMANOVA. Entre las localidades de muestreo existieron diferencias significativas en el pH y en la concentración de fosfato lo cual se corroboró con el PERMANOVA (Tabla 7). Las comparaciones pareadas mostraron diferencias entre Xcalak con Mahahual y Xahuayxol en el caso del pH y entre Mahahual y Xahuayxol para el fosfato (ver Anexo). En tanto que en el PERMANOVA indicó que no existieron diferencias en concentración de amonio entre sitios.

Tabla 6. Valores promedio (\pm Desv.est.) de los parámetros medidos en los tres sitios de estudio y en las diferentes zonas de muestreo, datos de octubre de 2019.

Sitio/Zona	pH	Amonio ($\mu\text{mol/L}$)	Fosfato ($\mu\text{mol/L}$)
Xcalak			
Zona 1	7.72 ± 0.06	1.96 ± 1.27	0.57 ± 0.33
Zona 2	7.87 ± 0.08	1.22 ± 0.85	0.24 ± 0.18
Zona 3	7.93 ± 0.01	0.65 ± 0.34	0.20 ± 0.06
Mahahual			
Zona 1	7.83 ± 0.06	2.59 ± 0.77	0.31 ± 0.12
Zona 2	7.95 ± 0.06	1.29 ± 0.89	0.23 ± 0.14
Zona 3	8.04 ± 0.01	0.37 ± 0.18	0.27 ± 0.05
Xahuayxol			
Zona 1	7.98 ± 0.04	0.75 ± 0.69	0.27 ± 0.12
Zona 2	8.01 ± 0.05	0.45 ± 0.25	1.30 ± 1.5
Zona 3	8 ± 0.06	0.69 ± 0.75	0.53 ± 0.34

Tabla 7. Resumen del PERMANOVA entre zonas y los tres sitios de muestreo, datos de octubre 2019.

Factor	S.C.T	S.C.D	F	p
Zonas de muestreo				
pH	0.54	0.38	8.81	0.0004*
Amonio	41.51	34.46	7.38	0.0021*
Fosfato	15.22	14.67	0.78	0.5818
Sitios de muestreo				
pH	0.54	0.345	11.96	0.0001*
Amonio	42.51	37.59	2.52	0.027*
Fosfato	15.22	13.59	2.74	0.074

S.C.T= Suma de Cuadrados Total, S.C.D.= Suma de Cuadrados Dentro, * 0.05.

8. DISCUSIÓN

8.1. Detección satelital de sargazo en el Caribe mexicano

De las 40 imágenes de 2018 y 2019 analizadas en la zona de estudio, 27 (67.50%) evidenciaron la presencia de sargazo, mientras que en 13 de ellas (32.50%) no se detectó la presencia del alga. Estudios semejantes a este han reportado valores muy similares en el porcentaje de la presencia de sargazo. Por ejemplo, Cuevas *et al.* (2018), analizaron 91 imágenes, 54 (60%) mostraron la presencia de sargazo y 31 (34 %) de ellas no. Algunas de las causas por las que no se detectó sargazo en este estudio se deben a la cobertura de nubes, los destellos solares, o las sombras de las nubes que imposibilitaron la visualización del alga. El sargazo puede estar presente en pequeños parches (<10 m), sin embargo la resolución especial de las imágenes Landsat 8 (30 m) no es suficiente para detectarlos si estos son escasos en el pixel (Gower y King, 2011, Wang y Hu, 2016).

Una aportación importante en este estudio es la aplicación del índice de Vegetación de Porcentaje Infrarrojo (IPVI) para la detección del alga. Este índice es similar al NDVI (índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), sin embargo el cálculo del IPVI es más rápido y menos complejo (Crippen, 1990). En este estudio el IPVI fue eficiente para la detección del alga. En otros estudios se han aplicado diferentes índices para la detección del sargazo, como el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente (ARVI), el índice de Vegetación de Suelo-Ajustado (SAVI), el índice de Vegetación Mejorado (EVI), el índice de Vegetación de Algas Flotantes (FAI), el índice de Vegetación de Algas Flotantes Ajustado (AFAI) y el índice Máximo de Clorofila (MCI). La aplicación de estos índices de vegetación en este y otros estudios cumplen un objetivo más importante, ya que al ser detectada el alga se emplean algoritmos para estimar su cobertura, determinar su distribución, obtener su biomasa y sus requerimientos espectrales (Gower y King, 2011, Hu *et al.*, 2015, Wang y Hu, 2016, Cuevas *et al.*, 2018, Arellano-Verdejo *et al.*, 2019).

Al ser detectado el sargazo en este estudio, se aplicó una clasificación supervisada mediante el algoritmo Suit's Maximum Relative para estimar la cobertura del alga. Este método clasificatorio no se ha utilizado en otros estudios donde se estima la cobertura de sargazo,

debido a que es un método propio del software TNTmips de Microimages® y en otros estudios probablemente emplean otros softwares de SIG (Sistemas de Información Geográfica) o percepción remota. Este método cuenta con las ventajas de que su cálculo computacional es rápido y que los pixeles que no encajan en ninguna de las clases los deja fuera del análisis para evitar sesgo en la clasificación (Zaniewski, 2011). Cuevas *et al.* (2018), utilizaron el Algoritmo de Bosque Aleatorio (Random Forest Algorithm) para determinar la cobertura de sargazo en la parte noreste de la península de Yucatán. Otros estudios han empleado diferentes métodos de clasificación como el de Mínimas Distancias (Minimum Distances) y el de Máxima Probabilidad (Maximum Likelihood) para mapear el sargazo bentónico presente en sitios aledaños a la costa. También, se han probado algoritmos clasificatorios de redes neurales como el ERISnet para identificar la efectividad que tienen para la detección de sargazo (Noiraksar *et al.*, 2014, Arellano-Verdejo *et al.*, 2019, Lasquites *et al.*, 2019).

Para conocer la efectividad del método de clasificación, justificar su poder estadístico y recomendar su uso para estudios posteriores se deben tomar en cuenta:

- a) la exactitud con la que clasificó las clases indicadas
- b) los errores que tuvo al clasificarlas.

De este modo, se obtiene un valor de exactitud y dos tipos de errores (error de omisión y de comisión). En este estudio se consideraron dos parámetros de precisión que son: la exactitud general (overall accuracy) y el parámetro Khat. La exactitud general obtenida fue de 86.70%, situándose dentro del rango de 85-100% que Congalton y Green (2002) señalan como aceptable (ver Anexo). Esto es similar a lo reportado por otros estudios donde registran una exactitud general del 80%, cuando realizan una clasificación supervisada para mapear bosques de kelp o hábitats bentónicos como arrecifes de coral y pastos marinos (Mishra *et al.*, 2005, Uhl *et al.*, 2016). En otros estudios se han reportado porcentajes más altos de exactitud general que oscilan entre 94 y 99 % cuando mapean sargazo bentónico y surgencias fitoplanctónicas (Babu *et al.*, 2016, Hoang *et al.*, 2016, Lesquites *et al.*, 2019). En este estudio el parámetro Khat obtenido fue de 75.05%, lo cual estuvo dentro del rango (40-80%) que Landis y Koch (1977) indican como un valor de concordancia moderada entre la clasificación y los datos de referencia. Al ser el parámetro Khat un análisis mejorado del indicador Kappa

los resultados entre ambos son comparables (Cohen, 1960). Por consiguiente, el porcentaje obtenido en este estudio es menor a lo que reportan Cuevas *et al.* (2018) cuyo valor Kappa es de 81.2%. La exactitud general y el parámetro Khat entraron dentro de rangos aceptables, aunque estos valores de exactitud pudieron ser mayores, ya que al momento de realizar la clasificación no se prestó suficiente cuidado en seleccionar los puntos de entrenamiento en las clases que no pertenecieron a la clase sargazo.

No obstante, la clase sargazo fue cuidadosamente clasificada ya que al ser el objeto de estudio se buscó aminorar sus errores de omisión y comisión. Se obtuvo un error de omisión de 13.15% que es menor a lo reportado por Cuevas *et al.* (2018) y Hu *et al.* (2015) quienes reportaron errores de omisión de 19 y 30% respectivamente cuando estimaron la cobertura de sargazo. Este tipo de error se origina cuando existen píxeles mezclados (ej. un píxel que contiene sargazo y agua) que causan dificultades al clasificador, debido a que existe una confusión para distinguir a que clase pertenecen (Hu *et al.*, 2015, Huovinen *et al.*, 2018). Una forma de reducir este tipo de error es realizar un muestreo para corroborar los puntos donde se ubica el alga y de esa manera tener certeza de que lo observado en la imagen realmente es sargazo. Aunque, esto tiene varios inconvenientes ya que el sargazo continuamente se mueve. Asimismo, el muestreo debe coincidir con el día que pasa el satélite y de ser así resulta muy complicado registrar los manchones de sargazo en extensiones de decenas de kilómetros en un sólo día (Cuevas *et al.*, 2018).

El error de comisión en este estudio fue de 7.72 %, lo cual es mayor a lo reportado por Cuevas *et al.* (2018) quienes detectaron un error de comisión de 2%. Este tipo de error se genera al incluir píxeles en la clase sargazo cuando en realidad no pertenecen a esta. Esto se puede corregir si se asignan nuevamente sitios de entrenamiento hasta que el error disminuya.

Otros análisis que muestran aspectos relevantes de la clasificación son el gráfico de dispersión elipsoidal y las estadísticas de clasificación, que permiten identificar la separabilidad y la distancia entre clases. De acuerdo con estos análisis, se identificó cierta similitud en el comportamiento espectral de la clase mar y la clase sargazo. De igual forma, los gráficos de respuesta espectral de la clase mar y sargazo de las bandas roja, infrarroja y del IPVI permitieron identificar que ambas clases comparten valores de reflectancia en las bandas roja e infrarroja (aunque en mayor medida en la roja) y sus respuestas espectrales se

asemejan en algunos puntos (ver Anexo). En ese sentido, se conoce que la vegetación flotante (en este caso el sargazo) es capaz de reflejar la luz entre un rango de 600 a 900 nm que es lo que abarcan las bandas del rojo e infrarrojo utilizadas para el análisis (Dierssen *et al.*, 2015), mientras que el agua marina refleja la luz entre los 400 y 700 nm (y cubre el espectro de banda roja de las imágenes Landsat 8) (Aguirre-Gómez, 2014).

Existen otros materiales y organismos marinos flotantes que tienen respuestas espectrales similares a las del sargazo. Dentro estos se encuentran los desechos marinos (plásticos, redes, basura, aceites), algas del género *Trichodesium* o *Ulva* y pastos marinos del género *Thalassia* y *Syringodium*. Sin embargo, el sargazo puede diferenciarse de ellos debido a que posee clorofila c que cuenta con picos de absorción de la luz entre los 600 y 650 nm, confiriéndole una señal única dentro de este rango de longitud de onda (Hu *et al.*, 2015). Esto permite asumir que las arribazones o manchones detectados satelitalmente no están compuestos únicamente de sargazo sino que también de otras algas y materiales flotantes.

Los resultados de este estudio mostraron que los mayores valores de cobertura de sargazo se encontraron en 2019. Esto concuerda con lo reportado en otros estudios, donde se ha identificado un aumento gradual en la cobertura de sargazo. Particularmente, en la región Caribe y del Océano Atlántico Central donde se observó una cobertura de sargazo de 1000 km² en 2011 y 6000 km² en 2018 (Wang *et al.*, 2019). Ese mismo patrón se identificó en la región del Atlántico Central Oeste donde la cobertura de sargazo fue de 59.6 km² en 2015 y de 956.2 km² en 2019 (Wang y Hu, 2016). Del mismo modo, en la península de Yucatán, la cobertura del alga fue cuatro veces mayor en 2015 que en 2014 (Cuevas *et al.*, 2018). Este incremento significativo en la cobertura de sargazo está asociado con una combinación de factores ambientales presentes en Región de Recirculación Nor-ecuatorial (zona donde se origina el alga). Dichos factores son: la descarga de nutrientes llevados a la superficie marina a través de las plumas de los ríos Congo, Orinoco y Amazonas (que se acrecentan cuando la precipitación es mayor), así como las surgencias de la costa oeste de África que permiten el ascenso continuo de nutrientes a la superficie y las temperaturas superficiales promedio o por debajo del promedio (Wang y Hu, 2016, Wang *et al.*, 2019). Si estas condiciones prevalecen el sargazo aumenta en biomasa y mediante acción del viento y las corrientes arriba a las costas del Caribe mexicano (Muller *et al.*, 1995, Putman *et al.*, 2018).

Los meses donde se detectó mayor cobertura de sargazo fueron: julio, agosto, septiembre y diciembre de 2018, así como enero, febrero y marzo de 2019. Esto concuerda con lo reportado en otros estudios, donde han notado extensas coberturas del alga durante los meses de verano, principalmente junio, julio, agosto y septiembre (Wang y Hu, 2016, Cuevas *et al.*, 2018, Wang *et al.*, 2019). Durante esta época, la Contracorriente Norecuatorial (NECC) se establece en la NERR y se propicia una acumulación del alga (Franks *et al.*, 2016). De igual forma, esta temporada coincide con los picos de descarga de los ríos Amazonas y Orinoco (Salisbury *et al.*, 2011, López *et al.*, 2013, Varona *et al.*, 2019) que llevan una gran cantidad de nutrientes y que permiten que el sargazo prolifere y aumente en biomasa. También, se reportaron picos importantes en la arribazón durante diciembre, enero y marzo. Lo cual sugiere que esto se origina como consecuencia de los nutrientes que aportan las surgencias de la costa este de África, que se presentan durante invierno y primavera, así como la disminución de la temperatura superficiales que contribuyen al crecimiento del sargazo (Varona *et al.*, 2019, Wang *et al.*, 2019).

Como se mencionó anteriormente, el sargazo se transporta desde la NERR hasta el Caribe a través de vientos y corrientes. Pero, no todo el sargazo situado en la NERR se transporta al Caribe, ya que esta zona se bifurca y una de las vertientes continúa en la NERR gracias a los giros a mesoescala presentes en esta zona. La otra vertiente permite que el sargazo llegue hasta el Caribe transportándose en primera instancia por la corriente Norte de Brasil, posteriormente pasa por las Antillas Menores por acción de la corriente de Guyana, después viaja a través de la corriente del Caribe y finalmente fluye hacia la corriente de Yucatán. Una vez que los manchones del alga se encuentran en el Caribe mexicano, son llevados hasta la costa a través de los vientos alisios del noreste (Cetina *et al.*, 2006, Johns *et al.*, 2020).

En la escena 018-047 se registró una cobertura de sargazo aproximadamente 10 veces mayor que en la escena 019-047, por lo tanto de una escena a otra disminuyó la cobertura del alga entre un 80-95%. Respecto a ello, existe una zona de transición desde Banco Chinchorro hasta 40 km hacia el oeste donde el alga se dispersa hacia otras regiones y solamente llega del 5-20% de cobertura hasta zonas aldeñas al área de estudio (escena 19047). Esto se debe a que en esa zona hay periodos semanales de reversión donde el flujo de la corriente viaja en dirección sur (Cetina *et al.*, 2006) lo cual provoca que el sargazo se aleje de los sitios de

estudio. Particularmente, de julio a octubre los vientos se mueven en dirección sureste, es por ello que sólo llega del 2-7% de sargazo de una escena a otra. En contraste, de noviembre a febrero los vientos fluyen hacia el norte sin alejarse de la costa (Rodríguez-Vera *et al.*, 2019), por lo cual arriba el 20% del alga entre escenas.

De acuerdo a la literatura, este es el primer estudio donde se realiza una estimación de la cobertura de sargazo en la parte sur de Quintana Roo mediante imágenes Landsat 8.

8.2. Efecto del sargazo en la turbidez del agua

Este estudio estimó el efecto del sargazo sobre la turbidez mediante el uso de bandas multiespectrales de imágenes Landsat 8.

Para calcular la turbidez se realizó una división entre las bandas espectrales 4 (roja) y 6 (infrarroja de onda corta o SWIR), basándonos en el método de Barret y Frazier (2016). Este método resulta muy útil ya que no es necesario tomar datos *in situ*, por lo cual se reduce el esfuerzo de muestreo y se obtienen resultados con mayor rapidez. Este tipo de métodos otorgan la ventaja de que son confiables y se asemejan a lo obtenido en muestreos de campo. Esto se ha corroborado en diferentes estudios donde han notado una alta correlación (0.84-0.96) entre los datos de turbidez tomados *in situ* y los datos provenientes de cálculos con bandas multiespectrales (Constantin *et al.*, 2017, Quang *et al.*, 2017).

Se han probado diferentes combinaciones de bandas multiespectrales para el cálculo de la turbidez. Sin embargo, el cociente entre la banda roja y SWIR tienen mayor efectividad para estimar este parámetro. Esto toma relevancia cuando se conoce que la banda SWIR se encarga de reflejar los sólidos suspendidos (SS), mientras que las bandas azul o roja tienen la capacidad de reflejar la clorofila (Cla) (Kloiber *et al.*, 2002, Barret y Frazier, 2016) y que tanto los SS como la Cla son componentes de la turbidez.

Cabe mencionar que este método también cuenta con ciertas desventajas. Una de las principales es que al ser un índice semicuantitativo no cuenta con unidades, por lo que dificulta su comparación con medidas cuantitativas de turbidez expresadas en FTU, NTU, en metros si nos referimos a la profundidad o en mg/l, cuando se expresa la cantidad de material orgánico disuelto. Una forma de evitar este problema es usar el coeficiente de atenuación

difusa (K-490) que es una medida cuantitativa de turbidez. Este coeficiente utiliza datos satelitales de radiancia de las longitudes de onda de 490 y 550 nm e indica el grado en que la radiación solar es atenuada con la profundidad (comúnmente se expresa en m^{-1}) (Chauhan, *et al.*, 2003, Shi *et al.*, 2014).

De acuerdo con los resultados de turbidez obtenidos en este estudio, la escena 018-047 presentó valores más altos que la escena 019-047, ya que en algunos meses se reportaron valores por encima de 15-25 (turbidez muy alta).

Los valores altos de turbidez de la escena 018-047 se reportaron durante febrero, noviembre y diciembre de 2018, así como en enero, marzo y noviembre de 2019. Los valores altos de febrero y noviembre pueden atribuirse a que estos meses corresponden a la época de nortes donde la intensidad del viento provoca una resuspensión de sedimentos y esto causa que la columna de agua pierda transparencia (Herrera-Silveira *et al.*, 1999, Aranda-Cicerol *et al.*, 2006). A esto hay que sumarle que en zonas específicas cercanas a la costa (por ejemplo en zonas restringidas del PNAX) no se remueve el sargazo, por lo cual este se acumula, descompone y desprende lixiviados que hacen que la columna de agua se vuelva turbia (van Tussenbroek *et al.*, 2017). Adicionalmente, la construcción de muelles o escolleras en los sitios de estudio permiten que el sargazo se concentre e incremente la turbidez (Robledo y Vásquez-Delfín, 2019). En contraste, los valores altos de turbidez de enero y marzo de 2019 se deben a las altas coberturas de sargazo reportadas en este estudio.

En la escena 019-047 se reportaron valores altos de turbidez (10-15) durante octubre, noviembre y diciembre de 2018, así como enero y marzo de 2019. Los valores altos de diciembre de 2018 y enero y marzo de 2019 coinciden con elevadas coberturas de sargazo. La alta turbidez de noviembre podría deberse a la época de nortes que provocan una resuspensión de sedimento (Herrera-Silveira *et al.*, 1999). Mientras que en octubre existe un efecto combinado del sargazo acumulado en la playa que desprende lixiviados y una alta precipitación (162.3-187.2 mm) (CONAGUA, 2018) que incrementa los escurrimientos continentales (que vienen cargados de una serie de nutrientes como nitritos, nitratos, fosfatos, entre otros) hacia el mar.

En este trabajo se realizó una relación cuantitativa entre la cobertura de sargazo y la turbidez a través de modelos de regresión lineal. Como resultado se identificó que en la escena 019-047 la variable cobertura de sargazo tiene un alto porcentaje de explicación (80%) sobre el incremento de la turbidez. En cambio, en el modelo de regresión de la escena 018-047 la variable cobertura de sargazo tiene un bajo porcentaje de explicación (47%) sobre el aumento en la turbidez.

En la escena 019-047 se observó que existió una mayor relación (directamente proporcional) entre la cobertura de sargazo y la turbidez, posiblemente porque esta escena cubre una zona de menor extensión y más cercana a la costa que hacen que el efecto del sargazo se concentre más. Mientras que en la escena 018-047 se identificó una menor relación entre cobertura de sargazo y la turbidez. Esto probablemente porque la escena abarca una mayor extensión y sitios más alejados de la costa que permiten que el efecto del sargazo se disipe y que otros factores temporales y oceanográficos tengan mayor impacto

Respecto a lo anterior se debe aclarar que no sólo el sargazo es responsable del aumento de la turbidez. Hay diversos factores tales como: la cantidad de materia orgánica (además del sargazo) e inorgánica suspendida en la columna de agua, ejemplo de esto son las bacterias, los taninos, el plancton y compuestos orgánicos disueltos (Fabricius *et al.*, 2005). Asimismo, la turbidez puede variar a escalas espaciales (por sitio) o temporales. Por ejemplo, temporalmente se observa menor turbidez durante la época de secas que en lluvias (Rodríguez-Juárez, 2011). Esto se debe a que en la temporada de lluvias aumentan las escorrentías las cuales aportan materia orgánica en suspensión y esto ayuda al incremento de la turbidez. De forma espacial podemos inferir que Mahahual al ser un destino turístico puede tener varios factores que propicien un aumento en la turbidez, como una alta descarga de aguas residuales que llevan materia orgánica directo al mar, así como una continua actividad de las lanchas que provocan una resuspensión del sedimento (Schmitter-Soto *et al.*, 2018). En cambio en Xcalak y Xahuayxol al ser sitios poco poblados y protegidos (CONANP, 2004) la descarga de aguas residuales y la actividad de las embarcaciones es menor.

8.3. Efecto del sargazo en la calidad del agua

Se han realizado pocos estudios para evaluar el efecto del sargazo en la calidad del agua del Caribe mexicano (van Tussenbroek *et al.*, 2017, Rodríguez Martínez *et al.*, 2019, 2020). Por lo tanto, este estudio es uno de los primeros que determina como la presencia esta alga afecta la calidad del agua de la laguna arrecifal de Mahahual, Xcalak y Xahuayxol.

En ese sentido, se ha observado que las grandes acumulaciones de sargazo cerca de la costa impactan negativamente la calidad del agua. Particularmente, en la laguna arrecifal se ha identificado una reducción en los niveles de oxígeno disuelto, del pH, potencial REDOX, así como la producción de compuestos con potencial tóxico como el amonio y el ácido sulfhídrico (van Tussenbroek *et al.*, 2017).

En este estudio se identificaron bajas concentraciones de oxígeno disuelto debido a la presencia del sargazo. Principalmente, en la zona donde se acumuló mayor biomasa del alga (de la playa a los 5 metros mar adentro) se registraron valores promedio de 0.05 a 0.29 mg/l que son menores a lo reportado en otros estudios (1 a 2.9 mg/l) para sitios con alta concentración de sargazo (van Tussenbroek *et al.*, 2017, Cabanillas-Terán *et al.*, 2019, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019). Estas condiciones de hipoxia se generan debido a que la materia orgánica acumulada (sargazo) impide el intercambio de oxígeno océano-atmósfera (Andersson, 2017). Adicionalmente, los procesos de respiración aeróbica (generados por los organismos adheridos al alga) y de oxidación del sargazo disminuyen los niveles oxígeno disuelto (Rebalais *et al.*, 2014, Qian *et al.*, 2017). En contraste, en la zona con efecto de los lixiviados pero sin sargazo acumulado (de la playa a los 15 metros mar adentro) se reportaron valores promedio de oxígeno de 2.62 a 4.16 mg/l, lo cual coincide con las concentraciones promedio de 2.42 a 3.66 mg/l que registraron van Tussenbroek *et al.* (2017) y Cabanillas-Terán *et al.* (2019). Este aumento en los niveles de oxígeno entre zonas, se debe a que no existió la presencia de sargazo acumulado que pudiera obstruir el intercambio de oxígeno océano-atmósfera. Sin embargo, la materia orgánica particulada proveniente de los lixiviados consume oxígeno y no permite que este parámetro se establezca hasta alcanzar concentraciones que no representen riesgo para la vida marina (>7 mg/l) (Torres-Alvarado y Calva-Benítez, 2012, Filter *et al.*, 2017). En ese sentido, ambas zonas de muestreo reflejaron

condiciones de hipoxia capaces de alterar el metabolismo, la fisiología (<4 mg/l) y ser letales (<2 mg/l) para peces e invertebrados (Vaquer-Sunyer y Duarte, 2008).

Del mismo modo, se identificó una reducción del pH en las zonas con mayor concentración de lixiviados (7.72-8.01) y un incremento en aquella con menor efecto de los mismos (7.93-8.04). Esto concuerda con lo reportado por van Tussenbroek *et al.* (2017), quienes observaron una disminución del pH en la zona más impactada por el sargazo (7.4-8) y un incremento (8.7-8.9) en la zona con nulo efecto del alga. Este decremento en el pH se debe a que la mineralización aeróbica de la materia orgánica (sargazo) genera ácidos orgánicos y ácido carbónico y se liberan iones H^+ como producto secundario (Krachler *et al.*, 2009).

No obstante, el pH tiene relación con el H_2S que es un gas producido por la degradación anaeróbica del sargazo (o materia orgánica en general) por acción de bacterias sulfuro-reductoras (Weiner, 2010). Korhonen *et al.* (2012) correlacionan ambos componentes de manera inversa y señalan que cuando el pH es menor a 6 la concentración de H_2S aumenta hasta un 90%, mientras que cuando es mayor a 8 decrece hasta 10%.

En este estudio no se consideró determinar la concentración de H_2S , ya que es un compuesto altamente volátil (Weiner, 2010) y se requiere de un procesamiento inmediato de las muestras de agua. Aunque, acorde a los valores de pH reportados en este trabajo (≈ 8) podemos asumir que los niveles de este gas eran bajos (Korhonen *et al.*, 2012). Por otra parte, no se observaron daños o muertes en organismos marinos durante los muestreos de julio y octubre de 2019 a causa del H_2S . Aunque, cuando la arribazón está en su punto máximo la concentración de este compuesto es mayor, lo cual ha originado la muerte de diversos organismos, principalmente peces y crustáceos ya que dificulta su proceso respiratorio y específicamente en los peces provoca daños en las branquias (Janas y Szaniawska, 1996, Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

Otro de los compuestos generados a partir de la descomposición del alga por acción principalmente de bacterias (mediante procesos físicos, químicos y biológicos) es el amonio (NH_4) (Farooqui *et al.*, 2014). En este estudio se determinaron concentraciones de amonio más altas en la zona con mayor efecto de los lixiviados (0.75-2.59 $\mu m/l$), mientras que en la zona con nulo efecto de los lixiviados disminuyeron los niveles de este compuesto (0.37-0.69

$\mu\text{m/l}$). Estos valores, son bajos en comparación con lo reportado por Rodríguez-Martínez *et al.* (2019), quienes detectaron concentraciones de amonio entre 4.6 y 8.8 $\mu\text{m/l}$ a causa de la arribazón masiva de mayo de 2018 en el Caribe mexicano.

En el medio marino generalmente encontramos proporciones equitativas de amonio en su forma molecular (NH_3) y en su forma ionizada (NH_4). La forma más toxica y letal es el NH_3 , la cual aumenta su concentración cuando incrementa la temperatura y el pH (Purwono *et al.*, 2017). En ese sentido, Gray *et al.* (2002) y Franklin y Edward (2019) determinaron que la dosis letal media de NH_3 para moluscos, peces y crustáceos varía de 0.33 a 66 mg/l.

El fosfato (PO_4) es otro de los compuestos generados a partir de la presencia de materia orgánica (sargazo) y es un indicador de que el ambiente esta eutrofizado (Andersen *et al.*, 2006). En este estudio se determinaron concentraciones de fosfato de 0.27 a 0.57 $\mu\text{m/l}$ en la zona con mayor concentración de lixiviados y de 0.20 a 1.3 $\mu\text{m/l}$ en aquellas zonas con poca influencia del lixiviado. Los valores registrados en este estudio, son bajos en comparación con lo reportado por Rodríguez-Martínez *et al.* (2019) quienes detectaron concentraciones de fosfato de 3.9 a 6.12 $\mu\text{m/l}$ en la arribazón de mayo de 2018 en el Caribe mexicano.

El fosfato no es un compuesto tóxico, pero si funciona como nutriente para una gran variedad de organismos fitoplanctónicos y promueve su crecimiento (Lomas *et al.*, 2014, Murrell *et al.*, 2002). Si este compuesto en conjunto con el nitrato permanecen en concentraciones elevadas (>3.03 mg/l de fosfato y >2.35 mg/l de nitrato) pueden inducir a un florecimiento algal nocivo (Jahan *et al.*, 2009) y desencadenar efectos negativos como la alteración de las redes tróficas, condiciones de hipoxia y producción de toxinas dañinas para los organismos marinos e incluso para el humano (Paerl, 1988).

Por otra parte, se ha observado en estuarios profundos ($\approx 46\text{m}$) de Escocia y en un archipiélago de Suecia, que los niveles elevados de amonio y fosfato estan relacionados con un agotamiento en la concentración de oxígeno. Esto debido a los procesos de mineralización y nitrificación que consumen el oxígeno disuelto en el medio (Balls, 1992, Selmer y Rydberg, 1993).

En este estudio se evaluaron los Sólidos Disueltos Totales (SDT) como posibles indicadores del efecto del sargazo en la calidad del agua. Para la región del Caribe no existen estudios

con los cuales se pudiera hacer comparaciones. De acuerdo con los resultados, se identificaron concentraciones promedio de SDT entre 35.50 y 37.59 g/l en la zona con sargazo acumulado. Mientras que en la zona con efecto de lixiviados pero sin el alga concentrada, se reportaron valores promedio de 36.47 a 36.84 g/l. Por lo cual, las zonas no fueron significativamente diferentes entre sí ($F=0.83$, $p_{0.05}=0.3667$). Estos valores entran dentro del rango de SDT establecido para el agua marina (30-40 mg/l) (Cheremisinoff, 2002). Esto indica que el sargazo y los lixiviados que desprende no promueven un incremento de los SDT. Esto se debe a que el sargazo genera compuestos como el NH_4 , H_2S y PO_4 , mientras que los SDT están compuestos por elementos como Cl, Na, Mg, K, CO_3 , SO_4 , Ca, Mg, entre otros (Weber-Scannell y Duffy, 2007).

De forma general, los parámetros que presentaron cambios por la presencia del sargazo y afectaron negativamente la calidad del agua de la laguna arrecifal de Mahahual, Xcalak y Xahuayxol fueron el pH, el oxígeno disuelto, el amonio y el fosfato.

Xcalak y Mahahual presentaron una mayor reducción en el pH y concentraciones de amonio más altas en relación con Xahuayxol (Tabla 6). En estos sitios se registraron valores promedio de pH de 7.72 a 7.95 en las áreas con mayor efecto de los lixiviados. Esto reflejó una reducción en este parámetro, ya que comúnmente se reportan concentraciones de pH entre 8.3 y 8.6 en condiciones libres del alga para esta zona (Torres-Álvarado y Calva-Benítez, 2012).

En cuanto al amonio se reportaron las concentraciones promedio más altas en Xcalak y Mahahual (1.96 y 2.59 $\mu\text{m/l}$, respectivamente) en aquellas zonas con mayor efecto de los lixiviados. Estos valores excedieron lo que comúnmente se registra en esta región (0.03-0.24 $\mu\text{m/l}$) (Almazán-Becerril *et al.*, 2014).

Por otra parte, Xahuayxol y Xcalak registraron mayores concentraciones de fosfato que en Mahahual (Tabla 6). Se reportaron valores de 0.24 a 1.3 $\mu\text{m/l}$ en aquellas zonas con impacto de los lixiviados. Estas concentraciones sobrepasan lo que generalmente se reporta para esta región (0.32-0.57 $\mu\text{m/l}$) (Torres-Alvarado y Calva-Benítez, 2012, Almazán-Becerril *et al.*, 2014).

En todas las localidades se observó que las concentraciones de oxígeno disuelto fueron afectadas. Se detectó un rango de valores promedio entre 0.05 mg/l a 4.1 mg/l. Se ha reportado que niveles de oxígeno bajos son capaces de afectar a la fauna marina ya que que a concentraciones menores 4.0 mg/l se altera su metabolismo y fisiología, mientras que valores menores a 2.0 mg/l pueden provocar la muerte (Vaquer-Sunyer y Duarte, 2008).

Este estudio provee de datos de calidad del agua colectados en campo en zonas con presencia de sargazo y lixiviados del mismo. De igual forma, se recomienda a las autoridades y pobladores de Xcalak, Mahahual y Xahuayxol hacer una recolección continua de sargazo en sitios aledaños a la playa y en construcciones artificiales (ej. muelles o escolleras) donde se acumule el alga. Cabe mencionar que es importante considerar el monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua para tener una mejor interpretación del efecto del sargazo en la salud ambiental de estos sitios. Es importante prevenir a la población de que grandes arribazones tienen un potencial impacto ecológico y ambiental lo cual también esta asociado con efectos negativos a nivel económico.

9. CONCLUSIONES

La clase sargazo fue correctamente clasificada y la estimación de su cobertura es confiable debido a que la exactitud general (overall accuracy) y el parámetro Khat se encontraron dentro del rango que la literatura señala como aceptable. Los errores de comisión y de omisión para la clase sargazo fueron similares a lo reportado en otros estudios.

Los gráficos de dispersión elipsoidal, de respuesta espectral y las estadísticas de clasificación muestran cierta similitud espectral entre la clase mar y la clase sargazo. Esto se atribuye a que la densidad y tamaño de los parches de sargazo en el pixel son poco dominantes ocasionando respuestas espectrales similares. Además, los valores de reflectancia en la banda roja son similares entre la clase mar y la clase sargazo.

La arribazón de sargazo fue mayor en 2019 que en 2018. Ya que en 2019 se registró una cobertura de 137.01 km² y en 2018 de 119.09 km².

Los meses con mayor cobertura de sargazo fueron julio, agosto, septiembre y diciembre de 2018 y enero, febrero y marzo de 2019. Esto concuerda con que durante los meses de verano (julio, agosto y septiembre) se establece la NECC que permite que el sargazo se acumule y además en esta época aumenta la descarga de nutrientes de los ríos Amazonas, Congo y Orinoco, por lo cual incrementa la biomasa del alga. Mientras que en invierno y primavera (diciembre, enero y marzo), la disminución de las temperaturas superficiales y las surgencias de la costa este de África, contribuyen a la proliferación de sargazo.

La cobertura de sargazo de la escena 018-047 fue aproximadamente 10 veces mayor que la de la escena 019-047. Por lo tanto de una escena a otra disminuyó la cobertura del alga entre un 80-95%. Esto puede ser el resultado de una reversión en el flujo de la corriente que viaja en dirección sur en la zona de Bancho Chinchorro y que provoca que el sargazo se aleje o disperse.

Este estudio se realizó el cálculo de la turbidez a través del cociente de las bandas roja e infrarroja de onda corta (SWIR). Esto con la finalidad de determinar el efecto del sargazo sobre este parámetro de calidad del agua. La importancia de utilizar este tipo de cálculos, es debido a que resultan más prácticos, eficaces y menos costosos.

Se registró una mayor turbidez en la escena 018-047 que en la 019-047, principalmente durante febrero, noviembre de 2018, enero y marzo 2019. Mientras que en la escena 019-047 se identificaron altos valores de turbidez durante noviembre, octubre y diciembre de 2018, así como enero y marzo de 2019.

El modelo de regresión de la escena 019-047 mostró que la variable cobertura de sargazo tiene un alto porcentaje de explicación (80%) sobre el aumento de la turbidez. Probablemente, porque esta escena cubre menor área y una zona más cercana a la costa que permite que se concentre el efecto del alga. Por otra parte, el modelo de regresión de la escena 018-047 permitió identificar que la variable cobertura de sargazo tiene un bajo porcentaje de explicación (47%) sobre el aumento de la turbidez. Posiblemente, porque la escena abarca mayor área y sitios más alejados de la costa que permiten que el efecto del sargazo se disipe.

En la zona donde se encontraba sargazo acumulado y una alta concentración de lixiviados se presentaron condiciones de hipoxia, debido a procesos de oxidación de la materia orgánica (sargazo), respiración aeróbica y una obstrucción del intercambio de oxígeno entre océano y atmósfera. Estas condiciones son capaces de alterar el metabolismo, la fisiología y ser letales para la fauna marina.

Se identificó una reducción del pH en los primeros 10 metros después de la playa donde encontró una mayor concentración de lixiviados y sargazo. Esto se debe a que la mineralización de la materia orgánica genera ácidos orgánicos y ácido carbónico y se liberan iones H^+ .

El uso de los SDT como un indicador del impacto del sargazo en la calidad del agua no mostró diferencias entre las zonas de muestreo. Los valores obtenidos en este estudio entraron dentro del rango de SDT establecido para el agua marina. Esto se debe a que el sargazo produce NH_4 , PO_4 y H_2S , mientras que los SDT están compuestos principalmente por Cl, Na, Mg, K, CO_3 , SO_4 , Ca y Mg.

De forma general, el amonio, el pH, el oxígeno disuelto y el fosfato fueron las variables que mostraron los mayores cambios ante la presencia del sargazo.

Xcalak y Mahahual registraron una mayor reducción del pH, así como concentraciones de amonio más altas que en Xahuayxol. Los valores reportados para estos parámetros, exceden lo que comúnmente se reporta en estos sitios.

Xahuayxol y Xcalak tuvieron concentraciones de fosfato más altas que en Mahahual. Los valores reportados en estos sitios sugieren que estos presentan sistema eutrofizado y las concentraciones sobrepasan lo que comúnmente se registra para estos sitios sin la presencia de sargazo.

Se registraron condiciones de hipoxia en todos los sitios de estudio ante la presencia del sargazo, lo cual pone en riesgo a los organismos marinos debido a que su metabolismo y fisiología se ven alterados, e incluso de prevalecer estas condiciones puede provocarles la muerte.

En conjunto, el uso de herramientas de sensores remotos y la evaluación de parámetros de la calidad del agua en este estudio contribuyeron a generar información relevante sobre la presencia y el impacto del sargazo en la parte sur del Caribe mexicano, específicamente lo que se denomina la Costa Maya.

10. RECOMENDACIONES GENERALES

Ser más cuidadoso al momento de asignar los puntos de entrenamiento de las demás clases (mar, sombras y Banco) para incrementar los valores de precisión de la clasificación como son la exactitud general y el parámetro Khat.

Cuantificar la cobertura de los elementos flotantes como algas y pastos que acompañan a las arribazones de sargazo para tener una mayor precisión en el estudio.

Estimar la cobertura de sargazo en un mayor lapso de tiempo (5 años). Esto permitirá identificar los patrones de arribazón del alga y determinar si influye más la escala estacional o anual.

Hacer modelación de los vientos y corrientes en el área de estudio y en la zona de transición para determinar la causa exacta de la disipación del sargazo hacia otras regiones.

Estimar la cobertura de sargazo en zonas más próximas a la costa mediante el uso de herramientas de teledetección con mayor resolución espacial (ej.drones).

Realizar mediciones de turbidez *in situ* y compararlas con los datos obtenidos a partir de imágenes de satélite.

Analizar con mayor profundidad la relación entre la cobertura de sargazo y la turbidez. Principalmente, corroborar porque en zonas más extensas el efecto del sargazo se disipa. Y de ser posible hacer mediciones *in situ* de cobertura de sargazo y turbidez en zonas más cercanas y alejadas de la costa.

Medir nutrientes (nitritos, nitratos, fosfatos, silicatos) y temperatura antes y después de Banco Chinchorro (zona de transición donde se disipan o mantienen los manchones de sargazo) y correlacionarlos con la cobertura de sargazo. Esto nos permitirá identificar si en esa zona de transición hay características fisicoquímicas particulares que favorezcan o no la proliferación del alga.

Considerar el efecto del sargazo en la concentración de H₂S y potencial REDOX.

Medir variables fisicoquímicas (pH, potencial REDOX, NH_4 , PO_4 , H_2S y O_2 disuelto) en una mayor área de la laguna arrecifal antes, durante y después de una arribazón de sargazo.

Monitorear continuamente los parámetros de calidad del agua en otros sitios de la costa de Quintana Roo, impactados por el sargazo.

Realizar mediciones de oxígeno disuelto en un ciclo diurno para conocer el comportamiento de este parámetro ante la presencia del sargazo. Y tomar medidas de este parámetro en sitios o zonas sin la presencia del alga para posteriormente compararlo.

Medir la concentración de metales pesados y otros elementos que pueda incorporar el sargazo en sus tejidos.

Dar a conocer a la población sobre los efectos negativos que genera esta alga en el medio marino. Se recomienda a las autoridades y pobladores cercanos a la costa el hacer una recolección continua del sargazo en sitios aledaños a la playa y en construcciones artificiales (ej. muelles o escolleras).

11. REFERENCIAS

- Aguilar, D. 1998. Estructura de la comunidad bentónica del arrecife de Mahahual, Quintana Roo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. CINVESTAV, IPN. 81 p.
- Aguirre-Gómez, R. 2014. Spectral Reflectance Analysis of the Caribbean Sea. *Geofísica Internacional*. 53: 385-398.
- Almazán-Becerril, A., Abundes, M., Francisco, V., López, I., Ramos, L., Álvarez-Filip, L., Delgado-Pech, A., Escobar-Morales, S., Gómez-Campo, K., López-Lodono, T., Irola-Sansores, E.D.B. y S. Manzo. 2014. Programa de Monitoreo Biológico (PROMOBI) 2014. Informe Final. CONANP. 88 p.
- Andersen, J.H., Schlüter, L y J. Ertebjerg. 2006. Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*. 28: 621-628.
- Anderson, M.J. 2001. A new method for nonparametric multivariate analysis of variance. *Austral ecology*. (26): 32-46.
- Andersson, A. 2017. Air-sea exchange of O₂ and CO₂. Processes controlling the transfer efficiency. Uppsala University. Suecia. 42 p.
- Antonio-Martínez, F., Henaut, Y., Vega-Zepeda, A., Cerón-Flores, A.I., Raigoza-Figueras, R., Cetz-Navarro, N.P. y J. Espinoza-Ávalos. 2020. Leachate effects of pelagic *Sargassum* spp. on larval swimming behavior of the coral *Acropora palmata*. *Scientific Reports*. 10: 3910.
- Aranda-Cirerol, N., Herrera-Silveira, J.A. y F.A. Comín. 2006. Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatan, Mexico. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 68: 445-454.
- Arellano-Verdejo, J., Lazcano-Hernández, H.E. y N. Cabanillas-Terán. 2019. ERISNet: Deep Learning Network for *Sargassum* Detection along the Coastline of the Mexican Caribbean. *PeerJ*: 2-19.
- Ariza, A. 2013. Productos LDCM – Landsat 8. Centro de Investigación y Desarrollo, CIAF, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://www.unspider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>.
- Babu, M.J., Gheeta, P. y K.P. Soman. 2016. MODIS-Aqua Data based detection and Classification of Algal Blooms along de Coast of India using RLS Classifier. *Procedia Computer Science*. 93: 424-430.

- Balls, P.W. 1992. Nutrient behaviour in two contrasting Scottish estuaries, the Forth and Tay. *Oceanologica Acta*. 15(3): 261-278.
- Barrett, D. C. y A.E. Frazier. 2016. Automated Method for Monitoring Water Quality Using Landsat Imagery. *Water*. 8(6): 257.
- Bravo-Morales, N.F. 2017. Teoría de Teledetección espacial Landsar, Sentinel 2, Aster L1T y MODIS. Geomática Ambiental SRL. Perú. 105 p.
- Bula-Meyer, G. 2004. Las macroalgas marinas en agronomía y el uso potencial del *Sargassum* flotante en la producción de fertilizantes en el archipiélago San Andrés y Providencia Colombia. *Revista Intertropical*. 91-103.
- Butler, J. N., Morris, B.F., Cadwallader, J y A. W. Stoner. 1983. Studies of *Sargassum* and the *Sargassum* community. Bermuda Biological Station Special Publ. No. 22. 307 p.
- Caballero, I., Stumpf, R.P. y A Meredith. 2019. Meredith. Preliminary Assessment of Turbidity and Chlorophyll Impact on Bathymetry Derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A Satellites in South Florida. *Remote Sensing*. 645: 2-20.
- Cabanillas-Terán, N., Hernández-Arana, H.A., Ruiz-Zarate, M.A., Vega-Zepeda, A y A. Sánchez-González. 2019. *Sargassum* blooms in the Caribbean alter the trophic structure of the sea urchin *Diadema antillarum*. *PeerJ*. 7:75-89.
- Camarena-Luhrs, T. y S. I. SalazarVallejo. 1991. Área de estudio, Capítulo 2. Estudios ecológicos preliminares de la zona Sur de Quintana Roo. CIQRO, Chetumal, México, 231 p.
- Cetina, P., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J. y A. Badan. 2006. Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research*. 111: 8-21.
- Cheremisinoff, N.P. 2002. Handbook of Water and Wastewater. Treatment Technologies. Pollution Engineering. USA. 636 p.
- Chauhan, P., Sahay, A., Rajawat, A.S. y S. Nayak. 2003. Remote sensing of diffuse attenuation coefficient using IRS-P4 Ocean Colour Monitor (OCM) sensor. *Indian Journal of Marine Sciences*. 32: 279-284.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement of nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. 20: 37-46.
- CONANP. 2004. Programa de manejo Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. Jaras Impresores, México. 162 p.

- CONAGUA. 2018. Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvias. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.
- Congalton, R., Oderwald, R. y R. Mead. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 49(12):1671–1678.
- Congalton, R.C. y K. Green. 2002. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices Mapping Science. Ilustrada. Florida, U.S.A. 160 p.
- Constantine, S., Constantinescu, S. y D. Doxaran. 2017. Long-term analysis of turbidity patterns in Danube Delta coastal area based on MODIS satellite data. *Journal of Marine Systems*. 170: 10-21.
- Corrales-Andino, R.E. y V. Ochoa-López. 2016. Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *Revista Ciencias Espaciales*. 9: 81-96.
- Coston-Clements, L., Settle, L.R., Hoss, D.E. y F.A. Cross. 1991. Utilization of the *Sargassum* habitat by marine invertebrates and vertebrates- a review. NOAA Technical Memorandum. NMFS-SEFSC-296. 30 p.
- Crippen, R. 1990. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*. 34: 71-73.
- Cuevas, E., Uribe-Martínez, A. y M.D.L.Á. Liceaga-Correa. 2018. A satellite remote-sensing multi-index approach to discriminate pelagic *Sargassum* in the waters of the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*. 39(11):3608-3627.
- Daltabuit Godás, M., Cisneros Reyes, H.B. y E. Valenzuela Valdivieso. 2007. Globalización y Sustentabilidad: El turismo en el sur de Quintana Roo. UNAM. Cuernavaca, Morelos. 165 p.
- Dawes, C.J. y A.C. Mathieson. 2008. The seaweeds of Florida. Gainesville. University Press of Florida. USA. 592 p.
- De Jong, S. M. y F.D. Van der Meer. 2005. Remote Sensing Image Analysis: including the spatial domain. Kluwer Academic Publishers. New York. 359 p.
- Dierssen, H.M., Clhus, A. y B. Russell. 2015. Hyperspectral discrimination of floating mats of seagrass wrack and the macroalgae *Sargassum* in coastal waters of Greater Florida Bay using airborne remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 167: 247-258.

- Doyle, E. y J. Franks. 2015. *Sargassum* is an emerging issue on the coasts of the Wider Caribbean. Disponible en: https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/1269/gcfisargassumfactsheet_2015-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Erickson, E., Wakao, S. y K.K. Niyogi. 2015. Light stress and photoprotection in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Journal*. 82: 449–465.
- Ernst, A.F. y C.J. Albers. 2017. Regression assumptions in clinical psychology research practice-a systematic review of common misconceptions. *PeerJ*. 16: 33-23
- Fabricius, K.E., De'ath, G., McCook, L., Turak, E., y DMcB Williams. 2005. Changes in algal, coral and fish assemblages along water quality gradients on the inshore Great Barrier Reef. *Marine Pollution Bulletin*. 51:384–398.
- Farooqui, Z., Siddiqui, P.Z. y M. Rasheed. 2014. Changes in Organic, Inorganic contents, Carbon Nitrogen ratio in decomposing *Avicennia marina* and *Rhizophora mucronata* leaves on tidal mudflats in Hajambro Creek, Indus Delta, Pakistan. *The Journal of Tropical Life Science*. 4: 37-45.
- Fernández, F., Boluda, C.J., Olivera, J., Guillermo, L.A., Gómez, B., Echavarría, E. y A. Mendis Gómez. 2017. Análisis elemental prospectivo de la biomasa algal acumulada en las costas de la República Dominicana durante 2015. *Revista Centro Azúcar*. 44: 11-22.
- Ferreira, C.E.L., De Oliveira Ribeiro Junqueira, A., Villac, M.C. y R.M. Lopes. 2009. Marine bioinvasions in the brazilian coast: brief report on history of events, vectors, ecology, impacts and management of non-indigenous species. In: Rilov G, Crooks JA, eds. Biological invasions in marine ecosystems: ecological, management, and geographic perspectives. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. 459-477.
- Ferreira, A. 2016. La observación de la Tierra desde el espacio. Imágenes satelitales: Un recurso disponible. *RTA*. 10 (31): 57-61.
- Filter, J., Jekel, M. y A.S. Ruhl. 2017. Impacts of Accumulated Particulate Organic Matter on Oxygen Consumption and Organic Micro-Pollutant Elimination in Bank Filtration and Soil Aquifer Treatment. *Water*. 9: 1-12.
- Franklin, D.A. y L.L. Edward. 2019. Ammonia toxicity and adaptive response in marine fishes-A review. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*. 48: 273:279.
- Franks, J. S., Johnson, D.R. y D. S. Ko. 2016. Pelagic *Sargassum* in the Tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*. 27 (1): 6-11.

- Gower, J. y S. King. 2008. Satellite images show the movement of floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico and Atlantic Ocean. *Nature Precedings*. 8: 1-6.
- Gower, J.F.R. y S.A. King. 2011. Distribution of floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean mapped using MERIS. *International Journal of Remote Sensing*. 32: 1917-1929.
- Gray, J.S., Shi-sun Wu, R. y Y.Y. Or. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Marine Ecology Progress Series*. 238: 249-279.
- Guiry, M.D. y G.M. Guiry. 2011. AlgaeBase: world-wide electronic publication. Galway: National University of Ireland. Disponible en: <http://www.algaebase.org/>.
- Gunasekara, K., Tajima, Y., Higashi, R., Chi, L.H. y H.V. Cuong. 2016. Satellite-based Monitoring of Behavior of Fine Sediment Discharged from Rivers. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*. 72: 1753-1758.
- Hernández-Arana, H. 2010. Caracterización del ANP Parque Nacional Arrecifes de Xcalak y formulación de un programa de monitoreo. El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Chetumal. Informe final SNIBCONABIO proyecto No. DM015. México D. F. 142 p.
- Hernández-Arana, H.A., Vega-Zepeda, A., Ruíz-Zárate, M.A., Falcón-Álvarez, L.I., López-Adame, H., Herrera-Silveira, J. y J. Kaster. 2015. Transverse coastal corridor: from freshwater lakes to coral reefs ecosystems. In: Islebe, G.A., Calmé, S., León Cortés, J., Schmook, B., eds. Biodiversity and conservation of the Yucatán Peninsula. Cham.Springer, 355-376 p.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A. y E. Monroy-Ríos. 2011. Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1): 517-528.
- Herrera-Silveira, J. A., Martin, M.B. y V. Díaz-Arce. 1999. Variation of phytoplankton in four coastal lagoons of Yucatan State, Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 47: 37-46.
- Hintze, J. L. y R.D. Nelson. 1998. Violin plots: A box plot-density trace synergism. *American Statistician*. 52 (2): 181-184.
- Hoang, T.C., Cole, A.J., Fotedar, R.K., O'Leary, M.J. y M.W. Lomas. 2016. Seasonal changes in water quality and *Sargassum* biomass in southwest Australia. *Marine Ecology Progress Series*. 551: 63-79.
- Hoang T.C., O'Leary, M.J. y R.V. Fotedar. 2016. Remote-Sensed Mapping of *Sargassum* spp. Distribution around Rottneest Island, Western Australia, Using High-Spatial

- Resolution WorldView-2 Satellite Data. *Journal of Coastal Research*. 32 (6): 1320-1321.
- Hu, C., Feng, L., Hardy, R.F. y E.J. Hochberg. 2015. Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic *Sargassum* macroalgae. *Remote Sensing of Environment*. 167: 229-246.
- Hu, C., Murch, B., Barnes, B.B., Wang, M., Maréchal, J.P., Franks, J., Johnson, D., Lapointe, B.E., Goodwin, D., Schell, J. y A. Siuda. 2016. *Sargassum* watch warns of incoming seaweed. *EOS*. 97:10–15.
- Huovinen, P, Ramírez, J. y I. Gómez. 2018. Remote sensing of albedo-reducing snow algae and impurities in the Maritime Antarctica. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 146: 507-517.
- Hurka, M. 1971. Factors influencing the gas composition in the vesicles of *Sargassum*. *Marine Biology*. 11:82-89.
- Janas, U. y A. Szaniawska. 1996. The influence of hydrogen sulphide on macrofaunal biodiversity in the Gulf of Gdansk. *Oceanologia*. 38: 127-142.
- Jahan, R., Kahan, S., Haque, M.M. y J.K. Choi. 2009. Study of harmful algal blooms in a eutrophic pond, Bangladesh. *Environmental monitoring and assessment*. (1-4): 7-21.
- Johns, E.M., Lumpkin, R., Putman, N.F., Smith, R.H., Muller-Karger, F.E., Rueda-Roa, D.T., Hu, C., Wang, M., Brooks, M.T., Gramer, L.J. y F.E. Werner. 2020. The establishment of a pelagic *Sargassum* population in the tropical Atlantic: Biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event. *Progress in Oceanography*. 182: 22-69
- Johnson, D.R., Dong, K.O, Franks, J., Moreno, P. y G. Sánchez-Rubio. 2013. The *Sargassum* Invasion of the Eastern Caribbean and Dynamics of the Equatorial North Atlantic. *Proceedings of the 65th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*. 102-103.
- Kloiber, S.M., Brezonik, P.L. y M.E. Bauer. 2002. Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*. 36: 4330-4340.
- Korhonen, L.K., Macías-Carranza, V., Abdala, R., Figueroa, F.L. y A. Cabello-Pasini. 2012. Efecto de la concentración del sulfuro, pH y anoxia sobre la fotosíntesis y respiración de *Zostera marina*. *Ciencias Marinas*. 38: 625-633.
- Krachler, R.F., Krachler, R., Stojanovic, A., Weilandner, B. y A. Herzig. 2009. Effects of pH on aquatic biodegradation processes. *Biogeosciences Discuss*. 6: 491-514.

- Laffoley, D.D.A. 2011. The Protection and Management of the Sargasso Sea: The Golden Floating Rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case, Sargasso Sea Alliance. 44 p.
- Landis, J. R. y G. G. Koch. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 33: 159-174.
- Lasquites J.J., Blanco, A. y A. Tamondong. 2019. Mapping of *Sargassum* distribution in the Eastern coast of Southern Leyte using sentinel 2 satellite imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42: 289-294.
- Littler, D.S. y M.M. Littler. 2000. Caribbean reef plants. Washington: OffShore Graphics. 542 p.
- Li, J., Liu, Y., Liu, Y., Wang, Q., Gao, X. y Q. Gong. 2019. Effects of temperature and salinity on the growth and biochemical composition of the brown algae *Sargassum fusiforme* (Fucales, Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology*. 31: 3061-3068.
- Lomas, M.W., Bonachela, J.A., Levin, S.A. y A.C. Martiny. 2014. Impact of ocean phytoplankton diversity on phosphate uptake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 111: 17540-17545.
- López, C.B., Dortch, Q., Jewett, E.B. y D. Garrison. 2008. Scientific assessment of Marine Harmful Algal Blooms. Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology. Washington, D.C. 62 p.
- López-Jiménez, L.N. 2016. Conservación en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak. *Teoría y Praxis*. 21: 9-30.
- López, J.M., Morrel, J., Corredor, J.E. y C.E. Del Castillo. 2013. Influence of the Orinoco River on the primary production of eastern Caribbean surface waters. *Journal of Geophysical Research*. 118: 4617-4632.
- Louime, C., Fortune, J. y G. Gervais. 2017. *Sargassum* Invasion of Coastal Environments: A Growing Concern. *American Journal of Environmental Sciences*. 13 (1): 58-64.
- Manrique, E. 2003. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*. 1: 1-11.
- Manzella, S. y J. Williams. 1991. Juvenile head-started Kemp's ridleys found in floating grass mats. *Mar Turtle Newsletter*. 52:5-6

- Maréchal, J.P., Hellio, C. y C. Hu. 2017. A simple, fast, and reliable method to predict *Sargassum* washing ashore in the Lesser Antilles. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 5:54-63.
- McGill, R., Tukey, J. y W.A. Larsen. 1978. Variations of boxplots. *American Statistician*, 32 (1): 12-16.
- Méndez-Tejeda, R. y G.A. Rosado Jiménez. 2019. Influence of climatic factors on *Sargassum* arrivals to the coasts of the Dominican Republic. *Journal of Oceanography and Marine Science*. 10 (2): 22-32.
- Milledge, J.J. y P.J. Harvey. 2016. Golden Tides: Problem or golden opportunity? The valorisation of *Sargassum* from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*. 4:60.
- Mishra, D.R., Narumalani, S., Rundquist, D. y M. Lawson. 2005. High Resolution Ocean Color Remote Sensing of Benthic Habitats: A Case Study at Roatan Island, Honduras. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 43: 1592-1604.
- Muller, K.F., Richardson, P. y D. McGillicuddy. 1995. On the offshore dispersal of the Amazon's Plume in the North Atlantic. *Deep-Sea Research I*. 42: 2127-2137.
- Murrell, M.C., Stanley, R.S., Lores, E.M., DiDonato, G.T., Smith, L.M. y D.A. Flemer. 2002. Evidence that phosphorus limits phytoplankton growth in a Gulf of Mexico estuary Pensacola Bay, FL, USA. *Bulletin of Marine Science*. 70: 155-167.
- Murphy, J. y J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*. 27:31-36.
- NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Analysis for Annual 2015. (2016). Disponible en: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513>.
- Noiraksar, T., Sawayama, S., Phauk, S. y T. Komatsu. 2014. Mapping *Sargassum* beds off the coast of Chon Buri Province, Thailand, using ALOS AVNIR-2 satellite imagery. *Botanica Marina*. 57 (5): 367-377.
- Núñez-Lara, E., Arias-González, J.E. y P. Legendre. 2005. Spatial patterns of Yucatan reef fish communities: Testing models using a multi-scale survey design. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 324: 157-169.
- Núñez-Lara, E., González-Salas, C., Ruiz-Zárate, M.A. Hernández-Landa R.C. y J.E. Arias-González. 2003. Condition of coral reef ecosystems in central-southern Quintana Roo (Part 2: Reef fish communities). *Atoll Research Bulletin*. 496: 338-358.

- Núñez-López, R. A. y M.M Casas-Valdéz. 1996. Fenología de las especies de *Sargassum* (Fucales: Sargassaceae) en tres zonas de Bahía Concepción, B. C. S., México. *Revista de Biología Tropical*. 44 (2): 455-464.
- Olaya, V. 2012. Sistemas de información geográfica. SEXTANTE. España. 476 p.
- Paerl, H.W. 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnology and Oceanography*. 33: 823–847.
- Paytan, A y K McLaughlin. 2007. The Oceanic Phosphorus Cycle. *Chemical Reviews*. 107: 563-576.
- Purwono, A.R., Hibban. M y M.A. Budiharjo. 2017. Ammonia-Nitrogen (NH₃-N) and Ammonium-Nitrogen (NH₄⁺ -N) Equilibrium on The Process of Removing Nitrogen By Using Tubular Plastic Media. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8: 4915-4922.
- Pendleton, L., Krowicki, F., Strosser, P. y J. Hallett-Murdoch. 2014. Assessing the economic contribution of marine and coastal ecosystem services in the Sargasso Sea. Duke University. 30 p.
- Phlips, E.J., Willis, M. y A. Verchick. 1986. Aspects of nitrogen fixation in *Sargassum* communities off the coast of Florida. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 102: 99–119.
- Putman, N.F., Goni, G.J., Gramer, L.J., Hu, C., Johns, E.M., Trinanes, J. y M. Wang .2018. Simulating transport pathways of pelagic *Sargassum* from the equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Progress in Oceanography*. 165: 205– 214.
- Qian, W., Dai, M., Xu, M., Kao, S.-j., Du, C., Liu, J., Wang, H., Guo, L. y L. Wang. 2017. Non-local drivers of the summer hypoxia in the East China Sea off the Changjiang Estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 198: 393-399.
- Quang, N.H., Sasaki, J., Higa, H. y N.H. Huan. 2017. Spatiotemporal Variation of Turbidity Based on Landsat 8 OLI in Cam Ranh Bay and Thuy Trieu Lagoon, Vietnam. *Water*. 570: 1-25.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rabalais, N., Cai, W.J., Carstensen, J., Conley, D., Fry, B., Hu, X., Quiñones-Rivera, Z., Rosenberg, R., Slomp, C., Turner, E., Voss, M., Wissel, B. y J. Zhang. 2014 Eutrophication-Driven Deoxygenation in the Coastal Ocean. *Oceanography*. 27:172-183.

- Richardson, P. L. y G. Reverdin. 1987. Seasonal cycle of velocity in the Atlantic North Equatorial Countercurrent as measured by surface drifters, current meters, and ship drifts. *Journal of Geophysical Research*. 92: 3691-3708.
- Riley, J.P. 1953. The Spectrophotometric determination of ammonia in natural water with particular reference to seawater. *Analytica Chimica Acta*. 9: 575-589.
- Robledo, D. y E. Vásquez-Delfín. 2019. Sargazo, conociendo al “Enemigo”. 2019. *Revista Avance y Perspectiva*. 5 (3).
- Rodríguez-Juárez, L.A. 2011. $\delta^{15}\text{N}$ en *Thalassia testudinum* como indicador de impacto antropogénico en la región costera de Mahahual, Quintana Roo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. CICIMAR-IPN. 53 p.
- Rodríguez-Martínez, R.E., Medina-Valmaseda, A.E., Blanchon, P., Monroy-Velásquez, L.V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, P., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V. y M.C. García-Rivas. 2019. Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*. *Marine Pollution Bulletin*. 146: 201-205.
- Rodríguez-Martínez, R.E., Roy, P.D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carillo-Domínguez, S., Collado-Vides, S., García-Sánchez, M. y B.I. van Tussenbroek. 2020. Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*. 8: 1-19.
- Rodríguez-Martínez, R.E., Ruíz-Rentería, F., van Tussenbroek, B., Barba-Santos, G., Escalante-Mancera, E., Jordán-Garza, G. y E. Jordán-Dahlgren. 2010. Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 58:23-43.
- Rodríguez-Martínez, R.E., van Tussenbroek, B. y E. Jordán-Dahlgren. 2016. Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano (2014-2015). *Caribe Mexicano*. 353-357 p.
- Rodríguez-Vera, G., Romero-Centeno, R., Castro, C.L. y V. Mendoza-Castro. 2019. Coupled Interannual Variability of Wind and Sea Surface Temperature in the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico. *Journal of Climate*. 32: 4263-4280.
- Rosenberg, J. L. y M. Gasko. 1983. Comparing location estimators: Trimmed means, medians, and trimean. In D. C. Hoaglin, F. Mosteller, and J. W. Tukey (Eds.), *Understanding robust and exploratory data analysis* 297-338 pp. N.Y.: Wiley.
- Rowe, G.T. y N. Staresinic. 1979. Sources of organic matter on the deep sea benthos. *Ambio Special Report*. 6: 19-23.

- Salisbury, J., Vandemark, D., Campbell, J., Hunt, C., Wisser, D., Reul., N. y B. Chapron. 2011. Spatial and temporal coherence between Amazon river discharge, salinity and light absorption by colored organic carbon in western tropical Atlantic surface waters. *Journal of Geophysical Research*. 116: 1-14.
- Schmitter-Soto, J.J., Aguilar-Perera, A., Cruz-Martínez, A., Herrera-Pavón, R.L., Morales-Aranda, A.A. y D. Cobian-Rojas. 2018. Interdecadal trends in composition, density, size, and mean trophic level of fish species and guilds before and after coastal development in the Mexican Caribbean. *Biodiversity and Conservation*. 27:459–474.
- Shi, K., Zhang, Y., Liu, X. Wang, M. y B. Qin. 2014. Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data. *Remote Sensing of Environment*. 140: 365-377.
- Selmer, J.S. y L Rydberg. 1993. Effects of nutrient discharge by river water and waste water on the nitrogen dynamics in the archipeligo of Goteborg, Sweden. *Marine Ecology Progress Series*. 92: 119-133.
- Sima-Morales, L. 2004. Hidrología y estado trófico de lagunas costeras del Caribe Mexicano: Aportes de nutrientes de diferentes fuentes. Tesis de Maestría en Ciencias. CINVESTAV IPN, Mérida. 92 p.
- Smetacek, V. y A. Zingone. 2013. Green and Golden seaweed tides on the rise. *Nature*. 504: 84-88.
- Sosa-Cordero, E., Ramírez-González, A., Olivares-Escobedo, J., Cohuó-Collí, J., Mercadillo-Elguero, M.I., Quintal-Lizama, C. 2009. Programa de Ordenamiento Pesquero en el Estado de Quintana Roo. CONANP-SAGARPA. Chetumal, Quintana Roo.
- Stoner, A.W. 1983. Pelagic *Sargassum*: evidence for a major decrease in biomass. *Deep-Sea Research Part A*. 30: 469–474.
- Strickland, J. D. H. y T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada. 2ª edición. Bulletin 167. 310 p.
- Torres-Alvarado, M.R. y L.G. Calva-Benítez. 2012. Nutrientes en arrecifes de coral, un caso de estudio. *ContactoS*. 85: 42-50.
- Uhl, F., Barscht, I. y N. Oppelt. 2016. Submerged Kelp Detection with Hyperspectral Data. *Remote Sensing*. 8: 1-20.
- Ulman, D.S., Cornillon, P.C. y S. Zhan. 2007. On the characteristics of subtropical fronts in the North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*. 112:1-16.

- Valesco, A., 2015. Sargazo invade el Caribe: ¿Qué es y cómo se combate? El Financiero, Mexico. Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/sargazoinvade-el-caribe-que-es-y-como-se-combate.html>.
- van Tussenbroek, B.I., Hernández Arana, H.A., Rodríguez-Martínez, R.E., Espinoza-Ávalos, J., Canizales-Flores, H.M., González-Godoy, C.E., Barba-Santos, M.G., Vega-Zepeda, A. y L. Collado-Vides. 2017. Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*. 122: 272-281.
- Vaquer-Sunyer, R. y C. Duarte. 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 105 (40): 15452-15457.
- Varona, H.L., Veleda, D., Silva, M., Cintra, M. y M. Araujo. 2019. Amazon River plume influence on Western Tropical Atlantic dynamic variability. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 85: 1-15.
- Wang, M. y C. Hu. 2016. Mapping and quantifying *Sargassum* distribution and coverage in the Central West Atlantic using MODIS observation. *Remote Sensing of Environment*. 183: 350-367.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B.B., Mitchum, G., Lapointe, B. y J.P. Montoya. 2019. The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science*. 365: 83-87.
- Wang, M., Hu, C., Cannizzaro, J., English, D., Han, X., Naar, D., Lapointe, B., Brewton, R. y F. Hernandez. 2018. Remote sensing of *Sargassum* biomass, nutrients, and pigments. *Geophysical Research Letters*. 22:12-359
- Webster, R.K. y T. Linton. 2013. Development and implementation of *Sargassum* Early Advisory System (SEAS). *Shore & Beach*. 81: 1-6.
- Weber-Scannell, P.K. y L.K. Duffy. 2007. Effects of Total Dissolved Solid son Aquatic Organisms. A Review of Literature and Recommendation for Salmonid Species. *American Journal of Environmental Science*. 3: 1-6.
- Weiner, E.R. 2010. Applications of Environmental Chemistry. CRC Press. USA. 288 p.
- Wu, H.P., Lim, S.J., Wan, A.W., Mohamad, Y.M. y S. Mamot. 2014. Characterisation and Satability of Pigments Extracted from *Sargassum binderi* obtained from Semporna, Sabah. *Sains Malaysiana*. 43: 1345-1354.
- Zaniewski, K. (2001). Plasmic fabric analysis of glacial sediments using quantitative image analysis methods and GIS techniques. University of Amsterdam. Amsterdam. 67-92 p.

12. ANEXO

Lista de imágenes clasificadas.

Escena 018-047

LC08_L1GT_018047_20180203_20180220_01_T2.
LC08_L1GT_018047_20180307_20180320_01_T2.
LC08_L1GT_018047_20180424_20180502_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20180611_20180615_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20180713_20180730_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20180729_20180814_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20180830_20180911_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20180915_20180928_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20181220_20181227_01_T2.
LC08_L1GT_018047_20190105_20190130_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20190206_20190221_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20190326_20190403_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20190411_20190422_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20190427_20190508_01_T1.
LC08_L1GT_018047_20190513_20190521_01_T1

Escena 019-047

LC08_L1TP_019047_20180109_20180119_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20180226_20180308_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20180704_20180717_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20180821_20180829_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20180906_20180912_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20181024_20181031_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20181109_20181127_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20181227_20180129_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20190112_20190131_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20190128_20190206_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20190317_20190325_01_T1.
LC08_L1TP_019047_20191011_20191018_01_T1.

Tabla 8. Matrices de error-confusión escena 019-047.

Escena 019-047-2018						Escena 019-047-2019																																																																																									
9 de enero de 2018						12 de enero de 2019																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>23</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>23</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>7</td> <td>0</td> <td>7</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>4</td> <td>0</td> <td>530</td> <td>534</td> <td>99.25%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>27</td> <td>7</td> <td>530</td> <td>564</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>85.19%</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	23	0	0	23	100.00%	SOMBRAS	0	7	0	7	100.00%	MAR	4	0	530	534	99.25%	Total	27	7	530	564		Accuracy	85.19%	100.00%	100.00%			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>68</td> <td>28</td> <td>0</td> <td>96</td> <td>70.83%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>742</td> <td>0</td> <td>742</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>830</td> <td>830</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>68</td> <td>770</td> <td>830</td> <td>1668</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>100.00%</td> <td>96.36%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	68	28	0	96	70.83%	SOMBRAS	0	742	0	742	100.00%	MAR	0	0	830	830	100.00%	Total	68	770	830	1668		Accuracy	100.00%	96.36%	100.00%		
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	23	0	0	23	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	7	0	7	100.00%																																																																																										
MAR	4	0	530	534	99.25%																																																																																										
Total	27	7	530	564																																																																																											
Accuracy	85.19%	100.00%	100.00%																																																																																												
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	68	28	0	96	70.83%																																																																																										
SOMBRAS	0	742	0	742	100.00%																																																																																										
MAR	0	0	830	830	100.00%																																																																																										
Total	68	770	830	1668																																																																																											
Accuracy	100.00%	96.36%	100.00%																																																																																												
Overall Accuracy = 99.29% Khat Statistic = 93.44%						Overall Accuracy = 98.32% Khat Statistic = 96.92%																																																																																									
26 de febrero de 2018						28 de enero de 2019																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>44</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>44</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>92</td> <td>0</td> <td>92</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>497</td> <td>502</td> <td>99.00%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>47</td> <td>94</td> <td>497</td> <td>638</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>93.62%</td> <td>97.87%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	44	0	0	44	100.00%	SOMBRAS	0	92	0	92	100.00%	MAR	3	2	497	502	99.00%	Total	47	94	497	638		Accuracy	93.62%	97.87%	100.00%			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>42</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>42</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>75</td> <td>0</td> <td>75</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>29</td> <td>0</td> <td>675</td> <td>704</td> <td>95.88%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>71</td> <td>75</td> <td>675</td> <td>821</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>59.15%</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	42	0	0	42	100.00%	SOMBRAS	0	75	0	75	100.00%	MAR	29	0	675	704	95.88%	Total	71	75	675	821		Accuracy	59.15%	100.00%	100.00%		
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	44	0	0	44	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	92	0	92	100.00%																																																																																										
MAR	3	2	497	502	99.00%																																																																																										
Total	47	94	497	638																																																																																											
Accuracy	93.62%	97.87%	100.00%																																																																																												
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	42	0	0	42	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	75	0	75	100.00%																																																																																										
MAR	29	0	675	704	95.88%																																																																																										
Total	71	75	675	821																																																																																											
Accuracy	59.15%	100.00%	100.00%																																																																																												
Overall Accuracy = 99.22% Khat Statistic = 97.83%						Overall Accuracy = 96.47% Khat Statistic = 87.48%																																																																																									
4 de julio de 2018						17 de marzo de 2019																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>15</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>15</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>0</td> <td>31024</td> <td>1</td> <td>31025</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>848</td> <td>848</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>15</td> <td>31024</td> <td>849</td> <td>31888</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td>99.88%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	15	0	0	15	100.00%	MAR	0	31024	1	31025	100.00%	SOMBRAS	0	0	848	848	100.00%	Total	15	31024	849	31888		Accuracy	100.00%	100.00%	99.88%			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>34</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>34</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>146</td> <td>152</td> <td>3.95%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>12</td> <td>0</td> <td>624</td> <td>636</td> <td>98.11%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>46</td> <td>6</td> <td>770</td> <td>822</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>73.91%</td> <td>100.00%</td> <td>81.04%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	34	0	0	34	100.00%	SOMBRAS	0	6	146	152	3.95%	MAR	12	0	624	636	98.11%	Total	46	6	770	822		Accuracy	73.91%	100.00%	81.04%		
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	15	0	0	15	100.00%																																																																																										
MAR	0	31024	1	31025	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	0	848	848	100.00%																																																																																										
Total	15	31024	849	31888																																																																																											
Accuracy	100.00%	100.00%	99.88%																																																																																												
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	34	0	0	34	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	6	146	152	3.95%																																																																																										
MAR	12	0	624	636	98.11%																																																																																										
Total	46	6	770	822																																																																																											
Accuracy	73.91%	100.00%	81.04%																																																																																												
Overall Accuracy = 100.00% Khat Statistic = 99.94%						Overall Accuracy = 80.78% Khat Statistic = 29.22%																																																																																									
21 de agosto de 2018						11 de octubre de 2019																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>6</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>0</td> <td>19011</td> <td>0</td> <td>19011</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>647</td> <td>647</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>6</td> <td>19011</td> <td>647</td> <td>19664</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	6	0	0	6	100.00%	MAR	0	19011	0	19011	100.00%	SOMBRAS	0	0	647	647	100.00%	Total	6	19011	647	19664		Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>28</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>28</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>73</td> <td>0</td> <td>73</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>858</td> <td>858</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>28</td> <td>73</td> <td>858</td> <td>959</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	28	0	0	28	100.00%	SOMBRAS	0	73	0	73	100.00%	MAR	0	0	858	858	100.00%	Total	28	73	858	959		Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%		
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	6	0	0	6	100.00%																																																																																										
MAR	0	19011	0	19011	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	0	647	647	100.00%																																																																																										
Total	6	19011	647	19664																																																																																											
Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%																																																																																												
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	28	0	0	28	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	73	0	73	100.00%																																																																																										
MAR	0	0	858	858	100.00%																																																																																										
Total	28	73	858	959																																																																																											
Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%																																																																																												
Overall Accuracy = 100.00% Khat Statistic = 100.00%						Overall Accuracy = 100.00% Khat Statistic = 100.00%																																																																																									
6 de septiembre de 2018						Escena 019-047-2018																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Ground Truth Data</th> </tr> <tr> <th>Name</th> <th>G_1</th> <th>G_2</th> <th>G_3</th> <th>Total</th> <th>Accuracy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SARGAZO</td> <td>100</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>100</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>SOMBRAS</td> <td>0</td> <td>181</td> <td>0</td> <td>181</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>MAR</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>736</td> <td>736</td> <td>100.00%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>100</td> <td>181</td> <td>736</td> <td>1017</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td>100.00%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Ground Truth Data						Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy	SARGAZO	100	0	0	100	100.00%	SOMBRAS	0	181	0	181	100.00%	MAR	0	0	736	736	100.00%	Total	100	181	736	1017		Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%			Escena 019-047-2018																																															
Ground Truth Data																																																																																															
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy																																																																																										
SARGAZO	100	0	0	100	100.00%																																																																																										
SOMBRAS	0	181	0	181	100.00%																																																																																										
MAR	0	0	736	736	100.00%																																																																																										
Total	100	181	736	1017																																																																																											
Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%																																																																																												
Overall Accuracy = 100.00% Khat Statistic = 100.00%																																																																																															

24 de octubre de 2018

Ground Truth Data					
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy
SARGAZO	31	0	0	31	100.00%
SOMBRA5	0	827	0	827	100.00%
MAR	4	5	5921	5930	99.85%
Total	35	832	5921	6788	
Accuracy	88.57%	99.40%	100.00%		
Overall Accuracy =	99.87%		Khat Statistic =	99.41%	

9 de noviembre de 2018

Ground Truth Data					
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy
SARGAZO	85	0	0	85	100.00%
SOMBRA5	0	210	0	210	100.00%
MAR	0	0	931	931	100.00%
Total	85	210	931	1226	
Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%		
Overall Accuracy =	100.00%		Khat Statistic =	100.00%	

27 de diciembre de 2018

Ground Truth Data					
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy
SARGAZO	63	0	0	63	100.00%
SOMBRA5	0	64	0	64	100.00%
MAR	4	0	604	608	99.34%
Total	67	64	604	735	
Accuracy	94.03%	100.00%	100.00%		
Overall Accuracy =	99.46%		Khat Statistic =	98.21%	

9 de noviembre de 2018

Ground Truth Data					
Name	G_1	G_2	G_3	Total	Accuracy
SARGAZO	85	0	0	85	100.00%
SOMBRA5	0	210	0	210	100.00%
MAR	0	0	931	931	100.00%
Total	85	210	931	1226	
Accuracy	100.00%	100.00%	100.00%		
Overall Accuracy =	100.00%		Khat Statistic =	100.00%	

Tabla 9. Matrices de error-confusión de la escena 018-047.

Escena 018-047-2018
3 de febrero de 2018

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	50	0	0	0	50	100.00%
SOMBRA5	1	1255	315	139	1710	73.39%
MAR	32	40	2406	390	2868	83.89%
BANCO	0	5	1	3684	3690	99.84%
Total	83	1300	2722	4213	8318	
Accuracy	60.24%	96.54%	88.39%	87.44%		
Overall Accuracy =	88.90%		Khat Statistic =	82.39%		

Escena 018-047-2019
5 de enero de 2019

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	96	0	0	0	96	100.00%
SOMBRA5	0	1523	2109	187	3819	39.88%
MAR	0	732	2075	2307	5114	40.57%
BANCO	0	0	0	8075	8075	100.00%
Total	96	2255	4184	10569	17104	
Accuracy	100.00%	67.54%	49.59%	76.40%		
Overall Accuracy =	68.81%		Khat Statistic =	48.50%		

7 de marzo de 2018

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	114	0	0	0	114	100.00%
SOMBRA5	0	1851	0	38	1889	97.99%
MAR	21	3	1700	1867	3591	47.34%
BANCO	0	6	233	3193	3432	93.04%
Total	135	1860	1933	5098	9026	
Accuracy	84.44%	99.52%	87.95%	62.63%		
Overall Accuracy =	75.98%		Khat Statistic =	63.42%		

6 de febrero de 2019

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
MAR	65421	10	27	1283	66741	98.02%
SOMBRA5	18	1718	0	0	1736	98.96%
SARGAZO	357	0	127	0	484	26.24%
BANCO	0	0	0	3028	3028	100.00%
Total	65796	1728	154	4311	71989	
Accuracy	99.43%	99.42%	82.47%	70.24%		
Overall Accuracy =	97.65%		Khat Statistic =	84.26%		

24 de abril de 2018

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	54	0	0	0	54	100.00%
SOMBRAS	0	1481	0	0	1481	100.00%
MAR	8	14	993	2658	3673	27.04%
BANCO	0	0	0	11107	11107	100.00%
Total	62	1495	993	13765	16315	
Accuracy	87.10%	99.06%	100.00%	80.69%		
Overall Accuracy =	83.57%		Khat Statistic =		59.30%	

26 de marzo de 2019

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
Sargassu	253	3728	0	0	3981	6.36%
Sea	70	374485	130	6349	381034	98.28%
Shadows	1	3003	9816	112	12932	75.90%
Banco	0	0	0	21772	21772	100.00%
Total	324	381216	9946	28233	419719	
Accuracy	78.09%	98.23%	98.69%	77.12%		
Overall Accuracy =	96.81%		Khat Statistic =		81.36%	

11 de junio de 2018

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	74	0	0	0	74	100.00%
SOMBRAS	0	1708	0	28	1736	98.39%
MAR	16	34	4121	1702	5873	70.17%
BANCO	0	15	197	1830	2042	89.62%
Total	90	1757	4318	3560	9725	
Accuracy	82.22%	97.21%	95.44%	51.40%		
Overall Accuracy =	79.52%		Khat Statistic =		67.10%	

11 de abril de 2019

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	47	0	0	0	47	100.00%
SOMBRAS	0	512	8	100	620	82.58%
MAR	0	4	1472	3076	4552	32.34%
BANCO	0	1	62	5657	5720	98.90%
Total	47	517	1542	8833	10939	
Accuracy	100.00%	99.03%	95.46%	64.04%		
Overall Accuracy =	70.28%		Khat Statistic =		42.45%	

13 de julio de 2018

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	92	0	0	0	92	100.00%
SOMBRAS	0	3212	4	0	3216	99.88%
MAR	1	182	13459	512	14154	95.09%
BANCO	0	0	0	1487	1487	100.00%
Total	93	3394	13463	1999	18949	
Accuracy	98.92%	94.64%	99.97%	74.39%		
Overall Accuracy =	96.31%		Khat Statistic =		91.43%	

27 de abril de 2019

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	98	0	4	0	102	96.08%
SOMBRAS	0	955	0	58	1013	94.27%
MAR	14	0	7666	1853	9533	80.42%
BANCO	0	0	54	2352	2406	97.76%
Total	112	955	7724	4263	13054	
Accuracy	87.50%	100.00%	99.25%	55.17%		
Overall Accuracy =	84.81%		Khat Statistic =		69.74%	

29 de julio de 2018

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	216	0	0	0	216	100.00%
SOMBRAS	0	5664	0	1	5665	99.98%
MAR	161	48	2969	3045	6223	47.71%
BANCO	0	17	122	2508	2647	94.75%
Total	377	5729	3091	5554	14751	
Accuracy	57.29%	98.87%	96.05%	45.16%		
Overall Accuracy =	76.99%		Khat Statistic =		66.87%	

13 de mayo de 2019

Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	44	0	0	0	44	100.00%
SOMBRAS	0	255	23	29	307	83.06%
MAR	0	20	1280	1319	2619	48.87%
BANCO	0	0	0	866	866	100.00%
Total	44	275	1303	2214	3836	
Accuracy	100.00%	92.73%	98.23%	39.11%		
Overall Accuracy =	63.74%		Khat Statistic =		42.62%	

Escena 018-047-2018

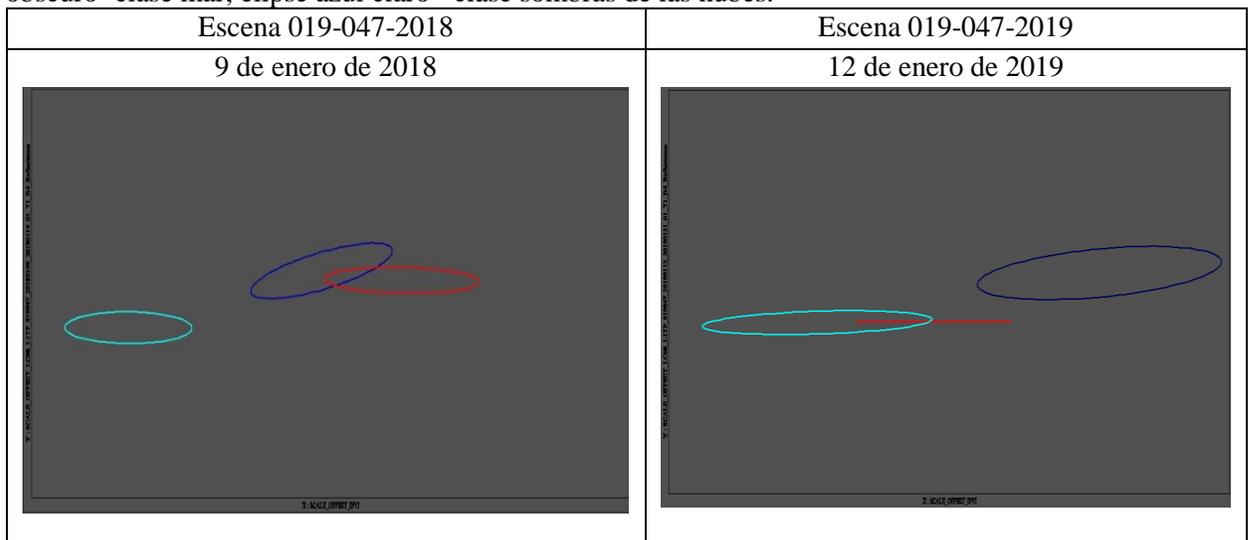
Escena 018-047-2018

30 de agosto de 2018						
Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	122	0	8	0	130	93.85%
SOMBRA S	0	669	0	7	676	98.96%
MAR	85	3	15445	1140	16673	92.63%
BANCO	0	0	3	2076	2079	99.86%
Total	207	672	15456	3223	19558	
Accuracy	58.94%	99.55%	99.93%	64.41%		
Overall Accuracy =	93.63%		Khat Statistic =		79.28%	

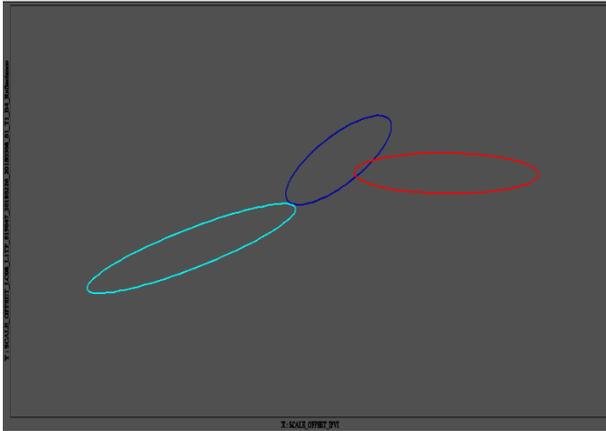
15 de septiembre de 2018						
Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	118	0	0	0	118	100.00%
SOMBRA S	0	1389	282	82	1753	79.24%
MAR	44	44	949	5573	6610	14.36%
BANCO	0	0	18	1704	1722	98.95%
Total	162	1433	1249	7359	10203	
Accuracy	72.84%	96.93%	75.98%	23.16%		
Overall Accuracy =	40.77%		Khat Statistic =		23.54%	

20 de diciembre de 2018						
Ground Truth Data						
Name	G_1	G_2	G_3	G_4	Total	Accuracy
SARGAZO	99	0	0	0	99	100.00%
SOMBRA S	0	878	706	0	1584	55.43%
MAR	1	166	973	5328	6468	15.04%
BANCO	0	0	0	3512	3512	100.00%
Total	100	1044	1679	8840	11663	
Accuracy	99.00%	84.10%	57.95%	39.73%		
Overall Accuracy =	46.83%		Khat Statistic =		21.78%	

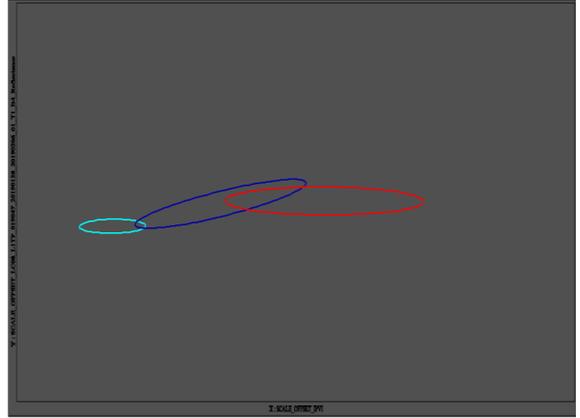
Tabla 10. Gráficos de dispersión elipsoidal escena 019-047.*Elipse roja=clase sargazo, elipse azul oscuro=clase mar, elipse azul claro= clase sombras de las nubes.



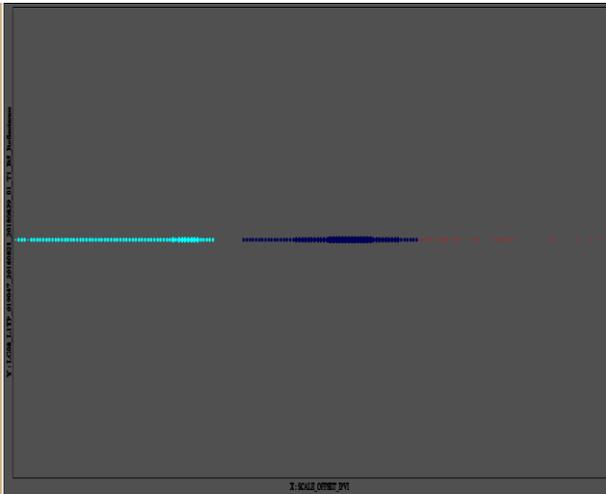
26 de febrero de 2018



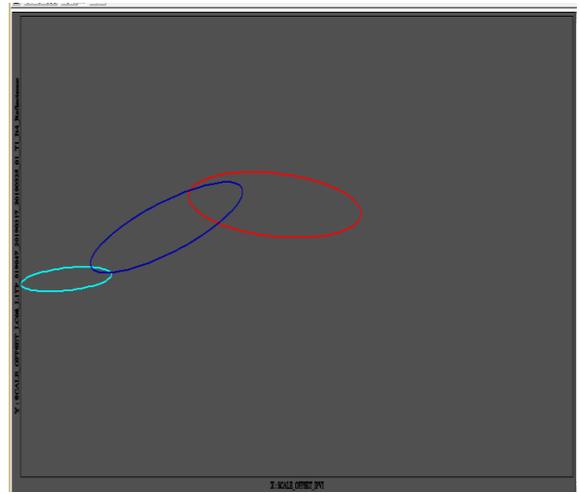
28 de enero de 2019



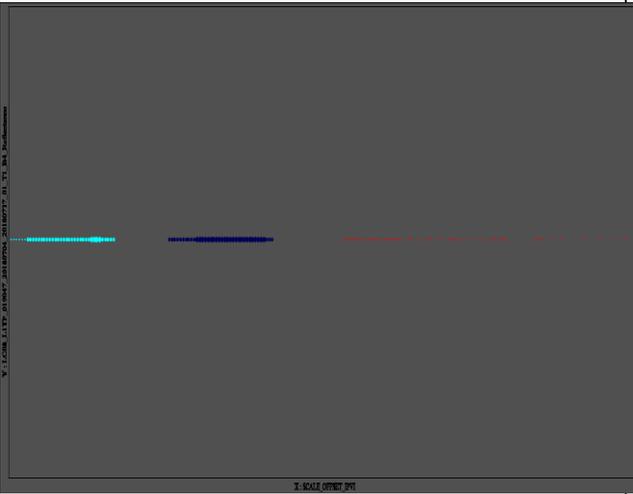
4 de julio de 2018



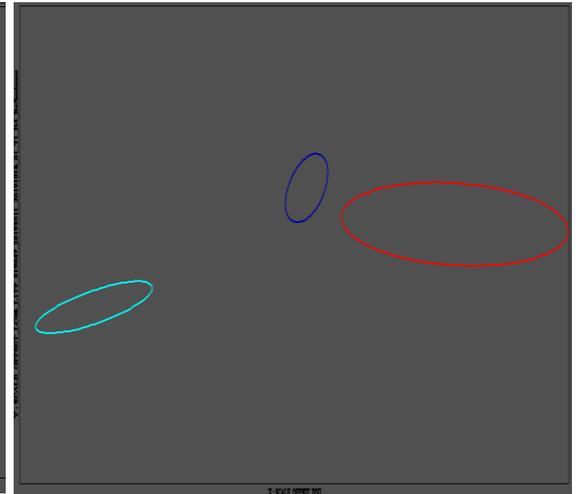
17 de marzo de 2019



21 de agosto de 2018



11 de octubre de 2019



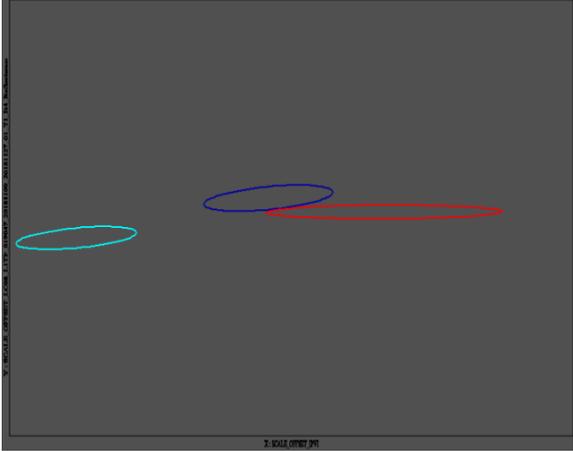
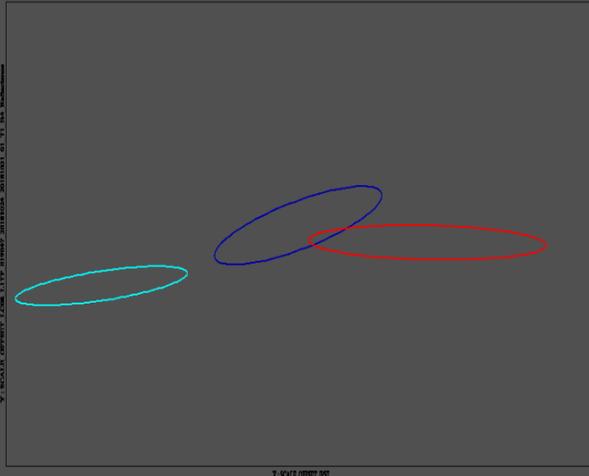
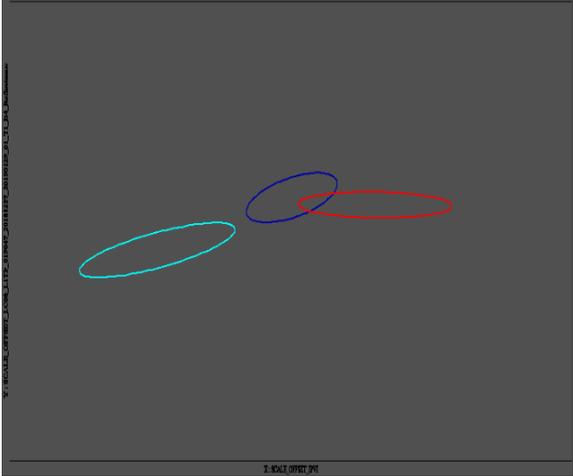
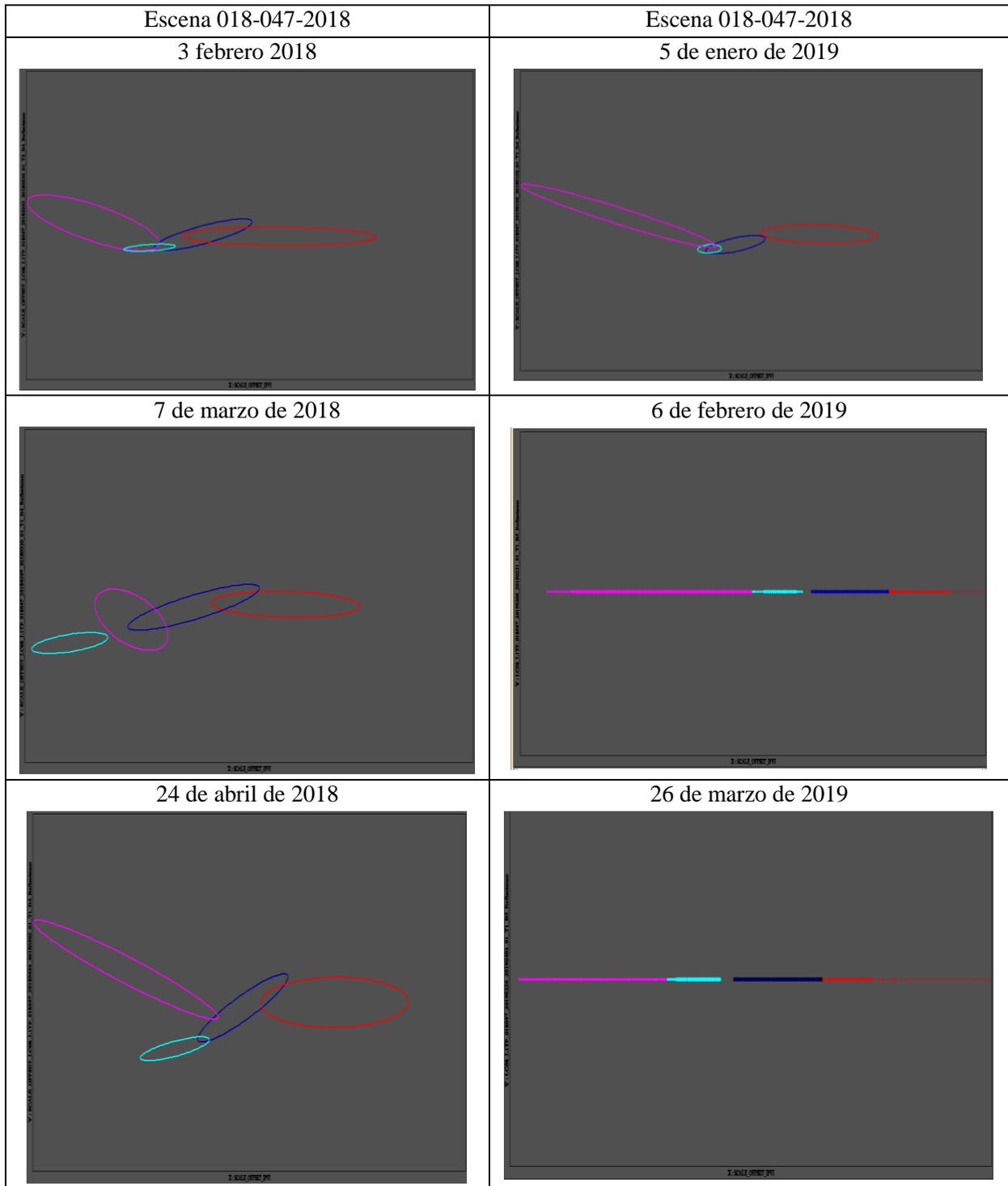
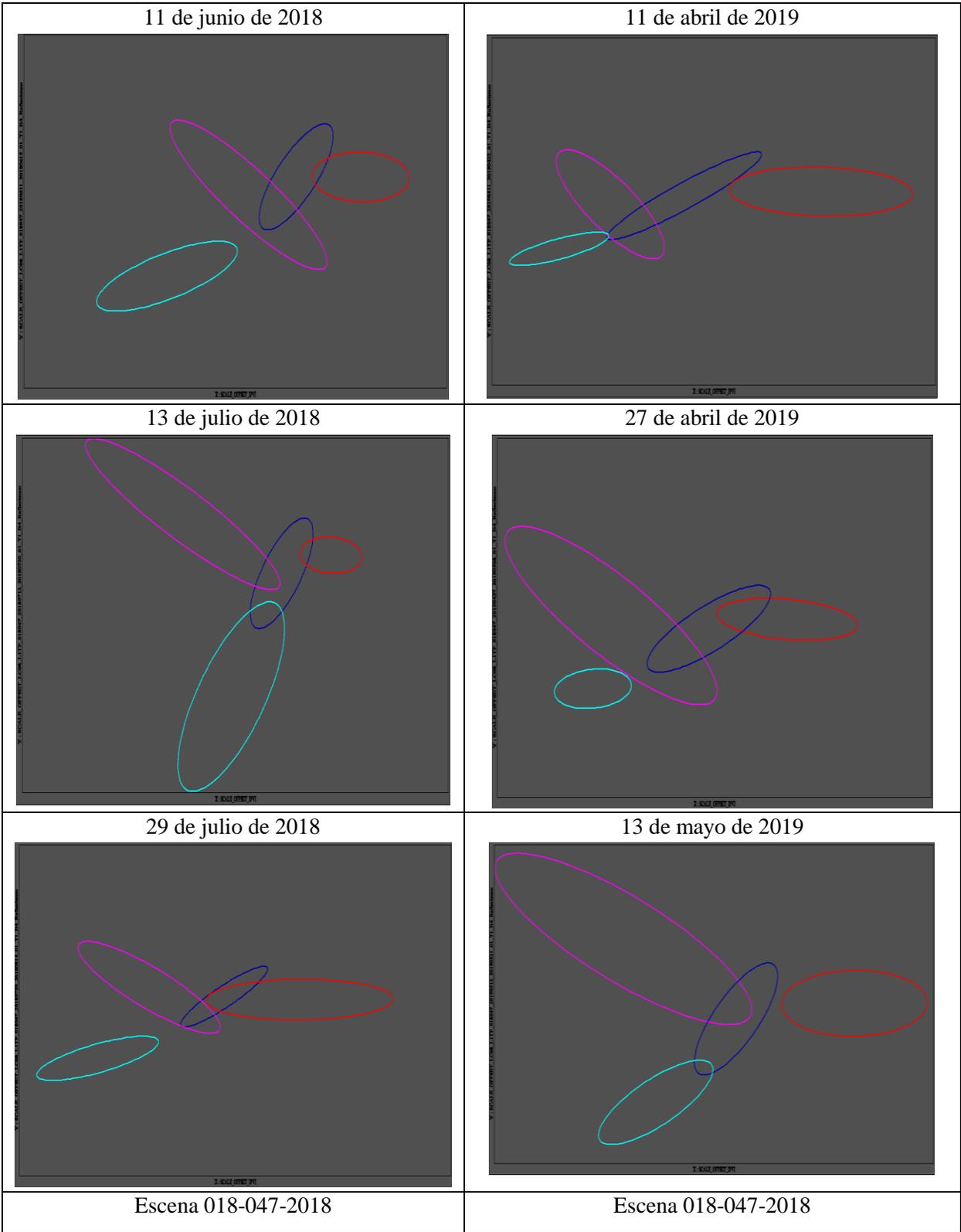
Escena 019-047-2018	Escena 019-047-2018
<p data-bbox="402 254 683 289">6 de septiembre de 2018</p> 	<p data-bbox="1019 254 1300 289">9 de noviembre de 2018</p> 
<p data-bbox="412 779 673 814">24 de octubre de 2018</p> 	<p data-bbox="1019 779 1300 814">27 de diciembre de 2018</p> 

Tabla 11. Gráficos de dispersión elipsoidal de la escena 018-047.*Elipse roja=clase sargazo, elipse azul oscuro=clase mar, elipse azul claro=clase sombras de las nubes, elipse morada= clase banco Chinchorro.





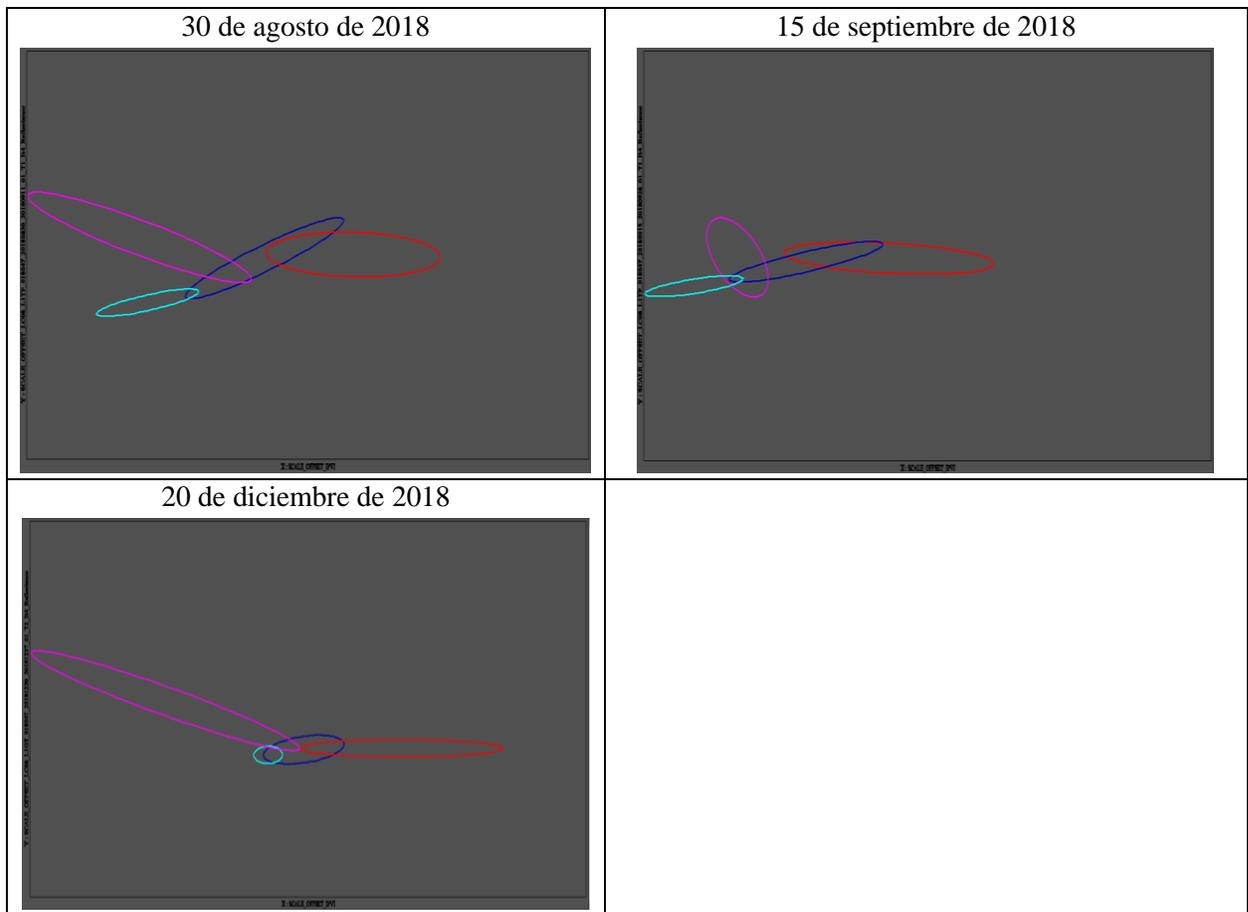


Tabla 12. Estadísticas de la clasificación de la escena 019-047.

Fecha	Medias de clase		Desviaciones estandar de clase		Distancias entre medias de la clase		
	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
09/01/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	411.50	Sargazo	5.77	Sombras	50.993	
	Sombras	361.47	Sombras	4.75	Mar	14.728	36.703
	Mar	396.84	Mar	5.30			
26/02/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	480.96	Sargazo	10.94	Sombras	78.102	
	Sombras	407.19	Sombras	12.37	Mar	31.478	48.960
	Mar	449.79	Mar	6.25			

04/07/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	555.73	Sargazo	26.87	Sombras	119.035	
	Sombras	484.62	Sombras	3.26	Mar	71.108	47.926
	Mar	436.69	Mar	6.71			
21/08/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	529.14	Sargazo	17.87	Sombras	102.241	
	Sombras	426.90	Sombras	13.54	Mar	38.737	65.053
	Mar	490.40	Mar	4.07			
06/09/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	569.65	Sargazo	30.41	Sombras	178.780	
	Sombras	404.72	Sombras	12.85	Mar	91.539	100.439
	Mar	480.34	Mar	3.16			
24/10/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	436.47	Sargazo	15.53	Sombras	105.452	
	Sombras	332.14	Sombras	11.25	Mar	41.531	64.847
	Mar	395.11	Mar	10.92			
09/11/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	396.79	Sargazo	11.30	Sombras	72.760	
	Sombras	324.42	Sombras	5.79	Mar	27.262	45.840
	Mar	369.61	Mar	6.20			
27/12/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	428.71	Sargazo	8.83	Sombras	62.600	
	Sombras	367.39	Sombras	8.95	Mar	23.537	39.643
	Mar	405.29	Mar	5.21			
12/01/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	316.30	Sargazo	3.37	Sombras	12.564	

	Sombras	303.79	Sombras	5.04	Mar	18.145	30.609
	Mar	334.06	Mar	5.34			
28/01/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	398.82	Sargazo	11.86	Sombras	62.641	
	Sombras	336.79	Sombras	3.98	Mar	30.598	32.148
	Mar	368.36	Mar	10.25			
17/03/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	455.07	Sargazo	13.36	Sombras	82.876	
	Sombras	376.00	Sombras	6.99	Mar	42.375	40.750
	Mar	413.98	Mar	11.83			
11/10/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras
	Sargazo	489.11	Sargazo	16.24	Sombras	129.833	
	Sombras	362.71	Sombras	8.36	Mar	52.323	80.593
	Mar	437.27	Mar	3.02			

Tabla 13. Estadísticas de la clasificación de la escena 018-047.

Fecha	Medias de clase		Desviaciones estandar de clase		Distancias entre medias de clase			
03/02/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	392.15	Sargazo	22.21	Sombras	73.277		
	Sombras	319.39	Sombras	5.93	Mar	42.812	30.749	
	Mar	349.46	Mar	11.19	Banco	104.680	32.885	61.918
	Banco	287.75	Banco	15.21				
07/03/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	419.16	Sargazo	10.82	Sombras	78.635		
	Sombras	341.88	Sombras	5.56	Mar	33.233	45.641	
	Mar	386.17	Mar	9.63	Banco	55.956	22.905	22.799
	Banco	363.83	Banco	5.35				
24/04/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar

	Sargazo	500.54	Sargazo	22.17	Sombras	123.424		
	Sombras	382.52	Sombras	10.39	Mar	69.322	55.334	
	Mar	432.72	Mar	13.62	Banco	155.784	49.087	87.728
	Banco	346.37	Banco	27.81				
11/06/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	495.13	Sargazo	10.40	Sombras	112.025		
	Sombras	393.61	Sombras	15.09	Mar	34.755	79.150	
	Mar	461.31	Mar	7.95	Banco	61.567	52.617	27.185
	Banco	436.32	Banco	16.79				
13/07/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	479.72	Sargazo	4.26	Sombras	51.115		
	Sombras	446.32	Sombras	7.30	Mar	18.575	35.016	
	Mar	463.22	Mar	4.29	Banco	51.087	41.073	34.789
	Banco	430.02	Banco	13.30				
29/07/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	484.17	Sargazo	4.26	Sombras	141.364		
	Sombras	348.28	Sombras	7.30	Mar	51.239	91.696	
	Mar	433.52	Mar	4.29	Banco	102.257	47.788	51.068
	Banco	382.87	Banco	13.30				
30/08/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	465.39	Sargazo	18.12	Sombras	107.974		
	Sombras	360.72	Sombras	10.63	Mar	45.744	62.795	
	Mar	420.24	Mar	16.50	Banco	109.503	22.789	64.083
	Banco	356.63	Banco	23.25				
15/09/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	408.16	Sargazo	19.22	Sombras	88.660		
	Sombras	320.51	Sombras	8.98	Mar	37.346	51.456	

	Mar	371.03	Mar	14.12	Banco	68.184	21.820	30.879
	Banco	340.23	Banco	5.65				
20/12/18	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	395.25	Sargazo	18.46	Sombras	59.364		
	Sombras	336.28	Sombras	2.60	Mar	43.528	15.898	
	Mar	351.94	Mar	7.28	Banco	105.705	48.386	62.984
	Banco	290.48	Banco	24.29				
05/01/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	370.50	Sargazo	13.85	Sombras	64.160		
	Sombras	307.06	Sombras	2.84	Mar	48.890	15.275	
	Mar	322.13	Mar	7.06	Banco	116.859	54.588	69.009
	Banco	254.03	Banco	23.13				
06/02/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	378.81	Sargazo	7.00	Sombras	58.955		
	Sombras	319.86	Sombras	5.86	Mar	27.007	31.948	
	Mar	351.81	Mar	8.75	Banco	116.332	57.378	89.326
	Banco	262.48	Banco	27.78				
26/03/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	417.59	Sargazo	15.14	Sombras	82.428		
	Sombras	335.16	Sombras	6.90	Mar	36.937	45.492	
	Mar	380.65	Mar	15.12	Banco	114.861	62.432	107.924
	Banco	272.73	Banco	23.58				
11/04/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	490.44	Sargazo	17.89	Sombras	128.795		
	Sombras	365.65	Sombras	9.67	Mar	66.201	63.380	
	Mar	425.32	Mar	15.03	Banco	102.132	28.666	35.956
	Banco	390.08	Banco	10.63				

27/04/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	485.77	Sargazo	14.81	Sombras	106.924		
	Sombras	385.80	Sombras	8.10	Mar	41.914	65.501	
	Mar	445.54	Mar	13.00	Banco	92.537	25.802	51.007
	Banco	395.27	Banco	22.27				
13/05/19	Clase	IPVI	Clase	IPVI	Clase	Sargazo	Sombras	Mar
	Sargazo	512.75	Sargazo	12.56	Sombras	96.743		
	Sombras	428.99	Sombras	9.88	Mar	53.126	46.315	
	Mar	462.68	Mar	7.17	Banco	99.854	50.872	51.733
	Banco	415.35	Banco	22.11				

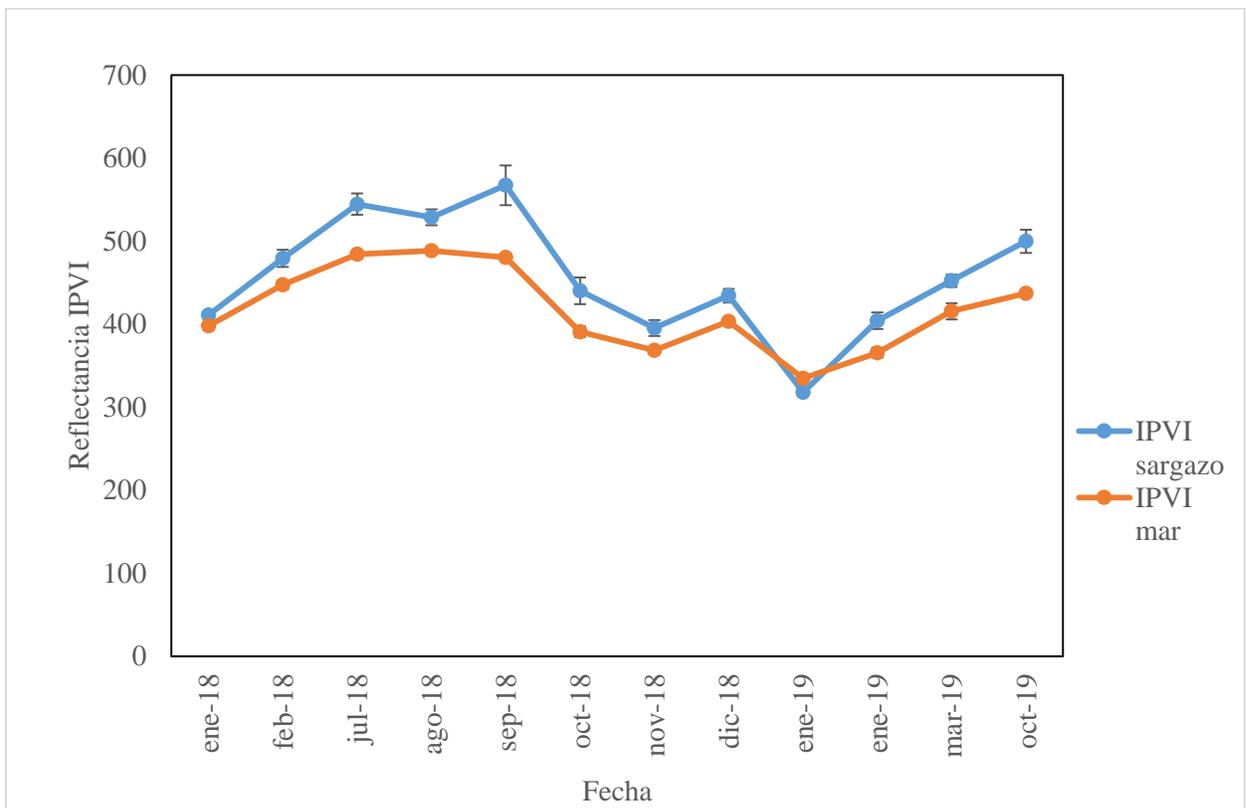


Figura 18. Respuesta espectral en el IPVI de la clase sargazo y mar de la escena 019-047.

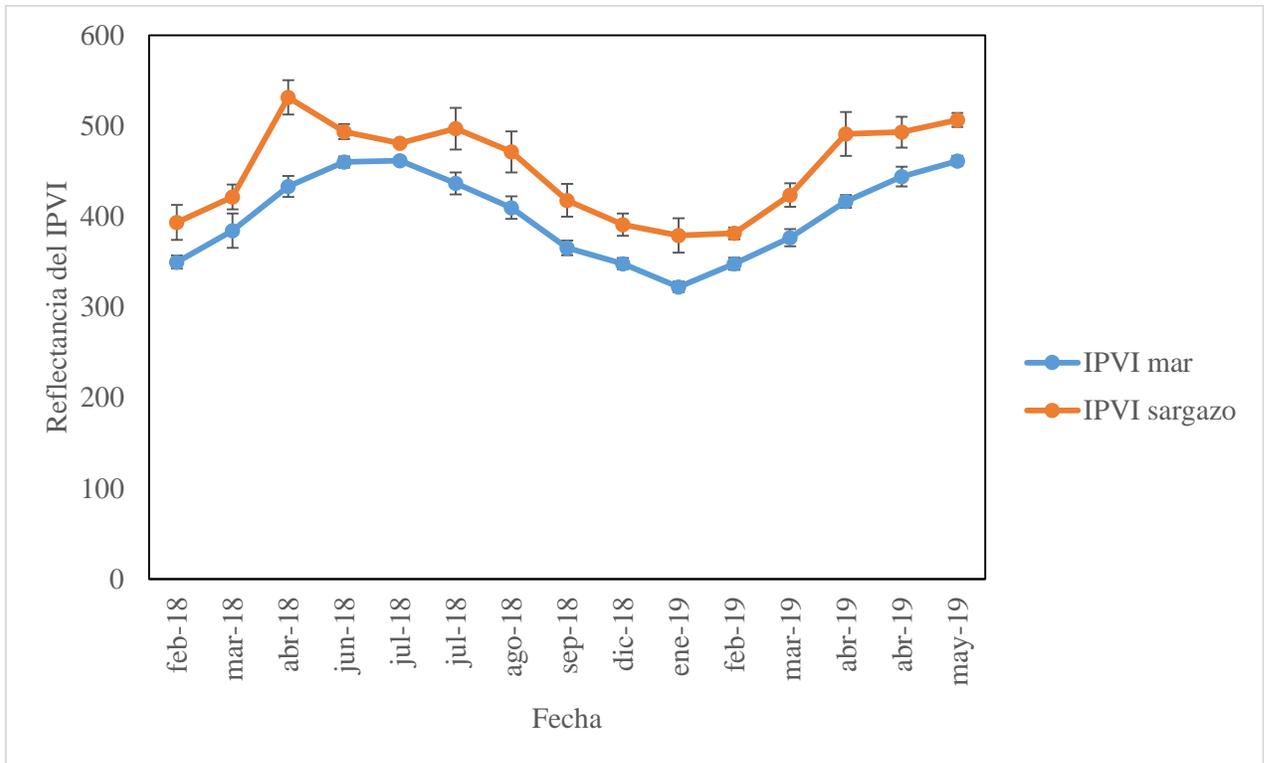


Figura 19. Respuesta espectral en el IPVI de la clase sargazo y mar de la escena 018-047.

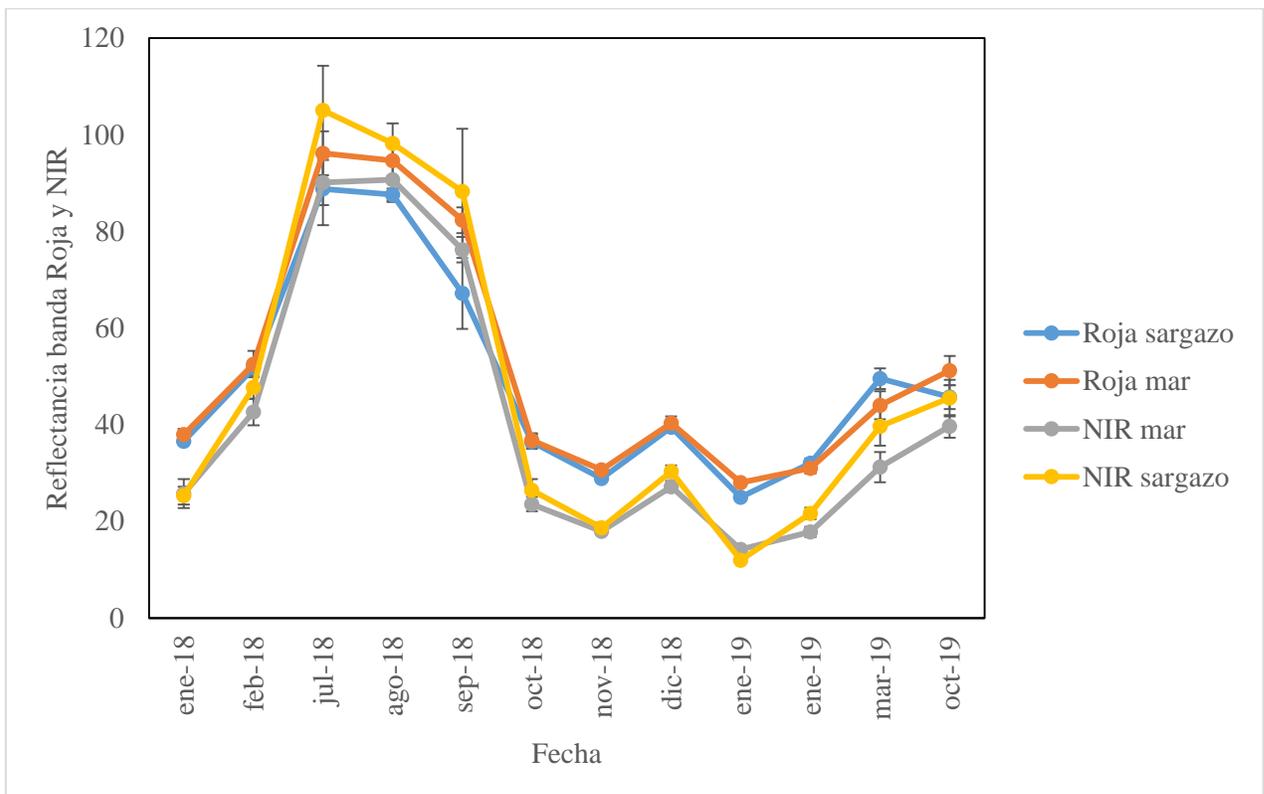


Figura 20. Respuesta espectral de las bandas roja e infrarroja de la clase sargazo y mar de la escena 019-047.

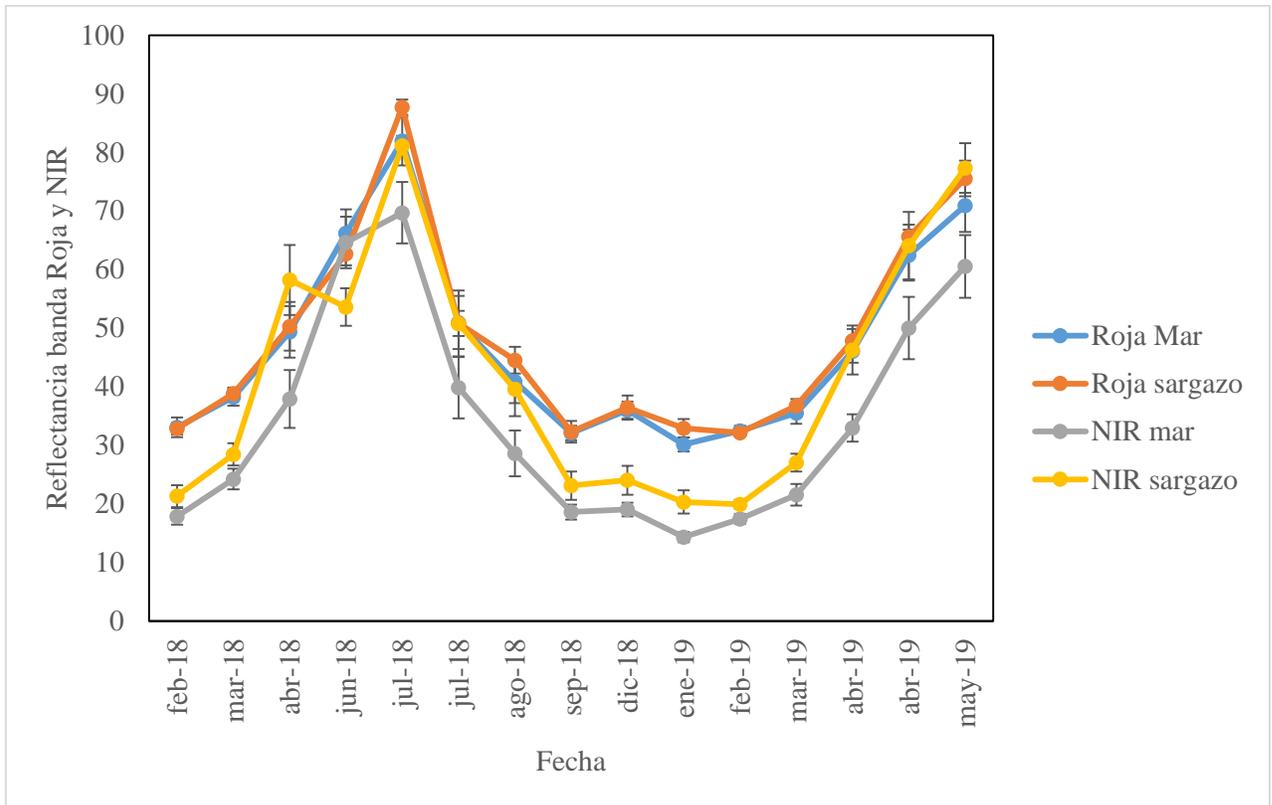


Figura 21. Respuesta espectral de las bandas roja e infrarroja de la clase sargazo y mar de la escena 018-047.

Tabla 14. Comparación múltiple PERMANOVA entre zonas y sitios de las diferentes variables ambientales, muestreo octubre 2019.

pH entre zonas				Amonio entre zonas				Fosfato entre zonas			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3		Zona 1	Zona 2	Zona 3		Zona 1	Zona 2	Zona 3
Zona 1		0.0191	0.0006	Zona 1		0.045	0.0011	Zona 1		0.6144	0.5851
Zona 2	0.0191		0.1239	Zona 2	0.045		0.0779	Zona 2	0.6144		0.4285
Zona 3	0.0006	0.1239		Zona 3	0.0011	0.0779		Zona 3	0.5851	0.4285	

pH entre sitios				Amonio entre sitios				Fosfato entre sitios			
	M	Xa	Xc		M	Xa	Xc		M	Xa	Xc
M		0.0515	0.0138	M		0.0291	0.7319	M		0.0194	0.3847
Xa	0.0515		0.0001	Xa	0.0291		0.045	Xa	0.0194		0.1147
Xc	0.0138	0.0001		Xc	0.7319	0.045		Xc	0.3847	0.1147	

*M=Mahahual, Xa=Xahuayxol, Xc=Xcalak.

Tabla 15. Comparación múltiple PERMANOVA entre zonas y sitios de las diferentes variables ambientales, muestreo octubre 2019.

SDT entre zonas			Oxígeno entre zonas		
	Zona 1	Zona 2		Zona 1	Zona 2
Zona 1		0.3665	Zona 1		0.0001
Zona 2	0.3665		Zona 2	0.0001	

SDT entre sitios				Oxígeno entre sitios			
	M	Xa	Xc		M	Xa	Xc
M		0.0001	0.0001	M		0.2742	0.6378
Xa	0.0001		0.0001	Xa	0.2742		0.4936
Xc	0.0001	0.0001		Xc	0.6378	0.4936	

Tabla 16. Supuestos del modelo de regresión lineal de la escena 019-047.

	Valor	p	Decisión
Estadístico global	2.5621	0.6335	Supuesto aceptable
Simetría	2.2533	0.1333	Supuesto aceptable
Curtosis	0.0574	0.8106	Supuesto aceptable
Función de enlace	0.1298	0.7186	Supuesto aceptable
Heterocedasticidad	0.1215	0.7274	Supuesto aceptable

*Para cumplir los supuestos $p < 0.05$.

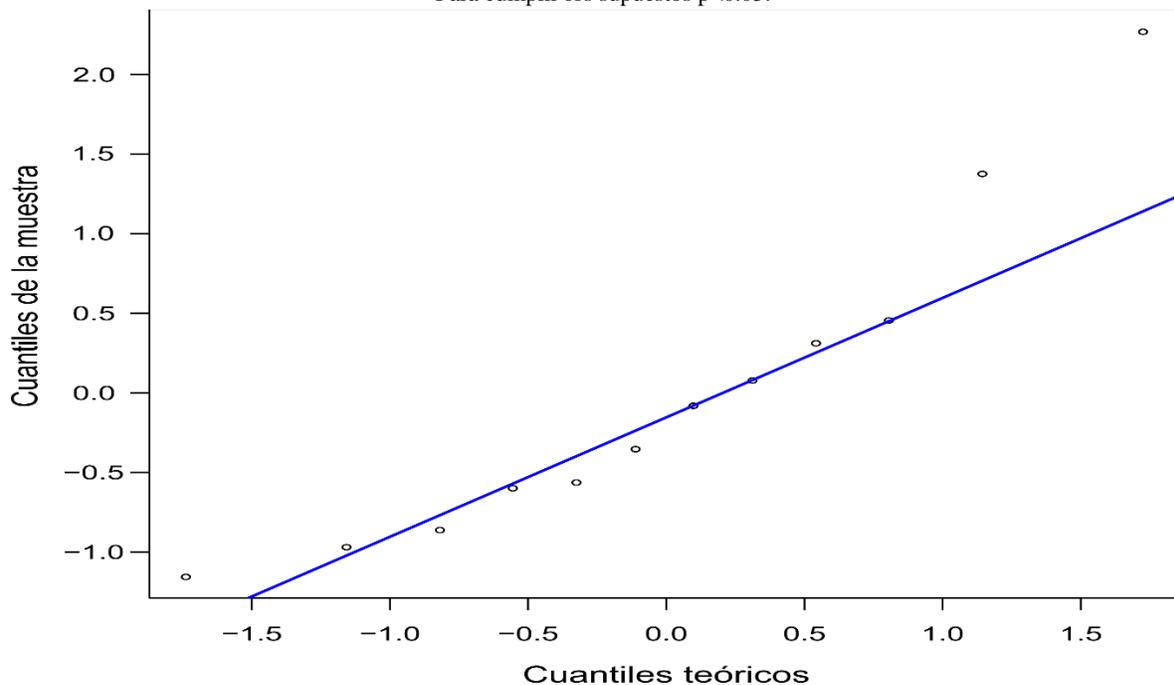


Figura 22. Distribución de los residuales de la escena 019-047 que muestra una distribución normal de los mismos.

Tabla 17. Supuestos del modelo de regresión lineal de la escena 018-047.

	Valor	p	Decisión
Estadístico global	6.9712	0.1374	Supuesto aceptable
Simetría	3.7464	0.0529	Supuesto aceptable
Curtosis	0.0669	0.7958	Supuesto aceptable
Función de enlace	0.5882	0.4430	Supuesto aceptable
Heterocedasticidad	2.5696	0.1089	Supuesto aceptable

*Para cumplir los supuestos $p < 0.05$.

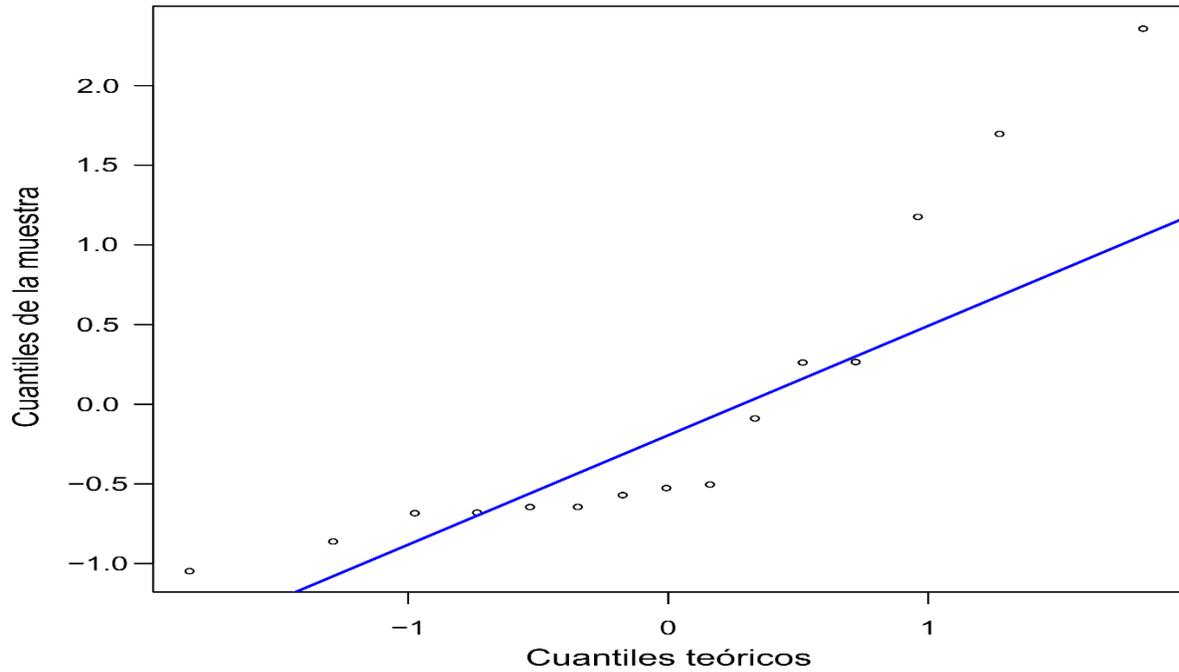


Figura 23. Distribución de los residuales de la escena 018-047 donde se muestra una distribución sesgada de los mismos.