



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
LABORATORIO DE INGENIERÍA Y PROCESOS COSTEROS

VARIABILIDAD TEMPORAL DE SARGAZO EN PUERTO MORELOS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE RÍOS Y COSTAS

PRESENTA:
LEONARDO DAVID MONTOYA SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL: DR. CHRISTIAN MARIO APPENDINI
ALBRECHTSEN

SISAL, YUCATÁN, DICIEMBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Resumen

La llegada masiva de algas marinas en las costas del Caribe es un problema grave para diferentes sectores. La pesca, el turismo y el ambiente han sido afectados en diferentes proporciones desde que se reportó el primer arribazón masivo de sargazo en 2011. El efecto negativo en el ecosistema arrecifal apunta a ser irreversible si estos arribazones se vuelven una norma. Después del 2011 se han registrado arribazones masivos en repetidas ocasiones, estos son atribuidos a una nueva zona de afloramiento ubicada entre África y Brasil. Investigaciones recientes apuntan a que el exceso de nutrientes suministrado por la cuenca del amazonas y surgencias en costas africanas es la causa de la aparición de esta nueva zona de afloramiento. Hasta ahora, los esfuerzos en la investigación del fenómeno se han concentrado en explicar su física a escala oceánica dejando de lado el comportamiento a escala local. En este trabajo se hace uso de técnicas de aprendizaje de máquinas para cuantificar la cobertura horaria de sargazo de Septiembre de 2015 a Junio de 2019 en imágenes de la costa de Puerto Morelos, México. EL sargazo fue identificado por medio del algoritmo llamado Support Vector Machine (SVM) despues de rectificar geométricamente las imágenes. Aquí se muestra como el aprendizaje automatico hecho por el SVM permite caracterizar el comportamiento de los arribazones dentro de una laguna arrecifal. Se encontró que hay presencia de macrofitas sobre la playa seca prácticamente durante todo el periodo de estudio. Los arribazones tienen lugar los años 2015, 2017, 2018 y 2019, siendo 2018 el año con mayor cantidad de arribazones. El inicio de los arribazones es normalmente en los meses de marzo y abril. Se encontraron periodos de limpieza de la costa a principios de Otoño y durante invierno.

Índice general

Resumen	III
1. Introducción	1
1.1. Arribazones masivos de sargazo	1
1.2. Video monitoreo costero	3
1.3. Zona de estudio	5
1.4. Objetivos de la investigación y estructura del documento	6
2. Detección de sargazo	9
2.1. Método de Otsu	9
2.2. Técnicas de aglomeramiento	10
2.3. Soporte Vectorial de Máquinas	12
2.4. Comparación entre métodos	14
2.5. Conclusiones	16
3. Cuantificación de Sargazo	19
3.1. Metodología	19
3.1.1. Pre-procesamiento	19
3.1.2. Procesamiento	27
3.2. Resultados SVM	32
3.3. Discusión	33
4. Variabilidad temporal de sargazo	35
4.1. Arribazones	35
4.1.1. Variabilidad	35
4.1.2. Dinámica	36
4.2. Sargazo encallado	44
4.2.1. Variabilidad	44
4.2.2. Limpieza natural	45

4.3. Efecto en el color del agua	53
4.4. Discusión	55
5. Conclusiones	57
5.1. Preguntas científicas	57
5.2. Trabajo a futuro	59
Bibliografía	61

Capítulo 1

Introducción

1.1. Arribazones masivos de sargazo

Las algas marinas están clasificadas dentro de dos grupos: Algas bénticas y algas pelágicas. Las algas bentónicas se encuentran adheridas al suelo marino y son comunes en aguas poco profundas, y las pelágicas se pueden encontrar flotando en mar abierto. Las algas juegan un papel importante con el equilibrio ecológico de los océanos. En ellas se alberga un gran número de especies marinas como camarones, cangrejos, peces, etc. Las algas pelágicas como el sargazo proveen de alimento a especies migratorias como las ballenas jorobadas. Cuando las algas pelágicas como el sargazo, llegan a las costas (arribazones) por medio de las corrientes oceánicas y vientos, las tortugas marinas usan estas algas como viveros para sus crías (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016). Sin embargo, cuando el sargazo llega en cantidades masivas a la costa tiene efectos devastadores en diferentes sectores como lo son: i) La pesca, ya que dificulta la movilidad hacia recursos pesqueros, daña líneas y redes de pesca, estropea motores de lanchas, entre otros. ii) El turismo, que es afectado debido a que este exceso de sargazo termina descomponiéndose en las costas y en lagunas costeras, lo que causa malos olores e incluso enfermedades a la población (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016; Franks *et al.*, 2011). iii) Por último, la llegada y descomposición del sargazo ha provocado la muerte de corales y pastos marinos que forman parte importante del ecosistema arrecifal. van Tussenbroek *et al.* (2017) reportaron un aumento promedio del 15 % en la tasa de mortalidad de diversas especies de pastos marinos en las costas de puerto Morelos, Quintana Roo a partir del primer arribazón masivo en 2014. Los pastos marinos mueren debido a que el sargazo flotante evita la llegada de luz al fondo marino. Por otro lado, la materia orgánica excesiva en el fondo debido a la descomposición del sargazo causa eutroficación. Así como hypoxia, anoxia y una disminución del pH en el fluido, situaciones que dan pie a la muerte de pastos marinos y otras especies de flora y fauna de la región.

Hanisak & Samuel (1987) encontraron que las algas pelágicas experimentan altas tasas de producción en aguas con temperaturas de los 24 a 30 grados, así como un porcentaje de salinidad de 36 a 42 %. Lapointe *et al.* (2014) encontraron que en condiciones óptimas el sargazo pelágico se puede duplicar en 50 días en aguas oceánicas y en aguas someras en 11 días. Estas condiciones se pueden encontrar en zonas tropicales. En particular el mar de los sargazos es una de estas zonas de afloramiento que ha sido reportada, sin ser un problema hasta antes del 2011, como la fuente de sargazo en el mar Caribe. (Díaz-Martínez & Espinoza-Avalos, 2000). En el mar de los sargazos las algas se reproducen en los meses de febrero y marzo (Marmorino *et al.*, 2011). Después masas pequeñas de sargazo se separan del mar de sargazos por acción de las corrientes marinas en la zona. Por medio de la corriente del Golfo de México estas pequeñas masas de sargazo son transportadas hacia costas caribeñas (Franks *et al.*, 2016)(Fig. 1.1.1). Franks *et al.* (2011) mostró por medio del análisis de imágenes satelitales la ubicación de una nueva zona de afloramiento en la Región de Recirculación del Norte del Ecuador NERR. Wang *et al.* (2019) han reportado descargas inusuales de nutrientes del río Amazonas desde el 2009, así como una surgencia al este del océano Atlántico. Estos dos hechos podrían ser los causantes del crecimiento de algas en la NERR y de la llegada de arribazones masivos a las costas Caribeñas desde el 2011. Al existir un exceso de sargazo en esta región masas de sargazo son transportadas por corrientes marinas. Las dos corrientes que están presentes en esta nueva zona de afloramiento en el centro del Atlántico son: la corriente ecuatorial del norte (NEC) y la corriente del norte de Brasil (NBC) (Franks *et al.*, 2011)(Fig. 1.1.2). Las trayectorias de estas corrientes y los meses de afloramiento del sargazo generan que los arribazones en las costas del mar Caribe tengan lugar en los meses de Agosto y Septiembre (Wang & Hu, 2017). Jhons et al reportaron una anomalía en los vientos sobre el Atlántico norte en el año 2010 que sugiere ser la causa del primer arribazón masivo en el mar caribe en 2011.

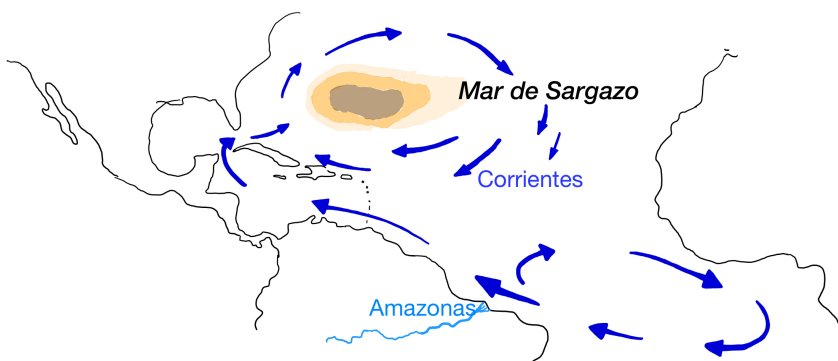


Figura 1.1.1: Diagrama de las corrientes presentes en el océano Atlántico. En la figura se muestra el mar de los* sargazos al norte.

Esta nueva zona de proliferación de sargazo ha causado afectaciones importante

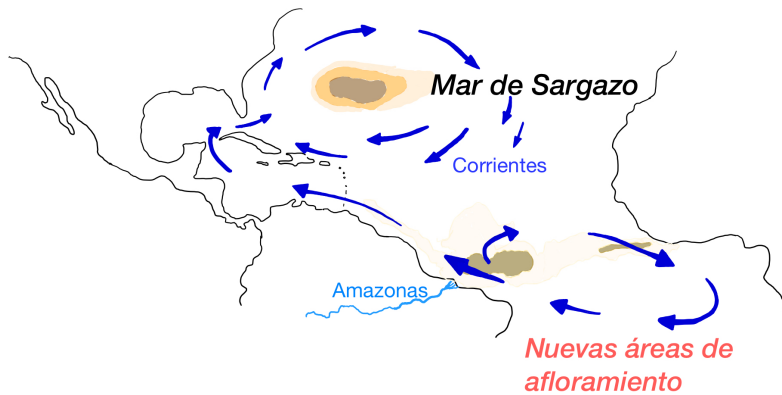


Figura 1.1.2: Diagrama de las corrientes presentes en el océano Atlántico. En la figura se muestra el nuevo afloramiento de sargazo en el centro del océano Atlántico.

a lo largo del mar Caribe. Rodríguez-Martínez *et al.* (2016) realizó una estimación de las cantidades de sargazo que llegan al Caribe Mexicano a partir de datos de instituciones públicas y hoteles. Estos datos fueron recolectados al realizar limpieza en mar y tierra sobre playas turísticas y algunas áreas naturales protegidas. Obteniendo que para el año 2015, en promedio se removieron 318.9 m^3 de sargazo por km de playa, en las costas de Quintana Roo. Sin embargo, se ignora el tiempo de residencia y la afluencia de sargazo en playas donde no se realizó limpieza alguna.

En general, gran parte de los esfuerzos en el tema se han centrado en entender el fenómeno a escala oceánica y regional. Dejando de lado el comportamiento local de los arribazones, siendo la escala local donde se presentan las mayores afectaciones. Por lo que en este estudio se usará la costa de Puerto Morelos para entender el comportamiento de los arribazones cerca de la costa y sus efectos en la dinámica litoral por medio del análisis de imágenes de alta resolución. Conocer el comportamiento del sargazo ayudará a diseñar planes de acción para los posibles arribazones futuros.

1.2. Video monitoreo costero

El monitoreo costero de alta resolución espacio-temporal nos permite conocer patrones morfodinámicos de los litorales en escalas grandes de tiempo. Sin embargo, significa una gran cantidad de recursos humanos y financieros. En algunos casos, los equipos de medición son intrusivos y estos afectan los fenómenos que se pretenden estudiar, como es el caso de la zona de lavado. Una alternativa para

resolver estas deficiencias son los sistemas de video monitoreo. Algunas aplicaciones que se ha dado a los sistemas de video monitoreo son la detección y análisis de la línea de costa, estudiar la morfodinámica de la playa, medir el run-up, estudiar la dinámica de las zonas de lavado y surf. El video monitoreo se ha vuelto popular desde la llegada del sistema Argus (Holman & Stanley, 2007), debido a que son de bajo costo y requieren poco mantenimiento. Estos sistemas constan de un conjunto de video cámaras ubicadas cerca de la línea de costa. Las cámaras toman dos capturas por segundo y a partir de éstas dan como resultado cuatro productos principales. Una imagen promediada cada 10 minutos, una imagen instantánea a los 10 minutos, una imagen de varianza y series de tiempo de conjuntos de píxeles (Holman & Stanley, 2007). Las cuales permiten conocer fenómenos en la costa como el movimiento de la línea de costa con una alta resolución temporal.

Existen diferentes sistemas de video monitoreo, los cuales se diferencian principalmente por la institución desarrolladora. La mayoría de estos sistemas son de código cerrado y con un alto costo, a pesar de tener como resultado los mismos productos. Sin embargo, existe un sistema denominado SIRENA desarrollado por el Instituto Mediterraneo de Estudios Avanzados (España) que es de bajo costo y permite al usuario final manipular el producto que desea recibir (Nieto *et al.*, 2010). SIRENA es de código abierto por lo que permite al usuario seleccionar las características del producto que se recibirá. El sistema inicia el proceso con las fotografías tomadas por cámaras. Las fotografías son enviadas a una computadora ubicada cerca de la posición de las cámaras. Este realiza un pre-procesamiento para disminuir el peso de las imágenes. Las imágenes son almacenadas en un ordenador y pueden ser consultadas vía internet, se almacena aproximadamente 1 Gb por día considerando 4,500 imágenes por hora por cámara (Nieto *et al.*, 2010). Lo cual es una gran cantidad de información a un costo relativamente bajo.

Las imágenes son útiles cuando están relacionadas a una ubicación específica y normalizadas para poder obtener áreas a partir del número de píxeles. Para la realización de esta tarea las imágenes son georreferenciadas y rectificadas geoméricamente. Esto consiste en pasar de una o muchas imágenes oblicuas a una imagen vista en planta de la zona, en la cuál la distancia en metros que separa a los píxeles rectificados es equidistante. Para la rectificación se debe aplicar una calibración extrínseca y otra intrínseca. La calibración intrínseca corrige la imagen de la curvatura generada por los lentes de la cámara y se realiza antes de instalar la cámara. Por otro lado la calibración extrínseca está relacionada con la posición y orientación de la cámara, transforman la imagen a coordenadas del mundo real.

De esta manera el video monitoreo costero por medio de cámaras nos permite analizar la afluencia y permanencia de sargazo con una alta escala temporal.

1.3. Zona de estudio

La zona de estudio es Puerto Morelos se ubica al este de la península yucateca, dentro de una barrera arrecifal que se extiende desde Honduras hasta el canal de Yucatán (figura 1.3.3). Puerto Morelos ha sido afectado por los arribazones masivos, los cuáles serán estudiados con cámaras instaladas en una torre dentro del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

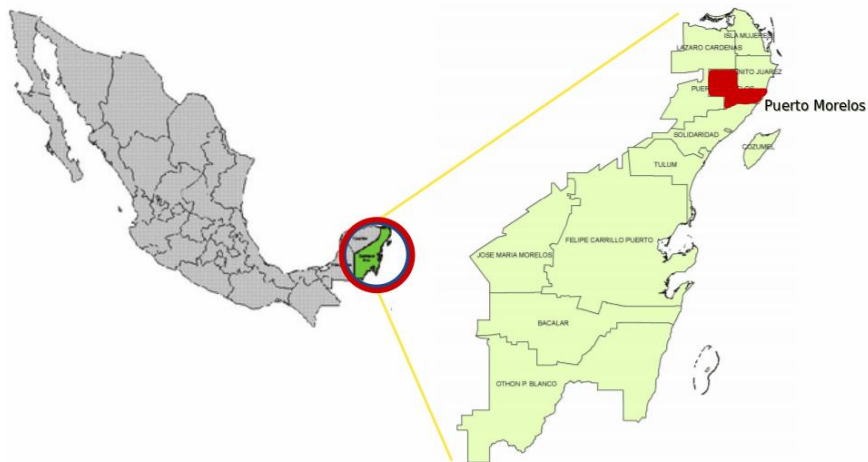


Figura 1.3.3: Ubicación del municipio de Puerto Morelos dentro del estado de Quintana Roo.

El clima en la región es tropical con dos temporadas dominantes. Invierno que va de Noviembre hasta Marzo donde la temperatura promedio mensual es de 24 a 25 ° C. En este periodo se presenta el paso de frentes fríos, llamados comúnmente "nortes". Durante la presencia de nortes la temperatura puede bajar significativamente. Por otro lado, los vientos provienen del noreste de Octubre a Febrero, mientras que durante el paso de nortes los vientos vienen del norte y del sureste. El verano se caracteriza por la presencia de brisas marinas y tormentas frecuentes, temperaturas máximas en el mes de Agosto arriba a los 33.5 ° C con promedios mensuales de 29 ° C y vientos predominantes del este (Coronado *et al.*, 2007).

La costa de Puerto Morelos es una laguna arrecifal con una longitud aproximada de 4 km y un ancho que varía de los 550 m a 1,500 m. Tiene una profundidad promedio de 3-4 m con un rango de marea de 17 cm. Cuenta con dos canales de entrada, uno al norte sobre la barrera arrecifal de 300 metros de ancho y de 6 m de profundidad, y otro en el sur que funciona como canal de navegación con 400 metros de ancho, este es dragado con regularidad para obtener una profundidad

cercana a los 8 m.

El clima marítimo en Puerto Morelos es dominado por oleaje swell proveniente del este generado en el mar Caribe. En aguas profundas se ha registrado una altura de ola significativa anual de $H_s = 0,8m$ con un periodo pico de entre 6 y 8 segundos. Presentándose en eventos de alta energía donde H_s puede superar los 1.75 m asociada al paso de nortes y tormentas. Por otro lado, en verano H_s ronda los 0.3 m. Sin embargo, el oleaje extremo está dominado por tormentas y huracanes que se presentan en el mar Caribe, lo que puede aumentar la altura del oleaje significativamente.

Coronado *et al.* (2007) analizó la física de la laguna y encontró que la rotura del oleaje en la cresta del arrecife produce un flujo hacia la laguna, esto aumenta el nivel de agua dentro de ella y finalmente el agua sale por los canales debido a la corriente generada por la diferencia entre el nivel de agua de la laguna y del mar adyacente. A su vez, encontró que la velocidad de esta corriente y las corrientes dentro de la laguna son función de: la corriente debido a la rotura del oleaje, corrientes de marea, corrientes por viento y a poco grado por la corriente de Yucatán.

El hecho de que la zona de estudio se encuentre en una laguna arrecifal y que los vientos predominantes sean en dirección normal hacia la costa podría jugar un papel importante en la residencia del sargazo en la playa.

1.4. Objetivos de la investigación y estructura del documento

Esta investigación tiene como objetivo principal aumentar el conocimiento sobre el comportamiento de los arribazones a una escala pequeña con el uso de imágenes de alta resolución. Los objetivos particulares en esta investigación son:

1. Desarrollar un algoritmo capaz de identificar sargazo sobre imágenes de la costa.
2. Cuantificar la cobertura de sargazo en imágenes por hora de la costa.
3. relacionar el comportamiento del sargazo en la playa con las condiciones meteorológicas.

En esta tesis se busca responder preguntas sobre identificación de objetos en imágenes. Y otras más sobre la presencia de sargazo y su dinámica en la zona costera:

1. ¿Las imágenes tomadas por estaciones costeras son efectivas para la identificación de sargazo encallado?
2. ¿Cuáles herramientas de procesamiento de imágenes son útiles en la identificación de sargazo y por qué?
3. ¿En que temporada del año hay mayor y menor presencia de sargazo?
4. ¿Cómo influye el clima marítimo y las condiciones meteorológicas la dinámica de los arribazones?
5. ¿Cuál es la capacidad del sistema para dispersar sargazo encallado?.

Esta tesis se conforma de 5 capítulos. En el capítulo 2, se presentan y describen las técnicas de aglomeramiento k-medias, jerárquica y dbscan para identificar sargazo en imágenes. Se realiza un análisis y una comparación de todas, después de analizar las técnicas de aglomeramiento y sus resultados parciales se comparan con un clasificador llamado Soporte Vectorial de Máquinas o SVM (por sus siglas en inglés). En el capítulo 3 se describe la metodología para cuantificar la cobertura de sargazo a lo largo de 5 años. Se discuten los procesos a los que fueron sometidas las imágenes desde su recolección o imagen cruda hasta el producto final, qué es la cobertura de sargazo horaria. Adicionalmente se compara el SVM con las otras técnicas de identificación. En el capítulo 4 se correlaciona la presencia del sargazo en la costa y los principales forzamientos del sistema marítimo, oleaje y viento. Por último, en el capítulo 5 se responden las preguntas planteadas previamente y se presentan las conclusiones junto con recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Detección de sargazo

La detección de objetos en imágenes es un tema sumamente explotado. En la literatura se encuentran algoritmos sencillos y complejos, en función del tamaño de la imagen y la distribución de sus píxeles. Un ejemplo ilustrativo es encontrar una línea que divida dos clases de píxeles para clasificar áreas u objetos en una imagen. La complejidad de esta identificación puede incrementarse y llegar incluso al uso de redes neuronales o aprendizaje de máquinas para lograr el mismo objetivo. En este capítulo se implementan tres procesos de identificación. El primero es el método de Otsu que fue aplicado previamente por Berriel-Bueno (2018). El segundo método consiste en una serie de técnicas de aglomeramiento (K-medias, jerárquico y DBSCAN) que pertenecen al área de aprendizaje de máquinas. El tercer método es un clasificador llamado Soporte Vectorial de Máquinas (SVM). En los siguientes capítulos se evaluará la eficiencia de cada método para la identificación de sargazo sobre la playa.

2.1. Método de Otsu

En el caso de este identificador se replicó la metodología usada en Berriel-Bueno (2018) para identificar sargazo. El método de Otsu consiste en analizar la distribución de píxeles en cada canal de un espacio de color. En la figura 2.1.1 se muestran los histogramas para los canales del espacio de color HSV (matiz, saturación y brillo). A partir de estos histogramas se buscan los umbrales que dividan de manera eficiente a los grupos al minimizar la varianza de los datos, es un proceso iterativo y es necesario especificar el número de grupos deseados.

El canal saturación fue despreciado debido a que sus resultados no son útiles para la identificación de sargazo. Los canales matiz y brillo se dividieron en 4 clases usando el método de Otsu. Para el caso del canal Matiz el grupo H1 representa el

sargazo en el mar, el H2 la vegetación costera, el H3 el mar y el grupo H4 muestra bordes de sargazo y una sección del muelle. Para el canal brillo se encontraron 4 grupos. EL primero sargazo en la playa y vegetación costera (V1), el segundo sargazo en el mar (V2), el tercero mar (V3) y el cuarto arena (V4).

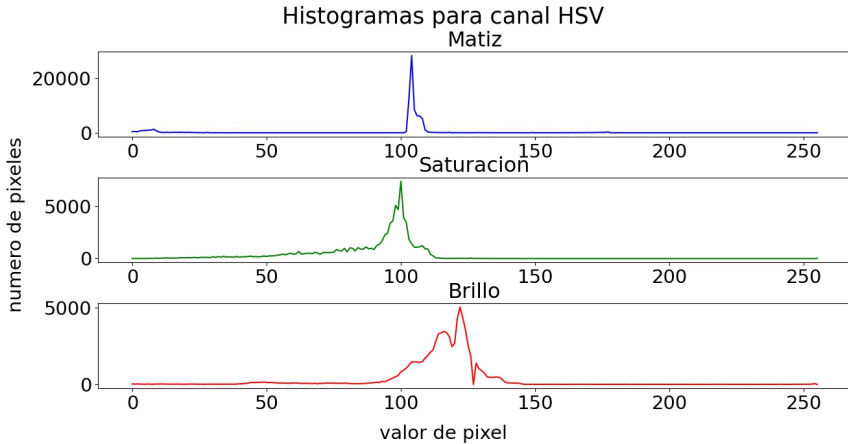


Figura 2.1.1: Diagrama de distribución de píxeles en una imagen. Se muestra la cantidad de píxeles en los canales H, S y V, diagrama usado en el método de Otsu.

La identificación de sargazo se realizó por la operación booleana $(H_1 \cap H_4) \cup V_1$, logrando una identificación de sargazo más precisa haciendo uso de 2 canales.

2.2. Técnicas de aglomeramiento

Las técnicas de aglomeramiento son usadas en el aprendizaje de maquinas para agrupar datos con características similares. Estas se usan cuando no hay información a priori sobre las clases en la imagen, lo que hace a este método un método no supervisado. Las mayoría de las aplicaciones son sobre datos que no pertenecen a imágenes como: el análisis computacional de perfiles genéticos, microanálisis de rayos X con sonda eléctrica, identificar compuestos para mezclas químicas y en algunos casos para monitoreo al identificar cambios en algún proceso (Tran *et al.*, 2005). Tran *et al.* (2005) probó la eficiencia de las técnicas de aglomeramiento en la identificación de objetos obteniendo resultados decentes. Los resultados de la investigación de Tran *et al.* (2005) nos ayudó en la selección de las técnicas de aglomeramiento usadas para la identificación de sargazo

Después de realizar pruebas con diferentes espacios de color se encontró que al usar el espacio de color HSV se obtienen los mejores resultados. Este espacio de color se compone por los canales H (matiz), S (saturación) y V (iluminación).

Al realizar pruebas preliminares se encontró que el uso de los canales H y V resulta más robusto a las variaciones espaciales y temporales de iluminación en las imágenes. Algunos de los parámetros a los que son sensibles las técnicas de aglomeramiento son: tamaño de la imagen, ruido en la imagen, superposición entre grupos, número de grupos, diferente densidad de grupo y diferente tamaño de grupo.

El modelo más popular en las técnicas de aglomeramiento para medir la similitud entre píxeles es la distancia Euclidiana, la cual a su vez es un caso especial de la distancia Minkowski, con $p = 2$. La distancia Minkowski está dada por la siguiente ecuación:

$$\varphi_{minkowski}(x_i, x_j) = \left(\sum_{l=1}^d |x_{il} - x_{jl}|^p \right)^{1/p} \quad (2.2.1)$$

Donde:

x_i = vector número uno con l número de componentes.

x_j = vector número dos con l número de componentes.

el caso $p = 2$ es la distancia Euclidiana, el caso $p = 1$ es la distancia Manhattan.

En la figura 2.2.2 se muestra la distribución de los canales H y V. Las zonas donde los contornos están más cerrados son zonas donde hay mayor cantidad de píxeles, dichas zonas representan los diferentes grupos.

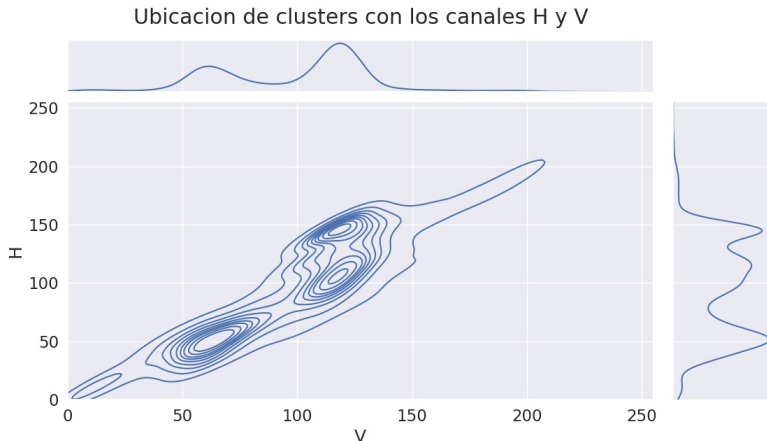


Figura 2.2.2: Histogramas de distribución de píxeles de los canales V (arriba) y H (abajo derecha) y ocurrencia conjunta (abajo izquierda).

En este trabajo se realizaron pruebas con 3 diferentes técnicas de aglomeramiento. La primera fue la técnica iterativa k-medias donde se colocan puntos

aleatoreamente que son los centros de los grupos y los datos más cercanos a estos forman parte de ese grupo. A la siguiente iteración se promedian las distancias de cada uno de los datos al centro de cada grupo, y ese resultado toma el lugar del centro del grupo. Así hasta llegar a que la diferencia entre la posición actual de centro del grupo sea muy pequeña a la posición del centro anterior o hasta que se cumplan un número de iteraciones dadas. K-medias tiene como valores de entrada el número de grupos, la tolerancia entre la posición nueva del centro del grupo y la posición anterior ó el número de iteraciones.

La segunda es la jerárquica. Esta técnica toma en principio a todos los datos como un grupo, al siguiente paso toma parejas de puntos más similares entre sí para crear nuevos grupos con estas parejas, y repite este proceso hasta llegar al número de grupos que se solicite como lo muestra la figura 2.2.3 (Popat & Emmanuel, 2014). Para el uso de esta técnica es necesario tener tres entradas principales. El número de grupos, la métrica a usar la estándar es la euclidiana y el tipo de conexión que tendrán los grupos a los datos.

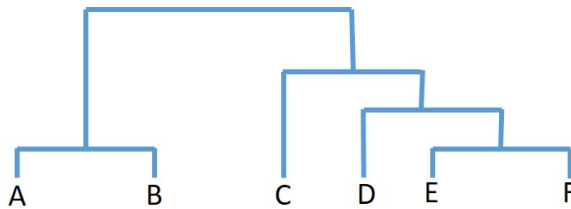


Figura 2.2.3: Dendrograma representativo de técnica de jerarquía.

La tercer técnica de aglomeramiento usada es la "Density-based spatial grouping of applications with noise"(DBSCAN). Como sugiere su nombre en inglés este algoritmo está basado en la densidad de datos, esto es lo que determina el número de grupos. DBSCAN toma como grupos a un conjunto de datos que cumplan con las siguientes condiciones dadas por el usuario. Debe de existir una distancia mínima entre sus puntos (ϵ) y contar con un número mínimo de puntos pertenecientes al grupo. Esta técnica de agrupamiento es capaz de discriminar el ruido en los datos ((Tran *et al.*, 2005)).

2.3. Soporte Vectorial de Máquinas

Este método es un clasificador de datos. Por medio de un entrenamiento con datos clasificados con anterioridad, se clasifican datos nuevos. Esta herramienta ha sido usada para detección de objetos en imágenes y se han reportado resultados que compiten con redes neuronales e inteligencia artificial (Tzotsos & Argialas, 2008).

Este método crea un hiperplano que separa los datos en categorías distintas con la ayuda de vectores de apoyo, que se refieren a los datos de entrenamiento. Si se supone que las dos clases son linealmente separables significa que debe existir más de una línea para separar los datos. Entonces los datos son representados como $\{x_i, y_i\}$, $i=1,2,3, \dots, N$, $y_i \in \{-1, +1\}$.

Donde:

N = número de muestras para entrenamiento.

$y_i=+1$ para la clase w_1 .

$y_i=-1$ para la clase w_2 .

Sin embargo podemos calcular dos líneas paralelas entre sí, una para cada clase, con las siguientes expresiones:

$y_i(wx_i + w_0) \geq +1$ para la clase w_1 donde $y_i = +1$

$y_i(wx_i + w_0) \leq -1$ para la clase w_2 donde $y_i = -1$

Las cuales se pueden combinar para obtener la ecuación:

$$y_i(w * x_i + w_0) - 1 \geq 0. \quad (2.3.2)$$

La separación entre dichas líneas se le llama margen y se encuentra minimizando la expresión:

$$\min \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 \right). \quad (2.3.3)$$

Sin embargo, la ecuación 2.3.2 no es adecuada cuando el problema deja de ser lineal. Para mejorar esto SVM realiza una operación que consiste en agregar una dimensión extra a los datos de entrenamiento. Esta dimensión extra se añade usando un kernel, que se refiere a una función elegida por el usuario. En esta función los datos de entrada son los valores de entrenamiento de cada vector. El kernel que se usó en esta tesis está dado por la ecuación:

$$z_i(x_i = [a_i, b_i]) = \bar{a} * \bar{b} + \|\bar{a}\|^2 \|\bar{b}\|^2. \quad (2.3.4)$$

Si bien la técnica SVM fue la elegida para el procesamiento de las imágenes usadas en este trabajo. Es necesaria una comparación de los resultados de todas las técnicas para así seleccionar la que haga mejor el trabajo.

2.4. Comparación entre métodos

Para seleccionar la mejor técnica de identificación de sargazo se compararon las técnicas mencionadas atrás. Todas las imágenes usadas en esta sección se sometieron a un procesamiento que se describe en el Capítulo 3 para obtener la cobertura de sargazo a lo largo del periodo de estudio. En las dos imágenes siguientes se muestra una imagen con sargazo seco en la playa y la otra sin él (figura 2.4.4a y b, respectivamente). Los resultados obtenidos de la aplicación de la técnicas de identificación sobre las imágenes son mostrados en las figuras 2.4.5 y 2.4.6.

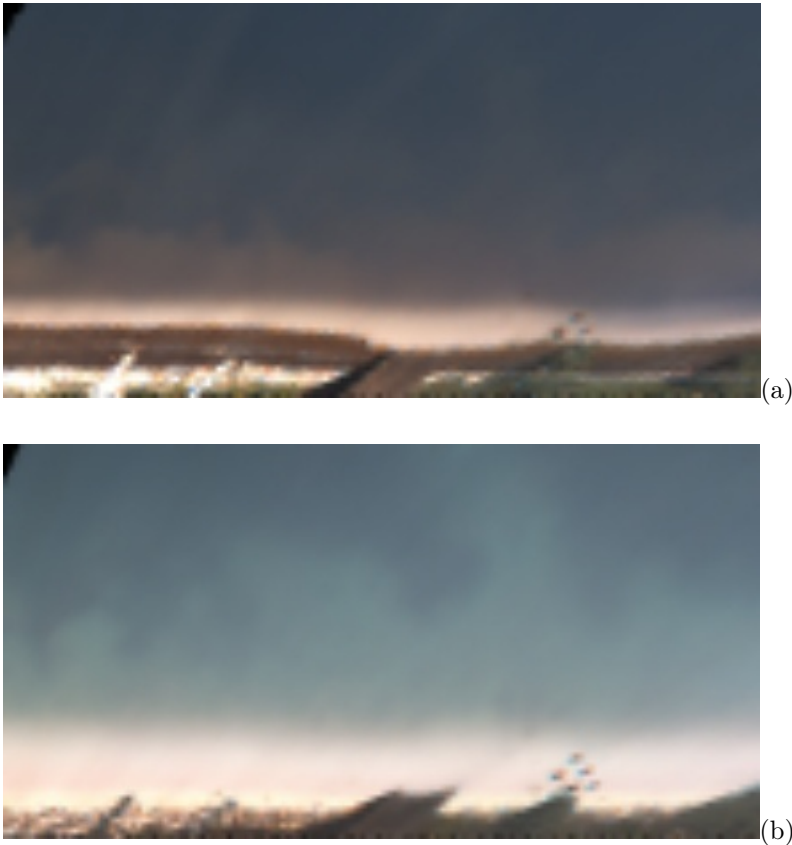


Figura 2.4.4: Fotografías preprocesadas usadas para cuantificar sargazo. a) imagen con sargazo seco del día 02/04/2018, b) imagen sin sargazo del día 08/03/2017.

Al realizar pruebas con las 5 técnicas descritas previamente se encontró que mientras la imagen se aleja de las cámaras los valores de los píxeles tienen mayores variaciones o ruido. Debido a esto, todas las técnicas se aplicaron sólo a la mitad de la imagen rectificadas (mostrada más adelante). También se encontró que

la vegetación costera en la parte inferior de las imágenes causa errores en la identificación de cualquier algoritmo. Por esto se optó por retirarla, excepto para las pruebas hechas con el método de Otsu siguiendo la metodología de Berriel-Bueno (2018) (ver capítulo 3).

En la figura 2.4.5 se muestran los resultados de la aplicación de todos los identificadores sobre la imagen del día 2 de Abril de 2018 donde hay alta presencia de sargazo. El área azul representa el sargazo identificado en la imagen.

En la imagen 2.4.5a se muestran los resultados de usar el método de Otsu aplicado en Berriel-Bueno (2018). La imagen muestra que la identificación de sargazo seco no es precisa debido a que encuentra sargazo seco donde no lo hay. Además hay una gran parte de sargazo que no es detectado. Al realizar pruebas con diferentes imágenes encontramos que el método es sensible a los cambios de iluminación y de tamaño de la imagen. Algunas veces el método es preciso con la selección de 4 grupos y en otras ocasiones lo es al asignar 5 grupos. La imagen mostrada en la figura 2.4.5a es claramente más corta a las imágenes donde se aplicaron otros métodos debido a que al cambiar el tamaño la identificación no fue precisa.

En las figuras 2.4.5b, 2.4.5c y 2.4.5d se muestran los resultados de aplicar las técnicas k-medias, jerárquica y dbscan, respectivamente. En las técnicas k-medias y jerárquica fueron asignados 5 grupos como entrada a los algoritmos. En el caso de dbscan se usó una distancia entre píxeles (epsilon) de 0.2 y un número mínimo de 100 píxeles para un grupo. Bajo estas condiciones se puede observar que en las técnicas k-medias, jerárquica y dbscan la identificación es similar. El sargazo es identificado con excepción de la parte superior donde agua es detectada como sargazo con las 3 técnicas de aglomeramiento. Con las pruebas se encontró que las tres técnicas tienen alta sensibilidad a los cambios de iluminación de las imágenes. Cuando se presentaron estos cambios de iluminación fue necesario usar un número mayor de grupos en los algoritmos k-medias y jerárquico. Y para el caso de dbscan fue necesario alterar el valor de epsilon. La figura 2.4.5e es una imagen con la aplicación del clasificador SVM. El área dentro de la línea blanca es la seleccionada como sargazo por el algoritmo. Esta técnica realiza el trabajo de identificación con mayor precisión. Al igual que en los otros identificadores, se encontró sensibilidad a los cambios de iluminación pero a menor escala.

En la figura 2.4.6 están los resultados de la aplicación de los cinco métodos de identificación del día ocho de Marzo de 2017 cuando la presencia de sargazo es baja. La imagen 'a' muestra la aplicación del método de Otsu, las imágenes 'b c d' corresponden a la aplicación de las técnicas de aglomeramiento kmeans, jerárquica y dbscan, respectivamente. En la imagen 'e' se aplicó el clasificador SVM sólo en la mitad de la imagen. Otsu(a) encuentra grupos de sargazo en la vegetación ya que el método requiere a priori que se especifique cuantos grupos y cuales grupos debe encontrar. Esta es la mayor limitante, la incapacidad para detectar correctamente imágenes sin sargazo o con poco sargazo. La técnica k-means(b) hace el trabajo bastante bien identificando el sargazo de manera correcta en esta imagen con poco sargazo, pero no lo hace bien en las imágenes con gran cantidad de sargazo (ver .

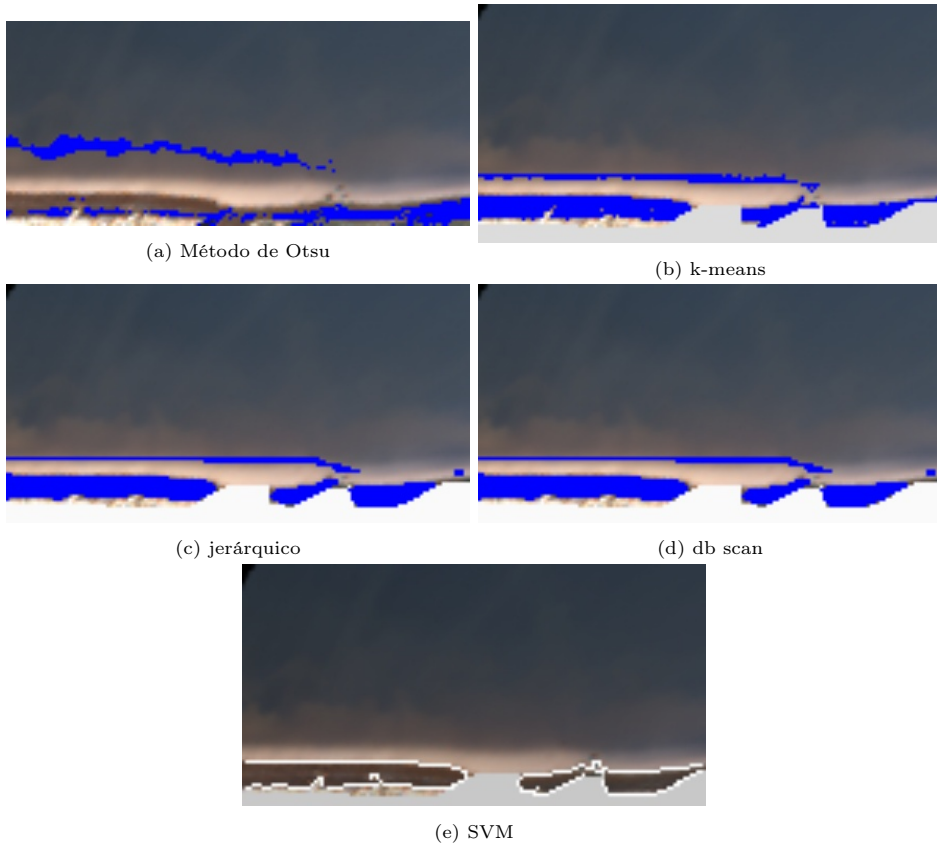


Figura 2.4.5: Aplicación de técnicas para identificación de sargazo en imagen del día 2 de Abril de 2018 (alta presencia de sargazo seco).

Por otro lado, la técnica jerárquica(c) identifica parcialmente el sargazo y además entrega falsos positivos en el agua. Dbscan subestima la cantidad de sargazo y además selecciona un área que es agua como sargazo. En la imagen del inciso (e) se aplicó el clasificador SVM. La identificación del SVM es buena incluso en imágenes con poco o nada de sargazo. Si se observa la imagen original, el inciso (b) de la figura 2.4.4 se percibe una alta precisión en al área donde se ha aplicado el clasificador. SVM realiza la identificación de sargazo con mayor precisión en imágenes con cantidades grandes o moderadas y no entrega falsos positivos para imágenes sin presencia de sargazo.

2.5. Conclusiones

Se puede observar que el método SVM mejora significativamente la clasificación al comparar con el método de Otsu, kmedias, jerárquico y dbscan. La identificación

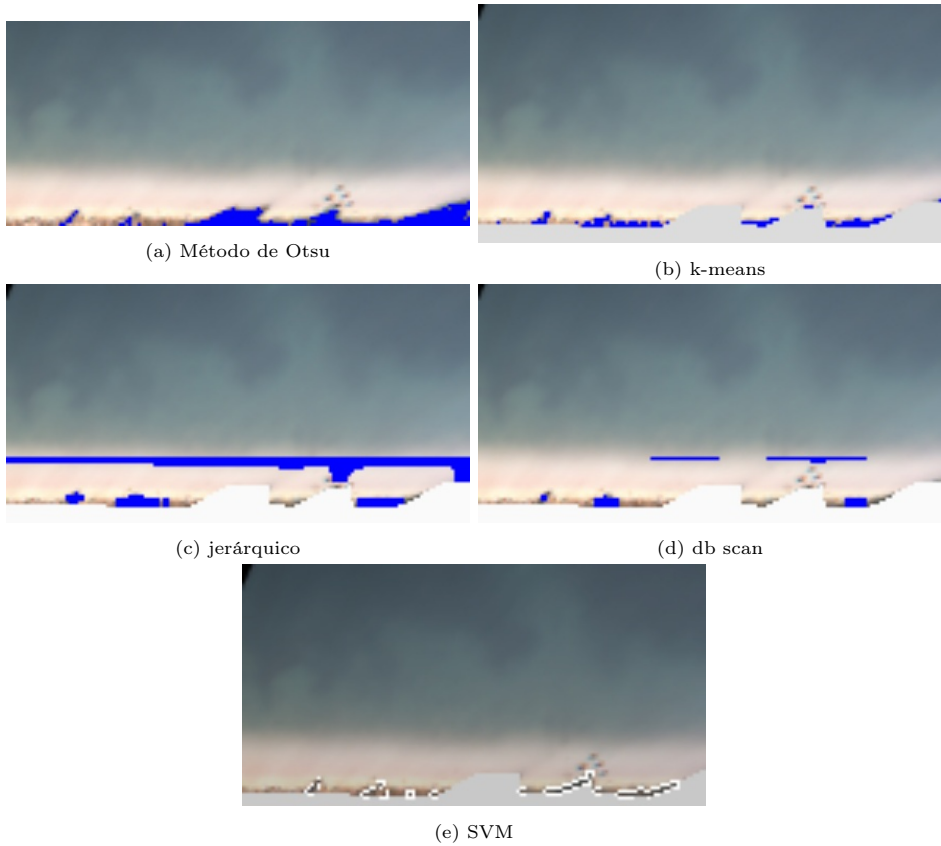


Figura 2.4.6: Aplicación de técnicas para identificación de sargazo en imagen del día 8 de Marzo de 2017 (baja presencia de sargazo seco).

de sargazo seco hecha por SVM mostrada en la figura 2.4.6 subestima en un bajo grado el área de sargazo. Sin embargo, discrimina perfectamente las áreas donde no lo hay. Para el caso donde hay alta presencia de sargazo la identificación del SVM también tiene alta precisión además de no entregar falsos positivos. La limitante más importante de los métodos no supervisados (Otsu, kmedias, jerárquico y dbscan) es la poca flexibilidad que tienen cuando hay más o menos grupos de los esperados.

Capítulo 3

Cuantificación de Sargazo

Para lograr mitigar el impacto de los arribazones es necesario conocer el volumen de llegada de sargazo y salida de sargazo. Por ello, en este capítulo se detalla el proceso que se siguió para cuantificar la cobertura de sargazo en metros cuadrados para el periodo del 19 de Septiembre de 2015 al 10 de Junio de 2019.

3.1. Metodología

En esta sección se describirá a detalle el procesamiento que se aplicó a cada imagen para la identificación con el clasificador SVM. Primero se realizó un preprocesamiento que transforma las imagenes crudas a coordenadas en el mundo real. A estas imagenes transformadas les fue aplicado un procesamiento que consta de la identificación de sargazo y la cuantificación a lo largo del periodo de estudio. La identificación de sargazo se realiza en dos etapas, una para identificar el sargazo seco y otra para el sargazo flotante. Para finalizar, los resultados obtenidos fueron limpiados de valores extremos y refinados. De este modo, se obtuvo la cobertura de sargazo para cada hora del periodo de estudio. A continuación se describe cada una de estas etapas con mayor detalle.

3.1.1. Pre-procesamiento

En la figura 3.1.1 se presentan el diagrama de flujo que describe los procesos aplicados a las imágenes antes de iniciar la identificación y cuantificación de sargazo. Las imágenes a analizar son capturadas por cámaras modelo stingray 125C mca Allied Vision ubicadas a 15 metros de altura y a aproximadamente 50 metros de la línea de costa en una unidad del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

Las cámaras son mantenidas por el Servicio Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO). La estación cuenta con 2 cámaras dirigidas hacia la costa que comparten una fracción de sus campos de visión.

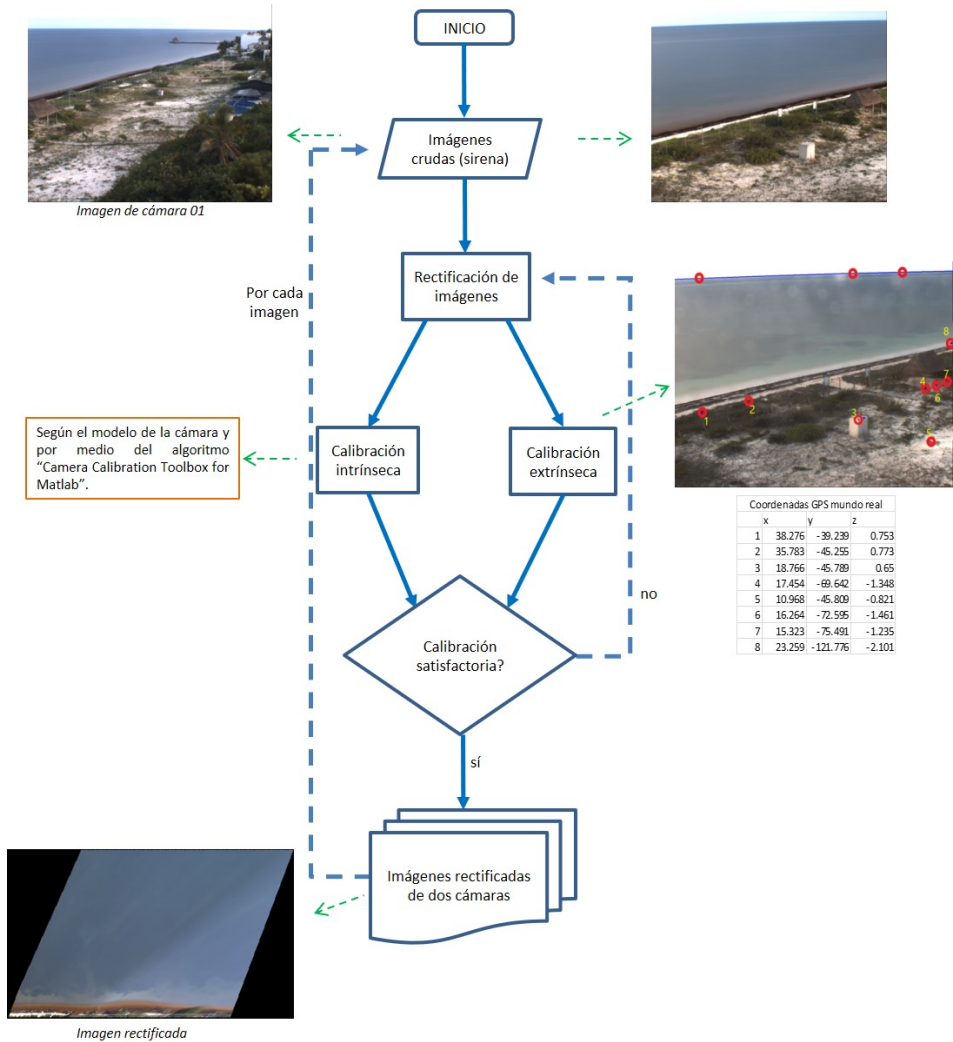


Figura 3.1.1: Diagrama de flujo de pre-procesamiento.

En la estación está implementado el sistema de video monitoreo SIRENA. Se programó a sirena para obtener una imagen instantánea, promedio y de varianza de la zona de estudio para ambas cámaras cada hora (figura 3.1.2). Se cuentan con imágenes de ambas cámaras desde el 16 de Septiembre de 2015 hasta el 08 de Junio de 2019. El conjunto de imágenes tiene periodos sin información cuando las lluvias o vientos intensos provocan cortes de energía y fallos en el sistema.

Así, la estación de monitoreo de Puerto Morelos nos permite analizar los arri-



Figura 3.1.2: Imágenes tomadas por cámara 1(izquierda) y cámara 2(derecha) del 1ro de Octubre de 2015 en la estación Puerto Morelos

bazones en la costa. Sin embargo, las imágenes capturadas deben someterse a un procesamiento para lograr cuantificar con exactitud la cobertura de sargazo.

Rectificación de imágenes

Las imágenes oblicuas de ambas cámaras se sometieron a un primer procesamiento aplicado con el software ULISES (Simarro *et al.*, 2017). Este procesamiento tiene el objetivo de rectificar geoméricamente las imágenes y así obtener un mosaico normalizado de ellas. Para ello es necesario realizar dos calibraciones, intrínseca y extrínseca. La calibración intrínseca depende principalmente de las distorsiones que existen en el lente de la cámara. En este trabajo esta calibración fue realizada por medio de un algoritmo de MATLAB llamado ' Camera Calibration Toolbox for Matlab '.

El algoritmo resuelve la ecuación de distorsión en lentes de prisma delgado propuesta por Brown (1966):

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fc(1) & \alpha_c * fc(1) & cc(1) \\ 0 & fc(2) & cc(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

Donde:

x_p = Punto proyectado en el eje x.

y_p = Punto proyectado en el eje y.

f_c = Distancia focal en eje x y eje y ($f_c(1)$, $f_c(2)$)

α_c = Coeficiente de inclinación define el ángulo entre los ejes x y.

cc = Coordenadas de punto principal en la imagen, se puede proponer como el centro de la imagen en primera instancia.

$$x_d(1) = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6)x + (2kc(3)xy + kc(4)(r^2 + 2x^2))$$

$$x_d(1) = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6)y + (kc(3)(r^2 + 2y^2) + 2kc(4)xy)$$

Donde:

kc = Distorsiones radiales y tangenciales ($kc(1)$, $kc(2)$, $kc(3)$, $kc(4)$, $kc(5)$).

x = coordenada en x de la imagen a proyectar, normalizada.

y = coordenada en y de la imagen a proyectar, normalizada.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Para esta calibración se usa un tablero de ajedrez en el que las dimensiones en el mundo real son conocidas. Se recomienda el uso de 20 a 25 imágenes tomadas con diferentes posiciones de la cámara. La calibración se realiza solo con la cuadrícula del tablero. En cada pixel se aplica la ecuación 3.1.1. Una vez realizada esta calibración se guarda un archivo de calibración usado para procesar las siguientes imágenes. Para este trabajo el archivo de calibración intrínseca fue proporcionado por el ICML.

Con la calibración extrínseca se busca ubicar una imagen en coordenadas del mundo real (x,y,z)y así, asignarle a los píxeles una unidad de longitud. En este trabajo usamos el software ULISES para la calibración extrínseca. ULISES resuelve una transformación lineal directa de las siguientes expresiones colineales (Simarro *et al.*, 2017):

$$c_u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (3.1.2)$$

$$c_r = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (3.1.3)$$

Donde:

c_u = posición del pixel en las columnas de la matriz de la imagen.

c_r = posición del pixel en las filas de la matriz de la imagen.

Holland *et al.* (1997) determinaron las expresiones para calcular los coeficientes L_i mostrados en las ecuaciones 3.1.2 y 3.1.3. Los valores de L_i dependen del tamaño de la imagen, la distancia focal normalizada, la posición de la cámara y su orientación con respecto al mundo real (ver Holland *et al.* (1997)).

Para resolver las ecuaciones 3.1.2 y 3.1.3 en toda la imagen es necesario contar con los siguientes datos:

- Archivo de calibración intrínseca (no indispensable)
- Coordenadas x , y , z de la cámara en el mundo real.

- Puntos de control en la imagen (píxeles) y sus coordenadas x, y, z en el mundo real.
- Seleccionar puntos en el horizonte.
- En el caso de unir las imágenes de dos o más cámaras es conveniente tener puntos de control en común entre cámaras.

Es recomendable que los puntos de control seleccionados correspondan a estructuras permanentes en la costa debido a que si es una estructura móvil será necesario cambiar sus coordenadas x, y, z . Así como la posición en filas y columnas en la imagen. De igual forma, es recomendable que la estructura donde estén fijas las cámaras sea suficientemente rígida y así evitar el movimiento de las mismas. El movimiento de las cámaras implica volver a identificar la ubicación en filas y columnas de los puntos de control en la imagen.

En este trabajo se usó como referencia la posición de la cámara 1 y a esta se le asignaron los valores de $x = 0,0, y = 0,0, z = 14,98$. Así mismo, la cámara 2 tiene la posición $x = 0,266, y = 0,115, z = 14,983$. El personal del IMCL nos proporcionó las ubicaciones en coordenadas del mundo real de los puntos de control, se muestran en el cuadro 3.1.1. Las ubicaciones de los puntos de control para cada imagen se muestran en la imagen 3.1.3. Dos puntos de control de la cámara 2 fueron eliminados en el año 2017 debido a que se encontraban en una reja que fue rehabilitada.

Cuadro 3.1.1: En el cuadro se muestran las coordenadas x, y, z de los puntos de control para ambas cámaras con respecto a la posición de la cámara 1. Los puntos que aparecen marcados en ambas cámaras son puntos que los campos de visión de las cámaras tienen en común.

x	y	z	cámara 1	cámara 2
17.454	-69.642	-1.348	punto 1	punto 4
10.968	-45.809	-0.821	punto 2	punto 5
16.264	-72.595	-1.461	punto 3	punto 6
15.323	-75.491	-1.235	punto 4	punto 7
23.259	-121.776	-2.101	punto 5	punto 8
1.953	-130.17	0.81	punto 6	-
-5.479	-108.512	-0.225	punto 7	-
-37.138	-549.581	-1.145	punto 8	-
-11.756	-164.498	0.83	punto 9	-
-33.618	-130.084	0.686	punto 10	-
38.276	-39.239	0.753	-	punto 1
35.783	-45.255	0.773	-	punto 2
18.766	-45.789	0.65	-	punto 3

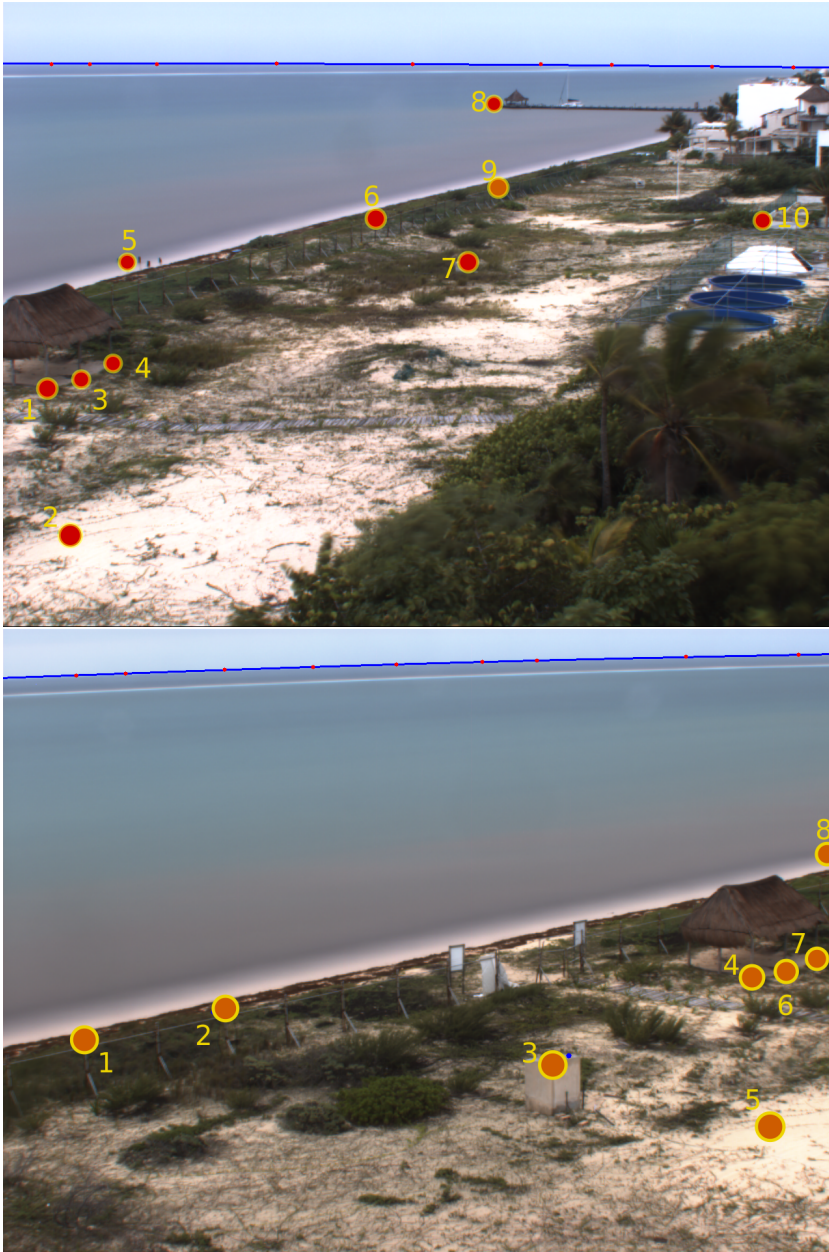


Figura 3.1.3: Puntos de control en las imágenes de cámara 1 (arriba) y cámara 2 (abajo).

Se rectificaron todas las imágenes proporcionadas eliminando manualmente las que presentaban errores graves como total oscuridad o manchas importantes. Para este trabajo se realizó una calibración por mes y en algunos casos 2 o más por mes. El software asume que los puntos de control permanecen en la misma

fila y columna en imágenes subsecuentes. A menos que se proporcionen datos de calibración nuevos. Al observar los primeros resultados sobre una rectificación preliminar se encontró que las cámaras tienen poco movimiento a lo largo de los años. Este movimiento se midió con respecto a los puntos de control en la imagen. Para este análisis se tomó en cuenta el punto 3 de la cámara dos (figura 3.1.3).

Los años 2015 y 2016 son donde se percibe más movimiento de las cámaras, en particular 2016. En la figura 3.1.4 se muestra el día y el mes de mayor movimiento que corresponden al 10 de Abril de 2016 y el mes de Abril de 2016. El punto mencionado se mueve un máximo de 4 píxeles el 10 de abril. El movimiento disminuye (figura 3.1.5) debido a que miembros del SAMMO protegieron las cámaras de los rayos solares resultando en una reducción de la expansión térmica.

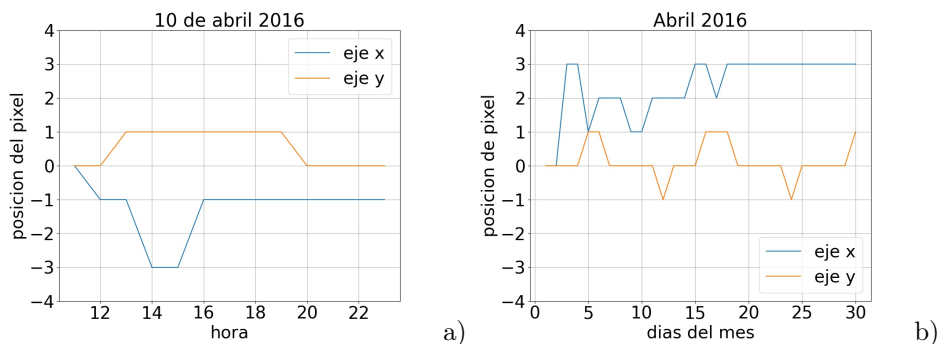


Figura 3.1.4: Movimiento del punto de control 3 en la cámara dos en ejes x, y para el 10 de Abril de 2016(a) y Abril de 2016 (b)

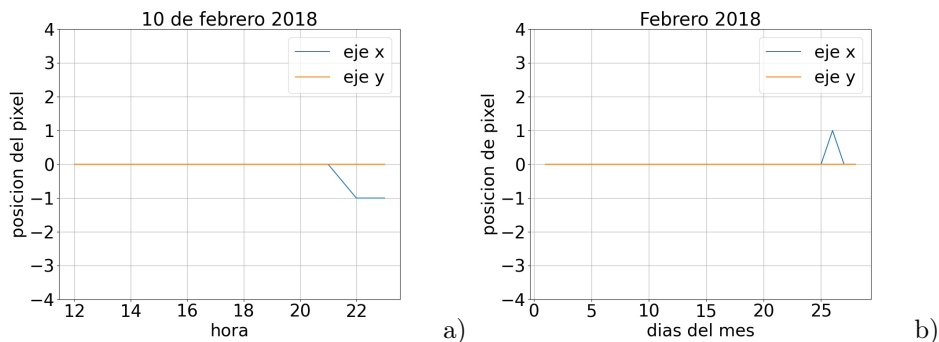


Figura 3.1.5: Movimiento del punto de control 3 en la cámara dos en ejes x, y para el 10 de Febrero de 2018(a) y Febrero de 2018(b)

Después de realizar las calibraciones mencionadas el software procesó todos los pares de imágenes a lo largo del periodo de estudio.

A continuación, se realizó una revisión visual para cada año donde se observó que algunas de las imágenes estaban incompletas, es decir, para la misma hora

existía una imagen de la cámara 1 pero no de la cámara 2, o viceversa. Se encontraron también otros errores como imágenes borrosas o demasiado oscuras (figura 3.1.6). Todas estas imágenes fueron eliminadas.

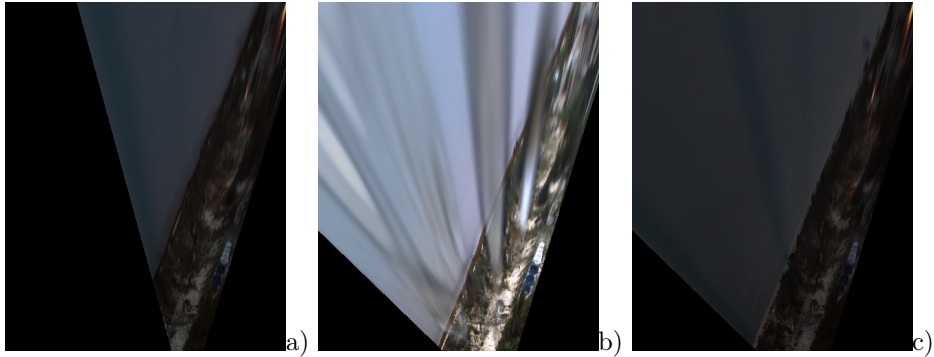


Figura 3.1.6: Errores comunes en imágenes rectificadas: a) Imagen sin foto de cámara 2. b) imagen con gotas en el lente. c) imagen demasiado oscura

Se procedió a rotar y recortar las imágenes sin errores para hacer los algoritmos futuros más sencillos. La imagen estándar en la que se identifica sargazo es de 241 píxeles en vertical y 440 en el sentido horizontal con el mar orientado hacia arriba como la figura 3.1.7. Para esta imagen un pixel equivale a 0.5 metros. Se observa la playa en la zona baja. La franja blanca entre la arena y el mar corresponde a la zona de rotura del oleaje. Las franjas negras son debido a la dirección de las cámaras.

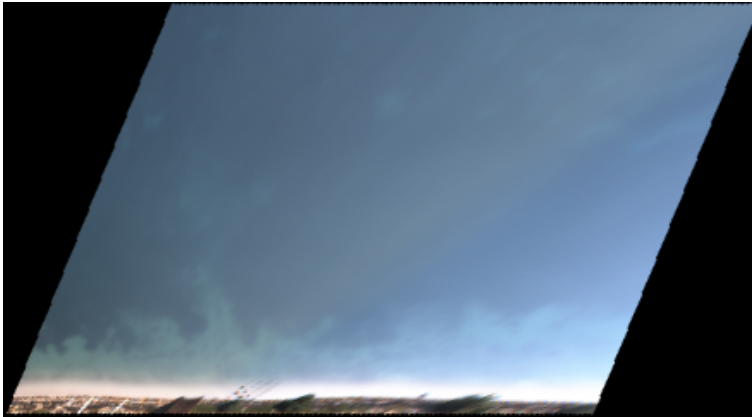


Figura 3.1.7: Imagen estándar para identificación de sargazo

Así las imágenes crudas georeferencias y rectificadas para continuar con el proceso de identificación y cuantificación de sargazo descrito en la siguiente sección.

3.1.2. Procesamiento

El conjunto de imágenes rectificadas es sometido al proceso descrito en los diagramas de flujo mostrados en las figuras 3.1.8 y 3.1.9. Para una identificación con mayor precisión fue necesario dividir el proceso en dos etapas. Primero identificar el sargazo seco y después el sargazo flotante. En la figura 3.1.8 se describe el proceso para la identificación de sargazo seco y en la 3.1.9 el proceso para identificar el sargazo flotante.

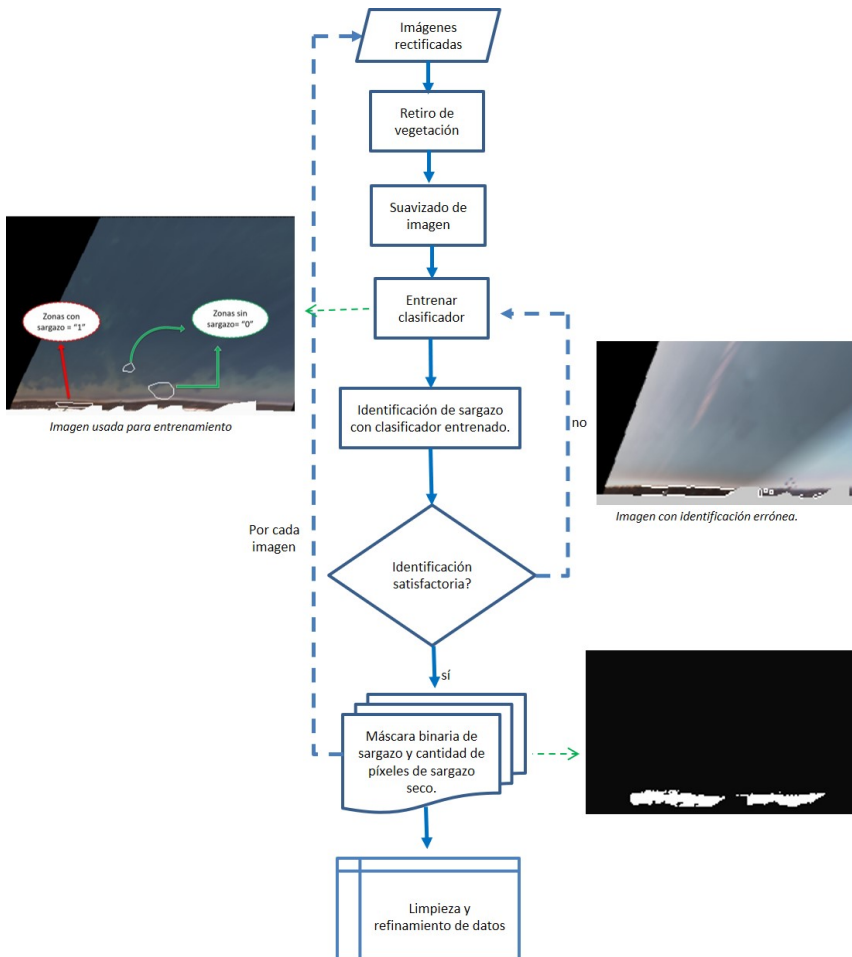


Figura 3.1.8: Diagrama de flujo para identificación de sargazo seco.

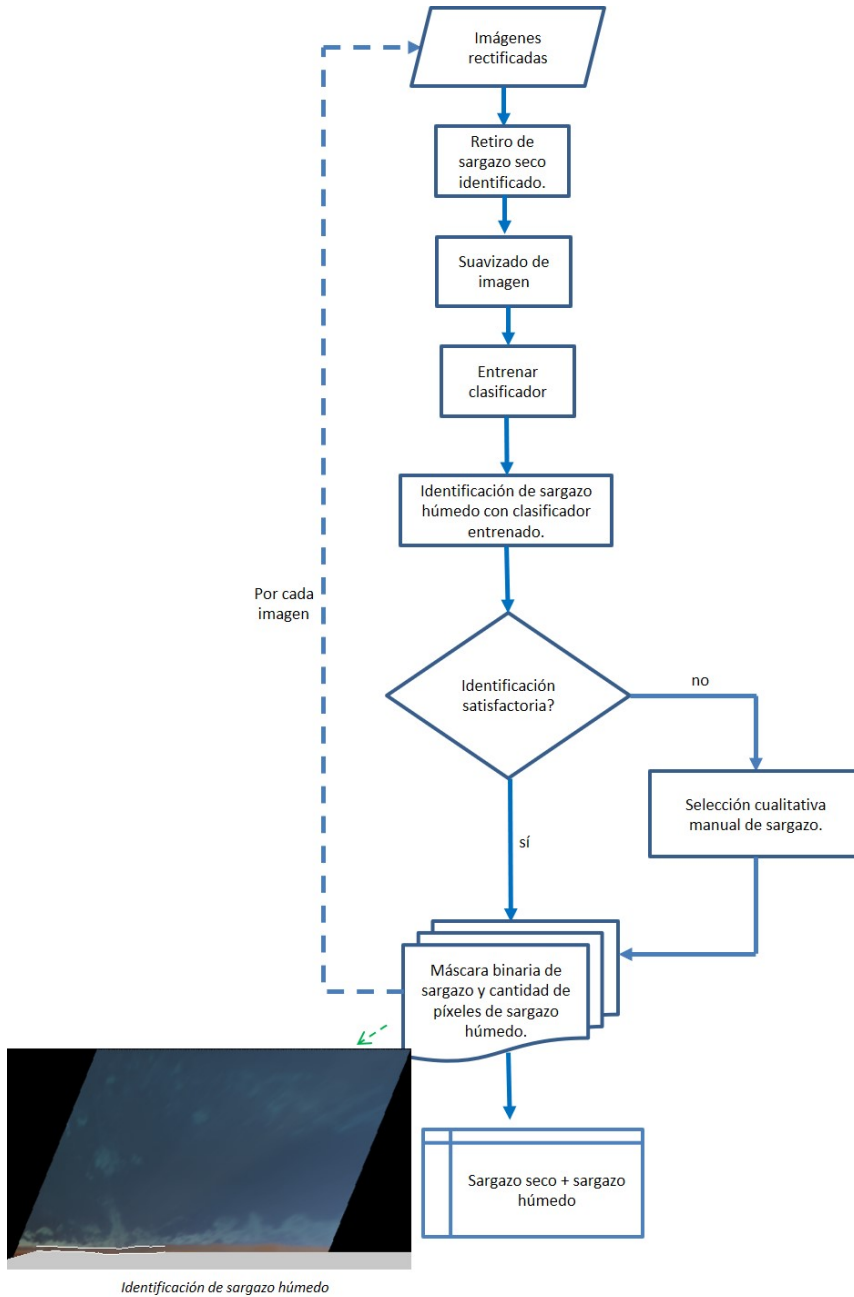


Figura 3.1.9: Diagrama de flujo para identificación de sargazo flotante.

Entrenamiento de SVM

Se realizaron pruebas para separar los píxeles que son sargazo de los píxeles que son vegetación. Sin embargo, esto no fue satisfactorio y finalmente se creó una línea

de vegetación manual, basada en la línea de vegetación promedio durante el año. Los píxeles debajo de esta línea que corresponden a vegetación fueron asignados con un valor de $[250,250,250]$ (color blanco) en el espacio de color RGB.

Como se mencionó en la sección 3.1.2, SVM necesita de un entrenamiento. Este entrenamiento se realizó en una imagen donde haya presencia de sargazo. Manualmente se dibujó un polígono en las áreas donde hay sargazo y otro donde no hay (figura 3.1.10). Se extrajo la información de esos píxeles en el espacio de color HSV. Se retiró la información del canal Saturación y se agregó una columna extra a la matriz donde se asignó '1' si el píxel es sargazo y '0' si el píxel no es sargazo (cuadro 3.1.2).

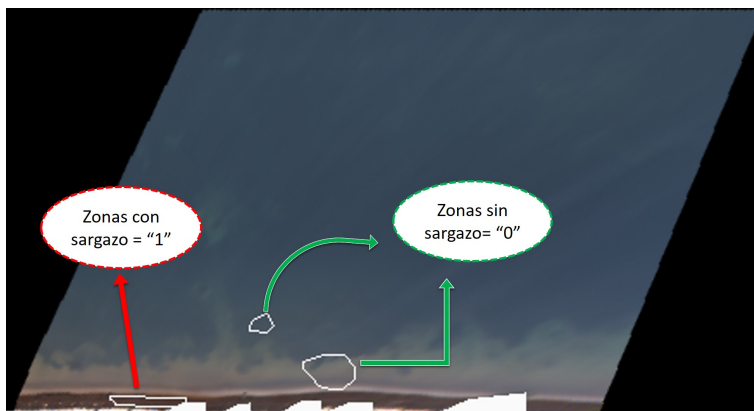


Figura 3.1.10: Imagen para entrenamiento de clasificador. A los píxeles que contienen los polígonos blancos se les asigna un valor de 0 o 1. En la parte baja se observa el retiro de la vegetación haciendo blancos sus píxeles.

Cuadro 3.1.2: Se muestra una matriz estándar para el entrenamiento del clasificador SVM, en este ejemplo se muestra la información de 12 píxeles únicamente.

H	V	etiqueta
231.00	6.00	1.00
231.00	7.00	1.00
231.00	3.00	1.00
231.00	6.00	1.00
231.00	7.00	1.00
231.00	7.00	1.00
206.00	23.00	0.00
207.00	21.00	0.00
207.00	26.00	0.00
207.00	24.00	0.00
207.00	22.00	0.00
208.00	21.00	0.00

A partir de la identificación del sargazo seco se seleccionó una línea de sargazo. Los píxeles debajo de esta línea se convierten en color blanco (figura 3.1.11) y se procede a hacer una nueva identificación para el sargazo flotante.

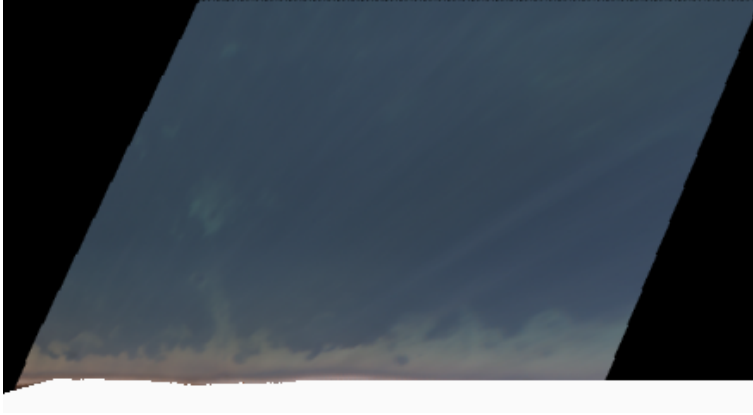


Figura 3.1.11: Imagen con línea de sargazo seco aplicada.

Aplicación de clasificador entrenado

Después de realizar pruebas en la imagen y notar que los píxeles más lejanos a las cámaras tienen alta variación en comparación con los valores cercanos a las cámaras, se tomó la decisión de aplicar la clasificación sólo en el segmento mostrado en la figura 3.1.12. Todo el conjunto de imágenes fue convertido al espacio de color HSV y se extrajo sólo la información de los canales H y V. Adicionalmente se eliminaron las imágenes de las horas: 11, 12, 13, 21, 22, 23. Al aplicar SVM en las imágenes sin vegetación se observó que con un único entrenamiento no fue suficiente para identificar sargazo seco en todas las imágenes. Por lo tanto, se realizó una clasificación supervisada que consistió en separar las imágenes satisfactorias y no satisfactorias. SVM se volvió a entrenar con las imágenes no satisfactorias y de nuevo se aplicó el algoritmo hasta obtener una clasificación con mayor precisión.

En la identificación del sargazo seco se realizaron diferentes cantidades de entrenamientos en cada año. Para 2015 se realizaron 2 entrenamientos, en 2016 se realizaron 3, para 2017 se realizaron 3 entrenamientos, en 2018 se realizaron 7 entrenamientos y para el año 2019 fueron necesarios 4. Para el caso del sargazo flotante se usó únicamente un entrenamiento para todos los años.

La identificación de sargazo flotante tiene un grado más alto de supervisión. Fue necesario revisar cada imagen para seleccionar si el entrenamiento funcionó bien. Para las imágenes donde la identificación fue deficiente se seleccionó una opción donde el usuario estimó si la cantidad de sargazo es nula, baja= $20m^2$ o mediana= $100m^2$ o mayor. En este caso se usaron las imágenes de todas las horas disponibles, 11 o 12 horas por día.



Figura 3.1.12: Area de estudio 76 X 165 píxeles dentro de cuadro amarillo.

En la figura 3.1.13 se muestran los resultados de la aplicación del clasificador SVM sobre sargazo flotante. Esta identificación resultó una tarea complicada incluso para el ojo humano. El algoritmo logra identificar las zonas que claramente son sargazo, sobrestima la identificación en otras regiones. Y por esto la supervisión del sargazo flotante es más exhaustiva.

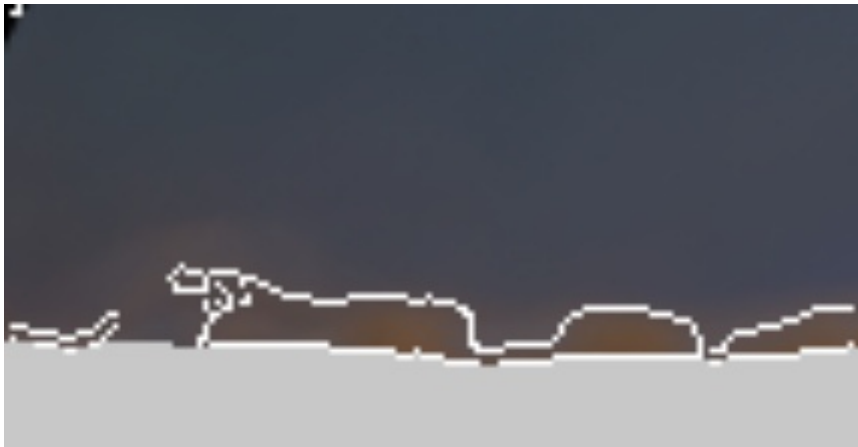


Figura 3.1.13: Aplicación del clasificador SVM para sargazo flotante en imagen del día 3 de Agosto de 2018.

Filtrado y Refinamiento de datos

Uno de los resultados de la sección 3.1.2 es un vector con el nombre de la imagen y la cantidad de píxeles que son sargazo para las horas seleccionadas para cada año. A estos datos se les aplicó el filtro Z-score modified para eliminar datos erróneos.

$$z_i = \frac{0,6745(y_i - y_{median})}{MAD}, \quad (3.1.4)$$

donde:

$$MAD = median(|y_i - y_{median}|) \quad (3.1.5)$$

y_i = i ésimo valor de la serie

y_{median} = mediana de la serie

Este método se aplicó para cada día, retirando así valores extremos erróneos en los datos obtenidos. Una vez obtenida la serie de datos limpios se realizaron suavizados con promedios simples por día, para cada 3 días y por semana de todos los años.

3.2. Resultados SVM

Se muestra la cobertura de sargazo desde las 12:00 horas del 16 de Septiembre de 2015 a las 21:00 horas del 31 de Diciembre de 2015 (figura 3.2.14). En la imagen los puntos rosas representan los valores diarios de la suma de sargazo seco y sargazo flotante por hora. La línea azul es el promedio de estos valores por día. De la segunda mitad a finales del mes de Octubre no hay datos. En la parte inicial del gráfico se pueden observar una varianza mayor de los datos. Esto es debido a que el filtro Z-score modified unicamente fue aplicado a los datos de sargazo seco ya que los resultados del sargazo flotante tienen un grado más alto de supervisión. La figura muestra que el mes donde hubo mayor presencia de sargazo fue Septiembre, encontrando un valor máximo cercano a los $1000m^2$. Esto se presenta a mediados de este mes y a finales del mismo se presenta una reducción de este. A inicios del mes de Octubre se observa una caída del área de sargazo cercana a 0, la cual se prolonga por una semana aproximadamente.

A partir del mes de Octubre la presencia de sargazo no rebasa los $200m^2$. Sin embargo se pueden observar variaciones en la afluencia y dispersión de sargazo. Un detalle que es importante resaltar, es que la presencia de sargazo es constante durante todo este periodo. Este hecho fue revisado y confirmado de forma manual.

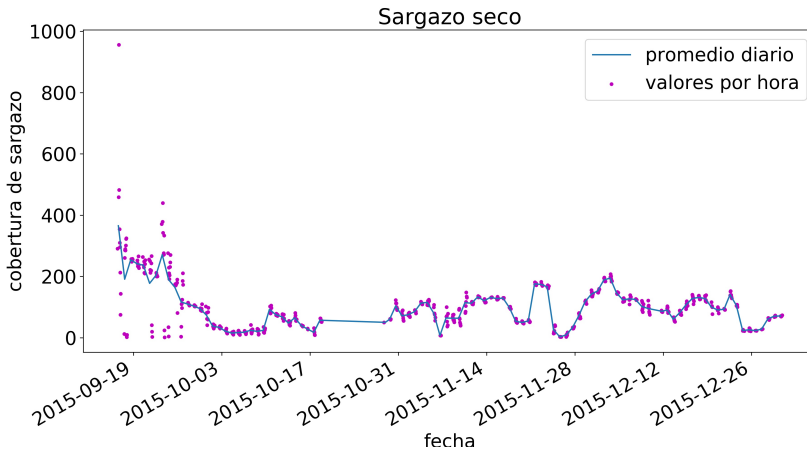


Figura 3.2.14: Aplicación del clasificador SVM en imágenes del 2015.

3.3. Discusión

La identificación de objetos en imágenes es una herramienta útil para el monitoreo costero, sus resultados tienen una alta dependencia del enfoque utilizado y los objetivos buscados. En este trabajo se revisaron múltiples enfoques con diferentes técnicas de identificación mencionadas en el capítulo 2. Al realizar pruebas en múltiples imágenes con el método de Otsu y las técnicas de aglomeramiento se encontraron tres características de las imágenes que afectaron la precisión de los algoritmos. La primera que se encontró fue la presencia de la vegetación debido a que sus propiedades de píxel son similares a las del sargazo encallado. El segundo problema fue la variabilidad de las propiedades de los píxeles mientras se alejaban de las cámaras. Y el tercero la variación en la iluminación de las imágenes a lo largo del día. El método de Otsu y las técnicas de aglomeramiento k-means y jerárquica tienen una gran ventaja cuando se conoce el número de objetos o grupos presente en la imagen a analizar. Sin embargo, estas tres técnicas presentan dos deficiencias claras. La más grave ocurre cuando en la imagen a procesar no hay sargazo y Otsu, k-means y jerárquica identifican cualquier otro objeto como sargazo. En la segunda dichos identificadores sobrestiman la cobertura de sargazo y ocurre cuando la cobertura de sargazo es baja. Esto hace que estos métodos de identificación deban tener una alta supervisión, la cual no es deseable para este trabajo.

El caso de la técnica de aglomeramiento dbSCAN es más alentador ya que para esta técnica no se debe asignar un número de objetos a priori sino que el algoritmo encuentra un número de grupos gracias a las condiciones iniciales que se asignan. Desafortunadamente el cambio de iluminación en las imágenes a lo largo del día provocó que la asignación de píxeles a los grupos fuera diferente de una imagen a otra. Una forma de intentar solucionar este problema podría ser cambiando la

distancia entre píxeles (epsilon) en función de la iluminación promedio de algún área de interés para cada imagen.

Debido a la dificultad de solucionar los problemas para todos los identificadores de una forma sencilla y completamente satisfactoria se optó por probar nuevas técnicas como SVM. SVM recibe un entrenamiento del tipo que se debe dar a una red neuronal. Este método resultó ser más preciso que los anteriores pero sin evitar completamente el problema de hacer una supervisión. Esta supervisión resultó ser mucho menor que la esperada con las otras técnicas y fue debido a la variación de la iluminación en las imágenes. Esta supervisión se podría reducir más usando diferentes sets de entrenamiento en función de la iluminación promedio de cada imagen.

Fue claro que el problema más persistente es la iluminación de las imágenes a lo largo del día. Esto se podría solucionar parcialmente usando sólo una hora del día pero esto nos haría perder información sobre llegadas o salidas abruptas. El uso de redes neuronales que son más robustas ayudaría a solucionar este problema. Se pueden agregar propiedades espaciales en la imagen, así como los valores de otros espacios de color.

Capítulo 4

Variabilidad temporal de sargazo

El sargazo que se transporta del océano hacia la costa (arribazón) se caracteriza por un color café claro claramente discernible en las imágenes tomadas por el sistema de video monitoreo. Una vez que se deposita sobre la playa seca se considera que ha encallado y adquiere un color café oscuro, casi negro, perdiendo rápidamente su capacidad de flotación. La dinámica de ambos es distinta por lo que su identificación y análisis se hace de manera independiente. De este modo, en este capítulo se presentan las condiciones climatológicas en los arribazones y durante la disminución de cobertura de sargazo en las imágenes (salida de sargazo).

4.1. Arribazones

4.1.1. Variabilidad

En la figura 4.1.1 se muestra el área de sargazo flotante cada hora. El año donde se reporta mayor cobertura de sargazo es el 2018 y se observa que en 2016 no hay presencia de él. Los meses con mayor presencia de sargazo son durante las estaciones de primavera y verano, teniendo la mayor cobertura durante Julio. Sólo en el año 2018 se observan arribazones continuos en Puerto Morelos, en los demás años los arribazones son eventos aislados. Por último, en el año 2016 no se registró ningún arribazón. Estos resultados coinciden con la investigación realizada por Wang *et al.* (2019) donde se reportó que en el año 2016 el afloramiento en el gran cinturón de sargazo no fue suficiente para arribar a costas mexicanas. En dicha investigación también se menciona que el año 2018 fue en el que se presentó más

aflorescimiento, y mayor afluencia en costas del caribe mexicano.

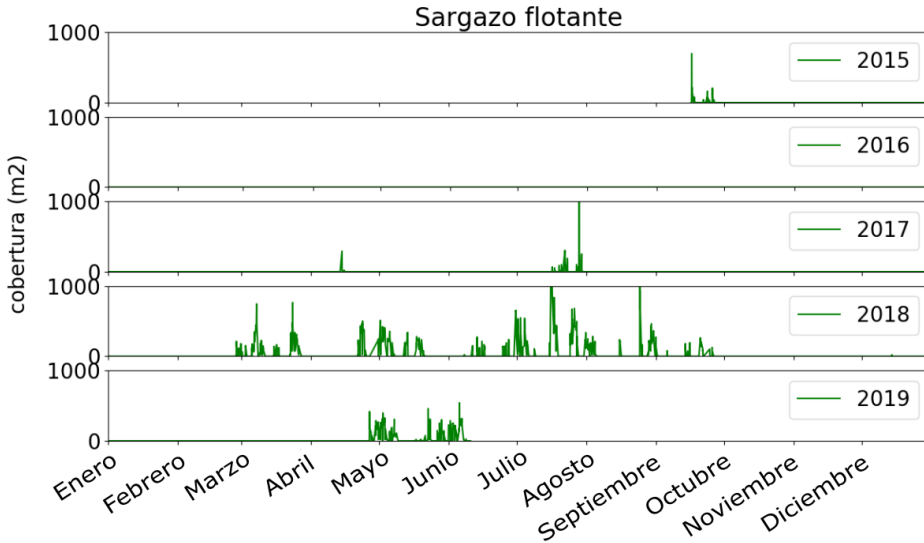


Figura 4.1.1: Cobertura de sargazo durante todo el periodo de estudio.

4.1.2. Dinámica

Llegadas

Para tener una visión más clara de la distribución de las llegadas a lo largo del periodo de estudio se calcularon la cantidad de llegadas por mes (figura 4.1.2). Estas llegadas fueron identificadas mediante una revisión visual de todas las imágenes, donde una llegada podría durar días mientras persistiera la presencia de algas color café claro en imágenes continuas. Se confirma que el 2018 es el año con más llegadas y en el 2016 ninguna. Además, en el mes de abril se presentan llegadas en 2017, 2018 y 2019 y en el mes de Mayo se presentan más llegadas, aunque sólo en 2018 y 2019. El segundo año con más llegadas es el 2019 a pesar de que este trabajo abarca hasta el mes de Junio.

Para conocer las condiciones de oleaje y viento que favorecen a los arribazones se realizaron rosas de oleaje, periodo y viento para las horas donde se presentan las 30 llegadas más grandes. En la figura 4.1.3 se muestran rosas de oleaje. En la izquierda la rosa para todo el periodo de estudio y en la derecha la rosa de oleaje para las llegadas. La altura de ola es pequeña durante las llegadas, menores a 1 metro en su mayoría. La dirección del oleaje durante las llegadas es prácticamente perpendicular a la línea de costa con una pequeña fracción proveniente del este. El periodo del oleaje durante las llegadas tiene una distribución uniforme encontrando periodos desde los 4 hasta los 10 segundos (figura 4.1.4).

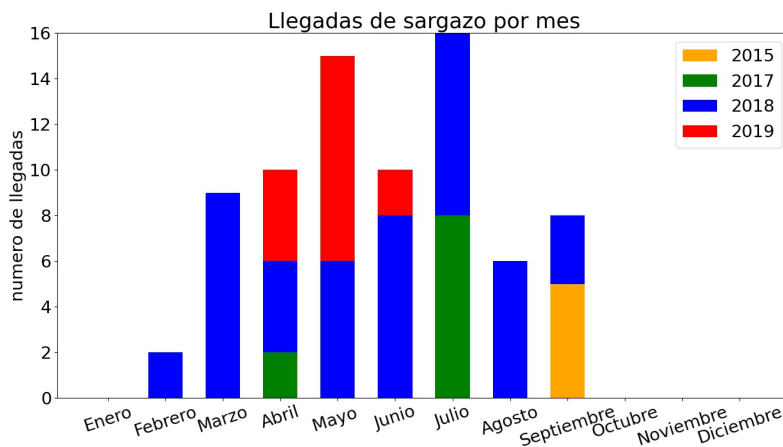


Figura 4.1.2: Cantidad de llegadas por mes.

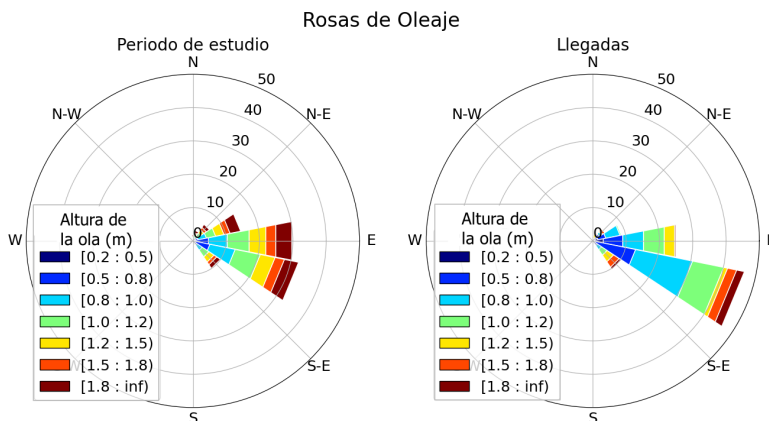


Figura 4.1.3: Rosa de oleaje en el sitio de estudio. En el lado izquierdo está la rosa correspondiente al todo el periodo de estudio y a la derecha la rosa para las llegadas de sargazo.

La velocidad del viento es ligeramente menor durante las llegadas en comparación con la de todo el periodo de estudio (figura 4.1.5). En cuanto a las direcciones, estas se distribuyen uniformemente del Sur al Este. Y no hay una diferencia significativa entre las direcciones a lo largo de los años y las ocurridas durante las llegadas de sargazo. Sólo desaparece la proporción del viento que se dirige hacia la costa.

Así, durante los arribazones la altura del oleaje y la velocidad del viento fueron más bajas que durante el periodo de estudio. Por otro lado, en el periodo y las direcciones de oleaje y viento no se observan grandes diferencias entre las llegadas y el periodo de estudio.

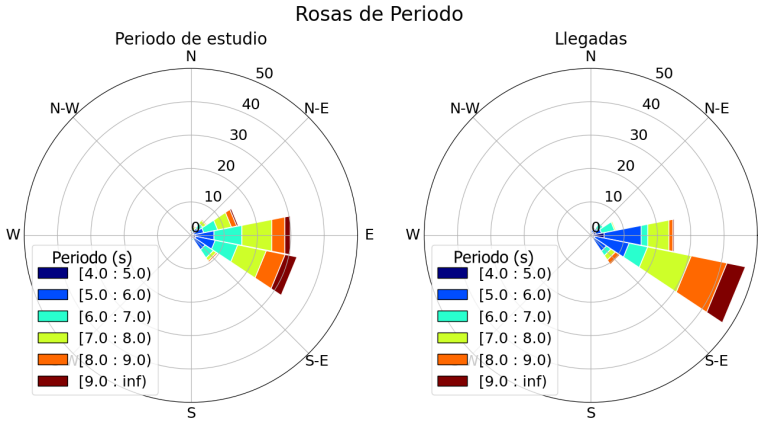


Figura 4.1.4: Rosa de periodo de ola en el sitio de estudio. En el lado izquierdo está la rosa correspondiente al todo el periodo de estudio y a la derecha la rosa para las llegadas de sargazo.

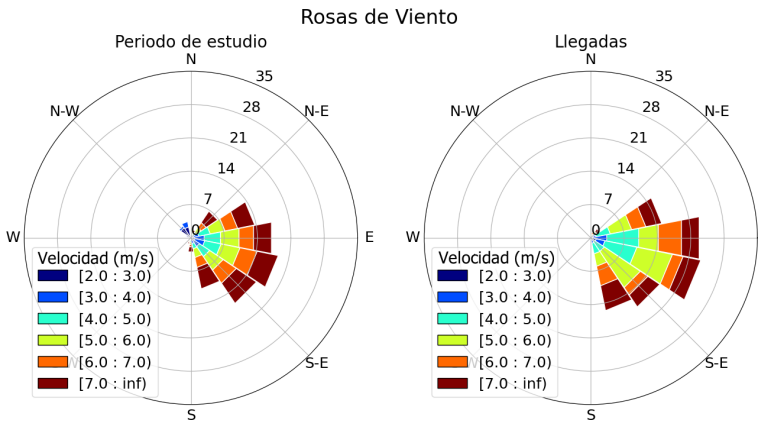


Figura 4.1.5: Rosa de viento en el sitio de estudio. En el lado izquierdo está la rosa correspondiente al todo el periodo de estudio y a la derecha la rosa para las llegadas de sargazo.

Apilamiento en la playa

Cuando el sargazo llega en grandes cantidades a la zona de rotura de oleaje se han cubierto áreas de hasta 20.2 m^2 por metro de playa (16 de Julio de 2018). En esta subsección (4.1.2 Apilamiento en la playa) se caracteriza el tiempo que tardan estas grandes masas de sargazo flotante en apilarse sobre la playa seca.

Se analizaron las variables físicas para algunos arribazones y se establecieron dos tipos de arribazones una con alta tasa de decremento de cobertura de sargazo

y la otra con baja tasa de decremento. Para obtener la tasa de decaimiento se usó el valor más alto de cobertura de sargazo flotante y se dividió entre la duración del evento. En la figura 4.1.6 se muestra el arribazón el día 29 de Agosto de 2018 con tasa de decremento de cobertura de sargazo pequeña. Para las primeras dos horas mostradas con líneas rojas en las gráfica (a) (figuras 4.1.6g y 4.1.6h) el gradiente es positivo hasta llegar a las 14:00 hrs (figura 4.1.6i). Para las siguientes tres horas el gradiente es negativo con un promedio de $-0,42m^2/mh$ hasta las 17:00 horas (ver figuras 4.1.6j a 4.1.6l). Para las siguientes horas aumenta la cobertura de nuevo y empieza a disminuir hasta la noche. Durante esta llegada la cobertura de sargazo se mantiene practicamente constante todo el día.

En las gráficas del arribazón del 23 de Agosto de 2018 (figuras 4.1.6a - f) podemos observar que la llegada inicia cuando es bajamar, la altura del oleaje es cercana a los 0.80 metros. El periodo antes de la llegada es de 7.5 segundos, después decrece durante la llegada y el ligero decremento se mantiene cercano a los 6 segundos. Para el caso del viento, la magnitud está entre los 4 y 5 m/s en el incremento y el decremento de cobertura. La dirección del viento durante estas horas es en su mayoría positiva, es decir, el viento va de izquierda a derecha hacia tierra considerando una línea normal a la costa como 0° . La línea gris en la gráfica en el cero corresponde a una dirección normal a la costa.

En la figura 4.1.7 se ejemplifica un arribazón con tasa de decremento de cobertura de sargazo alta del día 15 de Julio de 2018. En este caso el aumento de cobertura de sargazo es súbito. El registro inicia en las imágenes de las 21:00 y 22:00 horas del día 15 (figuras 4.1.7g y 4.1.7h) donde se observa que no hay sargazo llegando. La siguiente hora con luz que corresponde a las 12:00 horas del 16 y se observa una llegada masiva, la cantidad de sargazo aumenta para las 13:00 hrs (ver figuras 4.1.7i y 4.1.7j). Para las horas siguientes hay una caída rápida de la cobertura de sargazo en las líneas de color amarillo (ver figuras 4.1.7k a 4.1.7l). La tasa de decremento de cobertura de sargazo para estas horas tiene un promedio de $-2,2m^2/mh$. En este arribazón se muestran las condiciones de marea, para las 22:00 del día 15 es bajamar y también para la hora 12:00 del día 16. Sin embargo, en ninguna de estas dos horas tenemos imagen disponible es el momento exacto de la llegada. La altura de ola es muy cercana a los 0.90 metros con poca variación durante la llegada y salida de sargazo. El periodo es de 7.5 segundos momentos antes del inicio de la llegada y aumenta durante la llegada manteniéndose en 9 segundos hasta finalizar el decaimiento de cobertura de sargazo. El viento se mantiene entre los 3 y 5 m/s con las velocidades más bajas durante la noche. Y la dirección del viento fluctúa de positivo a negativo, siendo muy cercana a 0 grados o dirección normal.

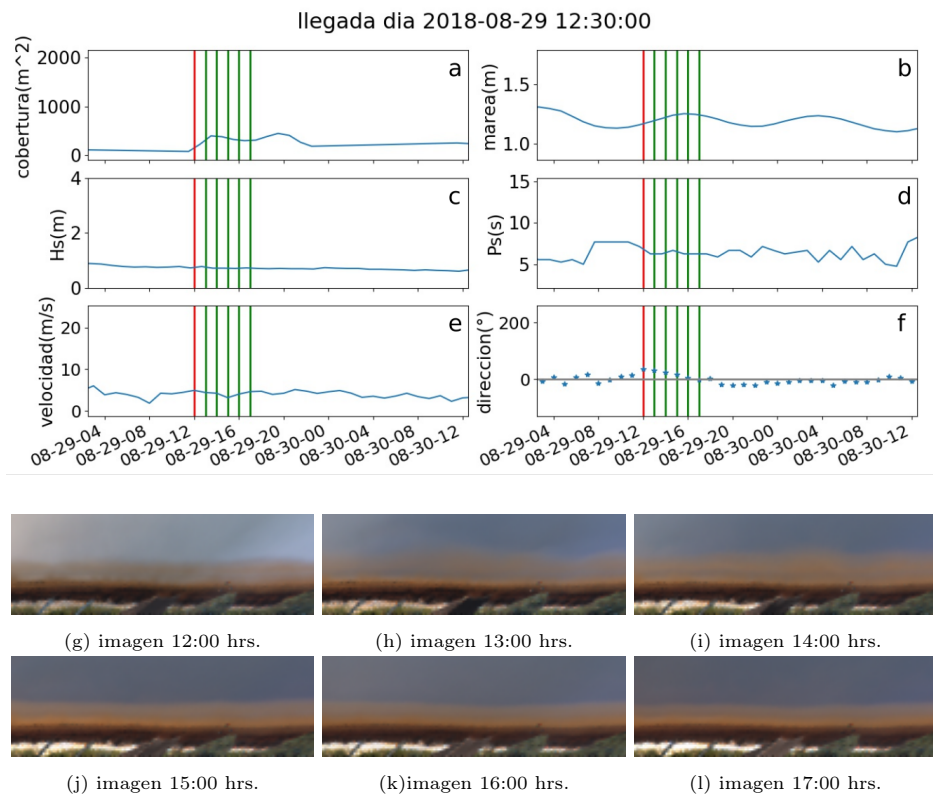
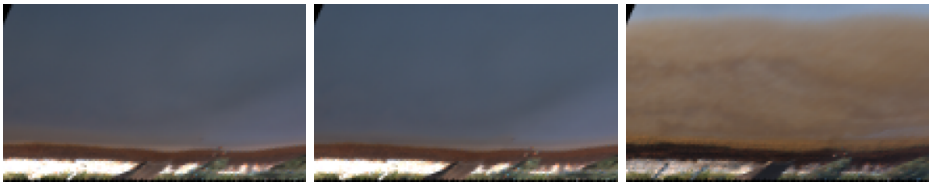
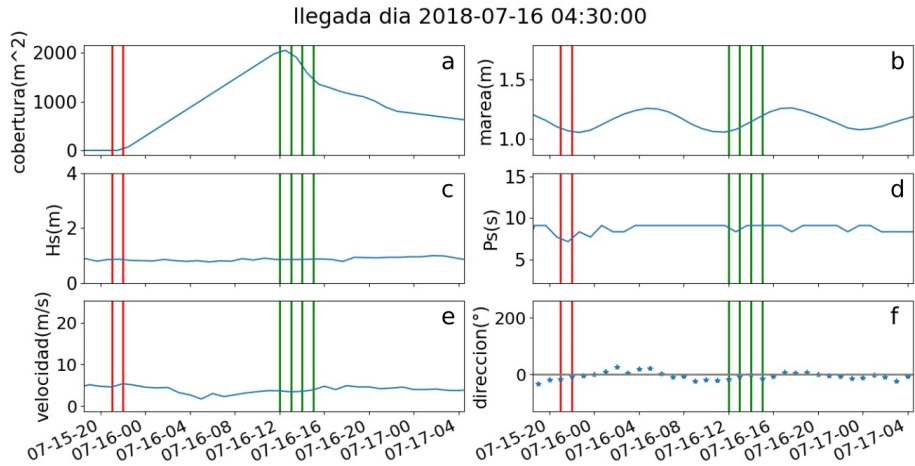


Figura 4.1.6: Variables físicas durante la llegada del día 29 de Agosto del 2018 a las 12:00 hrs. a)cobertura de sargazo por hora, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo, e)velocidad del viento, f) dirección del viento, línea gris corresponde a dirección perpendicular a la costa. g-h) línea roja, i-l) líneas verdes.



(g) imagen 07/15 21:00 hrs.

(h) imagen 07/15 22:00 hrs.

(i) imagen 07/16 12:00 hrs.



(j) imagen 07/16 13:00 hrs.

(k) imagen 07/16 14:00 hrs.

(l) imagen 07/16 15:00 hrs.

Figura 4.1.7: Variables físicas durante la llegada del día 16 de Julio del 2018 a las 12:00 hrs. a)cobertura de sargazo por hora, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo, e)velocidad del viento, f) dirección del viento, línea gris corresponde a dirección perpendicular a la costa. g-h) imagen de la costa correspondiente a la hora de las líneas rojas en las gráficas, i-l) imagen de la costa correspondiente a la hora de las líneas verdes en las gráficas.

Las condiciones marítimas son muy similares en ambos casos. La altura de ola tiene una diferencia poco significativa, del orden de centímetros y el viento y su dirección es prácticamente el mismo. El periodo de ola difiere, para la llegada de Agosto el periodo es de 6.5 segundos en promedio y para la llegada de Julio es de 8 seg.

El viento y su dirección persistente hacia tierra pueden trasladar el sargazo a la costa. Para esto sólo se necesitaría que haya sargazo disponible para ser transportado. Además del viento, como reportó Coronado *et al.* (2007) hay una corriente persistente hacia tierra dentro de la laguna, estos dos forzamientos se traducen en que mientras haya sargazo disponible la probabilidad de que llegue a la costa es alta. Una vez ubicado cerca de la costa, el sargazo se deposita en la playa seca y si ya está saturada este se apila. El apilamiento sobre la playa seca puede ser caracterizado analizando la tasa de decaimiento de cobertura de sargazo. Para la llegada del día 29 de Agosto de 2018 esta tasa es muy baja, en cambio para la llegada del día 15 de Julio de 2018 la tasa de decaimiento es alta a pesar de que el clima marítimo es muy similar. Se realizó un análisis detallado de las tasas de decaimiento de las llegadas. Se identificaron visualmente todos los arribazones de sargazo flotante (color café claro). Se definió la duración de la llegada como la primer hora que aparece sargazo flotante hasta la última consecutiva donde hay presencia del mismo.

Al mismo tiempo se promediaron las condiciones marítimas durante la duración de la llegada. En la figura 4.1.8 se grafica la tasa de decaimiento para cada llegada contra la altura de ola, periodo, dirección del oleaje, velocidad de viento y dirección del viento.

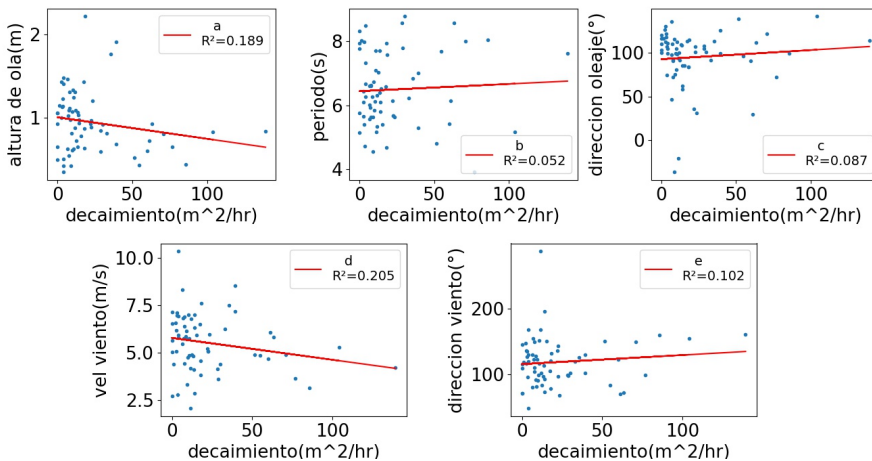


Figura 4.1.8: Relación entre la tasa de decaimiento y los forzamientos para todas las llegadas. a) altura de ola, b) periodo de ola, c) dirección del oleaje, d) velocidad del viento, e) dirección del viento.

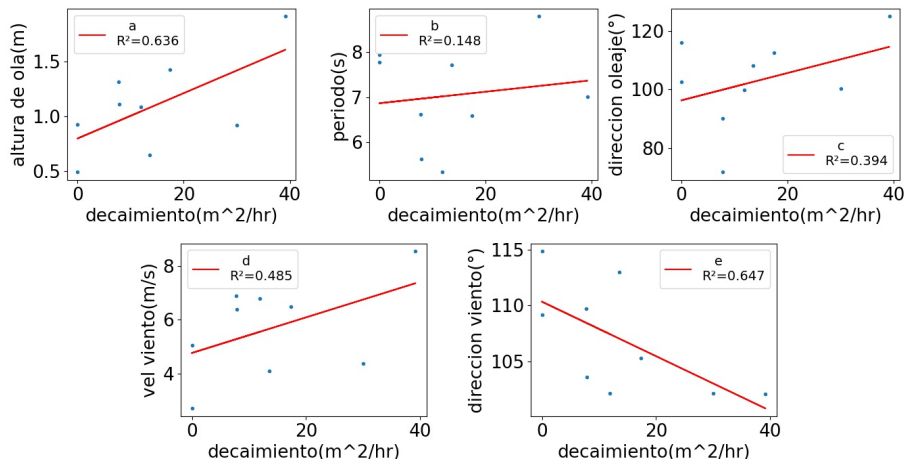


Figura 4.1.9: Relación entre la tasa de decaimiento y los forzamientos para las llegadas donde la dirección del viento es normal a la línea de costa. a) altura de ola, b) periodo de ola, c) dirección del oleaje, d) velocidad del viento, e) dirección del viento.

En la figura 4.1.8 se nota que la dispersión en todos los forzamientos es muy alta. Sin embargo, al realizar un filtro sobre la dirección del viento podemos observar mejores correlaciones. Se tomaron las llegadas donde el promedio del viento se encuentre entre los 100 y 115 grados que corresponden a direcciones normales a la costa (ver figura 4.1.9). En esta nueva imagen se observa una relación más clara entre la tasa de decaimiento, la altura de ola y la velocidad del viento. La tasa de decaimiento es directamente proporcional a la altura de ola y a la velocidad del viento. El periodo continúa con alta dispersión.

De nuevo, no se puede concluir algo contundente sobre el proceso de apilamiento del sargazo. Se esperaría que condiciones de mayor energía favorecieran una tasa de decaimiento más alta como se muestra en la figura 4.1.9 donde se seleccionaron arribazones con la dirección del viento normal a la línea de costa ($\pm 8^\circ$) pero esta relación no es constante para todos los arribazones usados en esta sección. Sin embargo, los forzamientos analizados no son los únicos que juegan un papel importante en la tasa de decaimiento. Las condiciones de saturación de sargazo encallado sobre la playa seca es algo a considerar. Otro punto a considerar es que probablemente el análisis individual de cada forzamiento sea un enfoque simple ya que no considera las interacciones entre otras variables.

4.2. Sargazo encallado

4.2.1. Variabilidad

En la imagen 4.2.10 se observa que la cobertura de sargazo encallado aumenta notablemente en el mes de Marzo, en los meses posteriores que corresponden a primavera y verano se mantiene una cobertura alta. En el mes de Octubre, la cobertura de sargazo disminuye en todos los años, durante los meses siguientes que sin parte del Otoño e invierno la cobertura de sargazo es mucho menor, lo cuál ocurre en todos los años. Es bueno resaltar que en los años donde no hay llegadas de sargazo flotante (color café claro) sí hay presencia de sargazo encallado en la costa (e.g. 2016).

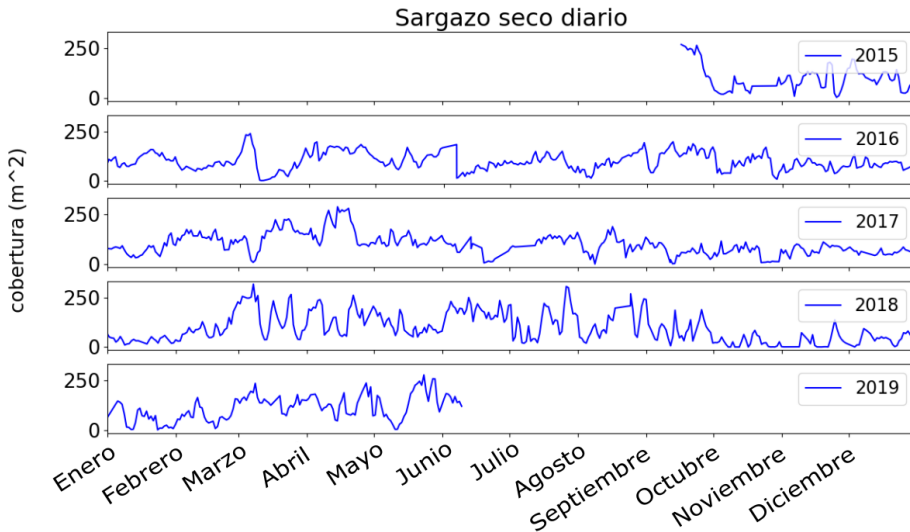


Figura 4.2.10: Promedio diario de sargazo ensallado durante el periodo de estudio.

Las observaciones anteriores son reforzadas en la figura 4.2.11 donde se muestra el promedio diario de sargazo encallado para cada mes. Los meses de Marzo a Septiembre la cobertura es mayor a los $110 \text{ m}^2/\text{dia}$, y para los meses de Octubre a febrero tenemos coberturas menores a los $100 \text{ m}^2/\text{dia}$. Los meses de llegada de sargazo encallado son Marzo y Abril y también corresponden a los meses con mayor cobertura. Los meses de Octubre y Enero son los meses con menor cobertura.

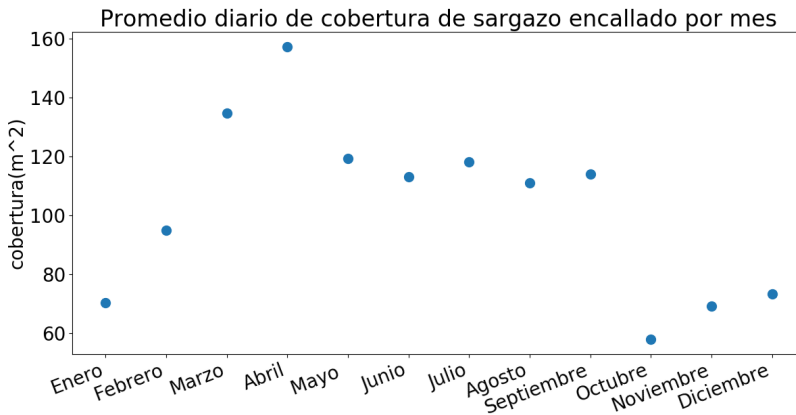


Figura 4.2.11: Promedio diario de sargazo encallado por mes para todo el periodo de estudio.

4.2.2. Limpieza natural

En esta sección se evalúa de manera cualitativa la capacidad del sistema arrecifal de remover el sargazo encallado de la playa seca y sacarlo del sistema. De este modo se podrán conocer patrones de limpieza de sargazo en la playa y así dar herramientas para el diseño de planes de retiro de sargazo.

Del mismo modo que con los arribazones se realizaron rosas de oleaje, periodo y viento para los momentos donde el sargazo encallado disminuye su área. En la figura 4.2.12 a la izquierda tenemos la rosa de oleaje para todo el periodo de estudio. A la derecha se encuentra la rosa de oleaje durante las salidas de sargazo encallado y es notable que el oleaje es energético para las salidas en comparación con el oleaje de las llegadas. La dirección predominante es del este y hay una componente clara del Noreste. El periodo del oleaje no parece jugar un papel importante en la limpieza (ver figura 4.2.13).

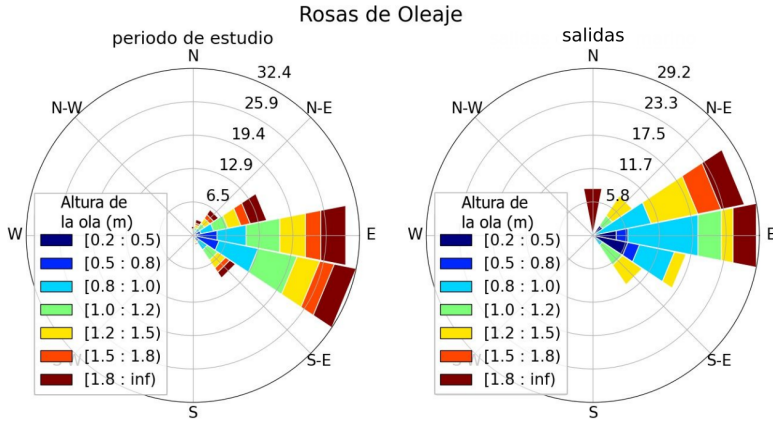


Figura 4.2.12: Rosa de oleaje en el sitio de estudio. En el lado izquierdo está la rosa correspondiente al todo el periodo de estudio y a la derecha la rosa para las salidas de pasto marino.

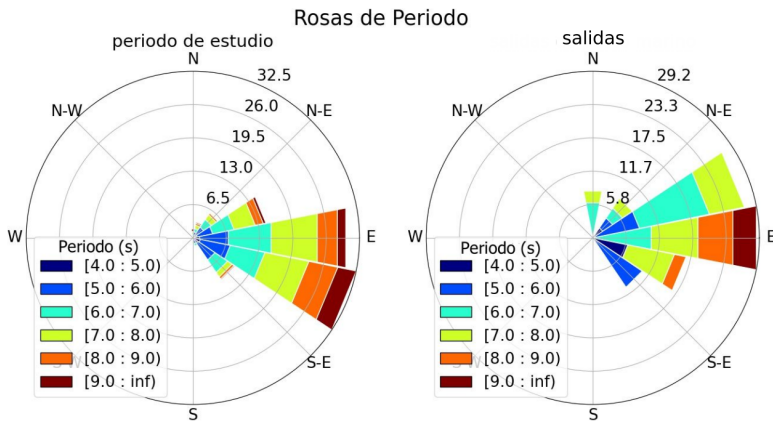


Figura 4.2.13: Rosa de periodo de ola en el sitio de estudio. En el lado izquierdo está la rosa correspondiente al todo el periodo de estudio y a la derecha la rosa para las salidas de pasto marino.

En la figura 4.2.14 vemos las rosas de viento para todo el periodo de estudio y para las salidas de sargazo encallado, a la izquierda y derecha, respectivamente. La velocidad del viento es más alta en las salidas de sargazo encallado que en las llegadas. La componente del noreste en la dirección del viento es predominante para las salidas de sargazo encallado.

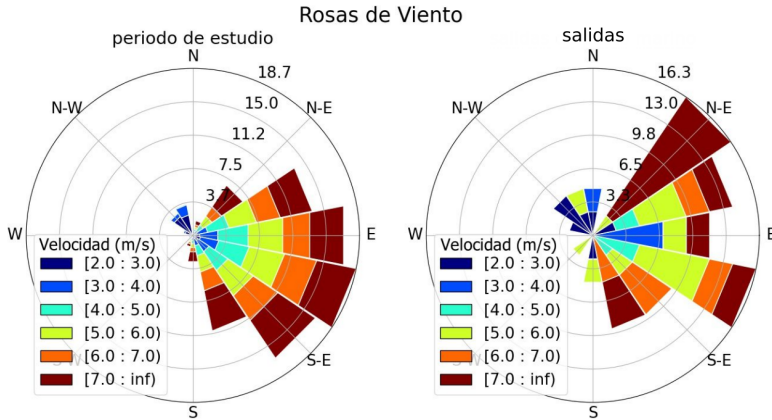


Figura 4.2.14: Rosa de viento en el sitio de estudio. En el lado izquierdo está la rosa correspondiente al todo el periodo de estudio y a la derecha la rosa para las salidas de pasto marino.

En la figura 4.2.15 se muestra el análisis de la noche del 23 de Noviembre 2015 a las 22:30 horas. En esta se observa una caída súbita de cobertura de sargazo encallado y corresponde a una tormenta. En la primer y segunda imagen (figuras 4.2.15g y 4.2.15h) hay $180m^2$ de sargazo en los 82 metros de costa analizados. En la siguiente imagen donde se ubica la primer línea en color verde podemos observar que prácticamente todo el sargazo fue removido (figura 4.2.15i). Sin embargo, en las imágenes posteriores se nota un pequeño aumento de la cobertura de sargazo encallado que coincide con una relajación de la tormenta. Esto se puede verificar mirando las gráficas de altura de ola y velocidad del viento en la zona donde se encuentran las líneas verdes (figuras 4.2.15j hasta 4.2.15o).

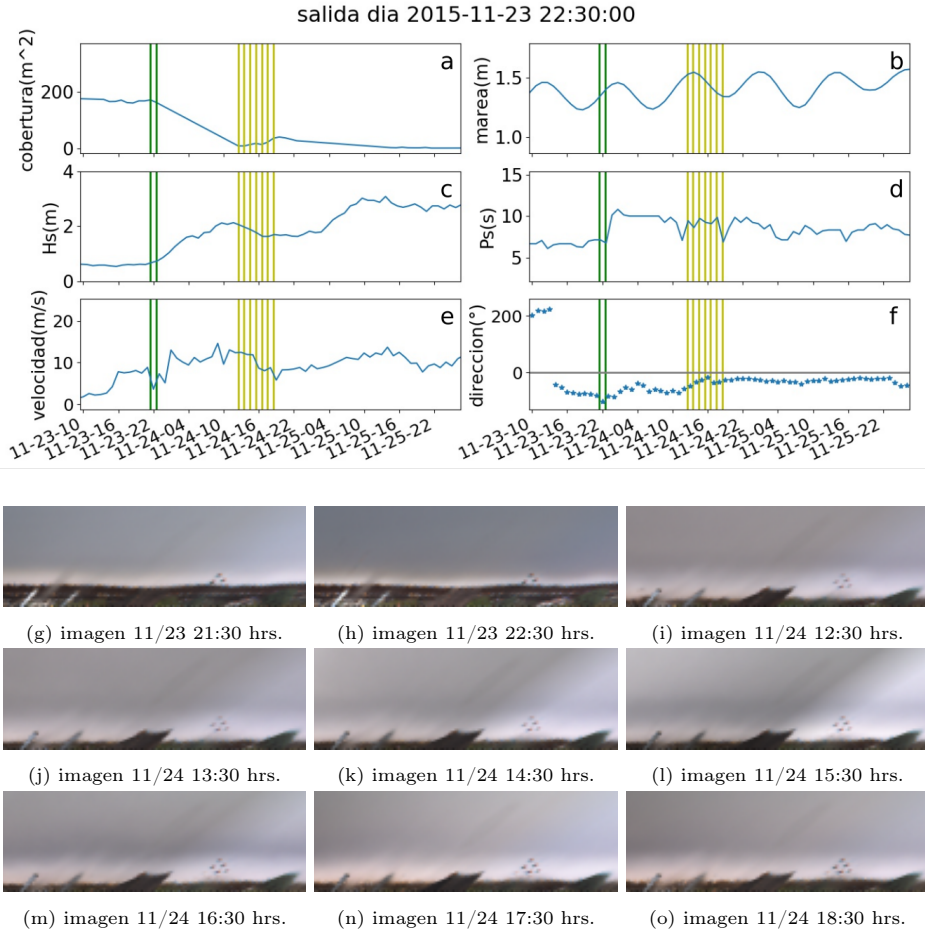


Figura 4.2.15: Variables físicas durante la salida de pasto marino del día 23 de Noviembre del 2018 a las 22:00 hrs. a)cobertura de sargazo encallado, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo de oleaje, e)velocidad del viento, f)dirección del viento, g-h)imagenes antes de la salida de sargazo, i-o) imagenes despues de la salida de sargazo.

Se revisó el caso de 5 salidas más, mostradas en las figuras 4.2.16, 4.2.17, 4.2.18, 4.2.19 y 4.2.20. En estas figuras se muestran salidas con un periodo de tiempo más prolongado, 3 días antes y 13 días después de la salida. Se identificó una etapa de salida de sargazo encallado y una de retorno de cobertura de sargazo señaladas en el área roja y verde de la gráfica, respectivamente. La etapa de retorno es cuando la cobertura de sargazo vuelve sin que exista un arribazón de sargazo flotante. En las gráficas es notable que el proceso de salidas de sargazo tienen una duración de dos días o más. Y que el sargazo regresa al menos en seis días.

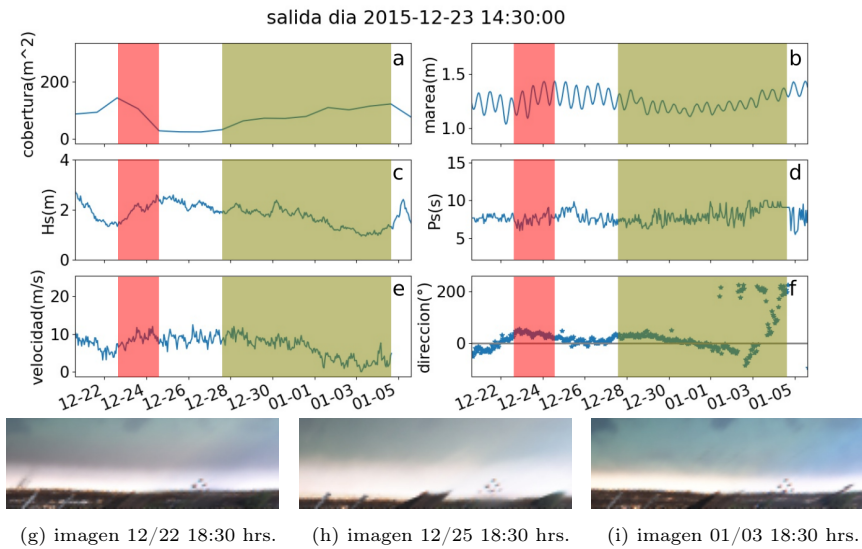


Figura 4.2.16: Variables físicas durante la salida de sargazo encallado del día 23 de Diciembre del 2015 a las 14:30 hrs. a)cobertura de sargazo encallado, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo de oleaje, e)velocidad del viento, f)dirección del viento, g)imagen antes de la salida, h) imagen despues de la salida, i)imagen con sargazo de nuevo en la costa

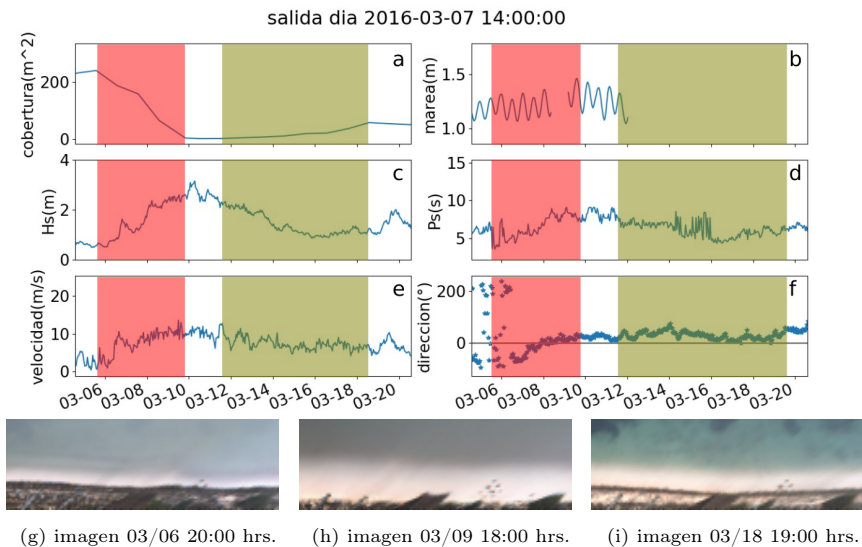


Figura 4.2.17: Variables físicas durante la salida de sargazo encallado del día 7 de Marzo del 2016 a las 14:00 hrs. a)cobertura de sargazo encallado, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo de oleaje, e)velocidad del viento, f)dirección del viento, g)imagen antes de la salida, h) imagen despues de la salida, i)imagen con sargazo de nuevo en la costa

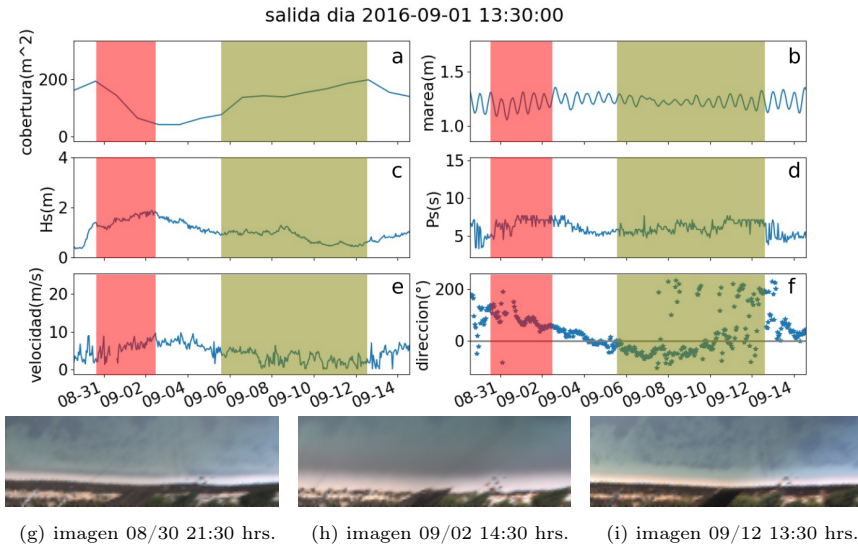


Figura 4.2.18: Variables físicas durante la salida de sargazo encallado del día 1 de Septiembre del 2016 a las 12:00 hrs. a)cobertura de sargazo encallado, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo de oleaje, e)velocidad del viento, f)dirección del viento, g)imagen antes de la salida, h) imagen despues de la salida, i)imagen con sargazo de nuevo en la costa

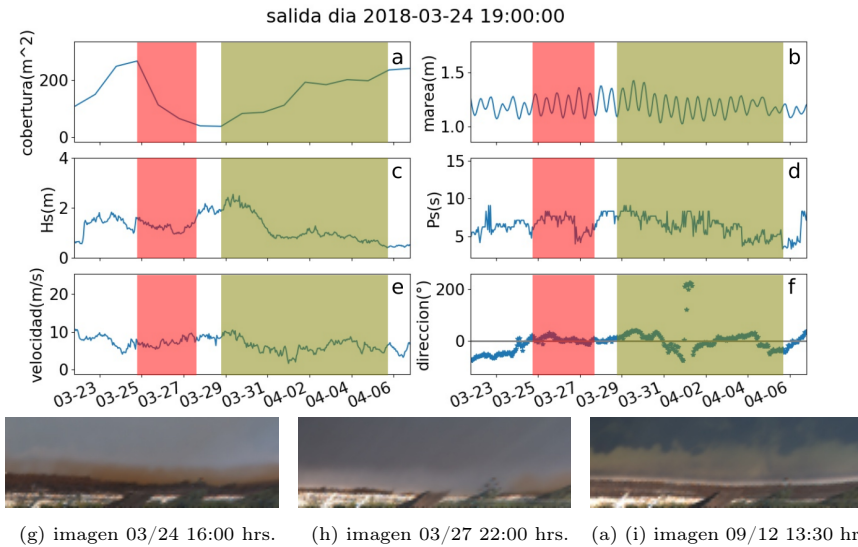


Figura 4.2.19: Variables físicas durante la salida de sargazo encallado del día 24 de Marzo del 2018 a las 19:00 hrs. a)cobertura de sargazo encallado, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo de oleaje, e)velocidad del viento, f)dirección del viento, g)imagen antes de la salida, h) imagen despues de la salida, i)imagen con sargazo de nuevo en la costa

En la mayoría de estas salidas se observa que durante la salida de sargazo encallado la altura significativa es cercana a los dos metros, el viento tiene un aumento notable durante la duración de la salida, así como el periodo de ola, el nivel del mar se mantiene entre los 1.2 y 1.3 metros para los 5 casos. Por último, la dirección del viento es muy cercana a 0° en la mayoría de las salidas. Es claro que las condiciones energéticas dan lugar a la salida de sargazo en la costa.

La etapa de retorno de cobertura de sargazo inicia cuando las condiciones atmosféricas pierden energía. En las gráficas y en especial en el área verde, es claro que al disminuir la altura del oleaje y la velocidad del viento la cobertura de sargazo vuelve al sistema. Las imágenes i corresponden al momento en que la cobertura a vuelto. En algunas ocasiones el ancho de la playa aumenta al igual que la cobertura de sargazo. Sin embargo, no en todas las salidas este comportamiento tiene una tendencia clara. En la figura 4.2.20 se muestra el caso de una salida donde aunque las condiciones son medianamente energéticas el sargazo encallado aumenta. La zona verde es donde esto se observa con mayor claridad. Se puede notar que la velocidad y dirección del viento tienen variación diurna, lo que significa que domina la brisa marina y el oleaje energético se generó lejos de la costa.

Si se observan las subfiguras h's podemos ver que en algunas ocasiones el ancho de playa disminuye, así como el sargazo encallado. Las imágenes h corresponden al final de la salida y coinciden con los valores máximos de altura de ola y velocidad de viento. Esto se observa en el área blanca entre las etapas de salida y retorno de sargazo.

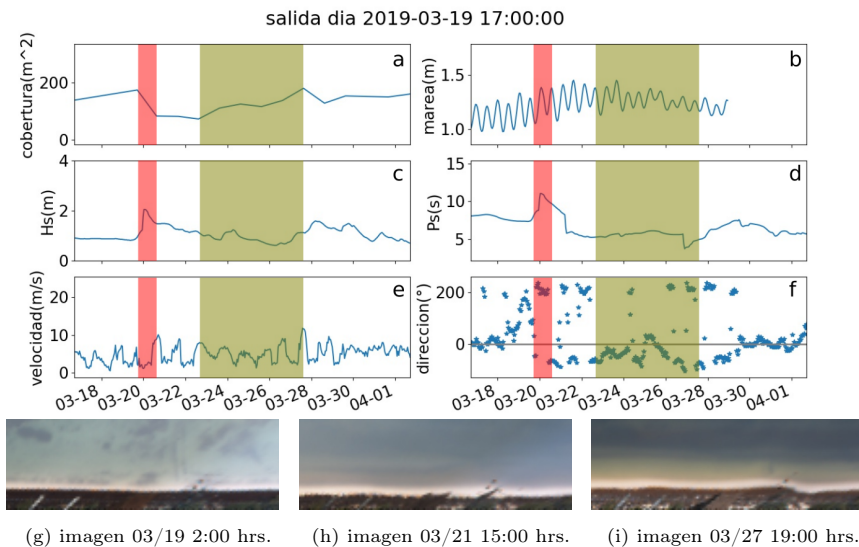


Figura 4.2.20: Variables físicas durante la salida de sargazo encallado del día 19 de Marzo del 2019 a las 17:00 hrs. a)cobertura de sargazo encallado, b)nivel del mar, c)altura de ola, d)periodo de oleaje, e)velocidad del viento, f)dirección del viento, g)imagen antes de la salida, h) imagen despues de la salida, i)imagen con sargazo de nuevo en la costa

Es posible que el hecho de que la cobertura de sargazo aumente a pesar de las condiciones climatológicas medias se deba a que el oleaje pierde más energía debido a que en esta salida (ver figura 4.2.20) hay un nivel del mar más bajo que en las demás salidas. Esto hace que el oleaje rompa en repetidas ocasiones sobre el arrecife antes de llegar a la costa disminuyendo la engería del oleaje y favoreciendo la llegada de sargazo a la playa seca. Otra razón podría ser que el sargazo encallado que llega es el remanente de una tormenta anterior. Esto para el caso especial de la figura 4.2.20.

4.3. Efecto en el color del agua

La descomposición de las grandes cantidades de sargazo también modifican el color del mar en Puerto Morelos. Siendo que uno de los principales atractivos del Caribe Mexicano es su color turquesa, la degradación de sargazo repercute sobre el turismo. Por lo que en esta sección se calcula el cambio de color en el agua para estimar la influencia del sargazo a 20 y 100 metros de la costa.

El análisis consiste en observar la evolución del canal 'a' y 'b' en el espacio de color CIELAB. Este espacio de color lo conforman 3 canales: L, luminosidad; a, valor de píxel entre rojo y verde, donde (+) es igual a rojo y (-) igual a verde; b, valor de píxel entre a amarillo (+) y azul (-). Todas las imágenes fueron transformadas a este espacio de color y se seleccionó un área de 100 m^2 aproximadamente y el valor de todos sus píxeles en cada canal fueron promediados. En la figura 4.3.21 se muestra el comportamiento del canal b sobre el área a 20 metros de la línea de costa. Este canal no es muy útil para identificar patrones ya que el valor de los píxeles del canal b en todos los años es constante. Sólo en el año 2018 se observa una variación alta llegando a valores altos de amarillo.

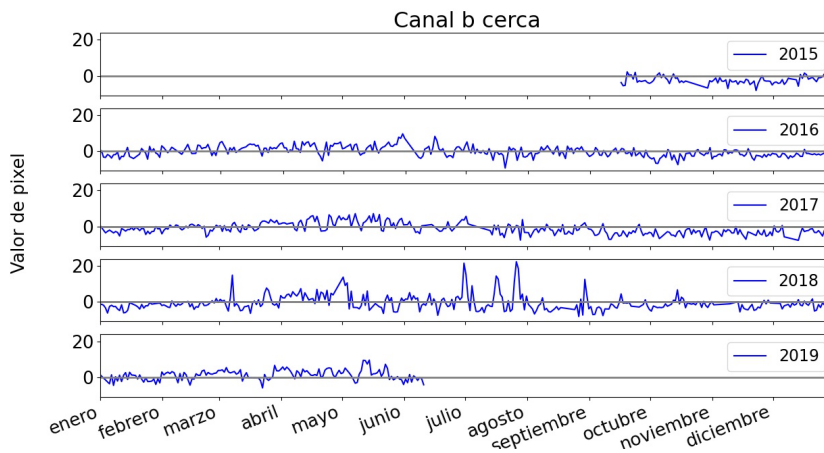


Figura 4.3.21: Comportamiento temporal del canal 'b' en el área ubicada a 10 metros de la línea de costa.

En las figuras 4.3.22 y 4.3.23 se grafica el comportamiento del canal a del área de la imagen a los 10 y 100 metros de la línea de costa, respectivamente. En los dos casos se observa que en el año 2016 el valor promedio es negativo, es decir, predomina el color verde. También se nota que en el año 2018 predominan los rojos, y esto coincide con los arribazones masivos de sargazo. En la gráfica que corresponde a los 10 metros de cercanía se encuentra un comportamiento comparable a lo descrito con la identificación de sargazo de secciones anteriores. En los meses de Marzo de todos los años hay una transición de color verde dominante a colores rojos. Finalmente, en los meses entre Octubre y Noviembre se nota una

pérdida de tonos rojos para pasar a una dominancia total de los verdes.

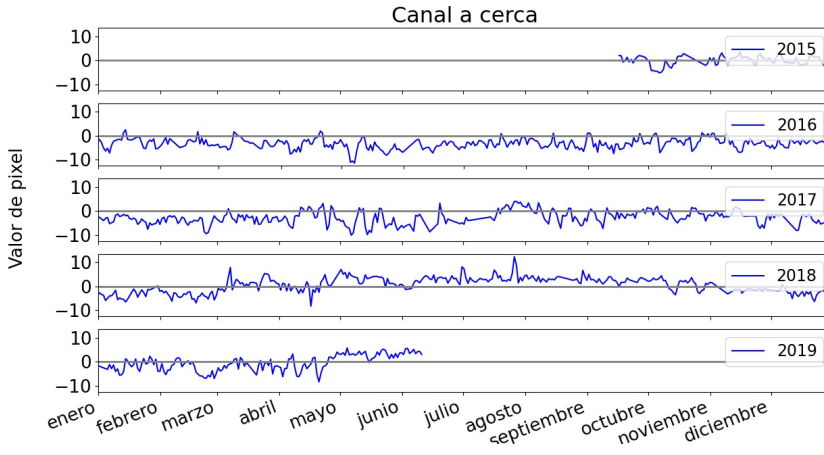


Figura 4.3.22: Comportamiento temporal del canal 'a' en el área ubicada a 10 metros de la línea de costa.

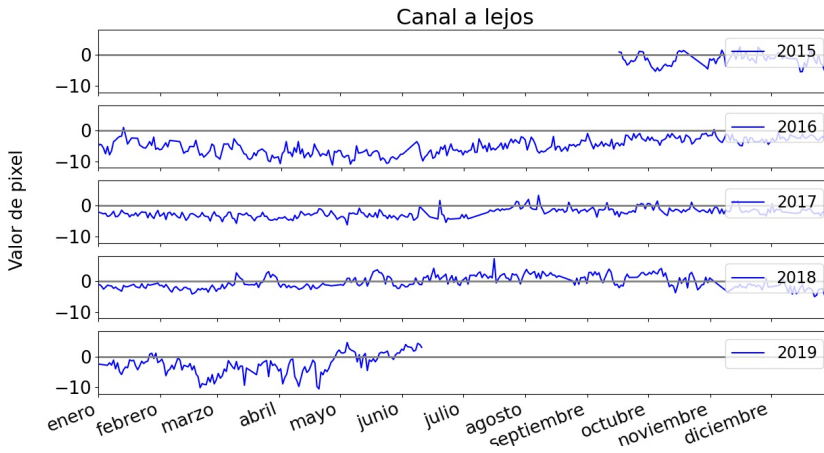


Figura 4.3.23: Comportamiento temporal del canal 'a' en el área ubicada a 100 metros de la línea de costa.

4.4. Discusión

En la investigación realizada por Wang *et al.* (2019) se muestra que en el año 2016 el afloramiento de sargazo no fue suficiente para llegar a costas mexicanas. También menciona que el año 2018 fue en el que se presentó más afloramiento, y más afluencia en costas del caribe mexicano. Lo cual es consistente con nuestros resultados.

De acuerdo a Wang *et al.* (2019) el sargazo sólo llega a costas del caribe Mexicano los meses de primavera y verano. Consistentemente, en el presente trabajo se identificaron llegadas desde Febrero hasta Septiembre. Más recientemente García-Sánchez *et al.* (2020) recolectó muestras de material encallado de la costa de puerto Morelos de 2016 a 2020 y Chávez *et al.* (2020) realizaron una cuantificación por medio de imágenes satelitales de la afluencia de sargazo en el caribe mexicano de 2016 a 2020. Los resultados de estos dos últimos sugieren que primavera y verano son las temporadas con más sargazo en el caribe mexicano. Así mismo, García-Sánchez *et al.* (2020) y Chávez *et al.* (2020) encontraron cobertura en la playa seca durante casi todo el periodo de estudio como se encontró en este estudio. Por otro lado, van Tussenbroek *et al.* (2017) observó que los arribazones pueden matar al pasto marino. Lo que nos lleva a suponer que el sargazo que vemos en los meses de Octubre a Febrero no es sargazo, sino que se trata de pastos marinos que se desprenden del fondo marino.

En el análisis de llegadas de sargazo encontramos que las tasas de apilamiento sobre la costa no tienen una causa clara debida a los forzamientos. Así como la tasa de recuperación de cobertura de sargazo encallado. Estas inconsistencias podrían ser causadas por el apilamiento previo sobre la playa. Es decir, partiendo del hecho de que el oleaje mostrado en todos los análisis es oleaje a 10 metros de profundidad y que el oleaje dentro de la laguna es muy pequeño gracias a su previa rotura sobre el arrecife y no es posible encontrar tendencias claras. Creemos que esté oleaje no hace más que apilar el sargazo o pasto marino. Entonces si la playa ya está saturada de algas el apilamiento es más lento con cualquier oleaje.

García-Sánchez *et al.* (2020) sugiere que la dirección del viento de mar a tierra es el principal responsable de la llegada de sargazo a la playa seca. Esto puede explicar que en las rosas de oleaje durante las llegadas no hay componente con dirección de tierra a mar. Los vientos con dirección de tierra a mar predominan en la temporada de nortes (invierno) cuando no se registraron llegadas de sargazo.

El comportamiento de la cobertura en el momento de las salidas nos llevo a concluir que el sargazo no sale del sistema facilmente. Se observa que la playa se limpia momentáneamente con las condiciones energéticas pero vuelven gracias al oleaje cuando las condiciones pierden energía.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta tesis se cuantifica la cobertura de sargazo en 82 metros de costa por medio de imágenes tomadas con un sistema de videomonitorio de la playa de Puerto Morelos de septiembre de 2015 a junio de 2019. Primero se usó el software ULISES para rectificar las imágenes y así lograr que los píxeles sean equidistantes en metros. Todas las imágenes fueron revisadas y se retiraron las que presentaban manchas o mala resolución. Se seleccionaron imágenes con condiciones de iluminación y cantidad de sargazo diferentes para probar la efectividad de diferentes técnicas del aprendizaje de máquinas para la identificación de sargazo en las imágenes. Se probaron las técnicas k-means, jerárquica y dbscan encontrando una baja efectividad al realizar esta tarea. Posteriormente, se usó el algoritmo de Soporte Vectorial de Máquinas (SVM) para la identificación de sargazo flotante y sargazo encallado en las imágenes con una mejor precisión. Por último, se cuantificó la cobertura de sargazo para cada imagen y se realizaron análisis del comportamiento del sargazo a lo largo de los años y los efectos que sufre con las condiciones atmosféricas. En esta última sección se responde a las preguntas establecidas al inicio de este trabajo.

5.1. Preguntas científicas

1) *¿Las imágenes tomadas por estaciones costeras son efectivas para la identificación de sargazo encallado?*

Los sistemas de videomonitorio fueron diseñados principalmente para captar procesos costeros como la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo y el movimiento de las barras de arena. El campo de visión de estos sistemas es más amplio en comparación con un monitoreo puntual, por ello es posible captar con buena resolución los arribazones y las salidas de sargazo en la costa. Comparando

nuestros resultados de la cobertura temporal con los obtenidos por García-Sánchez *et al.* (2020) son muy similares, lo cual hace a las imágenes una herramienta efectiva para identificar arribazones.

2) *¿Cuáles herramientas de procesamiento de imágenes son útiles en la identificación de sargazo y por qué?*

Con las pruebas realizadas con diferentes técnicas encontramos que la capacidad de identificar sargazo es alta en imágenes donde la iluminación es relativamente constante. Cuando no es así las técnicas de aglomeramiento y el método de Otsu son poco robustos. Se encontró que la técnica SVM, que requiere un entrenamiento previo a la identificación, da mejores resultados debido a que este discrimina directamente a los píxeles que no pertenecen al grupo de entrenamiento, mientras que las otras técnicas no son precisas cuando aumentan o disminuyen los grupos de píxeles en las imágenes.

3) *¿En que temporada del año hay mayor y menor presencia de sargazo?*

Al realizar la identificación durante todo el periodo de estudio se encontró que en todos los años hay presencia de algas en la costa. Sin embargo, los arribazones sólo tienen lugar en los años 2015, 2017, 2018 y 2019. En el año 2018 se registraron la mayoría de las llegadas de sargazo durante los meses de febrero a septiembre. En 2015 las llegadas se captaron en el mes de septiembre (no hay datos de los meses previos), en 2017 sólo en abril y julio. En el año 2019 se registraron llegadas desde abril hasta junio. El mes donde se registró mayor cobertura fue abril. En general, los primeros arribazones tienen lugar en los meses de primavera y los últimos del año ocurren en otoño. Pero para la mayoría de los años los arribazones son eventos aislados.

4) *¿Cómo influye el clima marítimo y las condiciones meteorológicas la dinámica de los arribazones?*

A partir de las rosas de viento realizadas para las llegadas se observó que el viento predominante se encuentra en un rango de $0^\circ \pm 30^\circ$ con dirección hacia la costa. También se encontró que durante las llegadas más grandes el oleaje es poco energético. Sin embargo, para el año con mayor cantidad de arribazones (2018) el sargazo llega persistentemente aún con oleaje energético. Es decir, siempre que haya sargazo disponible afuera del arrecife este llegará a la costa debido al viento.

5) *¿Cuál es la capacidad del sistema para dispersar sargazo encallado?*

Al analizar las salidas de material encallado se encontró que sólo se trata de una salida parcial. Ya que al pasar unos días, o más precisamente al pasar las condiciones energéticas de oleaje y viento, las masas de algas vuelven a la playa sin que se detecten llegadas de sargazo. Por lo que se propone que el sargazo en descomposición difícilmente sale del sistema por completo y la laguna tiene una capacidad limitada de expulsar el sargazo.

5.2. Trabajo a futuro

Con este trabajo se da un pequeño paso para entender la dinámica de los arribazones en Puerto Morelos. Pero hay investigaciones que faltan para mejorar este trabajo como lo es la presencia constante de macrofitas en la playa seca. El arrecife en Puerto Morelos protege a la playa al reducir la energía del oleaje, pero es probable que limite la autolimpieza del sistema. La instalación de un sistema de videomonitorio en una playa sin arrecife otorgaría la oportunidad de comparar las bondades de diferentes playas. Para el caso de Puerto Morelos es probable que se deba usar otro sistema de monitoreo para entender con claridad la autolimpieza de la laguna. Acompañar esto con campañas de campo para identificar el tipo de macrofitas encalladas también es relevante.

EL sargazo flotante dentro y fuera de la laguna es transportado por medio de corrientes a escala local y regional. La implementación de modelos numéricos que puedan calcular el campo de velocidades de corrientes en capas sería un ejercicio útil para complementar esta investigación. Algunas simulaciones que resultarían útiles serían: en condiciones de baja y alta energía, con direcciones de viento hacia la costa y hacia el mar y con los niveles de marea en los meses de mayor y menor cobertura de sargazo encallado.

El sargazo flotante está bajo el efecto del oleaje, viento corrientes en la laguna y el nivel del mar, realizar un análisis multivariable de varias combinaciones de forzamientos como condiciones de oleaje y marea, la magnitud del viento y su dirección, la velocidad y dirección de las corrientes, velocidades de corrientes con dirección del viento, ayudaría a tener un mejor entendimiento del comportamiento del sargazo flotante.

Bibliografía

- BERRIEL-BUENO, D. 2018 Arribo masivo de sargazo a la laguna arrecifal de puerto morelos: Condiciones de permanencia y dispersión. Master's thesis, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- BROWN, D. H. 1966 Decentering distortion of lenses.
- CHÁVEZ, V., URIBE-MARTÍNEZ, A., CUEVAS, E., RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, R., FRANCISCO, V., ESTEVEZ, M., CELIS, L., MONROY-VELÁZQUEZ, L., LEAL-BAUTISTA, R., MASIA, L., TUSSENBROEK, B., ALVAREZ-FILIP, L., GARCÍA-SÁNCHEZ, M. & SILVA, R. 2020 Massive influx of pelagic sargassum spp. on the coasts of the mexican caribbean 2014-2020: Challenges and opportunities .
- CORONADO, C., CADELA, J., IGLESIAS-PRieto, R., SHEINBAUM, J., LÁPEZ, M. & OCAMPO-TORRES, F. J. 2007 On the circulation in the puerto morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs* **26**, 149–163, report.
- DÍAZ-MARTÍNEZ, M. A. & ESPINOZA-AVALOS, J. 2000 Distribution of brown seaweeds (phaeophyta) in the yucatán península, méxico. *Bulletin of Marine Science* **66**, 279–289.
- FRANKS, J. S., JOHNSON, D. R. & KO, D. S. 2016 Pelagic sargassum in the tropical north atlantic. *Gulf and Caribbean Research* **27**, 6–11.
- FRANKS, J. S., JOHNSON, D. R., KO, D.-S., SÁNCHEZ-RUBIO, G., READ-HENDON, J. & LAY, M. 2011 Unprecedented influx of pelagic sargassum along caribbean island coastlines during summer 2011. *Tech. Rep.* 64. Gulf and Caribbean Fisheries Institute, Puerto Morelos, México.
- GARCÍA-SÁNCHEZ, M., GRAHAM, C., VERA, E., ESCALANTE-MANCERA, E., ÁLVAREZ FILIP, L. & VAN TUSSENBROEK, B. I. 2020 Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic sargassum species in the mexican caribbean. *Aquatic Botany* **167**, 103275.
- HANISAK, M. D. & SAMUEL, M. A. 1987 Growth rates in culture of several species of sargassum from florida, usa. *Hydrobiologia* **151/152**, 399–404.
- HOLLAND, K. T., HOLMAN, R. A., LIPPMANN, T. C., STANLEY, J. & PLANT, N. 1997 Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **22** (1), 81–92.

- HOLMAN, R. A. & STANLEY, J. 2007 The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Eng.* **54** (6-7), 477–491.
- LAPOINTE, B. E., WEST, L. E., SUTTON, T. T. & HU, C. 2014 Ryther revisited: nutrient excretions by fishes enhance productivity of pelagic sagassum in the western north atlantic ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **458**, 46–56.
- MARMORINO, G. O., MILLER, W. D., SMITH, G. B. & BOWLES, J. H. 2011 Airborne imagery of a disintegrating sargassum drift line. *Deep-Sea Research I* **58**, 316–321.
- NIETO, M. A., GARAU, B., BALLE, S., SIMARRO, G., ZARRUK, G. A., ORTIZ, A., TINTORÉ, J., ÁLVAREZ-ELLACURÍA, A., GÓMEZ-PUJOL, L. & ORFILA, A. 2010 An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms* **35** (14), 1712–1719.
- POPAT, S. K. & EMMANUEL, M. 2014 Review and comparative study of clustering techniques. *International journal of computer science and information technologies* **5** (1), 805–812.
- RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, R., VAN TUSSENBROEK, B. & JORDÁN-DAHLGREN, E. 2016 Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del caribe mexicano (2014–2015). *Florecimientos algales nocivos en México* pp. 352–365.
- SIMARRO, G., RIBAS, F., ÁLVAREZ, A., GUILLÉN, J., ÒSCAR CHIC & ORFILA, A. 2017 ULISES: An Open Source Code for Extrinsic Calibrations and Planview Generations in Coastal Video Monitoring Systems. *Journal of Coastal Research* **33** (5), 1217 – 1227.
- TRAN, T. N., WEHRENS, R. & BUYDENS, L. M. 2005 Clustering multispectral images: a tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **77** (1), 3–17, FESTSCHRIFT HONOURING PROFESSOR D.L. MASSART.
- VAN TUSSENBROEK, B. I., HERNÁNDEZ-ARANA, H. A., RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, R. E., ESPINOZA-AVALOS, J., CANIZALES-FLORES, H. M., GONZÁLEZ-GODOY, C. E., BARBA-SANTOS, M. G., VEGA-ZEPEDA, A. & COLLADO-VIDES, L. 2017 Severe impacts of brown tides caused by sargassum spp. on near-shore caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin* **122**, 272–281.
- TZOTSOS, A. & ARGIALAS, D. 2008 *Support Vector Machine Classification for Object-Based Image Analysis*, pp. 663–677. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- WANG, M. & HU, C. 2017 Predicting sargassum blooms in the caribbean sea from modis observations. *Geophysical Research Letters* **44** (7), 3265–3273.
- WANG, M., HU, C., BARNES, B. B., MITCHUM, G., LAPOINTE, B. & MONTOYA, J. P. 2019 The great atlantic sargassum belt. *Science* **365**, 83–87.