



Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

Región Poza Rica-Tuxpan

Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

“Análisis Morfodinámico de la Línea de Costa de la Isla
Lobos, Golfo de México Occidental”

Tesis para obtener el grado de Maestría en
Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

Presenta:

Xochiquetzal Peralta Jiménez

Director:

Dr. José de Jesús Salas Pérez

Marzo del 2022

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Región Poza Rica-Tuxpan

Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

Análisis Morfodinámico de la Línea de Costa de la Isla Lobos, Golfo de México Occidental

Tesis para obtener el grado de Maestría en
Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

Presenta:
Xochiquetzal Peralta Jiménez

Director:
Dr. José de Jesús Salas Pérez

Comité Lector
Dr. Adán Guillermo Jordán Garza
Dr. David Salas Monreal



Universidad Veracruzana

Tuxpan de Rodriguez Cano, Veracruz, México

22 de marzo de 2022

Mtro. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz

Coordinación Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

Por medio de la presente me dirijo a Ud. para dar conocimiento de que el estudio titulado **“Análisis Morfodinámico de la Línea de Costa de la Isla Lobos, Golfo de México Occidental”** realizado por la Biol. **Xochiquetzal Peralta Jiménez** , bajo la Dirección del **Dr. José de Jesús Salas Pérez**, ha sido revisado para poder llevar a cabo la solicitud de revisión por parte de la comisión lectora.

Dr. José de Jesús Salas Pérez

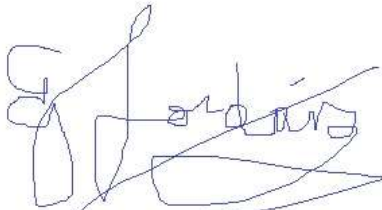
Director

A quien corresponda
Presente

ASUNTO: Aprobación de tesis de **Xochiquetzal Peralta Jiménez**

A través de este conducto comunico mi voto aprobatorio para la tesis de Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros titulada "Análisis Morfodinámico de la Línea de Costa de la Isla Lobos, Golfo de México Occidental" presentada por la biól. Xochiquetzal Peralta Jiménez.

Atentamente



Dr. Adán Guillermo Jordán Garza
Laboratorio de Arrecifes Coralinos
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Universidad Veracruzana
Tuxpan de Rodríguez Cano, 27/05/2022



UNIVERSIDAD VERACRUZANA
Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías

Boca del Río, Veracruz a 31 de mayo del 2022.

A través de este conducto comunico mi **voto aprobatorio** para la tesis de Maestría en Manejo de Ecosistema Marinos y Costeros titulada “**Análisis Morfodinámico de la Línea de Costa de la Isla Lobos, Golfo de México Occidenta**”, presentada por la Biól. **Xochiquetzal Peralta Jiménez**.
Atentamente Dr. David Salas Monreal Investigadora Titula C de Tiempo completo, del Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, de la Universidad Veracruzana, región Veracruz.

Atentamente,

David Salas Monreal

davsalas@uv.mx

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi Familia, mis padres que desde niñas nos han enseñado a mi hermana y a mí a seguir nuestros sueños e impulsado para cumplir con nuestras metas, y sobre todo que siempre nos han apoyado e impulsado.

A mi hermana que a pesar de llamarme “loca” por la carrera que elegí y por andar en campo, siempre me ha apoyado y me ha echado porras en todos mis proyectos.

Finalmente, a mi tío René Jiménez Hernández, aunque ya no está con nosotros, fue parte importante y principal para que pudiera realizar mi maestría, Gracias por creer en mí y por siempre estar pendiente de todos nosotros.

Así que este trabajo es de ustedes, Los amo.

"No es el más fuerte de las especies el que sobrevive, tampoco es el más inteligente el que sobrevive. Es aquel que es más adaptable al cambio".

Charles Darwin

Agradecimientos

Son muchas las personas a las que tengo que agradecer, ya que sin ellas no podría haber concluido este trabajo de investigación, agradezco sus consejos, ayuda y motivación que me dieron.

A mi director el Dr. José de Jesús Salas Pérez, quien me tuvo mucha paciencia y me dedico de su tiempo para el trabajo en campo y de gabinete, ya que fue una pieza clave y fundamental para la realización de esta investigación.

A mi comité lector, el Dr. Jordán-Garza y Dr. Salas-Monreal, por sus revisiones, aportaciones y sugerencias, en cada evento académico y en la revisión final del mismo. Gracias por su paciencia y confianza.

Al Mtro. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz, coordinador de la Maestría de Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros, por siempre brindarnos el apoyo asesorías y estar pendiente de nosotros durante todo este proceso.

A la Q.B. Blanca Zapata, directora del Área de protección de Flora y Fauna del Sistema Arrecifal Lobos Tuxpan (APFF_SALT), y mi actual jefa, quien me brindo todo el apoyo laboral para poder realizar mis estudios de maestría, para la logística para los muestreos y por motivarme a concluir esta investigación.

A el Biol. Jhostin Sánchez y la Mtra. Diana Vidal, técnicos operativos del APFF-SALT, por su gran apoyo en las tomas de datos, gracias por su compañerismo y por su compromiso por la conservación.

A los chicos de servicio social del APFF-SALT, principalmente a Giovanni, Coral, Pedro y Fernanda, quienes me apoyaran en las campañas de perfiles de playa. Agradezco su entusiasmo a participar y por hacer más divertidas las campañas de campo.

A mi pareja el Biol. Juan Manuel González Cobos, por su gran apoyo, confianza y sobre todo paciencia para que pudiera culminar este proyecto. Gracias, porque sin ti no hubiera sido posible el logro de esta meta.

A mis tíos Rosa y Pepe, así como a mi prima Mariana, por siempre apoyarme y motivarme a seguir adelante y echarle ganas a mis proyectos.

A mi cuñado Sergio, que se ha convertido parte de esta familia y al igual que mi hermana siempre están apoyándome, en mis proyectos.

A los Biol. Vicente y Paty, mis padres Tortugueros, gracias por fomentarme el amor a la investigación, por alentarme a seguir superándome, por siempre estar ahí para mí y echarme porras.

Índice

Índice	i
Resumen.....	1
Introducción	2
II. Antecedentes	4
III. Objetivos	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Particulares.....	10
IV. Área de Estudio	11
Sedimentación	12
Corrientes Marinas	13
Mareas	14
V. Material y Métodos.....	15
Medición de Perfiles de Playa	15
Medición de corrientes marinas y oleaje	17
VI. Resultados.....	21
Tasa de Erosión de la Línea de costa en la Isla Lobos.	21
Dirección y velocidades de las corrientes marinas	28
Medición de Oleaje.....	34
VII. Discusión	45
VIII. Conclusión.....	49
IX.- Aplicación práctica	49
Referencias.....	51

Índice de figuras

Figura 1.- Isla Lobos en la zona norte del corredor arrecifal del suroeste del Golfo de México.....	10
Figura 2.- Diseño de nivel de vasos comunicantes o de Andrade (tomado de Andrade y Ferreira, 2006).....	14
Figura 3.- Medición de perfiles de playa con el método de Andrade.....	15
Figura 4.- Diseño de Tarjeta de Deriva.....	16
Figura 5.- Sitio de Liberación de tarjetas de deriva en la laguna arrecifal de Isla Lobos.....	18
Figura 6.- División por zonas de estudio en la línea de costa de Isla Lobos: Azul (Zona Este), Rojo (Zona Centro) y Naranja (Zona Oeste).....	20
Figura 7.- Tasa de Erosión o Acumulación de la línea costera de la Isla Lobos (Zona Oeste).....	22
Figura 8.- Tasa de Erosión o Acumulación de la línea costera de la Isla Lobos (Zona Centro).....	24
Figura 9.- Tasa de Erosión o Acumulación de la línea costera de la Isla Lobos (Zona Este).....	25
Figura 10.- Trayectoria de tarjetas de deriva en la laguna arrecifal de Isla Lobos.....	27
Figura 11.- Deriva de las boyas Lagrangeanas, dentro de la laguna arrecifal de Isla Lobos en el mes de septiembre del 2020 y marzo del 2021.....	29
Figura 12.- Prueba t-student entre las velocidades de las boyas de deriva Lagrangeanas 2 y 3.....	33
Figura 13.- Refracción promedio de oleaje del mes de febrero.....	35
Figura 14.- Refracción promedio de oleaje del mes de marzo.....	36
Figura 15.- Refracción promedio de oleaje del mes de abril.....	37
Figura 16.- Refracción promedio de oleaje del mes de mayo.....	38
Figura 17.- Refracción promedio de oleaje del mes de junio.....	39
Figura 18.- Refracción promedio de oleaje del mes de julio.....	40
Figura 19.- Refracción promedio de oleaje del mes de agosto.....	41
Figura 20.- Refracción promedio de oleaje del mes de septiembre.....	42
Figura 21.- Grafico indicando la ubicación de las balizas, viento, oleaje y corriente marina.....	43

Índice de tablas.

Tabla 1.- Coordenadas de las 26 estaciones de los perfiles de playa.....	13
Tabla 2.- Resultados de la tasa de erosión en la línea de costa de la Isla Lobos.....	21
Tabla 3.- Tasa de erosión en m/año (zona oeste).....	21
Tabla 4.- Tasa de erosión en m/año (zona centro).....	23
Tabla 5.- Tasa de erosión en m/año (zona este).....	25
Tabla 6. Promedios de la tasa de erosión / acumulación en la línea de costa de la Isla Lobos.....	26
Tabla 7.- Datos colectados con las tarjetas de deriva en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.....	28
Tabla 8.- Datos de la deriva de la boya Lagrangeana 1, en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.....	30
Tabla 9.- Datos de la deriva de la boya Lagrangeana 2, en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.....	31
Tabla 10.- Datos de la deriva de la boya Lagrangeana 3, en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.....	32
Tabla 11.- Datos de los promedios, máximo, mínimo y desviación estándar de Hs y Ts.....	34

Resumen

Análisis Morfodinámico de la Línea de Costa de la Isla Lobos, Golfo de México Occidental

El estudiar y conocer el comportamiento de la zona costera ha sido de gran interés en muchas partes del mundo, porque es importante para la morfodinámica costera, su planeación y manejo de las líneas de costa. El objetivo de este trabajo fue identificar los procesos naturales y antrópicos que han influido a la morfología de la línea de costa de la Isla Lobos, del Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan. Para este estudio se midieron perfiles de playa en 26 balizas durante 2 años (mayo del 2019 a septiembre del 2021, en 6 experimentos), se midió la corriente marina y el oleaje, sembrando 5 tarjetas de deriva y 3 boyas de deriva Lagrangeana de las cuales se calculó la velocidad y dirección de la corriente litoral de la laguna arrecifal de Isla Lobos. Para el estudio del oleaje se utilizó la plataforma “Windfinder” este utiliza el modelo Global Forecast System (GFS) se obtuvieron datos diarios de altura, dirección y periodicidad de la ola. Posteriormente se calcularon altura significativa de la ola (H_s) y del periodo significativo de la ola (T_s), también se obtuvo la dirección del viento y oleaje. Se determinó que 10 balizas presentaron erosión con un promedio de 2.3 m/año. La zona donde se presentó la mayor tasa de erosión (7.5 m/año) es donde se observan actividades antropogénicas como la colocación de un geotubo y donde se ha dinamitado la cresta arrecifal, además la corriente litoral se intensifica de 0.5 m/s llegando a velocidades de 1.9 m/s en esa zona; en 14 balizas se observó una acumulación con un promedio de 1.60 m/año y en 2 balizas se observó una estabilidad donde no hay cambio en la morfología de la línea de la costa. Comparando los perfiles de playa con la medición de la corriente litoral y el oleaje se comprobó que en la laguna arrecifal de la Isla Lobos existe una corriente litoral la cual es producida por los gradientes de altura de las olas alrededor de la laguna arrecifal de la Isla Lobos. Este trabajo sugiere recomendaciones para la restauración de la línea costera, así como realizar estudios a largo plazo de la dinámica costera de la Isla Lobos.

Introducción

Las líneas de costa son acumulaciones de materiales no consolidados en la zona de la playa, no son líneas estáticas, están sujetas a la acción del oleaje, las mareas, las corrientes marinas, los vientos y factores climáticos como los huracanes y tormentas, que erosionan o acumulan sedimento, en diferentes localidades de la franja litoral (Carranza-Edwards, 2010; Peña-Olivas y Sánchez-González, 2018).

Son áreas complejas por su dinámica extrema, siendo sensibles a cualquier modificación por interacciones de los ambientes marinos, climáticos o por las acciones antrópicas. Estas zonas han sido de importancia en muchas partes del mundo para el desarrollo de las actividades portuarias, industriales, petroleras y turísticas (Lacerda, Pinhero y Passos, 2021).

Esta dinámica siempre ha estado presente en la zona costera, contribuyendo a su modificación. Actualmente esta dinámica se ha intensificado debido a las actividades humanas, convirtiéndose en un problema para los asentamientos urbanos (Van-Rijn, 2011).

Uno de los problemas más comunes que presentan las líneas de costa es la erosión (perdida de la línea de costa), esta puede ser por factores naturales estacionales, como los eventos extremos como huracanes o tormentas, está perdida también se puede generada por factores antropogénicos. Cual sea el caso, el equilibrio de la línea de costa se ve afectado (Mendoza-Baldwin y Silva, 2004).

En México las costas del océano Atlántico por su relieve suave, tienen un mayor riesgo para la erosión por efecto del ascenso del nivel del mar (FitzGerald, Fenster, Argow y Buynevich, 2008). En algunas áreas de la costa se han detectado zonas de línea de costa erosionadas, por la acción del oleaje, el incremento del nivel del mar (por efecto del calentamiento global) o por el cambio de usos de suelos, causando daños al hábitat y/o asentamientos humanos (Tanner y Stapor-Jr, 1971).

El sistema arrecifal Lobos-Tuxpan se localiza en la zona noroccidental del golfo de México agrupando 7 arrecifes de tipo plataforma con llanuras someras. En este sistema arrecifal se ubica el Arrecife Lobos, que tiene un cayo arenoso (Isla Lobos) importante para la actividad petrolera y turística. Con la actividad petrolera se realizaron importantes modificaciones al arrecife y al cayo arenoso.

Las construcciones e infraestructuras hechas en la zona de la laguna arrecifal de la Isla Lobos, en combinación con los fenómenos meteorológicos como los: vientos que soplan del Norte, las tormentas tropicales y huracanes, han ocasionado un daño irreversible, modificando significativamente los procesos naturales del ecosistema arrecifal y su entorno visual. Los factores anteriores más la reconstrucción del camino de acceso a la zona de la playa de Isla Lobos, han agravado el cambio de la línea de costa de la zona de estudio de manera severa (García-Salgado, Nava, Samos, Bravo y García-Uribe, 2014).

Los ecosistemas tienen la capacidad de resiliencia ante ciertos impactos antropogénicos y/o naturales, pero muchas veces requieren la asistencia humana para generar condiciones que faciliten los procesos de recuperación. En muchas zonas costeras la recuperación del transporte litoral, ayuda como medida para evitar la erosión o acumulación en determinadas zonas de la línea de costa, siendo una de las principales acciones de conservación, para asegurar la provisión de servicios ambientales ante un panorama de cambio climático global (Manzano-Fischer et al., 2010).

Las acciones humanas en respuesta a la erosión costera han sido la construcción de rompeolas, espigones o geotubos, las cuales modifican el transporte natural de sedimentos, algunas de estas acciones pueden agravar los procesos de erosión, en el futuro (Hein et al., 2019).

II. Antecedentes

Para estudiar la morfodinámica de las líneas costeras, se tiene que investigar la dinámica del litoral y cuantificar la erosión o acumulación que provocan los fenómenos naturales y antrópicos, para determinar el cambio del paisaje litoral, la destrucción de construcciones urbanas y el riesgo para la población humana que habita en zonas costeras (Anthony, 2005; Cambers, 1998; Finkl y Walker, 2005).

Al ser la erosión uno de los problemas más importantes en zonas litorales de muchas partes del mundo, se han realizado diversos estudios para evaluarla. En Banna-Omran y Frihy (2009), utilizando imágenes aéreas de 1955 e imágenes Landsat Thematic del 2002 Mapper (ETM), junto con observación de campo, analizaron los cambios geomorfológicos en la zona costera del delta nororiental del Nilo. Estas imágenes se superpusieron, utilizando puntos de control como faros, carreteras y los principales canales de los ríos, para realizar las comparaciones de la línea de costa. Para observar los cambios de la línea de costa a corto plazo, eligieron 50 perfiles los cuales cubren toda la costa del área de estudio. Con las fotografías y las imágenes ETM, identificaron y cartografiaron un total de 9 tipos geomorfológicos pronunciados (playa, planicie costera, dunas costeras, terrenos agrícolas, salinas, laguna de Manzala, marismas, centros urbanos). Determinaron que los patrones de erosión y acreción prevalecen a lo largo de la zona de estudio siendo afectados localmente por la construcción de malecones/espigones y por la colocación de estructuras de protección costera. Dentro de los resultados vieron que el sedimento se transporta del Oeste hacia el Este, presenta zonas con tasas de erosión de la línea de costa de entre -11 y -7 m/año, y otras con una tasa de acreción de 14 m/año. Estos patrones de erosión/acreción son derivado de los patrones naturales de corrientes inducidas por las olas y el transporte de sedimento, junto con el impacto de estructuras de protección costera, construidas por el hombre.

Van-Rijn, en el 2011, realizó un estudio de erosión costera y control, utilizando un concepto de celdas costeras (espigones) para hacer frente, mediante la identificación y análisis de los volúmenes de sedimento acumulados por celdas costeras. Este análisis determina que los perfiles de playa relativamente empinados son muy vulnerables a la erosión. La erosión de las dunas durante eventos extremos con altos niveles de oleaje de

hasta 5 m, es principalmente un proceso transversal el cual lleva los sedimentos al frente de la duna. La erosión calculada es de $20 \text{ m}^3/\text{m}$ para un nivel de oleaje de 1 m hasta de $200 \text{ m}^3/\text{m}$ para un nivel de oleaje 5 m. En experiencia práctica de las costas de Holanda muestran que la erosión a gran escala puede detenerse mediante la regeneración masiva de la playa y a la superficie de la costa durante periodos de 20 años (periodos de tiempo largo), esta metodología es factible solo si se cuenta con suficientes cantidades de arena y los costos de dragado y vertido aceptables. Sin embargo, no es la alternativa más económica. Por otra parte, las estructuras duras (espigones, rompeolas separados y arrecifes artificiales) reducen significativamente la erosión manteniendo las playas en condiciones normales. Consideran que este tipo de estructuras las deben de construir donde el gradiente de transporte es de 0, para evitar la erosión del lado de sotavento de la estructura. Estas estructuras duras no son un remedio para la erosión costera en condiciones de nivel de oleaje altos (5 m).

Para el golfo de México y Mar Caribe, Márquez (2011) realizó un levantamiento topográfico de 53 perfiles de playa en 27 sitios, entre los municipios del Carmen y Champotón en el Estado de Campeche, comprendiendo 290 km en el litoral sur del Golfo de México, más un análisis granulométrico de muestras de sedimento, además de un análisis histórico de la línea de costa mediante cartografía, utilizando imágenes de satélite, ortofotos y un análisis de los cambios morfológicos estacionales de las playas de esa zona de estudio. Los resultados mostraron un proceso erosivo regional en la zona litoral investigada, teniendo una tasa de erosión máxima de 14 m/año y mínima de 0.2 m/año: cuantificando desplazamientos negativos (erosión) de la línea de costa. Identificaron y cuantificaron un proceso de transgresión marina en el litoral de Campeche el cual es causado por la interrupción de transporte de litoral de sedimento por la construcción de espigones y escolleras, causando la disminución de material arenoso, que aunado al incremento en la intensidad de frecuencia de fenómenos meteorológicos como huracanes, junto con el aumento del nivel del mar, han afectado al desarrollo urbano, turístico, eléctrico, la logística de comunicación terrestre y pérdida ecológica de manglares en conjunto con la pérdida de playas para la anidación de tortugas marinas.

Dos años después, Ruíz-Martínez, Silva-Casarín y Posadas-Venegas (2013) aplicaron una metodología para determinar los estados morfodinámicos de las playas de la costa noreste de Quintana Roo-México, que carecen de la protección de un sistema arrecifal para la protección de la línea de costa, que en conjunto con las infraestructuras urbanas localizadas en esa área han producido erosión. En ese estudio de geología y geomorfología de la costa, análisis de los sedimentos, junto con una modelación numérica de olas, se establecieron los principales parámetros morfodinámicos de las playas. Los resultados muestran que la presencia del corredor arrecifal son una protección costera natural manteniendo el equilibrio en las playas, dejando como responsables de la pérdida permanente de la playa el debilitamiento y la pérdida de la zona arrecifal y la construcción de estructuras urbanas por el hombre. La combinación de ambas representa la condición más desfavorable para el cambio morfodinámico de la línea de costa de esa área de estudio.

Kaliraj, Chandrasekar y Magesh (2013) realizaron un estudio sobre el impacto de las olas y corrientes litorales en la erosión, en las costas de Kanyakumari, Tamil Nadul, en la India, adquirieron imágenes de 1999 a 2011, las cuales les permitieron determinar las tasas de erosión de la costa utilizando una línea costera digital basado en GIS y un análisis estadístico, lo cual les permitió cuantificar las zonas de erosión y zonas de acumulación. Sus resultados revelaron que las zonas costeras, que incluyen las costas de Kanyakumari, Kovalam, Manavalakurichi y Thengapattinam, tienen un máximo de energía de las olas, que, en asociación con la alta velocidad de la corriente litoral, producen procesos de erosión. El efecto acumulativo de estos procesos costeros en el área de estudio conduce a una erosión severa que se calcula en 300.63, 69.92, 54.12 y 66.11 m/año, respectivamente. Las zonas costeras, Rajakkamangalam, Ganapathipuram, Muttam y Colachel, han experimentado depósitos de sedimentos durante el monzón del noreste. La variación espacial de la costa y su impacto en la energía de las olas y la corriente litoral se han cartografiado utilizando la tecnología geoespacial. Este estudio les permitió realizar predicciones de los procesos costeros y prevenir los impactos de esos fenómenos naturales.

Por otra parte, Panana-Arce et al., (2014) realizaron un registro preliminar de perfiles de playa y parámetros fisicoquímicos en la zona de Roca Partida-Monte Pío, Veracruz. El experimento lo realizaron en tres diferentes puntos del municipio de San Andrés Tuxtla

(Arroyo de Lisa, Roca Partida y Monte Pio), tomaron datos en el mes de octubre (periodo de otoño) del 2007 al 2011. Los tres sitios cerca de las salidas de los ríos o bocabarra. Los perfiles se determinaron (6 perfiles) tomando en cuenta la posición del río, considerando una distancia entre 10 y 15 m, teniendo como punto de referencia el límite de bajamar inferior, así como la amplitud de la playa en línea recta, marcando cada punto de medición con estacas y flexómetro, esto apoyado también con un GPS, brújula y mapa para establecer la posición y la dirección de toma del perfil. Se obtuvo la medición de oleaje colocando estacas y estadales. Los observadores anotaban las lecturas de los parámetros de cresta de la ola. También colectaron sedimentos. Se encontró una variabilidad en los registros de perfiles de playa: para el caso de Monte Pio se calculó una pérdida de la línea de costa del 60% provocada por la acción del viento en asociación con la corriente costera. Para el caso de Arroyo de Lisa y Roca Partida, presentaron una pérdida menor de la línea de costa. Se observó una ligera trasgresión de playa posterior a la zona intermareal, esta inducida perpendicularmente por el forzamiento del oleaje y viento hacia la línea de costa.

Carranza-Edwards, Márquez-García, Tapia-Gonzalez, Rosales-Hoz, y Alatorre-Mendieta (2015), realizaron un estudio en las playas del sur del Golfo de México y del mar Caribe noroeste. La investigación tuvo como objetivo comparar variaciones morfológicas y sedimentológicas entre las playas del Sur del Golfo de México y de la Riviera Maya (Caribe noroeste). En este estudio, se colectó regionalmente muestras de sedimentos del frente de la playa, se midieron perfiles topográficos de las playas y se analizó el posible efecto del ascenso del nivel del mar asociado al calentamiento global. La diferencia entre muestreos varió de 26 a 32 años. En 23 estaciones en los muestreos antiguos y recientes. Los perfiles de playa presentan variaciones, siendo más largos en ocasiones para los muestreos recientes que para los antiguos. La concavidad de los perfiles de playa sugiere que hay más perfiles recientes característicos de erosión. Las líneas de playa analizadas mediante imágenes LANDSAT de diversos años, sugieren la influencia de procesos antrópicos y meteorológicos; estos últimos podrían indicar una conexión entre deposición y erosión de playas en localidades no muy alejadas a las zonas de estudio. Tanto la comparación de parámetros texturales como composicionales demostraron su utilidad en el análisis comparativo de arenas de playa antiguas y recientes. Resultó más común encontrar clasificaciones más pobres en sedimentos recientes que en sedimentos antiguos, lo que

puede sugerir una interferencia mayor de factores antrópicos en sedimentos recientes, o una mayor variación de los parámetros oceanográficos. A través del análisis de componentes principales se observa que el mayor peso estadístico para sedimentos de tipo terrígeno está representado por minerales pesados y para sedimentos carbonatados (*pellets*), esta relación refleja condiciones favorables para la erosión.

En las costas de Ceará, Brasil, en las playas que comprenden Resex de Prainha do Canto Verde, Lacerda et al., (2021), realizaron un estudio para determinar la variación de la evolución de la línea de costa, utilizaron técnicas de geoprocésamiento, con ayuda del software Google Earth Pro, extrajeron imágenes satelitales y posteriormente las georreferenciaron utilizando como base la carta de ortofotos obtenida de la superintendencia Estatal de Medio Ambiente de Ceará. Utilizando el programa Digital Shoreline Analysis System (DSAS) en su versión 4.2, utilizada en ArcGIS 10.3, obtuvieron las tasas de erosión y acreción de la línea de costa. Utilizando los métodos End Point Rate (EPR). Los cálculos obtenidos muestran tasas de erosión que varían entre -4.14 m/año como máximo y -2.33 m/año el mínimo. Determinaron que, para los últimos 13 años, se ha perdido entre -53.82 y -30.29 metros en 13 años, determinando que los transectos en donde se presentan las tasas de erosión más altas, son donde existe mayor actividad antropogénica. Un factor que consideran que puede influir directamente en la erosión es la presencia de bancos de arena sumergidos, los cuales pueden cambiar la dirección de las olas, aumentando su potencia erosiva.

Para el caso de las corrientes marinas de la zona de estudio Lobos-Tuxpan, (Salas-Pérez y Jordán-Garza, 2018) mencionan que los responsables de la circulación son dos mecanismos; el viento el cual es el responsable de la variación estacional de la circulación (en verano y primavera se observó que los vientos tienen una preferencia hacia el noroeste) y por lo tanto la corriente costera fluye de sur a norte. El segundo son las corrientes de baja frecuencia, asociadas a la circulación de mesoescala del Golfo de México, esto debido al giro ciclónico de la Bahía de Campeche que, en su frontera cercana a la costa, induce corrientes costeras hacia el sur.

Un factor también importante para el tema de la erosión es la vegetación de las dunas costeras y las playas, Feagin et al. (2019), realizaron una investigación, realizando experimentos de campo y flujo de olas, en donde descubrieron que las plantas de duna

redujeron significativamente la erosión, esto debido a que se crean agujeros con sus tallos, hojas y sus raíces, atenuando el lavado de las olas y corrientes. Después de tomar muestras de los diferentes tipos de vegetación, determinaron que las especies herbáceas las cuales habitan la mayoría de las zonas costeras, cuentan con la estructura más eficiente para la reducción de la erosión. La vegetación puede ofrecer una alternativa proporcionando ventajas significativas sobre los enfoques tradicionales de ingeniería dura contra la erosión costera, debido a que los ecosistemas costeros tienen la capacidad de autoreparación y recuperación, (Gracia, Rangel-Buitrago, Oakley y Williams, 2017).

En las investigaciones presentadas anteriormente, se ejemplifica que la pérdida de la línea de costa es un problema mundial, lo cual impacta negativamente a la pérdida de hábitat, afectaciones a la población que se encuentran asentadas o cerca de las líneas costeras, provocando daños a las infraestructuras o perdiendo atractivos turísticos y con ello pérdidas económicas. Por lo tanto, los estudios de la morfodinámica costera relevantes para poder conocer el origen de la problemática y poder aplicar soluciones efectivas.

Las investigaciones mencionadas anteriormente coinciden que los factores naturales que influye en las modificaciones de la línea costera son las corrientes y la altura y dirección del oleaje, provocando una dinámica en donde se puede presentar erosión o acumulación, esta dinámica natural, puede ser afectada por la construcción de malecones, muelles o estructuras duras como espigones para la protección de la costa.

III. Objetivos

Objetivo General

Identificar los procesos naturales o antrópicos que han influido a la morfología de la línea de costa de la Isla lobos del Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan.

Objetivos Particulares

- Evaluar la evolución estacional de los perfiles de la línea de costa, mediante la medición de perfiles de playa.
- Determinar las corrientes y oleaje en la zona de la laguna arrecifal de la Isla Lobos.
- Proponer alternativas para minimizar la erosión y analizar su eventual restauración.

IV. Área de Estudio

El arrecife Isla Lobos presenta un cayo arenoso con una superficie de 600x500 m y una elevación máxima de 2.5 metros. La zona de barlovento está dominada por surcos y canales que disminuyen desde la cresta hasta el arrecife frontal; en la zona de sotavento se encuentra una comunidad coralina desarrollada. Existe un canal de 1.5 km y una profundidad de 3 m, dividiendo al arrecife (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2014). En la zona frente al Faro (zona suroeste), en el 2013 se colocó un geotubo para disminuir la erosión que se presentó en esa zona, derivado de modificaciones realizadas a Isla Lobos y el arrecife, lo cual modificó los procesos naturales del ecosistema arrecifal, el geotubo tiene una longitud de 160 m de largo por 4 metros de ancho y 1.50 metros de alto (Figura 1).



Figura 1.- Isla Lobos, del corredor arrecifal del suroeste del Golfo de México.

Sedimentación

Las islas son conocidas como cayos, islotes, bancos, arrecifes o sistemas insulares. En ellas se pueden encontrar una variedad de ecosistemas como, manglares, arrecifes, playas y dunas. Son importantes por su gran riqueza de especies y endemismo que llegan a presentar.

La Isla Lobos es un cayo formado por la acumulación de esqueletos de corales. Los cuales han ido creciendo de la plataforma submarina hasta la superficie (<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/islas.html>), creando arena de tipo calcárea (Moreno, 2004), la playa presenta pendientes suaves con vegetación como *Canavalia rosea*, *Ipomoea pes-caprae*, *Portulaca oleracea* y *Randia laetevirens*, con pendientes suaves.

Corrientes Marinas

La circulación de la plataforma continental Tampico-Veracruz (TAVE) se debe a las corrientes inducidas por el viento en el Golfo de México. La circulación de mesoescala en el área norte es generada por remolinos anticiclónicos que se desprenden de la corriente de Lazo; cuando llegan a la plataforma de TAVE, chocan y se dividen en dos remolinos: uno anticiclónico ubicado frente a la laguna Tamiahua en la zona norte del suroeste del Golfo de México y otro ciclónico en la zona sur de la bahía de Campeche (Vidal, V., Vidal, F., y Perez-Moreno, 1992; Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008).

El corredor arrecifal del suroeste del Golfo de México se ve afectado por los periodos de evaporación y precipitación relacionados con el intercambio de calor-flujo océano-atmósfera (Salas-Pérez y Granados-Barba, 2008), definiendo los periodos secos y lluviosos y cambios en la circulación del viento. Esto induce cambios en las características de la circulación marina en las plataformas continentales de Tamaulipas y Veracruz (Vidal et al., 1992; Monreal-Gómez y Salas-de-León, 1997; Salas-Pérez y Arenas-Fuentes, 2011; Mateos-Jasso, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno y Allende-Arandía, 2012).

Las corrientes de verano en los arrecifes del norte, arrecifes Lobos-Tuxpan, muestran una dirección predominante hacia el noroeste, además de la presencia de remolinos de submesoescala en la zona de sotavento del arrecife Tuxpan. Esta circulación está asociada con un vórtice de submesoescala que describe un periodo orbital de aproximadamente 7 días con un eje semi mayor de 27 km y un eje semi menor de 21 km (Salas-Pérez y Jordan-Garza, 2018). En otoño las corrientes muestran una dirección general hacia el suroeste. En

invierno la corriente fluye del noreste hacia el suroeste y en primavera hay flujos estacionales con una trayectoria que fluye alrededor de un remolino ciclónico que comienza en el lado de sotavento del arrecife Tuxpan y se mueve hacia el suroeste (Salas-Pérez y Jordán-Garza, 2018).

El corredor arrecifal del suroeste del Golfo de México está influido por las fluctuaciones estacionales en los sistemas de alta presión atmosférica, que se generan desde otoño hasta primavera, generando sistemas frontales con frentes fríos conocidos localmente como “Nortes”. Desde primavera hasta el verano, las fluctuaciones atmosféricas están dominadas por ondas tropicales y tormentas que, en algunos casos, se convierten en huracanes que afectan el Golfo de México (Salas-Pérez y Jordán-Garza, 2018).

Mareas

Las mareas en el golfo de México son el resultado de oscilaciones de marea indirectas en el océano y forzamiento astronómico directo sobre el Océano Atlántico. La respuesta del Golfo de México a la marea semidiurna no presenta resonancia y las amplitudes típicas para esta cuenca son de 7 a 9 cm en el margen occidental y de 1 cm en las regiones profundas (Martínez-López y Pares-Sierra, 1998). Para los componentes de marea diurnos se ha determinado que las amplitudes y las fases son diferentes en todo el Golfo de México occidental, debido a los cambios de anchura de la plataforma continental de Veracruz (Salas-Pérez y Jordán-Garza, 2018). En el sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, el régimen de mareas es regularmente diurno, con las siguientes características: Pleamar máxima registrada: 0.833 metros; Nivel de pleamar media: 0.833 metros; Nivel medio del mar: 0.000 metros; Nivel de la marea media: 0.033 metros; Nivel de bajamar media: 0.284 metros; Bajamar mínima registrada: 0.782 metros (CONANP, 2014; Salas-Pérez y Jordán-Garza, 2018).

V. Material y Métodos

La medición de los perfiles de playa y corrientes marinas se han realizado en los meses de mayo y agosto del 2019. Posteriormente se midieron perfiles de playa en febrero y septiembre del 2020 y en marzo 2021 tratando de medir las épocas climáticas representativas del Golfo de México.

Medición de Perfiles de Playa

Conocer la pendiente y el perfil de la costa es muy importante porque permite cuantificar el tipo principal de ola generada y cualitativamente en el caso de disipación o reflexión de energía (Moncayo-Guzmán y Ger-Salvatierra, 2019). Se utilizó el método de Andrade y Ferreira, (2006) o “vasos comunicantes” que es una modificación del método de Emery. Este método es uno de los más sencillos y válidos para medir los perfiles de playa, debido a que no requiere herramientas sofisticadas (Moncayo-Guzmán y Ger-Salvatierra, 2019).

Se establecieron 26 balizas, ubicadas cada 50 m las cuales se geo-posicionaron (Tabla 1) y marcaron con un tubo de PVC.

Baliza	Coordenada X	Coordenada Y	Baliza	Coordenada X	Coordenada Y
1	N21 28.317	W97 13.594	14	N21 28.095	W97 13.659
2	N21 28.294	W97 13.596	15	N21 28.091	W97 13.633
3	N21 28.263	W97 13.609	16	N21 28.090	W97 13.604
4	N21 28.230	W97 13.628	17	N21 28.105	W97 13.551
5	N21 28.208	W97 13.646	18	N21 28.118	W97 13.528
6	N21 28.186	W97 13.674	19	N21 28.133	W97 13.503
7	N21 28.170	W97 13.703	20	N21 28.157	W97 13.487
8	N21 28.163	W97 13.722	21	N21 28.181	W97 13.477
9	N21 28.149	W97 13.739	22	N21 28.217	W97 13.469
10	N21 28.124	W97 13.754	23	N21 28.241	W97 13.460
11	N21 28.103	W97 13.735	24	N21 28.268	W97 13.463

12	N21 28.095	W97 13.716	25	N21 28.291	W97 13.475
13	N21 28.096	W97 13.688	26	N21 28.316	W97 13.491

La metodología consiste en dos estacas o tablillas graduadas unidas entre sí por medio de una manguera con agua, para este estudio las estacas tienen 1.5m entre tablilla y tablilla que son separadas por un metro de manguera (figura 2). Este método se basa en el principio físico hidrostático existente en la manguera; la diferencia de lecturas que marca el agua indica la elevación diferencial entre ambas estacas (Andrade y Ferreira, 2006). Este procedimiento simple da mediciones precisas y algo más exactas que el método de Emery (1961).

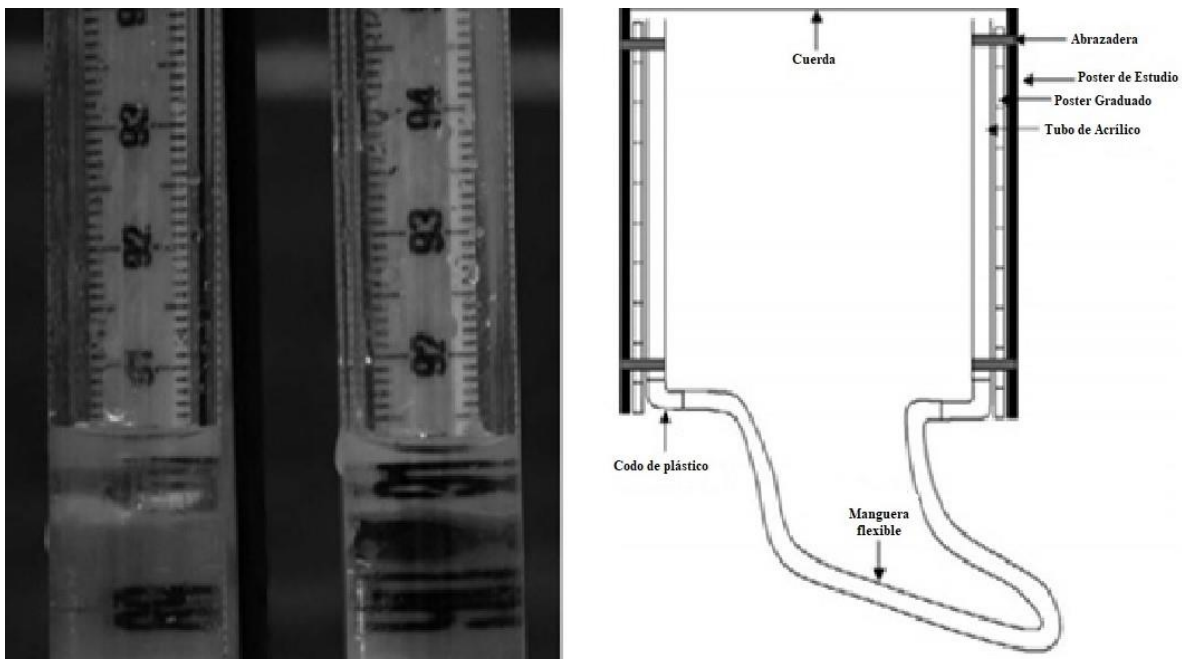


Figura 2.- Diseño de nivel de vasos comunicantes o de Andrade (tomado de Andrade y Ferreira, 2006).

La medición de los perfiles se comenzó en el punto de referencia fijo (baliza) el cual se encuentra en la parte superior de la playa y se avanzó en dirección perpendicular a la línea de marea. La última lectura debe hacerse cuando el polo más lejano está parcialmente sumergido.

Las lecturas resultantes deben anotarse en una tabla de campo, asegurándose siempre de que el orden de las lecturas se mantenga constante.

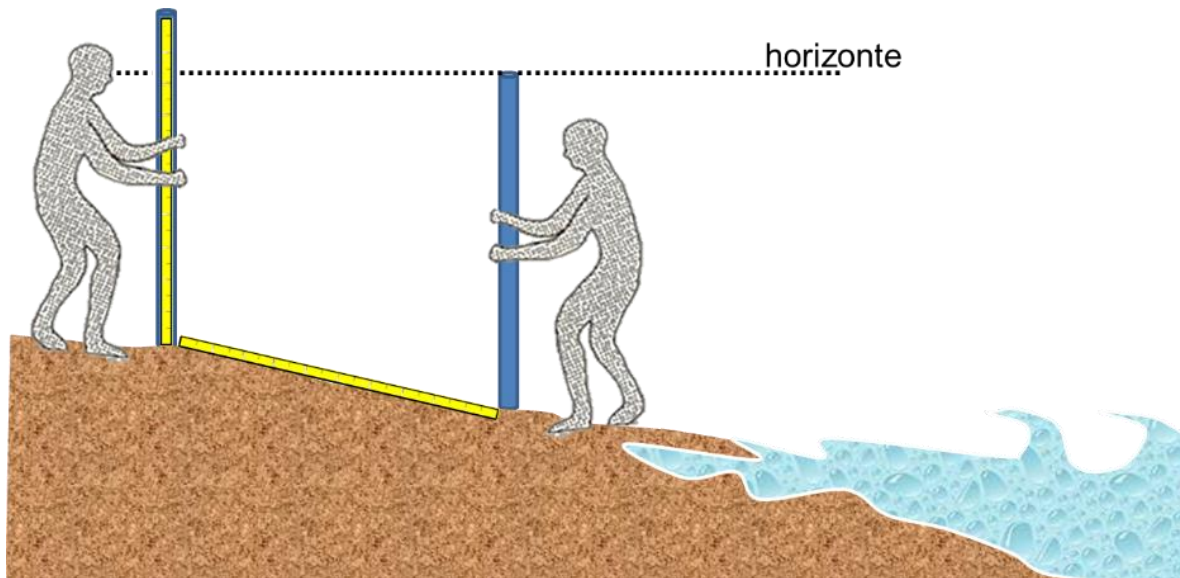


Figura 3.- Toma de perfiles de playa con el método de Andrade.

De las mediciones se obtendrá la tasa de erosión o acumulación media, tomando la longitud la longitud total del perfil la primera y última fecha; esta diferencia se dividirá por el número de años, dando como resultado a la tasa de erosión en unidades de m/años (Ojeda-Zújar, 2000).

$$\text{Tasa de erosión o acumulación} = \frac{\text{medidafinal} - \text{medida inicial}}{\text{años}} = \frac{m}{\text{años}}$$

Medición de corrientes marinas y oleaje

Dentro del área de estudio se realizaron muestreos in situ, en los meses de febrero del 2020 y septiembre del 2020 de los datos oceanográficos para medición de corrientes se elaboraron tarjetas de derivas y boyas de deriva Lagrangeana.

Los cuerpos de deriva se elaboraron con tarjetas de cartón colocadas dentro de una bolsa de polietileno sellada, junto con un peso y una pequeña cantidad de aire. Las tarjetas tenían una hoja con un texto impreso para su identificación: sitio de liberación, fecha de liberación, hora, coordenadas y un número secuencial de identificación.

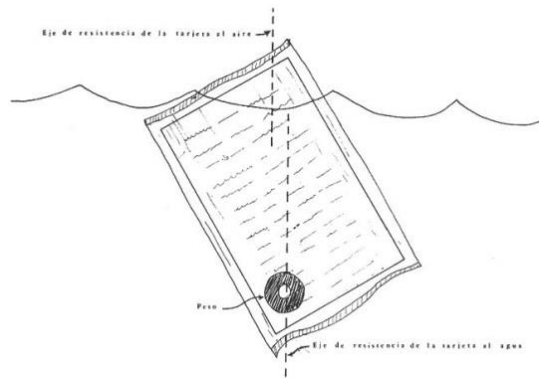


Figura 4.- Diseño de Tarjeta de Deriva.

Las boyas de deriva Lagrangeana (3) se elaboraron, con recipientes de vidrio, cada uno con un GPS marca “Garmin” programados para medir la deriva de la corriente, se les colocó una banderola para visualizarlos a distancia.

La cantidad de aire y pesos se ajustó para que sólo aproximadamente un 10% de la tarjeta y la boya de deriva Lagrangeana salieran del agua, y fueran movidas por la corriente marina y no el arrastre del viento (figura 4).

Con un kayak se sembraron, un grupo de 8 tarjetas derivas (en el mes de febrero del 2020) y dos boyas de deriva Lagrangeana (en el mes de septiembre del 2020) dentro de la laguna arrecifal, estas se repartieron entre la línea de costa y la cresta del arrecife. Al sembrar cada tarjeta y boya se tomó la hora, número de tarjeta o boya y coordenadas. Después de ser liberadas las tarjetas se les dio un seguimiento, anotando, cada 20 min. las coordenadas intermedias y la hora para el caso de las boyas solo se les fueron siguiendo con la función de seguimiento del GPS y se anotaron la hora y coordenada final de colecta.

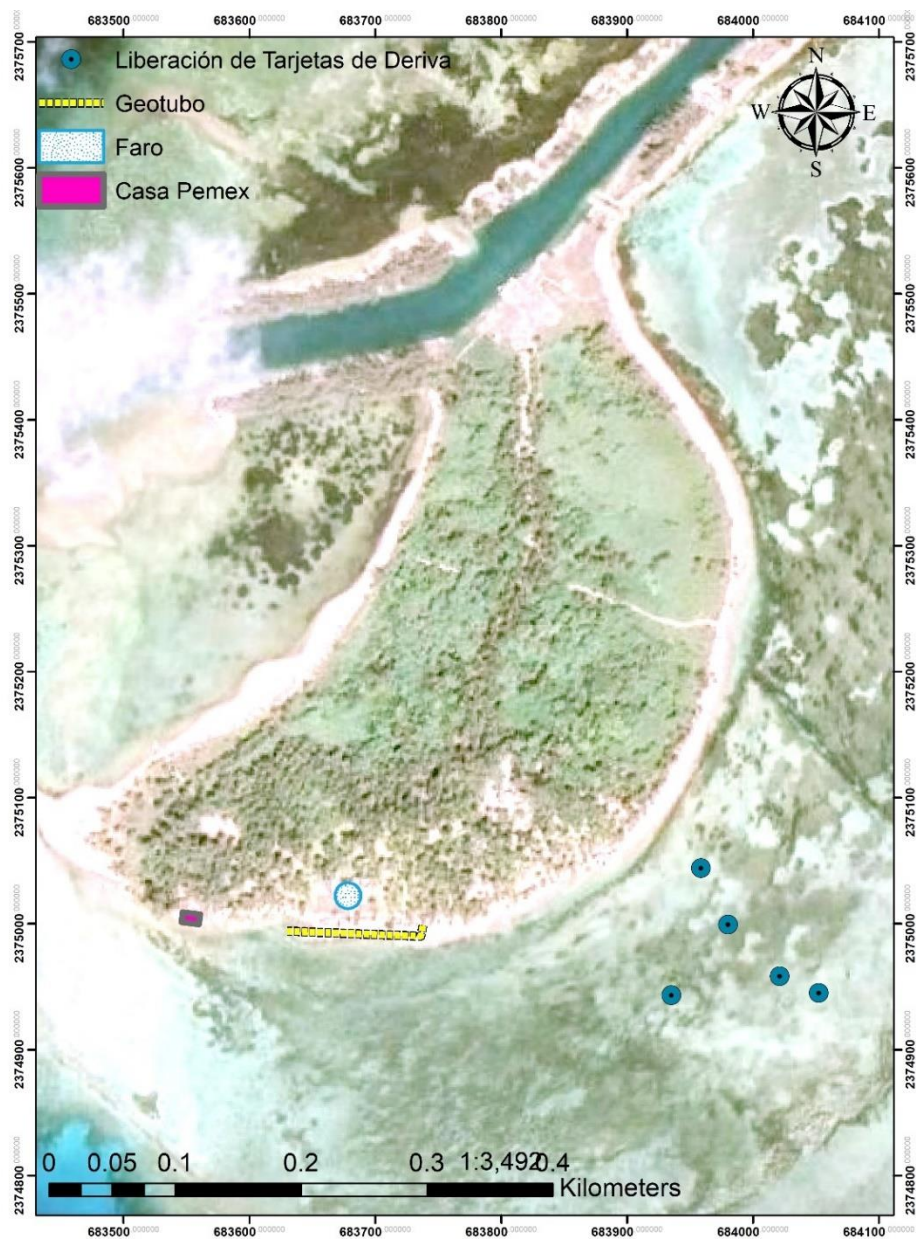


Figura 5.- Sitio de Liberación de tarjetas de deriva en la Isla Lobos.

Con los datos de posición geográfica se obtuvo la velocidad de la corriente marina en (m/s).

Utilizando la fórmula:

$$V = \frac{x_1 - x_2}{t_1 - t_2}$$

donde:

x_1 = Distancia inicial

x_2 = Distancia final

t_1 = Tiempo inicial

t_2 = Tiempo final

Para obtener los datos de oleaje se utilizó la plataforma “Windfinder” este utiliza el modelo Global Forecast System (GFS) es un modelo numérico de predicción meteorológica, creado y utilizado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica Estadounidense. Este modelo numérico se actualiza cuatro veces al día con pronósticos de hasta 16 días.

De esta aplicación se tomaron los datos diarios de altura, dirección y periodicidad de la ola, desde mar abierto hacia la laguna arrecifal; se capturaron en una base de Excel para su análisis. Del mismo modo se hizo con los datos del viento.

Se calcularon altura significativa de la ola (H_s) está definida como la media aritmética del 33 % de las alturas de ola más altas y del periodo significativo de la ola (T_s) definido por la media aritmética del 33% del periodo más alto. También se obtuvo la dirección del viento y oleaje (Moncayo-Guzmán y Ger-Salvatierra, 2019).

Con los datos tomados se realizó un mapa de refacción de oleaje dentro de la laguna de Isla Lobos. Con ayuda del programa ArcMap se colocó una malla en un mapa de Isla lobos, se tomó el promedio de una semana de la altura y dirección del oleaje en cada uno de los vértices de la malla, y posteriormente, se fueron trazando los rayos de energía de la dirección del oleaje, desde mar abierto, hasta la zona de la laguna arrecifal de Isla Lobos.

VI. Resultados

Tasa de Erosión de la Línea de costa en la Isla Lobos.

El área de estudio se dividió en 3 zonas, esto para facilitar la comparación y análisis de los sitios; la zona oeste (baliza 1 a la baliza 9), zona centro (baliza 10 a baliza 18) y zona este (baliza 19 a la baliza 26) (Figura 6).

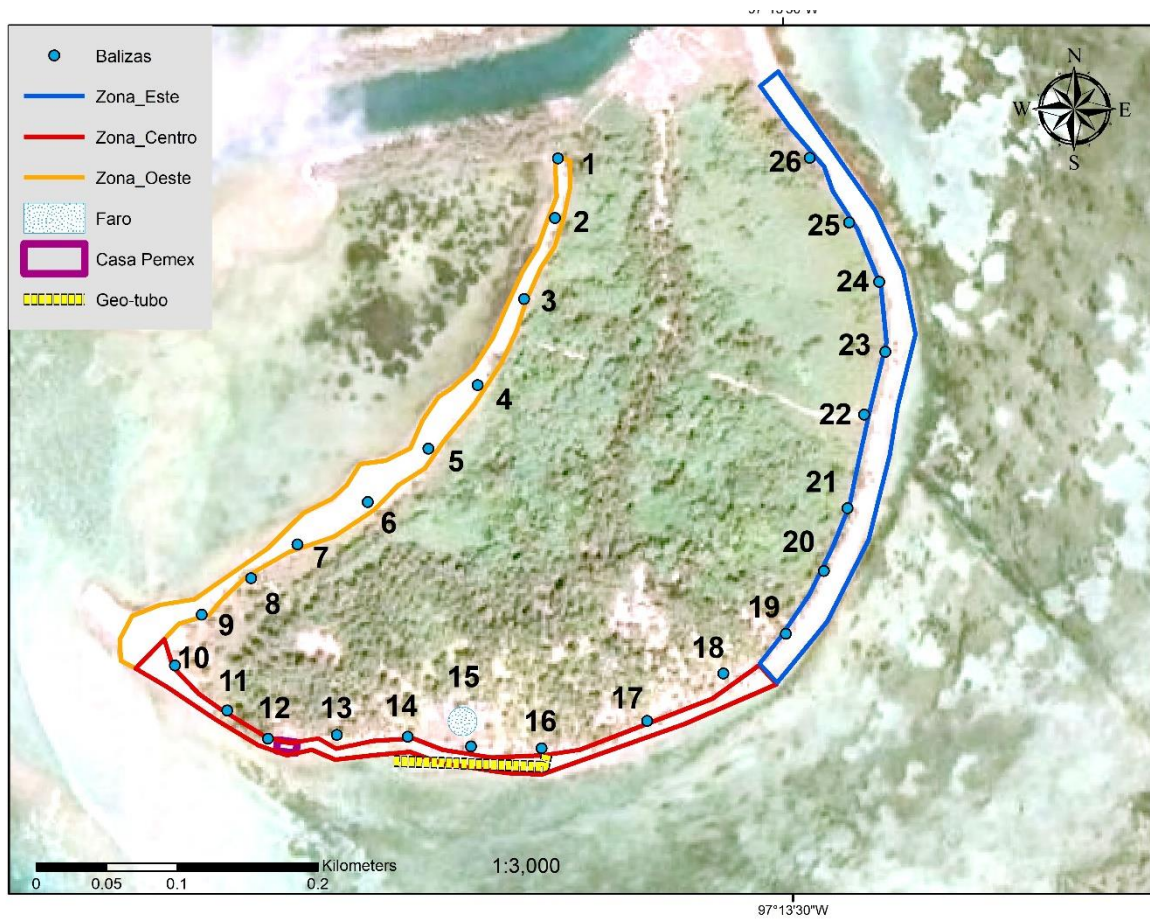


Figura 6.- División por zonas de estudio Azul Zona Este, Rojo Zona Centro y Naranja Zona Oeste.

Se tienen 26 estaciones fijas, a una distancia de 50 m, una de otra. Se realizaron seis campañas de toma de perfiles con el método de Andrade (mayo y agosto 2019, febrero y septiembre 2020, febrero y agosto 2021). Durante este periodo de colecta de datos (2 años) se determinó que 10 balizas de la isla presentan erosión, 4 ubicadas en la zona Oeste (balizas 4, 5, 6 y 7) y 6 ubicadas en la zona central (balizas 10, 11, 12, 13, 17 y 18) con un

promedio de 2.3 m/año, con una máxima de 7.5 m/año (baliza 10) y una mínima de 0.5 m/año (baliza 18). Se presentó una acumulación en 14 balizas 6 ubicadas en la zona Este de la Isla (19, 20, 22, 23, 24 y 26), 3 para la zona central (14, 15 y 16) y 5 en la zona Oeste (1, 2, 3, 8, 9) con un promedio de 1.6 m/año, un mínimo de 0.5 m/año (balizas 3, 8, 19, 20, 22 y 26) y un máximo 6.5 m/años (baliza 16). En 2 balizas (21 y 26) ubicadas en la zona Este, los perfiles no presentaron ni erosión ni acreción de la longitud en la línea de costa, ubicadas en la zona Este (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la tasa de erosión en la línea de costa de la isla Lobos

Erosión/acumulación	Numero de balizas	Promedio de tasa de erosión o acumulación	Tasa máxima de erosión o acumulación	Tasa mínima de erosión o acumulación
Erosión	10 balizas	2.3 m/año	7.5 m/s	0.5 m/año
Acumulación	14 balizas	1.6 m/año	6.5 m/año	0.5 m/año
Estabilidad	2 balizas	0 m/año	0 m/año	0 m/año

En la zona Oeste las mediciones de los perfiles de playa se realizaron desde la baliza 1 a la baliza 9. En la tabla 3 se muestra la tasa de erosión o acumulación de sedimento.

Tabla 3. Tasa de erosión en m/año (zona Oeste)

Baliza	Metros	Años	Tasa m/año	Erosión / Acumulación
1	2	2	3	Acumulación
2	-2	2	1	Acumulación
3	2	2	0.5	Acumulación
4	4	2	-1	Erosión
5	0	2	-1	Erosión
6	-3	2	-1.5	Erosión
7	-6	2	-1.5	Erosión
8	0	2	0.5	Acumulación
9	4	2	1	Acumulación

En la tabla 3, se puede observar que para esta zona las balizas que muestran mayor erosión son la 7 y 6 con -1.5 m/año, las que presentaron menor erosión fueron las balizas 4 y 5 a una razón de 1 m/año. En 5 balizas (1, 2, 3, 4 y 9) presentaron acumulación de sedimento, siendo la baliza 1 la de mayor tasa de acumulación para esta zona con 3 m/año.

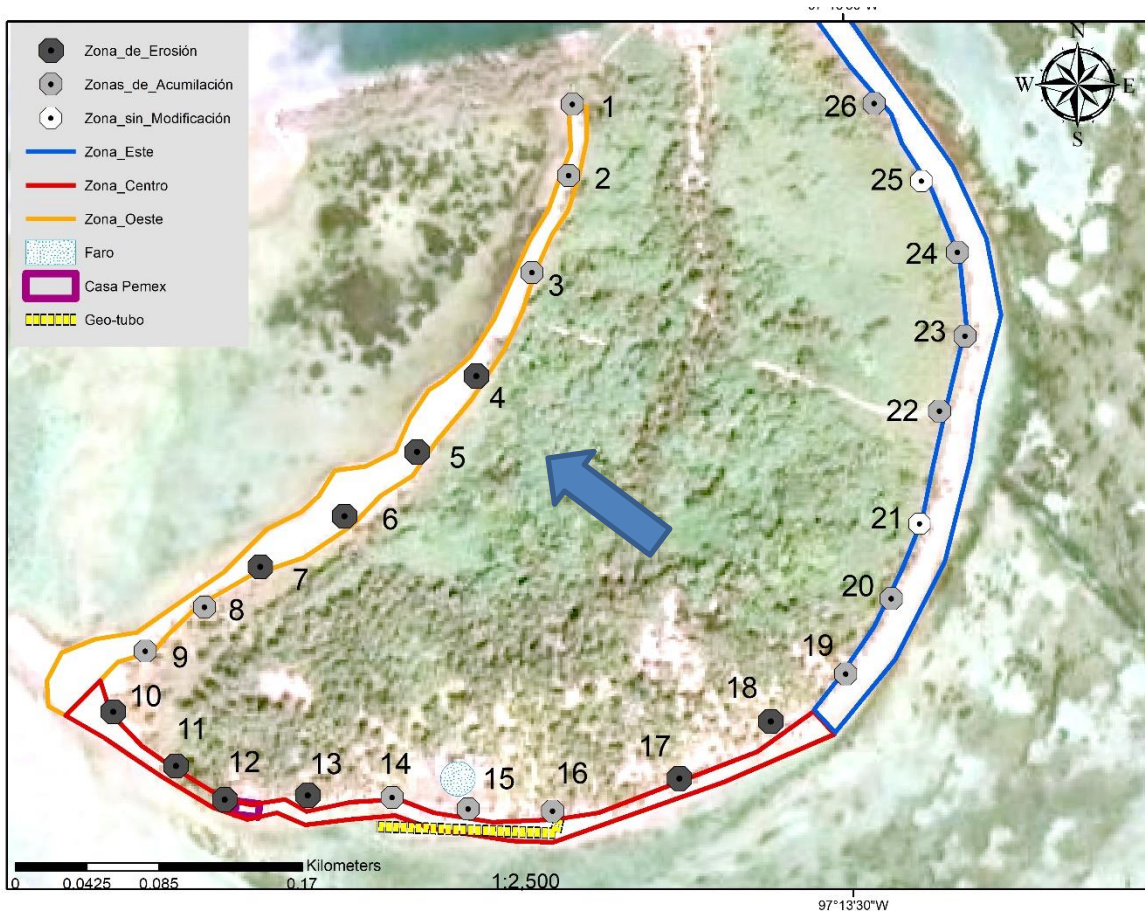


Figura 7.- Tasa de Erosión o Acumulación de la línea costera de la Isla Lobos (Zona Oeste).

En la figura 7 se muestran los perfiles de playa de la baliza 1 a la 9 de la zona Oeste, se observa que en 4 balizas (4, 5, 6 y 7) presentan una erosión y 5 balizas (1, 2, 3, 8 y 9) tienden a una acumulación de sedimento. Los resultados analizados en la zona Oeste, muestran que la baliza 1 presenta un incremento de 3 metros durante estos dos años de muestreo.

El perfil 7, en cada campaña que se midieron los datos de perfiles de playa fueron acortándose, esto puede deberse a la corriente litoral de la laguna arrecifal; mientras que para la baliza 9 presento un perfil acrecido de un metro durante los dos años de medición.

Para la zona centro que comprende de la baliza 10 a la baliza 18, en la tabla 4 se pueden observar las tasas de erosión para cada una de las balizas que se ubican en esta zona. Esta es la que presenta tasas de erosión y acumulación más altas. En las balizas 10, 11, 12, 13, 17 y 18 presentaron tasas de erosión de -7.5, -5.5, -2.0, -1.5, -1.0, -0.5 m/año respectivamente, la baliza 10 y 11 son las zonas donde presentan la mayor erosión con -7.5 m/año y -5.5 m/año, con una tasa más baja de 0.50 m/año se encuentran la baliza 18.

Las balizas 15 y 16 (zona donde se ubica el faro) es donde se presentó la mayor acumulación con 5 m/año y 6.5 m/año, que es la zona donde se ubicó el geotubo que fue colocado para la protección del faro en el año 2014.

Tabla 4. Tasa de erosión en m/año (zona Centro)				
Baliza	Metros	Años	Tasa m/año	Erosión / Acumulación
10	-13	2	-7.5	Erosión
11	-7	2	-5.5	Erosión
12	-4	2	-2	Erosión
13	-2	2	-1.5	Erosión
14	-4	2	1	Acumulación
15	-2	2	5	Acumulación
16	7	2	6.5	Acumulación
17	-2	2	-1.00	Erosión
18	-1	2	-0.50	Erosión

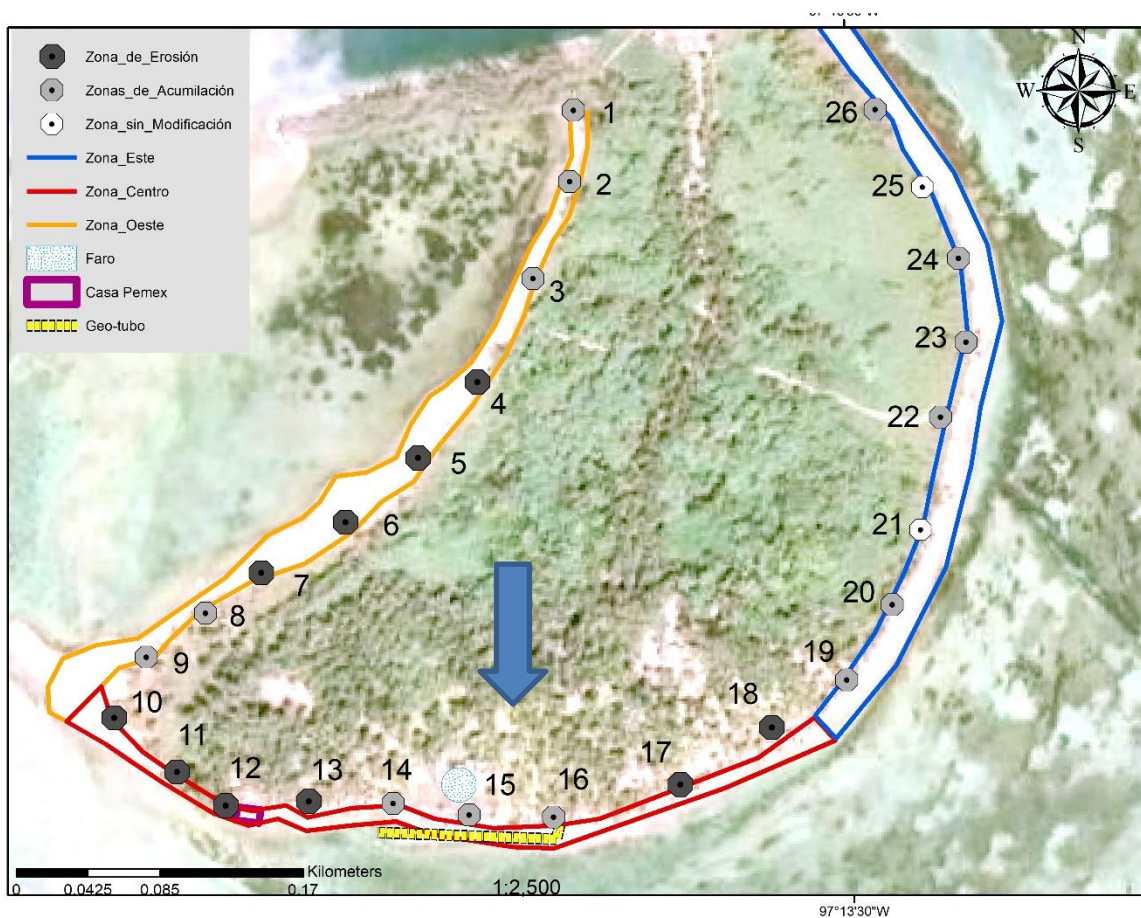


Figura 8.- Tasa de Erosión o Acumulación de la línea costera de la Isla Lobos (Zona Centro).

En la figura 8 se observan los perfiles de playa de las balizas 10-18, la ubicación de la casa de PEMEX (baliza 12), la ubicación del Faro (baliza 15) y la ubicación del geotubo (balizas 14, 15 y 16). En esta zona podemos ver como se describió anteriormente, que 6 balizas (10, 11, 12, 13, 17 y 18) presentan erosión y solo 3 balizas (14, 15 y 16) presentan acumulación. Uno de los resultados relevantes, es que para la zona Este del geotubo (baliza 16) es donde se está presentando acumulación de sedimento y para la zona Oeste se presenta erosión. Para la zona Este de la Isla, en la tabla 5 se muestran los datos obtenidos de tasas de erosión o acumulación. Es importante señalar que es la zona donde se registraron incrementos de línea de costa. En las balizas 19, 20, 22, y 26 presentan una tasa de 0.5 m/año de acumulación y 1 m/año para las balizas 23 y 24. Las balizas 21 y 25 fueron las únicas que no presentaron cambios en su perfil a lo cual su tasa de erosión/acumulación fue de 0.

Tabla 5. Tasa de erosión de m/año (zona Este)

Baliza	Metros	Años	Tasa m/año	Erosión / Acumulación
19	1	2	0.50	Acumulación
20	1	2	0.50	Acumulación
21	0	2	0.00	-
22	1	2	0.50	Acumulación
23	2	2	1.00	Acumulación
24	2	2	1.00	Acumulación
25	0	2	0.00	-
26	1	2	0.50	Acumulación

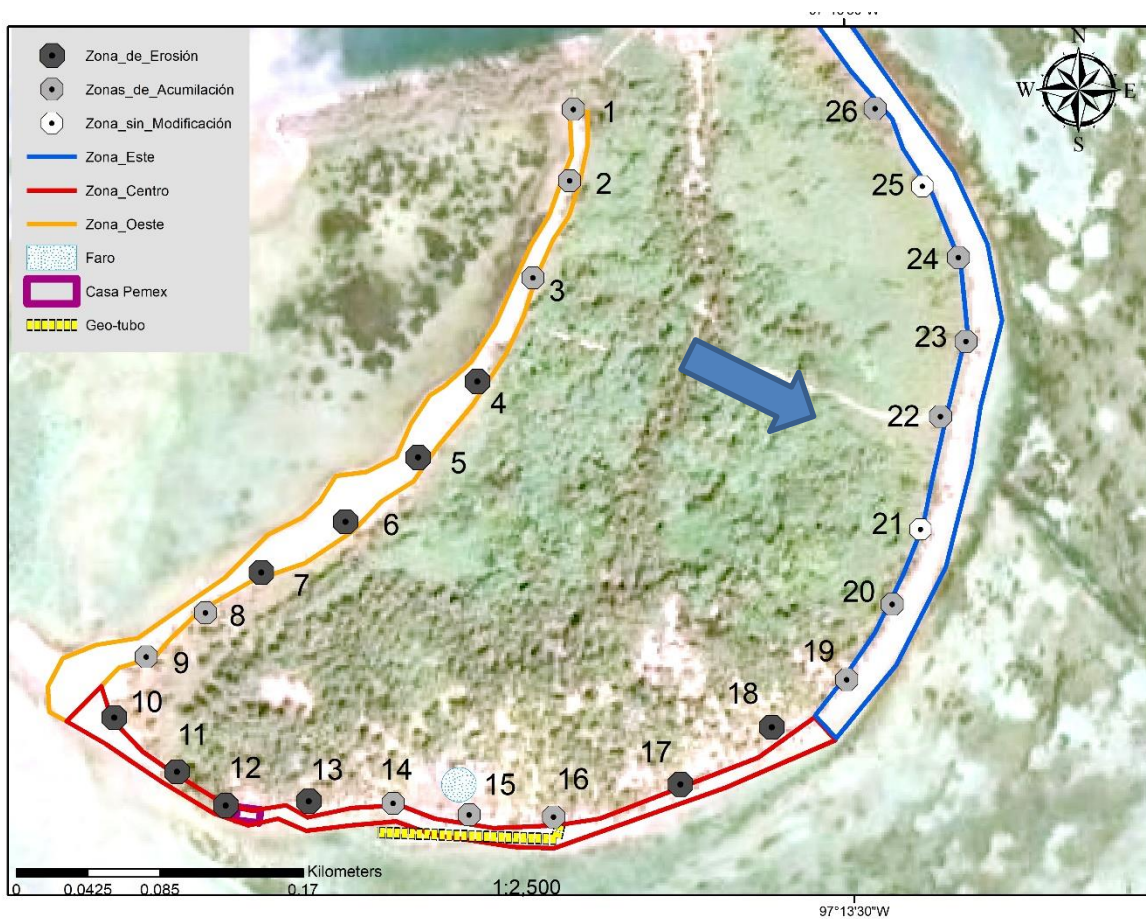


Figura 9.- Tasa de Erosión o Acumulación de la línea costera de la Isla Lobos (Zona Este).

En la figura 9, se puede ver los perfiles de playa de las balizas 19 a la 26 ubicadas en la zona Este de la Isla Lobos. Como se mencionó anteriormente lo relevante de esta zona es

que ninguna de las balizas presento erosión, y hubo acumulación en 6 balizas (19, 20, 22, 23, 24 y 26) y dos presentaron una estabilidad en el perfil (21 y 25).

Cabe señalar que a diferencia de las otras zonas que presentaron acumulación, esta zona presento una acumulación máxima de 1 m/año, a diferencia de las zonas Oeste y la zona Centro donde se presentaron acumulaciones máximas de 3 m/año (zona Oeste) y 6.5 m/año (Zona Centro).

Tabla 6. Promedios de la tasa de erosión / acumulación en la línea de costa de la Isla Lobos		
Zona	Promedio de tasa de erosión	Promedio de tasa de acumulación
Oeste	-1.1 m/año	1.2 m/año
Centro	-3 m/año	4.16 m/año
Este	0.0 m/año	0.6 m/año

La tabla 6 muestra los promedios de las tasas de erosión y acumulación por zonificación (Oeste, Centro y Este), se puede ver que la zona Centro es la zona en donde presenta las tasas más altas de erosión con un promedio de -3 m/año y una acumulación de 4.16 m/año, y que la zona Este es la zona en donde no presento una tasa de Erosión siendo esta de 0 m/año y una acumulación de 0.6 m/año, siendo la zona en donde el incremento de la línea de costa es mínima a diferencia de la zona Oeste y Centro. La zona Oeste presenta unas tasas de erosión y acumulación con muy pocas diferencias teniendo tasas de -1.1 m/año de erosión y 1.2 m/año de acumulación teniendo una diferencia de 0.1 m/año.

En el análisis de los datos también se observó la profundidad (concavidad del perfil de playa) de sedimento. Teniendo zonas donde puede presentar erosión en su longitud, pero acumulación de sedimento en su altura.

Para las balizas 16, 17, 18 y 26 durante los dos años de muestreo se observa que se acumuló sedimento presentando una elevación del perfil de playa. Para las balizas 1 a la 15 y de la

19 a la 24, son balizas donde se perdió sedimento en donde en su mayoría también presentan erosión en algunos casos. En el caso de la baliza 25 es la zona con mayor estabilidad, manteniendo su longitud y altura.

Dirección y velocidades de las corrientes marinas

En febrero del 2020 se realizó un experimento para medir las corrientes marinas en la laguna arrecifal de la Isla de Lobos, con el método de tarjeta de deriva, se sembraron 8 tarjetas de deriva, de las cuales únicamente se recuperaron 5. En 3 de ellas se midieron dos posiciones geográficas y de 2 tarjetas se anotaron tres posiciones geográficas, de las que fueron utilizadas para construir su trayectoria y por lo tanto la dirección de la corriente. Posteriormente, se calculó su velocidad (m/s) (Tabla 6).

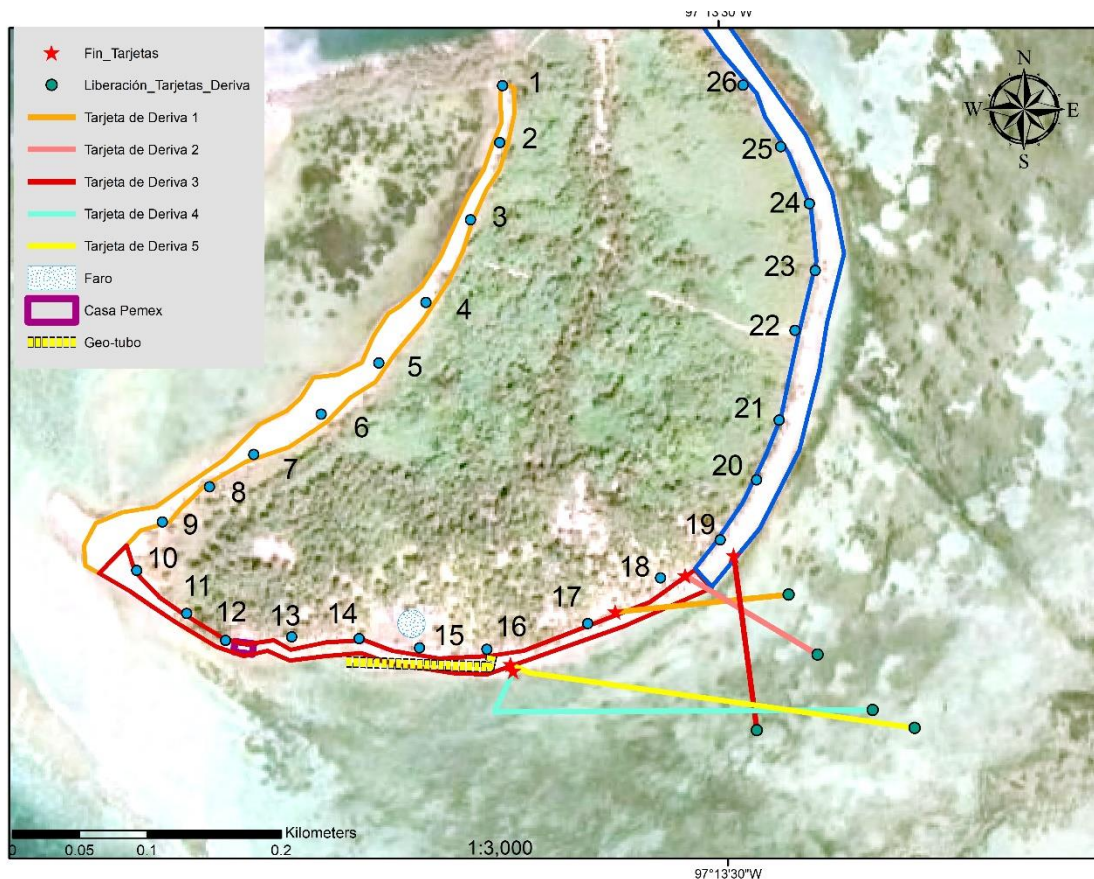


Figura 10.- Trayectoria de tarjetas de deriva en la isla lobos.

El primer resultado que podemos identificar en la figura 10 donde se muestra la trayectoria real de las tarjetas de deriva, de las 5 tarjetas de deriva, 4 de ellas (tarjetas 1, 2, 4 y 5), se

desplazaron hacia el Oeste desde la parte Este de la laguna arrecifal de la Isla Lobos, solo en un caso (la tarjeta número 3) fue la que presento una dirección hacia el Norte. Otro aspecto a considerar es que en 3 de los casos (tarjetas 1, 2 y 3), recalaron en la línea de costa: la tarjeta de deriva 1 en la baliza 17, la tarjeta de deriva 2 sobre la baliza 18 y la tarjeta 3 recaló en la baliza 19 (que fue la única con dirección hacia el Norte) y en los otros dos casos las tarjetas de deriva finalizaron su trayectoria en la zona Este del geotubo, la tarjeta de deriva 5 llegó a la baliza 16 y la tarjeta 4 llegó a la altura de la baliza 15.

Tabla 7. Tarjetas de Deriva				
Tarjeta	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Dirección	Tiempo de Arrastre (s)
1	130	2.2	O	60
2	128	0.5	ONO	240
3	114	0.4	NE	300
4	312	0.9	OSO-ONO	360
5	305	1.3	OSO-N	240
Promedio	197.8	1.06		240
Max	312	2.2		360
Min	114	0.4		60
Desviación estandar	101.27	0.7		112.2

Nota: Datos tomados del arrastre de 5 tarjetas de deriva en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.

En la tabla 7 se muestra la velocidad promedio de las 5 tarjetas de deriva, que es de 1.06 m/s, una máxima de 2.2 m/s con dirección hacia el Oeste (tarjeta 1) y una mínima de 0.4 m/s con dirección hacia el Norte (tarjeta 3), presentando una desviación estándar de 0.7 m/s. Se observó una diferencia en las velocidades de la tarjeta de deriva 1 y la tarjeta de deriva 3, presentando una diferencia de velocidad de 1.8 m/s y con direcciones opuestas.

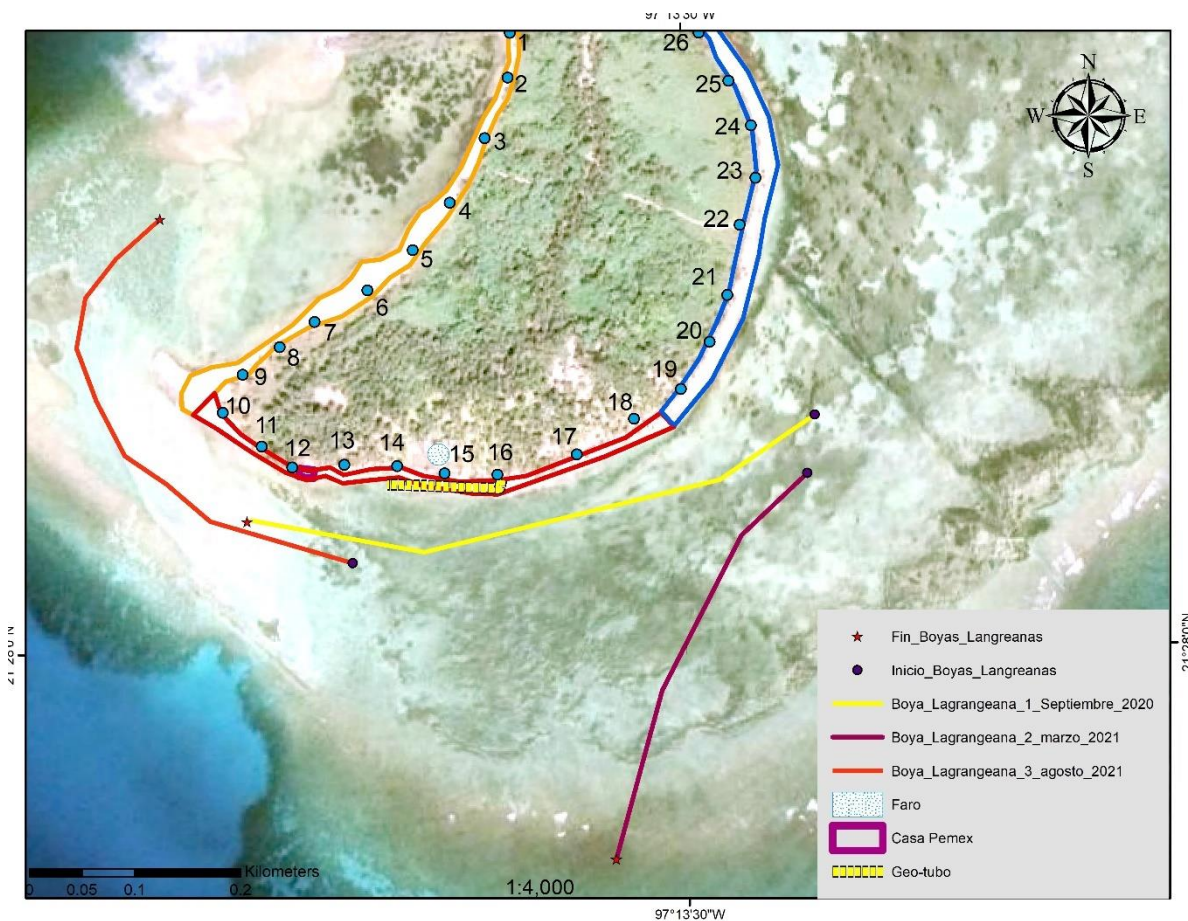


Figura 11.- Deriva de las boyas lagrangeana, dentro de la laguna arrecifal de Isla Lobos en el mes de septiembre del 2020, marzo y agosto del 2021.

En la deriva de septiembre del 2020, se sembró una boya lagrangeana (1), para esta deriva se colectaron 8 coordenadas geográficas las cuales muestran la distancia, velocidad y tiempo de deriva (Tabla 8). Se observó que la dirección predominante, fue hacia el O (270°). El promedio de la velocidad de deriva fue de 0.6 m/s.

En el mapa 8 se puede observar la trayectoria que siguieron las boyas de deriva lagrangeanas, para el caso de las boyas de deriva lagrangeanas 1 y 2 se liberaron en la zona Este de la laguna arrecifal, para la boya lagrangeana 1 la cual se liberó en el mes de septiembre del 2020, mostro una trayectoria hacia el Oeste (6 m) en paralelo a la línea de costa, para posteriormente seguir una dirección hacia el sur, saliendo de la cresta arrecifal donde fue recuperada. En marzo del 2021 la boya lagrangeana 2, tuvo una trayectoria similar a las que se observaron con las tarjetas de deriva, esta boya presento una dirección

hacia el Oeste, con trayectoria en paralelo a la línea de costa, sin embargo a diferencia de las tarjetas de deriva, la boya lagrangeana 2 no recaló hacia la costa, recuperándola sobre la laguna arrecifal a la altura de la baliza 12 (zona sur del geotubo).

La última deriva se realizó en el mes de agosto del 2021, la liberación de la boya lagrangeana 3 se realizó del lado Oeste del geotubo sobre la laguna arrecifal (zona Suroeste de la laguna arrecifal). En esta deriva la trayectoria fue en paralelo a la línea de costa con una dirección hacia el Oeste, para posteriormente seguir su trayectoria hacia el Norte, sobre la parte Oeste de la Isla lobos donde se ubican las balizas 1- 9.

En las tablas 8, 9 y 10 se muestran los resultados de las boyas de deriva lagrangeanas, donde podemos observar las distancias recorridas, su tiempo de arrastre, dirección y sus velocidades.

Tabla 8. Boya lagrangeana 1				
Puntos	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Dirección	Tiempo de Arrastre (s)
1	6	0.3	SO (225°)	21
2	3	0.2	OSO (247.5°)	18
3	1	0.0	OSO (247.5°)	80
4	2	0.0	O (270°)	51
5	1	0.0	ONO (292.5°)	37
6	395	1.9	OSO (247.5°)	204
7	164	1.8	O (270°)	90
8	5	0.6	ONO (292.5°)	08
Promedio	82	0.6		63.3
Max	395	1.9		204
Min	1	0.0		0
Desviación	161	0.8		63.8

Nota: datos de deriva de la boya lagrangeana (septiembre 2020), en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.

En la tabla 8, se muestran los datos obtenidos de la boya de deriva lagrangeana, la que recorrió una distancia total de 577 metros, con un tiempo total de arrastre de 509 segundos, durante este recorrido el GPS colecto 8 puntos geográficos y con estos datos se logró calcular la velocidad de la corriente para cada uno de estos puntos. Los resultados indicaron que se tuvo una velocidad promedio de 0.6 m/s. Una máxima de 1.9 m/s y una mínima 0.0 m/s. en todos los puntos colectados por la boya de deriva Lagrangeana presento una dirección principalmente hacia el Oeste (mapa 8).

En los primeros puntos (1 y 2) la velocidad se mantuvo entre 0 y 3 m/s, para posteriormente aumentar la velocidad en los últimos puntos 6 y 7 de 1.9 m/s y 1.8 m/s y finalmente disminuyo la velocidad de la corriente en el punto 8 a 0.6 m/s.

Tabla 9. Boya lagrangeana 2				
Puntos	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Dirección	Tiempo de Arrastre (s)
1	2	0.0	SO (225°)	57
2	1	0.1	SSO (202.5°)	25
3	2	0.4	S (180°)	18
4	392	0.3	SSO (202.5°)	230
5	1	0.0	SSO (202.5°)	37
Promedio	79.60	0.16		73.3
Max	392	0.4		230
Min	1	0.0		18
Desviación	174.64	0.17		88.78

Nota: Datos de deriva de la boya lagrangeana (marzo 2021), en la laguna arrecifal de la Isla Lobos.

Para el mes de marzo del 2021, el GPS de la boya de deriva lagrangeana (2) realizo un recorrido total de 398 metros con un tiempo total de 367 segundos, registro 5 puntos (Tabla 9), con una velocidad promedio de 0.16 m/s, esta tuvo una dirección del SO (225°) hacia el S (180°) lo cual se observa en el mapa 8, en esta medición la boya salió de la laguna

arrecifal pasando la cresta arrecifal con dirección hacia el Sur. La velocidad máxima fue de 0.4 m/s y mínima de 0.0 m/s, con una desviación estándar de 0.17 m/s.

Tabla 10. Boya lagrangeana 3				
Puntos	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Dirección	Tiempo de Arrastre (s)
1	140	1.6	O (270°)	85
2	90	1.8	ONO (292.5°)	50
3	50	1.1	NNO (337.5°)	45
4	50	1.1	NNO (337.5°)	45
5	40	0.8	N (360°)	48
6	100	0.6	NNE (22.5°)	150
Promedio	78	1		71
Max	140	1.8		150
Min	40	0.6		45
Desviación	38.7	0.5		41.9

La deriva de la última boya Lagrangeana se realizó en el mes de agosto del 2021 (tabla 10), realizo un recorrido con una distancia total de 470 metros con un tiempo de arrastre total de 423 segundos, registrando 6 puntos, de estos se calculó la velocidad y la dirección. El promedio de la velocidad fue de 1m/s con un tiempo de arrastre promedio de 71 segundos. La velocidad máxima fue de 1.8 m/s y mínima de 0.6 m/s con una desviación estándar de 0.5m/s. En esta zona se cuantifico un ligero ascenso de la velocidad de la corriente, a diferencia de las boyas de deriva Lagrangeana 1 y 2, así como a las tarjetas de deriva. Se presento una dirección hacia el Oeste (270°) terminando en una dirección Norte (360°) donde disminuye la velocidad de 1.8 m/s a 0.6 m/s presentando una diferencia de 1.2 m/s. Se observo diferencia significativa en el promedio de la velocidad entre la boya Lagrangeana 2 (0.16 m/s) y 3 (1 m/s), se calculó un valor de $P=0.0033$ lo cual nos indica

que existe diferencia significativa entre las velocidades de la boya de deriva Lagrangeana 2 y la boya de deriva Langrangeana 3 (ver figura 12). Además de que la tarjeta de deriva 3, presenta una dirección hacia el norte, por lo tanto, no es significativo, debido a que predominan las direcciones hacia el Oeste. Para el caso de las boyas Langrangeanas 1 y 3 no presentaron diferencia significativa, presentando un valor de $P=0.167$.

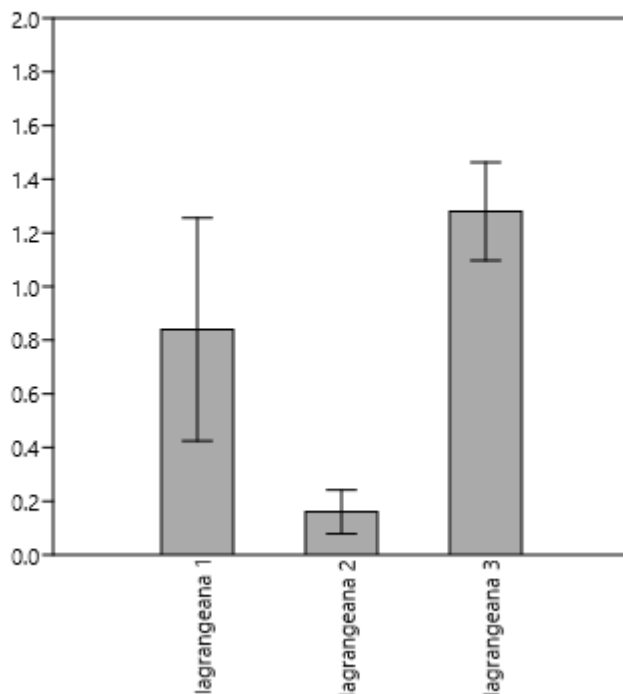


Figura 12.- Prueba t-student entre las velocidades de las boyas de deriva Lagrangeanas 2 y 3.

Medición de Oleaje

Diariamente, desde el mes de febrero del 2020 se hizo una base de datos con parámetros generados por medio de la aplicación Winfinder (modelo GFS), la cual colecta datos desde una estación meteorológica fija que se encuentra en Isla Lobos, proporciona información de temperatura, velocidad y dirección del viento, velocidad de la corriente marina, así como la altura promedio (H_s), periodicidad promedio (T_s) y dirección del oleaje.

El oleaje predominante es del Este hacia el Oeste (con un 44.3%) y en menor proporción el oleaje es de dirección hacia el sur (0.1%). En la Tabla 11 se resumen los detalles de Hs y Ts para la base de datos de febrero a diciembre 2020 con una n=2556. Observando la altura significativa de la ola (Hs) de 1.2 m con un periodo promedio significativo (Ts) de 6s.

Tabla 11. Datos de Hs y Ts		
	Altura Hs	Periodo Ts
Promedio	1.2	6
Max	4.1	10
Min	0.4	4
DS	0.42	0.86

Nota: datos de los promedios, máximo, min y desviación estándar de datos de oleaje.

Para el año 2020 se obtuvo las Hs por mes. En dónde se observa que el mes con mayor altura de oleaje fue diciembre (1.5 m) siendo esta la época de invierno y las más bajas fueron en la época de primavera y verano, particularmente para los meses de abril y agosto (0.9 m), respectivamente.

Lo mismo se realizó para los Ts, observando que la mayoría de los meses mantienen un promedio de 6s. Solo los meses de febrero y diciembre son los que presentaron un promedio de Ts= 7.

Para el caso de la dirección del viento, sopla del ESE con un 19.2% y con menor incidencia del S con el 1%. en el caso del oleaje se registraron oleajes propagándose hacia dirección el O (44.3%).

En los mapas 9,10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 se muestra la refracción del oleaje por mes, se distribuye del este (E) hacia el oeste (O), esto genera un gradiente de alturas de olas en la zona de la laguna arrecifal, generando una corriente litoral la cual se puede observar con las tarjetas de deriva y boyas de deriva Lagrangeana.

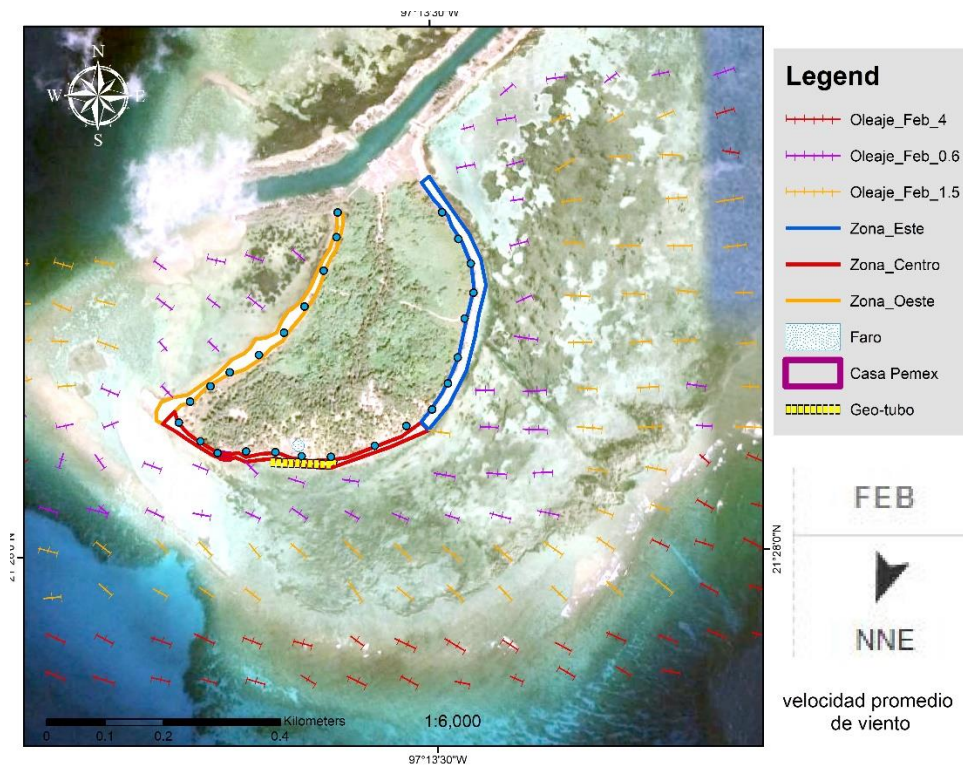


Figura 13.- Refracción promedio de oleaje del mes de febrero.

Para el mes de febrero del 2020 se observó, que la refracción del oleaje presento una dirección del Este hacia el Oeste con alturas que se distribuyen desde los 4 m como máximo y 0.6 m como mínimo (figura 13). Las alturas más altas se presentaron fuera de la laguna arrecifal (4 m altura), dentro de la laguna arrecifal la altura de la ola es de 1.5 m y en la línea de costa de 0.6 m.

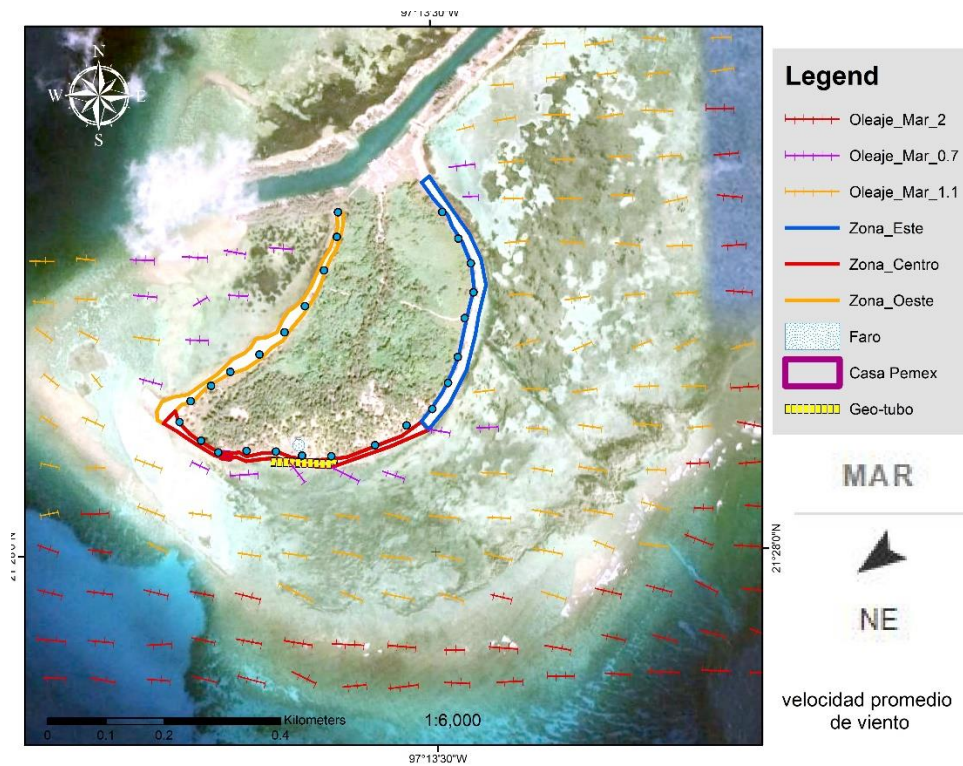


Figura 14.- Refracción promedio de oleaje del mes de marzo.

Analizando la refracción del oleaje para el mes de marzo (figura 14), se observa que a diferencia del mes de febrero el oleaje es menor, presentando como altura máxima 2 m, esta altura se presenta fuera de la laguna arrecifal. Dentro de la laguna arrecifal en la parte Este, se puede observar que la altura de la ola muestra un valor de 1.1m hasta la costa. Esta altura se extiende hasta la zona Centro y Oeste de la Isla Lobos, pero sobre la laguna arrecifal. Para el caso de la zona donde se ubican las balizas 1 a la 9 (zona Oeste) presentaron un oleaje de 0.7 m, para la baliza 10 presenta un oleaje de 1.1 m, mientras que las balizas 11 a 16 presentan una altura de oleaje de 0.7 m, y en las balizas 17 y 18 presento un oleaje de 1.1 m. En el caso de la zona Este se observa que las balizas 19 a 25 tienen una altura de oleaje de 1.1 m. Finalmente en las balizas 26 presenta una altura de oleaje de 0.7 m.

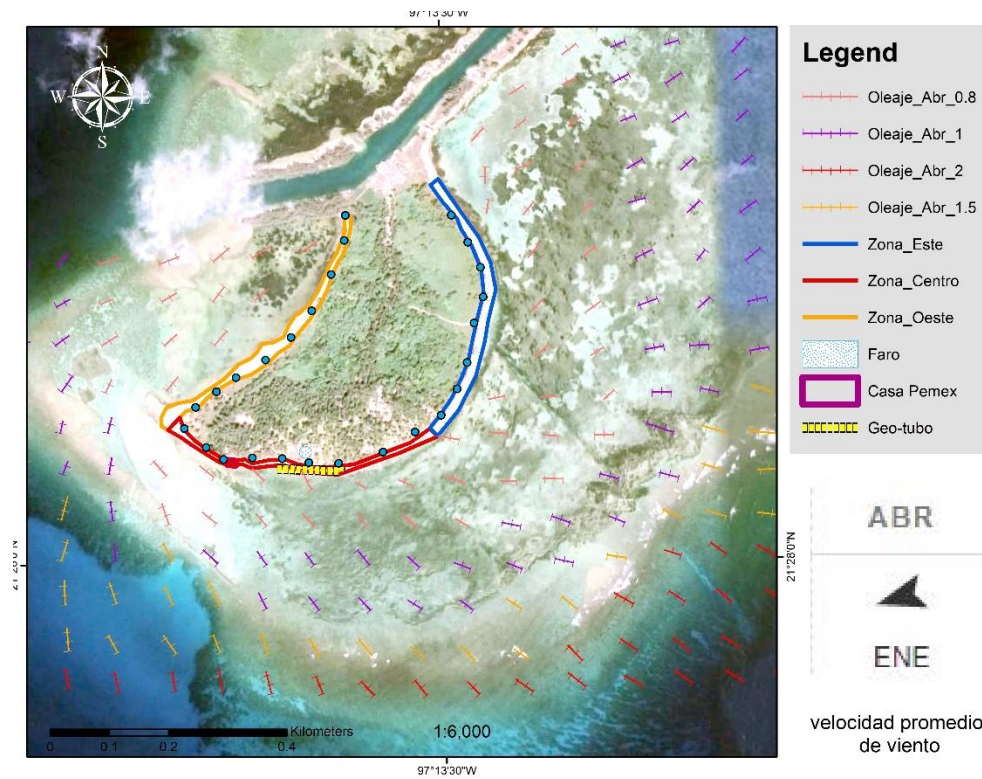


Figura 15.- Refracción promedio de oleaje del mes de abril.

En la figura 15 podemos observar la refracción del mes de abril, los rayos de energía del oleaje se distribuyen desde el Este-Sureste con dirección hacia el Noroeste y Oeste. Para este mes la altura más alta de la ola es de 2 m manteniéndose como en el mes de marzo, algo muy relevante en este caso y los anteriores es que la altura del oleaje va disminuyendo conforme entra a la laguna arrecifal y va llegando a la línea de costa, teniendo alturas de 1 m para la zona de la laguna arrecifal y 0.8 m en la altura de la línea de costa. Estos resultados coinciden para las zonas Este, Centro y Oeste de la Isla Lobos.

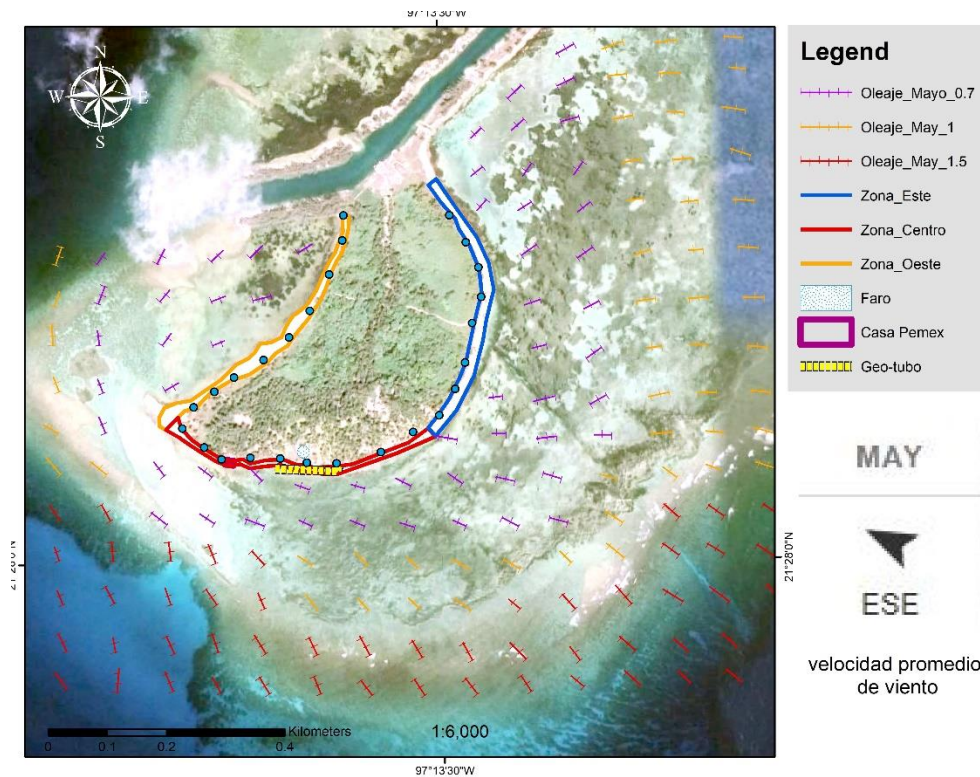


Figura 16.- Refracción promedio de oleaje del mes de mayo

Durante el mes de mayo se observó (figura 16), que la dirección de la energía del oleaje se distribuyó del Este-Sureste hacia el Oeste y Noroeste, la altura máxima del oleaje fue de 1.5 m, 0.5 m por debajo de la altura máxima de los meses anteriores (marzo y abril). Al igual que en los meses anteriores el oleaje presenta un patrón en donde la altura de oleaje más alta se presenta fuera de la laguna arrecifal y pasando la cresta arrecifal va disminuyendo para llegar a la línea de costa más debilitado, para este mes la altura de oleaje que se presentó dentro de la laguna arrecifal fue de 1 m, para llegar a la línea de costa con una altura de 0.7 m. Para la zona centro de la Isla lobos se observó que la refracción del oleaje llega de la zona Este con dirección hacia el Oeste.

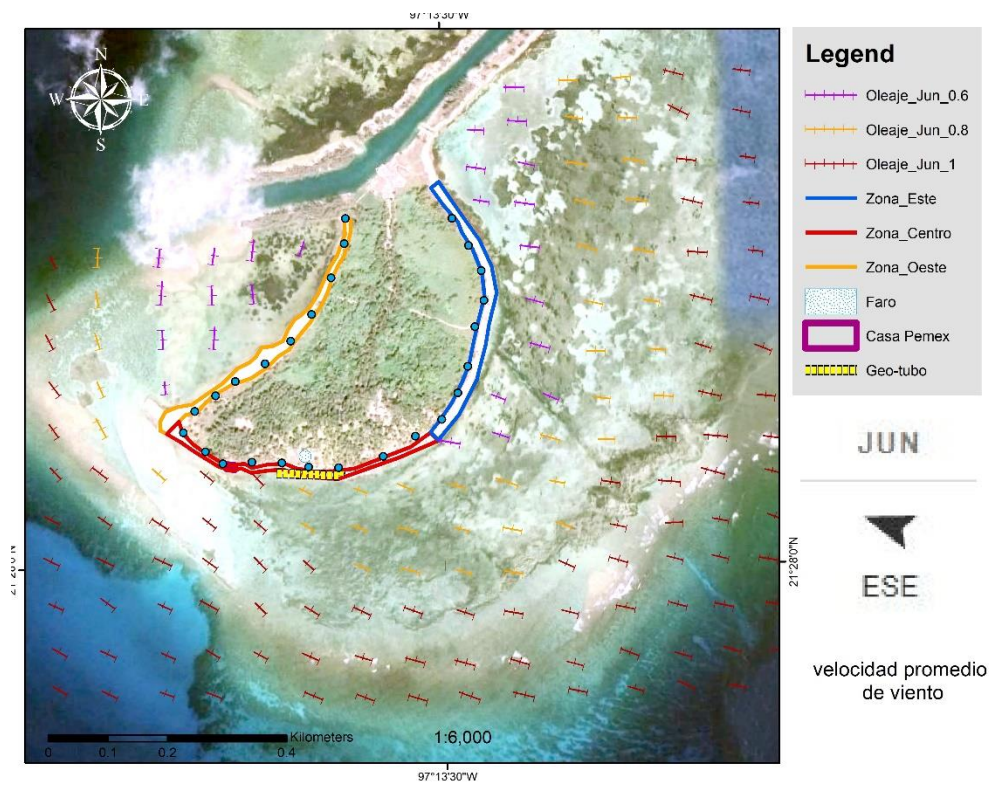


Figura 17.- Refracción promedio de oleaje del mes de junio.

En la figura 17 la altura máxima que se presento fue de 1 m y de 0.6 m como oleaje mínimo, para la zona Este de la Isla Lobos, el oleaje que presento fue de 1m para la zona fuera de la laguna arrecifal, al entrar en la laguna arrecifal la altura fue de 0.8 m para llegar a la línea de costa con una altura de 0.6 m, con dirección que se propaga del Este hacia el Oeste. Para la zona central de la Isla se observa que el oleaje en la laguna arrecifal es de 0.8 m pero hay un cambio en la altura del oleaje, que aumenta a 1 m hacia la zona Este de la zona Centro. Para la zona Oeste la altura del oleaje fue de 0.6 m.

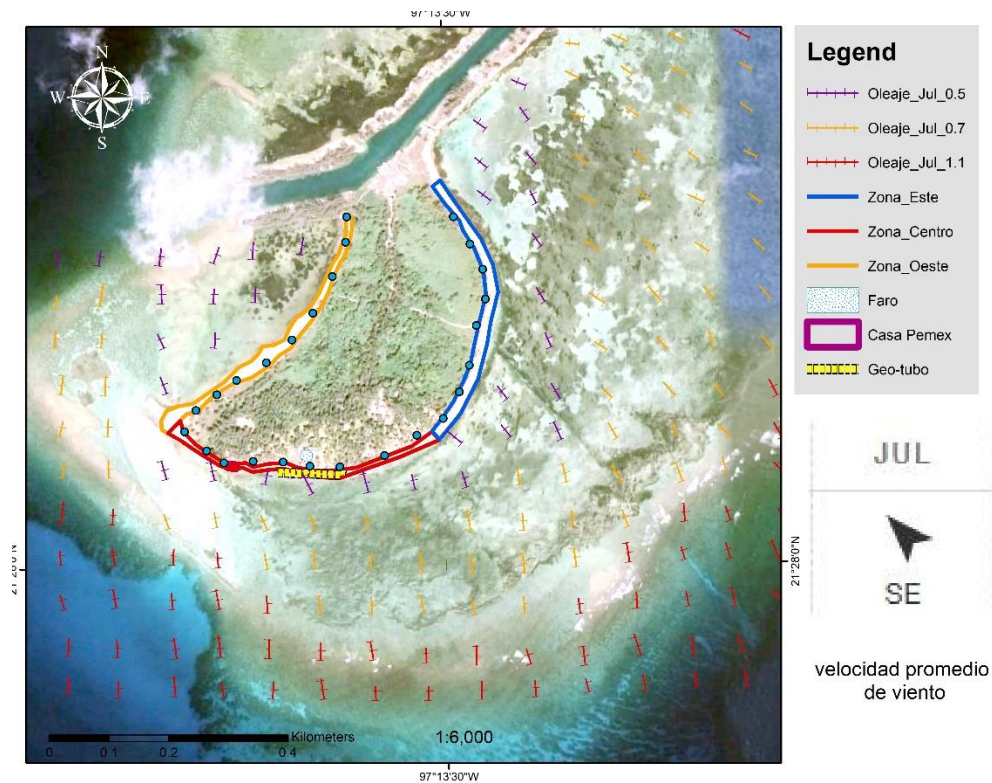


Figura 18.- Refracción promedio de oleaje del mes de julio.

La dirección de los rayos de energía del oleaje en el mes de julio (figura 18), se propaga de Sur hacia el Noroeste, en este mes se observa un cambio en la dirección del oleaje. Se presentó una altura máxima de 1.1 m y como mínima de 0.5 m, en este mapa se observa que la altura máxima de las olas se presenta fuera de la laguna arrecifal, disminuyendo conforme se acerca a la línea de costa. Para este mes la refracción de las olas impacta a la zona central de la Isla Lobos.

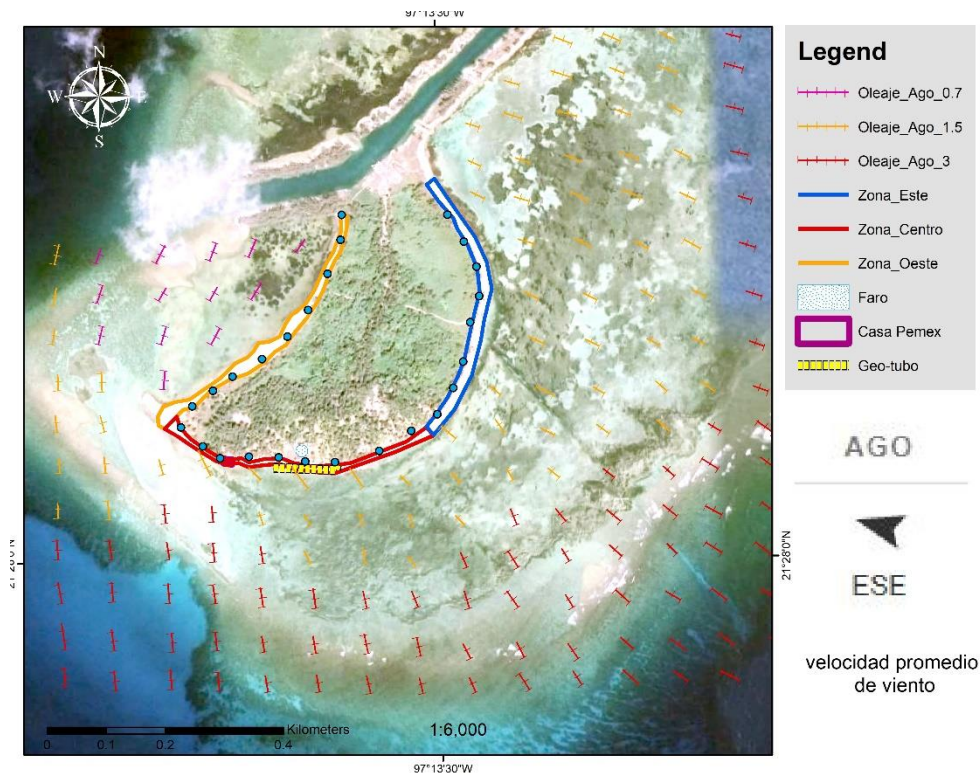


Figura 19.- Refracción promedio de oleaje del mes de agosto.

Para el mes de agosto se observa (figura 19), un incremento en la altura de oleaje, presentando una altura máxima de 3 m la cual se observa fuera de la laguna arrecifal, entrando a la laguna arrecifal disminuye a una altura de 1.5 m, esta altura de oleaje impacta hasta la línea de costa. Para la zona Este y Centro de la Isla Lobos la dirección del tren de olas se propaga del Este hacia el Oeste. Para la zona Oeste de la Isla Lobos se puede apreciar que la altura del oleaje disminuye a comparación de las otras dos zonas. Aquí se presenta como una altura máxima de 3 m y como altura mínima de 0.7 m que es la altura con la que impacta la ola en la línea de costa. Para las balizas 1 a la 9 (zona Oeste) se observa que el oleaje tiene una altura mínima de 0.7 m, pero para las balizas 10 a la 26 (zonas Centro y Este) se observa que la altura de oleaje se presentó con una altura de 1.5 m.

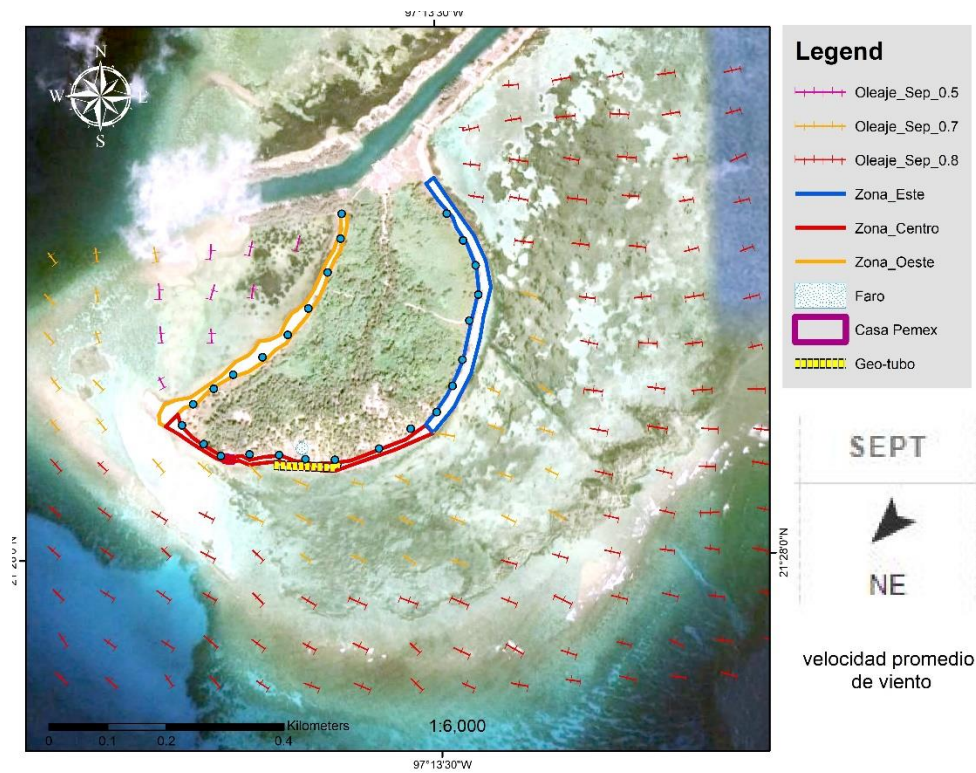


Figura 20.- Refracción promedio de oleaje del mes de septiembre

En la figura 20 se observa la dirección de la refracción de las olas propaga del Este hacia el Oeste, para este mes es donde se presentó el oleaje más bajo en comparación con los meses de febrero a agosto, presentando una altura máxima de 0.8 m y mínima de 0.5 m la altura que se presentó para la zona Este de la Isla Lobos es de 0.8 m desde fuera de la laguna arrecifal hasta llegar a la línea de costa, en la zona centro disminuye la altura del oleaje en la línea de costa a 0.7 m y para la zona Oeste presento una propagación con dirección hacia el norte con una altura de 0.5 m.

Para determinar los factores de erosión o acumulación de la línea de costa, en Isla Lobos, se relacionaron los datos de la dirección del viento, oleaje y corriente, junto con la ubicación de las balizas (figura 21).

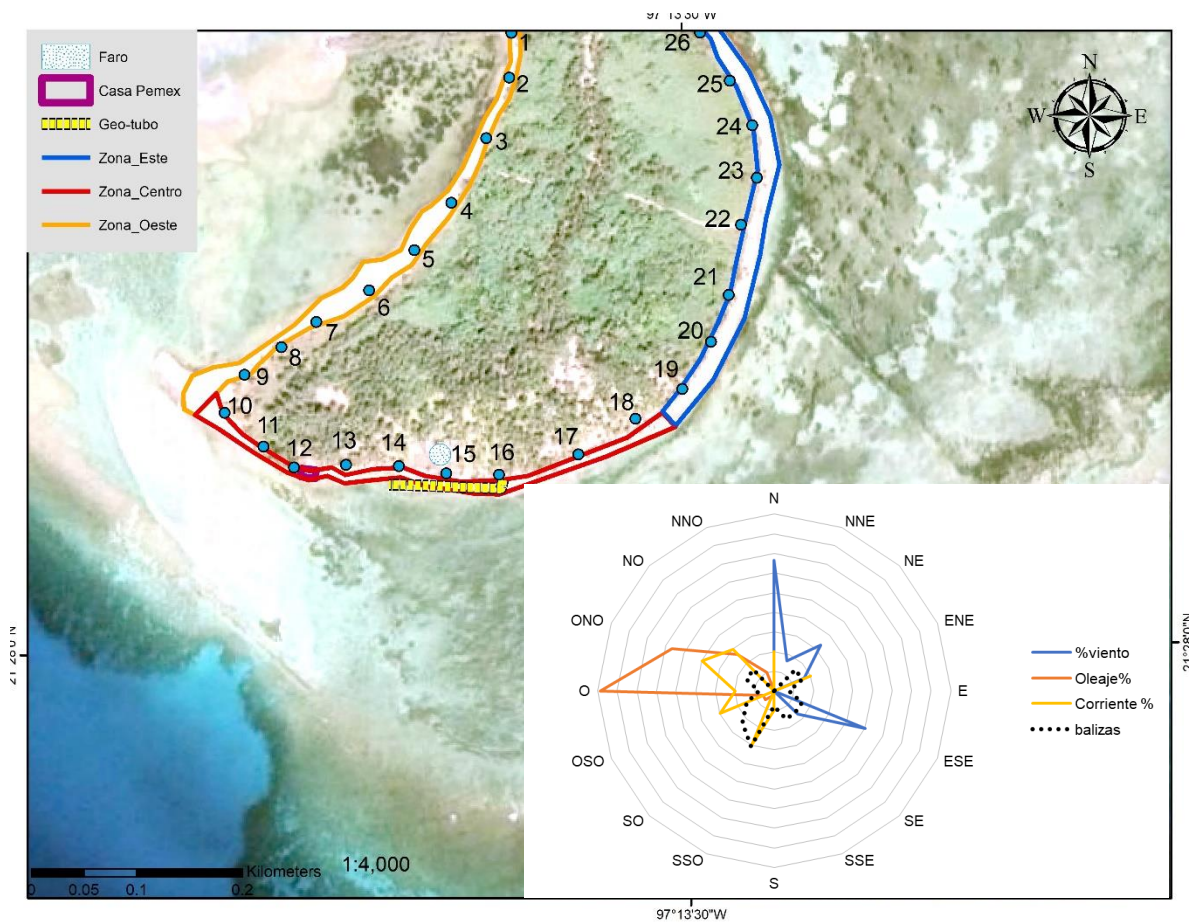


Figura 21.- Grafico indicando la posición y dirección del viento, oleaje y corriente marina.

Se observa que el oleaje fue de fondo y no local. También se observa que este genera una corriente litoral en la laguna arrecifal de Isla Lobos, que no está influida por el viento, la cual se ve bloqueada por la presencia del geotubo, que se localiza al sur, zona centro de Isla Lobos, que detiene el transporte de sedimentos, esto provoca erosión en la zona sur (zona central) y acumulación en la zona Este; estos resultados concuerdan con los resultados de las tazas de erosión.

VII. Discusión

Algunos de los factores o parámetros importantes de la erosión en la línea de costa son el transporte de los sedimentos debido a los efectos del oleaje y corrientes, las cuales afectan las líneas de costa en muchas partes del mundo, por lo tanto, la erosión tiene componentes transversales y costeros (Van-Rijn, 2011).

Con los resultados observados, se puede analizar que la corriente que se presenta en la laguna arrecifal de la Isla Lobos es una corriente litoral local con una dirección del SO al O con una velocidad promedio de 0.88 m/s, esta corriente se origina por refracción de las olas, las cuales presentan en promedio una altura (Hs) de 1.2 m con dirección del Este al Oeste con un tiempo promedio (Ts) de 6 s, para la temporada de invierno la Hs 1.5 m con un Ts de 7 s, para la temporada de primavera y verano presenta una Hs de 0.9 m con un Ts 6 s. En el Mar del Norte a lo largo de la costa de Holanda, Van-Rijn, (2011), utilizó el modelo CROSMOR, el cual esta basados en procesos para calcular los volúmenes de erosión, tomo datos durante 100 días, en donde determinó los parámetros de las olas encontrando una Hs menor de 1 m en el 50%, Hs de 1 a 3 m en el 45% de los casos y 5% se observó mayor a 3 m, este último dato coincidiendo en temporada de invierno, con corrientes de marea de 0.6 m/s con dirección hacia el Norte y una corriente de refluo con dirección hacia el Sur de 0.5 m/s. En el caso de las costas de Holanda se observa una corriente de refluo en dirección Sur, opuesta a la corriente de marea Norte, a diferencia de la corriente en la laguna arrecifal en la Isla Lobos, la cual presenta una corriente litoral con dirección solo hacia el Oeste con una velocidad promedio de 0.88 m/s, con una máxima de 1.06 m/s y una mínima de 0.16 m/s. Al igual que en el caso de Mar del Norte de la costa de Holanda, se observa una temporalidad en el gradiente de la altura de las olas (verano e invierno).

Lacerda et al., (2021), describieron para las costas de Ceará en Brasil, que las olas provienen del Este-Este sureste y del Norte-Noreste, mencionan que las olas que vienen del Norte-Noreste, son características de alta energía, que configuran olas de mar de fondo. Como se vio en los resultados y se mencionó en el párrafo anterior la Isla Lobos presentó para todo el año una dirección que va del Este al Oeste con oleaje de baja energía, presentando un promedio de altura de 1.2 m (olas de baja energía) con un máximo de 4.1 m (olas de alta energía) esto para los meses de febrero con eventos muy específicos llamados

Nortes. En los mapas de refracción se observa que donde se ve más el impacto del oleaje es en la zona Este y Centro de la Isla Lobos.

Para las costas del sur de Veracruz (Montepío, Arroyo de Lisa y Roca Partida) Panana-Arce et al., (2014), para el mes de octubre registraron alturas de oleaje de 0.8 m y 0.9 m, presentando corrientes de marea relativamente fuertes sobre la franja exterior de la plataforma del Golfo de Mexico, para el mes de septiembre en la Isla Lobos se registraron oleajes con alturas de 0.9 m, 0.8 m y 0.5 m, muy similares a las registradas por Panana-Arce et al., a pesar de ser un mes de diferencia.

A lo largo de la costa mediterránea de Egipto el oleaje es intenso con alturas de hasta 2 m de alto y su dirección es estacional a lo largo de la costa, esto es derivado del sistema de baja presión a gran escala que se presenta en esa zona con direcciones de oleaje NNO, NO y ONO esto provocado por el viento del noroeste, acercándose a la línea de costa en ángulo, mueve la arena hacia esa dirección, con una corriente costera en dirección del Oeste al Este, esto inducido por el gradiente de las alturas de las olas a lo largo de la costa, siendo la responsable de transportar los sedimentos de las zonas erosionadas hacia el Este. Relacionando los parámetros de corrientes y refracción del oleaje se observó que la erosión en la línea de costa de la Isla Lobos se presenta en las zonas Sureste y Suroeste (zona centro). Depositando sedimento en la zona Oeste de la Isla, lo cual se observa en los resultados de las tasas de erosión y acumulación que se presentan en el mapa 4 y la tabla 4, en donde se determinó que la baliza 1 ubicada en la zona Oeste es la que presenta acumulación de sedimentos.

La distribución de erosión y acumulación, muestra que las corrientes litorales inducidas por las olas (atributo natural) y su transporte de sedimentos, además del impacto de la intervención humana con estructuras para la protección de la costa (El Banna-Omran y Frihy, 2009), son las que presentan las tasas más altas de erosión en la línea de costa, determinando que la zona de sotavento de los espigones o estructuras duras para la protección de la línea de costa son las que muestran afectaciones de erosión. En los resultados de los perfiles de playa en la Isla Lobos se muestra que dos perfiles (balizas 15 y 16), presentan acumulación, siendo la zona con mayor tasa de acumulación (5 y 6.5 m/año). Sin embargo, las balizas 10, 11, 12, 13 que se ubican hacia la zona Oeste de las balizas 15 y

16, presenta la mayor tasa de erosión, esto se debe a la estructura colocada enfrente de las instalaciones del faro para su protección (geotubo), reduciendo significativamente la erosión en la zona Este del geotubo (balizas 15 y 16), pero causando una erosión en la parte Oeste del mismo como efecto secundario (balizas 10, 11, 12, 13).

Para la tasa de erosión de este estudio se tiene un promedio de erosión de 2.3 m/año y un promedio de acumulación de 1.6 m/año. Determinando que la zona más crítica como ya se mencionó anteriormente es la zona centro donde se tiene una tasa de erosión promedio de -2.18 m/año, siendo esta zona donde se encuentra las actividades antropogénicas como la destrucción de un tramo de la cresta arrecifal por la acción de dinamitar, en asociación con la colocación de un geotubo que impiden el flujo natural de sedimentos, y el cual fue colocado como medida de protección para el faro de la Isla Lobos. Similarmente Lacerda et al., (2021), en su investigación en la costa este del estado de Ceará en Brasil, encontraron tasas de erosión que varían entre -4.14m/año a 1.77 m/año, se presenta en los sitios donde se construyeron espigones sobre la línea de costa, lo que induce una modificación en el transporte de sedimento. Abeykoon, Thilakarathne, Abeygunawardana, Warnasuriya y Egodayana (2021), muestran que las playas con mayor tasa de erosión son aquellas donde se encuentran las principales actividades de desarrollo humano, las cuales causaron alteraciones físicas en la línea de costa, por la construcción de estructuras duras para la protección de costas.

Una característica importante de la Isla Lobos es la modificación de la cresta arrecifal, que fue dinamitada, en la zona Suroeste la cual coincide con la zona en donde se presenta la mayor erosión y donde se colocó el geotubo como estructura para la protección de costa. Esta modificación en la cresta arrecifal es otro de las presiones que suma a la erosión en las Isla Lobos, en este sentido: Ruíz-Martínez et al., (2013) describen que para las costas noroeste de Quintana Roo, caracterizando el sedimento colectando 110 muestras y la modelación del comportamiento del oleaje por medio del modelo numérico WAPO3, el cual resuelve la ecuación de la pendiente de la playa, la refracción, rompiente de oleaje y la dirección que se produce por la presencia de los arrecifes de coral en el sistema costero; para determinar los estados morfodinámicos de la línea de costa que tienen presencia o carecen de la protección de un sistema arrecifal, identificaron que cuando el oleaje proviene

con dirección al noroeste, para el caso de la costa de Puerto Morelos la cual se encuentra protegida por un sistema arrecifal muestra una tendencia a disipar la energía del oleaje, siendo esto suficiente para que los mecanismos naturales de recuperación de la playa no sean afectados, con esto demostraron que sin la existencia o debilitamiento de un sistema arrecifal, se produce la pérdida de sedimento permanente (erosión).

VIII. Conclusión

En este estudio se determinaron las características morfodinámicas de la línea de costa de la Isla Lobos, midiendo perfiles de playa, corrientes marinas y oleajes. A partir de estas variables se determinó las zonas de erosión y acumulación de la línea de costa, ayudando a comprender la dinámica que mantiene la línea de costa de Isla Lobos.

Se determinó que de las 26 balizas en donde se midieron perfiles, 10 de ellas presentaron erosión, en 14 balizas se observó una acumulación y 2 balizas se observó una estabilidad donde no existió cambio en la morfología de la línea de la costa. Se observó que la dirección de las corrientes marinas fluye hacia el Oeste y posteriormente hacia el Norte (por la parte Oeste de la Isla).

Los resultados muestran zonas de erosión o acumulación, siendo la zona central la más afectada por la erosión. Con la trayectoria de las tarjetas de deriva y las boyas de deriva Lagrangeana se determinó que existe una corriente litoral dentro de la laguna arrecifal de la Isla Lobos, la cual no se encuentra relacionada con el efecto del viento, sino con la diferencia de alturas de las olas, que, en asociación con la construcción de un geotubo, detiene el flujo natural de sedimentos, lo cual produce erosión en la zona centro. Estos resultados muestran que los daños en el arrecife por acciones antropogénicas han causado la vulnerabilidad en la línea de costa para la zona central de la Isla Lobos.

Otro factor importante que produce erosión en la zona central y oeste de la Isla Lobos, produce como efecto secundario una tasa de erosión mayor en la zona adyacente a este. Estas estructuras duras a pesar de ser alternativas para el control de la erosión no siempre son la mejor solución, y menos si no están colocadas adecuadamente tomando en cuenta la dinámica costera del área de estudio. Por lo tanto, se propone, que se destruya el geotubo.

IX.- Aplicación práctica

A escala global los ambientes costeros están siendo afectados, por acciones antropogénicas, factores naturales como el viento, el oleaje, mareas y corrientes marinas, las actividades de desarrollo industrial como lo es la extracción de líquido del subsuelo, el cambio de uso de suelo ha generado un retroceso de la línea de costa. El seguimiento de estos cambios han sido un tema de importancia en los últimos años en muchas zonas costeras del mundo.

La línea de costa de la Isla Lobos se ha reducido considerablemente, generando una preocupación por la pérdida de hábitat para la anidación de tortugas marinas, pérdida de pastos marinos y el colapso de las instalaciones como el faro y, las instalaciones de PEMEX, la cual está dañando la línea de costa de la Isla Lobos.

Considerando el presente trabajo y sus resultados, en el cual se determinaron las áreas de mayor erosión en la línea de costa de la Isla Lobos y los factores que la provocan. Se pueden implementar acciones adecuadas de mitigación.

Con los resultados obtenidos se sugiere quitar el geotubo colocado en la zona centro de la Isla, para que la corriente litoral fluya libremente y los sedimentos transportados alimenten toda la línea de costa de ella. Al mismo tiempo en que se tenga que realizar acciones de restauración en la línea de costa, se recomienda la plantar vegetación que ayude a la fijación de la línea de costa erosionada.

Por lo tanto, se recomienda, hacer estudios, para determinar cuáles son los meses con más erosión o más acumulación, así como determinar si la corriente litoral cambia de dirección y poder realizar estudios de modelación y proyección. Para el caso de la vegetación que se puede plantar en la Isla Lobos se recomienda que sea vegetación rastrera de la zona como es la riñonina (*Ipomoea pes-caprae*), que posiblemente de estabilidad a la línea de costa de esta zona, donde se presenta la mayor erosión.

La presente investigación se debería de tomar como base, para realizar acciones de mitigación para la problemática de erosión de la Isla Lobos. Esto permitiría implementar acciones sustentables que generen un impacto positivo.

Referencias

- Abeykoon, L. C. K., Thilakarathne, E. P. D. N., Abeygunawardana, A. P., Warnasuriya, T. W. S., and Egodaayana, K. P. U. T. (2021). Are Coastal Protective Hard Structures Still Applicable with Respect to Shoreline Changes in Sri Lanka. ADBI Working Paper 1240.
<https://www.adb.org/publications/coastal-protective-hard-structures-still-applicable-shoreline-sri-lanka>
- Andrade, F. y Ferreira, M. A. (2006). Un método simple para medir perfiles de playa. *Revista de Investigación Costera*, 22 (4), 995-999.
- Anthony, E. J. (2005). Beach erosion. En Schwartz M. L. (Ed.). *The Encyclopedia of Coastal Sciences*. Dordrecht, The Netherlands, pp1212.
- Cambers, G. (1998). Coping with Beach Erosion with Case Studies from the Caribbean. *Coastal Management Sourcebooks*. Environment and Development UNESCO Publishing. UNESCO Paris, pp 120.
- Carranza-Edwards, A. (2010). Causas y consecuencias de la erosión de playas. En Yáñez-Arancibia, A. (ed.). *Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología: Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*, Instituto de Ecología A. C., Xalapa, Ver., 37–50.
- Edwards, A., Márquez-García, A. Z., Tapia-Gonzalez, C. I., Rosales-Hoz, L., & Alatorre-Mendieta, M. A. (2015). Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del Golfo de México y del Caribe noroeste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 21-43. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140533222015000100003&lng=es&tlng=es.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2014). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan. *Impreso y hecho en México / Printed and bound in Mexico*. 180.
- El Banna-Omran, M. M. y Frihy, E. (2009). Human-induced changes in the geomorphology of the northeastern coast of the Nile delta, Egypt. ISSN 0169-555X, Volume 107, Issues 1–2, 2009, pp 72-78.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.025>.
- Emery, K. O. (1961). A simple method of measuring beach profile, 90–93.
- Feagin, R.A., Furman, M., Salgado, K., Martínez, M., Innocenti, R.A., Eubanks, K., Figlus, J., Huff, T.P., Sigren, J.M., & Silva, R. (2019). El papel de la vegetación de playa y dunas de arena en la mediación de la erosión de las olas. *Ciencia de estuarios, costeros y plataformas*.
- Finkl, C. W. y Walker, H. J. (2005). Beach nourishment. En Schwartz M. L. (Ed.). *The Encyclopedia of Coastal Sciences*, Dordrecht, The Netherlands, 1212.
- FitzGerald, D. M., Fenster, M. S., Argow, B. A. y Buynevich, I. V. (2008). Coastal Impacts Due to Sea-Level Rise: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 36, 601–647.
- Gracia, C.A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J.A., & Williams, A.T. (2017). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management*, 156, 277-289.

- García-Salgado, M., Nava, M. G., Samos, F. E., Bravo, O. y García-Uribe. R. (2014). Estudio para el diseño del programa de restauración de la cresta Arrecifal del Arrecife Lobos del Área de Protección del Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos – Tuxpan. *Oceanus A.C.*, 9 -11.
- Hein, C. J., Fallon, A. R., Rosen, P., Hoagland, P., Georgio, I. Y., FitzGerald, D. M., Morris, M., Baker, S., Marino, G. B., (2019). Shoreline Dynamics Along a Developed River Mouth Barrier Island: Multi-Decadal Cycles of Erosion and Event-Driven Mitigation. *Front. Earth Sci.* 7:103. doi: 10.3389/feart.2019.00103.
- Kaliraj, S., Chandrasekar N., & Magesh N. S. (2013). Impacts of wave energy and littoral currents on shoreline erosion/ accretion along the south-west coast of Kanyakumari, Tamil Nadu using DSAS and geospatial technology. *Environmental Earth Sciences*. ISSN 1866-6280. DOI10.1007/s12665-013-2845-6.
- Lancerda-Barrios, E., Pinhero-Guerra, R. G., y Passos-Fernandes, R. (2021) Variação Da Linha De Costa No Litoral Leste Do Estado Do Ceará: O Caso Da Resex Da Prainha Do Canto Verde. *Arq. Ciên. Mar, Fortaleza*, 2020, 53 (Especial): 25 – 33. ISSN 0374-5686. doi.org/10.32360/acmar.v53,supl.,42693.
- Manzano-Fischer, P., List, R., Davidson, A., Ceballos, C., Pacheco, J., Santos-Barrera, G. y Cruzado, J. (2010). Rapid decline of a grassland system and its ecological and conservation implications *revista Plos um editor Pubic Library of Science* (vol: 5 No. 1) e8562.
- Márquez-García, A. (2011). *Procesos de erosión y depositación en el litoral sur del Golfo de México* (Tesis para Doctorado en Ciencias del Mar). Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Martínez-López, B., & Pares-Sierra, A. (1998). Circulación en el Golfo de México inducida por las mareas, el viento y la Corriente de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 24(1), 65–93. <https://doi.org/10.7773/cm.v24i1.740>
- Mateos-Jasso, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R. and Allende-Arandía. M. E. (2012). Variability of the thermohaline structure in the northern Veracruz Coral Reef System, Mexico. *Continental Shelf Research* 50-51: 30-40. doi:10.1016/j.csr.2012.10.001.
- Mendoza-Baldwin, E. G. y Silva, R, (2004). Modelos de perfiles de playa en presencia de estructuras sumergidas de protección. *Ingeniería hidráulica ed México*, Vol. XIX, 5-16.
- Moncayo-Guzmán, D. A., y Ger-Salvatierra G. J. (2019). Caracterización de las condiciones oceanográficas presentes en la playa de Ballenita - Provincia de Santa Elena, con énfasis en la estructura “El Mirador”, mediante el análisis de procesos costeros dominantes y cambios de perfiles de playa. (Tesis de Ingeniería Oceanográfica) Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/131478/D-76658.pdf>.
- Monreal-Gómez, M. A. & Salas-de-León, D. A. (1997). In *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, edited by M. F. Lavin, 183-199. Unión Geofísica Mexicana. Thermohaline structure and circulation of the Gulf of Mexico.

- Moreno-Casasola, P. (2004). A case study of conservation and management of a tropical sand dune system: La Mancha-El Llano. En: Martínez M.L. y Pisanty N.P. Eds. Coastal dunes: *Ecology and conservation (Ecological Studies vol. 171)*, 319-334.
- Ojeda Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, (30). Recuperado a partir de <https://bage.agegeografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/377>
- Panana-Arce, A., Gama-Villasana, H., Mendoza-Zuñiga, R., Panana, E., & Riviera, J. (2014). Registro Preliminar Del Perfil De Playa Y Parámetros Físicoquímicos En La Zona Costera De Roca Partida-Monte Pío, Veracruz.
- Peña-Olivas, J. y Sánchez –González, J. (2018). Respuesta de la costa a las variaciones del nivel del mar: efecto sobre las playas de España. *Ingeniería civil 74-85*. doi191/2018.
- Ruiz–Martínez, G., Silva–Casarín, R. and Posadas–Venegas, G. (2013). Morphodynamic comparación of the Northeast Shoreline of Quintana Roo, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. IV (3): 47-65.
- Salas-Pérez, J. J, & Granados-Barba, A. (2008). Oceanographic characterization of the Veracruz reefs system. *Atmósfera*, 21(3), 281-301. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362008000300005&lng=es&tlng=en.
- Salas-Pérez, J. J., & Arenas-Fuentes, V. (2011). Winter water mass of the Veracruz Reef System. *Atmósfera*, 24(2), 221-231. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018762362011000200005&lng=es&tlng=en.
- Salas-Pérez, J. J. & Jordan-Garza, A. G. (2018). Oceanography of the Reef Corridor of the southwestern Gulf of Mexico. Features and circulation of water masses in the Reef Corridor of the Southwestern Gulf of Mexico, Editors: J. de Jesús Salas Pérez et al. © 2018 Nova Science Publishers, Inc.38–66.
- Tanner, W., Stapor-Jr, F. W. (1971), Tabasco beach-ridge plain: an eroding coast: *Transactions - Gulf Coast Association of Geological Societies*, 21, 231–232.
- Van-Raijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control *Ocean & Coastal. Management* 54 (2011) 867e887.
- Vidal, V., Vidal, F., & Pérez-Molero, J. (1992). Collision of a loop current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of México. *Journal Geophysical Research*. 97: 2155-2172.

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”

www.uv.mx