



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES MÉRIDA**

**VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS EMBRIONARIAS  
PARA MITIGAR LA ENERGÍA DEL OLEAJE Y SUS  
IMPACTOS EN LA EROSIÓN DE PLAYAS ARENOSAS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN MANEJO SUSTENTABLE DE  
ZONAS COSTERAS**

**P R E S E N T A:**

**JESSICA SARAI ESPARZA MISS**



**ESCUELA  
NACIONAL DE  
ESTUDIOS  
SUPERIORES**  
UNIDAD **MÉRIDA**

**DIRECTOR(A) DE TESIS:**

**DRA. GABRIELA MENDOZA GONZALEZ**

**Mérida, Yucatán 2024**



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.



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación o Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo titulado:

\_\_\_\_ Vegetación de dunas costeras embrionarias para mitigar la energía del oleaje y sus impactos en la erosión de playas arenosas \_\_\_\_\_

en la modalidad de Tesis que presenté para obtener el título de Licenciado(a) en Manejo Sustentable de Zonas Costeras, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

**Atentamente**

419128861

Jessica Sorai Esparra Miss

**Nombre, firma y número de cuenta de la persona alumna**

## AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto CONAHCYT en Atención a Problemas Nacionales “Geomorfología costera verde: un enfoque transdisciplinario como línea base para la solución de problemas socio ecológicos en el litoral” con clave 4660, por otorgar la beca que hizo posible mi participación en el desarrollo de este proyecto y tesis. Este proyecto se desarrolló gracias a la Dra. Gabriela Mendoza González a quien especialmente quisiera agradecer su apoyo incondicional y su dirección en este trabajo, sus consejos, sus observaciones, y todas las enseñanzas y charlas que me han ayudado a crecer tanto personal como académicamente. Gracias por sembrar en lo más profundo de mi corazón y mente esta sed de luchar junto a las comunidades por el cuidado de nuestros ecosistemas costeros.

Al proyecto “Modelado físico y numérico de la transformación del oleaje en la zona de swash” IN104324 por el apoyo brindando para mantener en condiciones óptimas el canal de oleaje y el equipo correspondiente.

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de ingeniería de la UNAM por proporcionar el espacio donde se realizó el experimento.

Al Dr. Alec Torres Freyermuth, por creer en el proyecto y formar parte de la gestión y realización, así como por brindarme las herramientas necesarias para cumplir con este trabajo.

Al Lic. Camilo Sergio Rendón Valdez y al Lic. Marco Antonio Ponce Márquez por la gran labor técnica que desempeñan en sus respectivos laboratorios, por su paciencia, y su guía, sin su ayuda no hubiera podido completar este trabajo.

Al Dr. Aldo Hernández Olivares por el apoyo técnico que me brindo, su asesoramiento, y sus observaciones para contribuir con la mejora de mis resultados.

Al Dr. Erick García por el gran apoyo técnico con los materiales para llevar a cabo el experimento.

Al Mtro. Carlos Vazquez Cruz y al Mtro. Pavel E. Popoca Cruz por su apoyo logístico.

## AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A los profesores de la licenciatura que enloquecieron mi corazón por su pasión a los sistemas costeros. Sobre todo, a los que me compartieron conocimientos que transformaron mi cerebro y alma, como la Dra. Maite Mascaró con su gran corazón y bella capacidad de compartir estadística tan fácilmente o como el Dr. José Carlos Pintado con sus maravillosas clases de geomorfología costera, él fue quien me dio a conocer a través de videos en clase lo increíble de trabajar en un canal de oleaje, ahí fue cuando supe que quería trabajar en uno y se logró.

A Ignacio Quiroz Burkiwicz por ser un ángel caído del cielo en mi vida, un gran ser humano que me brindó las mejores condiciones para que no me preocupara por nada más que por realizar mi tesis. Sin él este proyecto no se hubiera podido llevar a cabo. Infinitas gracias por confiar en mí en todo momento.

A mis amigas y amigos que me acompañaron en esta etapa con todo tipo de aventuras, gracias por creer en mí, espero que siempre permanezcan en mi camino (Adriana Tamargo, Diana Martínez, Michelle, Fernanda Soltero, Jessica Rodríguez, Norberto, Miguel Ángel Domínguez). En especial a Fátima Mariana Gamboa Oliva, quien conoce mi corazón desde niña y a pesar de los kilómetros que nos separan, siempre estuvo ahí apoyándome, esta tesis es nuestra mi amiga.

A Dash (Oscar Ariel) quien fue una estrella fugaz en mi vida, y ahora me alumbra las noches de humo desde lo más alto del cielo.

A mi familia por existir, pero más a Yara Miss Vargas, mi mami hermosa, la enfermera más inteligente.

Al monito capi José de Jesús Esparza, alias Kamalesha.

A Juan Carlos Cortes Flores, por llegar a ilustrar mi vida.

# Índice

RESUMEN.....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	10
2 ANTECEDENTES.....	12
3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS.....	14
3.1 Preguntas.....	14
3.2 Objetivos.....	14
3.2.1 Objetivo general.....	14
3.2.2 Objetivos específicos.....	14
4 MARCO CONCEPTUAL.....	15
5 METODOLOGÍA.....	20
5.1 Caracterización de la vegetación embrionaria dunar.....	20
5.1.1 Especies estudiadas.....	20
5.1.2 Propagación de las plantas.....	21
5.1.3 Crecimiento y biomasa de las plantas.....	25
5.2 Interacción oleaje-vegetación.....	28
5.2.1 Modelo físico.....	28
5.2.2 Medición morfológica.....	31
5.2.3 Medición del rebase de agua y sedimento en los reservorios.....	33
6 RESULTADOS.....	34
6.1.1 Tasas de crecimiento.....	34
6.1.2 Estructuras aéreas peso fresco y seco.....	37
6.1.3 Estructuras subterráneas, peso fresco y seco.....	38
6.1.4 Tipo de raíz.....	40
6.1.5 Longitud de raíces.....	43
6.2 Modelado físico en el laboratorio.....	44
6.2.1 Volúmenes de Rebase de agua y sedimento en reservorios.....	44
6.2.2 Morfodinámica de la duna.....	46
6.2.3 Interacción biomasa vs volúmenes de rebase de agua y sedimento.....	47
7 DISCUSION.....	49
7.1 Vegetación.....	49
7.2 Interacción oleaje-vegetación.....	50
8 CONCLUSIONES.....	53
9 REFERENCIAS.....	55

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b> a) Parches de <i>Cakile edentula</i> , foto tomada de Aguirre (2021); b) <i>Hymenocallis littoralis</i> en círculos rojos, foto tomada por Mariana Arcega; <i>Suaeda linearis</i> en parches al frente de playa, foto tomada por Jessica Esparza; d) <i>Canavalia rosea</i> al frente de playa tomada del usuario @kinzgarden de Instagram. ....	17
<b>Figura 2.</b> Representación de los individuos y su tamaño empleado al momento de los experimentos (a) <i>C. rosea</i> , (b) <i>H. littoralis</i> , (c) <i>S. linearis</i> , (d) <i>C. edentula</i> . Elaborado por Juan Carlos Cortes Flores .....	20
<b>Figura 3.</b> Distribución de <i>C. edentula</i> , <i>S. linearis</i> , <i>C. rosea</i> e <i>H. littoralis</i> a lo largo del sistema playa-duna. Elaborado por Juan Carlos Cortes Flores. Fuente: Inspirado en Maximiliano et al., (2019) y Rodríguez (2019). 21	
<b>Figura 4.</b> Vegetación desarrollada en los cajones experimentales al momento inicial de siembra (arriba) y antes del traslado al canal de oleaje para correr ensayos después de 14 a 17 semanas de crecimiento (inferior): a) <i>H. littoralis</i> ; b) <i>C. rosea</i> .; c) <i>C. edentula</i> ; d) <i>S. linearis</i> ; e) <i>C. rosea</i> - <i>C. edentula</i> ; f) <i>C. rosea</i> . - <i>S. linearis</i> ; g) <i>C. rosea</i> . - <i>S. linearis</i> - <i>C. edentula</i> . ....	24
<b>Figura 5.</b> Procedimiento experimental para la obtención de variables biológicas de las plantas, (a) Germinación, (b) Siembra y crecimiento por 6 meses, (c) Experimento, (d) Extracción de organismos volcando cajones, (e) Medición de raíces con cinta métrica, (f) Peso húmedo con báscula granataria, (g) Secado en el horno, (h) 15-20 minutos en desecador, (i) Peso seco con báscula granataria. ....	27
<b>Figura 6.</b> Arreglo experimental. (a) Diagrama de colocación de cajón dentro del canal de oleaje. Se muestra la rampa de cemento (gris), cajón de arena(amarillo) y un reservorio de acrílico para medir desbordamiento de agua y sedimentos(azul). (b) Dimensión de los cajones utilizados para realizar los ensayos en el canal de oleaje. ....	28
<b>Figura 7.</b> Procedimiento experimental realizado en el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), (a) Traslado de cajones de zona de crecimiento de las plantas al canal de oleaje, (b) ensayos con onda solitaria, (c) transecto topográfico de playa previa y posterior a cada ensayo, (d) cuantificación del volumen de agua y sedimento captado en los cajones posterior a cada ensayo, (e) colocación de sedimento en vasos de precipitado y secado en el horno, (f) peso y división del sedimento en cuartos para obtener muestras representativas para la granulometría , (g) análisis granulométrico con el equipo CAMSIZER. ....	32
<b>Figura 8.</b> Crecimiento de las plántulas en cajones de crecimiento.: Panel a) <i>H. littoralis</i> ; b) <i>C. edentula</i> ; c) <i>S. linearis</i> ; d) <i>C. rosea</i> ; e) <i>C. rosea</i> ,- <i>C. edentula</i> ; f) <i>C. rosea</i> - <i>S. linearis</i> ; g) <i>C.rosea</i> - <i>C. edentula</i> - <i>S. linearis</i> . ...	35
<b>Figura 9.</b> Raíces de <i>H. littoralis</i> .....	40
<b>Figura 10.</b> Raíces de <i>C. rosea</i> .....	41
<b>Figura 11.</b> Raíces de <i>S. linearis</i> .....	41
<b>Figura 12.</b> Raíces de <i>C. edentula</i> .....	42
<b>Figura 13.</b> Longitud de raíces de todas las especies estudiadas. Tratamiento en solitario. ....	43
<b>Figura 14.</b> Sedimento acumulado en los reservorios traseros después de cada ensayo. ....	44
<b>Figura 15.</b> Rebase de agua acumulada en los reservorios de acrílico después de cada ensayo. ....	45
<b>Figura 16.</b> Volumen de erosión acumulada en los 8 ensayos, volumen calculado a través de 8 transectos sobre el mismo sitio dentro de los diferentes tratamientos posterior a cada ensayo. ....	46
<b>Figura 17.</b> Biomasa (peso fresco total aéreo) por tratamiento comparado con el rebase de agua en los reservorios traseros, cada barra negra en el gráfico representa el rebase de agua para cada tratamiento. ....	47
<b>Figura 18.</b> Biomasa (peso fresco total aéreo) por tratamiento vs volumen de sedimento en los reservorios traseros, cada barra negra en el gráfico representa el sedimento acumulado en los reservorios para cada tratamiento.....	48
<b>Figura 19.</b> Depósito de arena deslavado al frente de la duna en el tratamiento <i>C. edentula</i> . ....	52

## CUADROS

Cuadro 1. Generalidades de la propagación y distribución de las especies utilizadas.....	23
Cuadro 2. Condiciones de los ensayos para cada set de vegetación. ....	30
Cuadro 3. Promedio y desviación estándar del crecimiento de las especies estudiadas. ....	36
Cuadro 4. Tasa de crecimiento promedio de las especies cm/año .....	36
Cuadro 5. Correlación entre tasas de crecimiento de las tres especies utilizadas en los diferentes tratamientos, la especie que cuentan con una (A) corresponde a las que se encontraban en el tratamiento <i>C. rosea</i> - <i>C. edentula</i> - <i>S. linearis</i> , las <i>C. rosea</i> que cuentan con la letra (B) corresponden a las del tratamiento <i>C. rosea</i> - <i>C. edentula</i> , y las <i>C. rosea</i> que cuentan con una letra (C) corresponden a <i>C. rosea</i> - <i>S.linearis</i> , las <i>S.linearis</i> con letra (B) corresponden a las del <i>C. rosea</i> - <i>S.linearis</i> , las que no tienen letra se refieren a los tratamientos individuales. ....	37
Cuadro 6. Peso aéreo fresco y seco para los 7 tratamientos. ....	38
Cuadro 7. Peso radicular fresco y seco para los 7 tratamientos. ....	39
Cuadro 8. Pesos totales de estructuras aéreas y subterráneas frescas y secas, así como su relación .....	40

## RESUMEN

Las playas y dunas costeras presentan ciclos naturales de erosión y acreción. Sin embargo, la erosión crónica es un problema de manejo cuando representa un riesgo para la sociedad e infraestructura humana en la costa. La erosión y degradación en los ecosistemas de playa y duna costera de Yucatán están influenciadas principalmente por actividades antrópicas, aunadas al incremento del nivel medio del mar y al aumento de huracanes y tormentas. Ante ello, para proteger las costas se opta por infraestructura dura, sin embargo, está documentado que esta provee soluciones locales y temporales que pueden impactar el sistema a escala regional por alterar los procesos de transporte sedimentario natural del litoral. Por ello, se proponen alternativas suaves, fundamentadas en estrategias de adaptación basada en ecosistemas. El objetivo de este estudio es analizar la función ecosistémica de control de erosión e inundación proporcionado por la vegetación ante el impacto del oleaje en las dunas costeras embrionarias del litoral de Yucatán. Para esto, se sembraron 8 arreglos de especies de plantas locales y se crecieron durante 6 meses en cajones de arena. Los cajones formaron parte de un modelo físico en el canal de oleaje con el propósito de realizar ensayos en los que se puso a prueba las estructuras vegetativas de 4 especies de plantas pioneras, para analizar la retención de sedimentos bajo el impacto de oleaje de tormenta simulado en el canal. Entre las plantas estudiadas, se observó que *H. littoralis* mostró un crecimiento más rápido y saludable en conjunto con *C. rosea* en tratamientos individuales. Además, *H. littoralis* demostró ser más eficaz contra la erosión, con menor rebase de sedimento en los reservorios traseros. En cuanto a la protección contra inundaciones, *H. littoralis* también sobresalió al ofrecer la mayor defensa, seguido por el tratamiento combinado de *C. rosea* y *C. edentula*. Los resultados sugieren que la vegetación costera juega un papel importante en la estabilización de la duna costera, particularmente en la retención de sedimento y regulación de inundaciones, siempre y cuando las estructuras aéreas y subterráneas de la vegetación se encuentren en buenas condiciones.

## **ABSTRACT**

Beaches and coastal dunes have natural cycles of erosion and accretion. However, chronic erosion is a management problem when it poses a risk to society and human infrastructure on the coast. Erosion and degradation in the beach and coastal dune ecosystems of Yucatan are mainly influenced by anthropogenic activities, together with the increase in mean sea level and the increase in the magnitude of hurricanes and storms. In view of this, hard infrastructure has been chosen to protect the coasts, however, it is documented that this provides local solutions that can impact the system on a regional scale by altering the sediment transport processes of the coast. For this reason, soft alternatives are proposed, based on ecosystem-based adaptation strategies. The aim of this study is to analyze the ecosystem function of sediment retention and erosion control provided by coastal dune vegetation facing the impact of waves on the embryonic coastal dunes of the Yucatan coast. For this, an experiment was carried out in a wave channel, in which the vegetative structures of four pioneer plant species were tested, to analyze sediment retention under the impact of simulated storm swell in the channel. Among the plants studied, it will be observed that *H. littoralis* showed faster and healthier growth in conjunction with *C. rosea* in individual treatments. Furthermore, *H. littoralis* proved to be more effective against erosion, with less sediment overflow in the rear reservoirs. In terms of flood protection, *H. littoralis* also stood out by offering the greatest defense, followed by the combined treatment of *C. rosea* and *C. edentula*. The results suggest that coastal vegetation plays an important role in the stabilization of the coastal dune, particularly in sediment retention and flood regulation, as long as the aerial and underground structures of the vegetation are in good condition.

# 1 INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras presentan una gran variedad de ecosistemas, ambientes y comunidades que convergen en una zona de transición de mar a tierra, esto permite una gran heterogeneidad de hábitats que favorecen la presencia de diferentes especies animales y vegetales (López, 2007). Entre estos ecosistemas se encuentran las dunas costeras, las cuales son el resultado de la acumulación de material arenoso retenido en su desplazamiento, transportado principalmente por el viento. La vegetación presente, adaptada al medio climático de la playa, obstaculiza el transporte eólico de sedimentos, promoviendo su acumulación, formando así montículos de arena vegetados. Estos montículos van creciendo con el tiempo teniendo la función de depósito de arena de la playa con alineamiento paralelo a la línea de costa (Mendoza et al, 2022).

El incremento de la población humana en las zonas costeras, ha aumentado la vulnerabilidad de las comunidades costeras frente a perturbaciones y desastres naturales. Muchas veces, el desarrollo urbano de la costa viene acompañado de estrategias ingenieriles tradicionales de protección costera para construir cercanamente a la playa (diques, escolleras, relleno de playas e infraestructura sobre dunas costeras), los que generalmente resultan en la pérdida de dunas costeras y en alteración de la dinámica sedimentaria litoral (efectos adversos a las zonas aledañas a las obras ingenieriles). Así mismo, numerosos factores afectan la reducción de los sistemas dunares: cambios de uso de suelo impulsados por el turismo; la presencia de especies invasoras que causan diferentes cambios morfológicos y ecosistémicos; así como diferentes causas antropogénicas (deforestación, acceso a las playas, etc.) y naturales que conllevan a que los ecosistemas dunares se encuentren degradados, ya sea como pérdida total del hábitat o con la fragmentación de estos (Malavasi et al., 2016; Vega, 2007; Fernández et al., 2020). Estas dunas costeras, acumulaciones de arena moldeadas por el viento, se dan cuando existe algún obstáculo, como la vegetación, que impide que la arena se disperse, (Maun, 2009) La vegetación halófila pionera que coloniza estas dunas de arena les brinda soporte y estructura, creando así una sucesión ecológica importante para prevenir la erosión costera y las inundaciones (Badillo et al., 2020; Hanley et al., 2014), siendo así la conservación dunar un elemento clave para la mitigación de la erosión e inundación frente a los diferentes temporales marítimos (Ley et al., 2007). Las playas y dunas costeras son ecosistemas que

se encuentran en alarmante peligro a lo largo de la costa Yucateca, las principales amenazas presentes en esta zona son la contaminación, fenómenos naturales, la presencia de humanos en zonas naturales, así como la construcción de infraestructura y la privatización de playas, a pesar de ser barreras naturales que sirven de protección a las comunidades costeras (Mendoza et al., 2021; Meza, 2022). Para generar un manejo sustentable de zonas costeras, es prioritario considerar las estrategias basadas en ecosistemas, las cuales pueden incluir acciones de conservación para evitar el deterioro de ecosistemas o de restauración y reforestación para rehabilitar y recuperar los ecosistemas perdidos. Estas estrategias, están ligadas a la infraestructura verde para la conservación del paisaje, sus componentes naturales y culturales, al mismo tiempo que protegen la costa, reducen el riesgo costero e incrementan la resiliencia de los ecosistemas costeros.

En este estudio se pretende conocer la capacidad protectora de la vegetación pionera de duna costera de cuatro especies de plantas nativas de la península de Yucatán frente a la erosión causada por oleaje, así como evaluar la resistencia de estas especies frente al oleaje, identificando el papel de sus estructuras aéreas y subterráneas en la retención de sedimentos y en la protección de inundaciones tierra adentro. Con esto, se espera proveer de información útil en cuanto al papel significativo que la vegetación costera (considerando estructuras aéreas y subterráneas) tiene en la dinámica ecosistémica, para el diseño e implementación de restauración y estrategias de manejo sustentable en las dunas costeras.

## 2 ANTECEDENTES

El sistema playa-duna es muy dinámico a lo largo de todo el año (D'Alessandro et al., 2022). Para que las dunas embrionarias y frontales se formen, es necesario que los granos de arena que han sido depositados en la playa por acción del oleaje se sequen y puedan ser transportados por el viento (Oderizs, 2014). Las dunas, bioestructura generada dentro del sistema playa-duna son consideradas importantes para su estudio, para los cuales, se han desarrollado diversos modelos físicos en canales de oleaje para explorar la función de protección de diferentes tipos de vegetación costera (vegetación de dunas y manglares) frente al oleaje. Por ejemplo, Silva y colaboradores (2016) llevaron a cabo un trabajo donde realizaron 24 experimentos en un canal de oleaje con el objetivo de estudiar los efectos de cuatro densidades de cobertura vegetal (ninguna, baja, media, alta) de *Ipomoea pes-caprae*, en el movimiento de los sedimentos bajo tres condiciones de tormenta (suave, moderada, intensa). Sus experimentos demostraron que la mayor pérdida de arena siempre ocurrió en los experimentos sin vegetación, observando que el volumen erosionado era el doble que cuando la vegetación estuvo presente. Caso Aguirre (2016) elaboró una herramienta numérica para la predicción de la evolución del perfil de playa con duna, implementando un modelo físico de perfiles de playa con duna en presencia y ausencia de vegetación. Sus resultados demuestran que la vegetación contribuye a retrasar el proceso de erosión de la duna, pero no a evitarlo. Mendoza y colaboradores (2017) realizaron un experimento dentro de un canal de oleaje para identificar si la vegetación de duna costera (*Ipomoea pes-caprae*) juega un papel importante en la prevención de la erosión de las dunas. Los resultados arrojan que la presencia de vegetación de las dunas costeras no modifica realmente la dinámica del perfil de playa, ni el régimen de erosión que se presenta en las dunas, sin embargo, reconocen que la vegetación puede servir para retardar la erosión. Feagin et al. (2019) analizaron cuatro especies de plantas de duna costera: *Spartina patens*, *Panicum amaru*, *Sesuvium portulacastrum*, *Ipomoea pes-caprae*, para conocer su papel en la retención de sedimentos. En total realizaron 54 réplicas dentro de un canal de oleaje con las diferentes asociaciones de plantas. Sus resultados sugieren que la vegetación reduce la erosión de las olas en aproximadamente un 40% para las dunas. Maximiliano et al. (2019) realizaron un experimento para resaltar la importancia que tienen las especies y

las combinaciones de especies dentro de la protección costera, su objetivo fue explorar si la riqueza funcional de las plantas ayuda a reducir la erosión de las olas en las dunas costeras embrionarias. En este trabajo utilizaron tres especies: *Ipomoea pes-caprae*, *Sesuvium portulacastrum*, y *Sporobolus virginicus*, que fueron sometidas a diferentes condiciones de oleaje irregular. Encontraron que la erosión se redujo en las dunas cubiertas con vegetación, pero tal protección se vio condicionada por la especie y por el tiempo. Por otro lado, Feagin et al. (2023) demostraron que durante condiciones extremas de tormenta la vegetación altera los patrones de acreción y erosión, creando micropendientes pronunciadas que aceleran la erosión.

Los trabajos descritos, muestran evidencia sobre la capacidad de retención de sedimento que presentan las dunas vegetadas. Sin embargo, ninguno de ellos analiza la biomasa vegetal subterránea y aérea en relación con la protección costera ni el rebase ocasionado por el oleaje y transporte de sedimento en un escenario de tormenta. Debido a lo anterior, este estudio pretende evaluar cuantitativamente cuáles especies son más resistentes al oleaje, cuáles son más efectivas para reducir la erosión y el rebase de agua en dunas embrionarias costeras, identificando qué especies se desarrollan más rápidamente.

### **3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS**

#### **3.1 Preguntas**

¿Cuáles especies de plantas pioneras crecen más rápido?

¿Qué especies y/o asociaciones de plantas pioneras son más eficaces para reducir la erosión?

¿Qué especies y/o asociaciones de plantas pioneras son más eficaces para reducir el rebase de agua en la cresta de la duna?

¿El desarrollo de las diferentes estructuras aéreas y subterráneas de plantas de dunas de la península de Yucatán influyen en el control de erosión e inundación en la cresta de la duna?

#### **3.2 Objetivos**

##### **3.2.1 Objetivo general**

Analizar la capacidad de la vegetación pionera para reducir la erosión y el rebase del oleaje en dunas costeras.

##### **3.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el crecimiento de las plantas desde la germinación de sus semillas.
- Analizar la cantidad de sedimento retenido en diferentes tratamientos de vegetación relacionados con su diversidad.
- Estimar el rebase de agua en la cresta de la duna de acuerdo con los diferentes tratamientos de vegetación.
- Identificar los mecanismos estructurales de las plantas (raíces o parte aérea) que ayudan a mitigar la erosión y rebase asociado al oleaje.

## 4 MARCO CONCEPTUAL

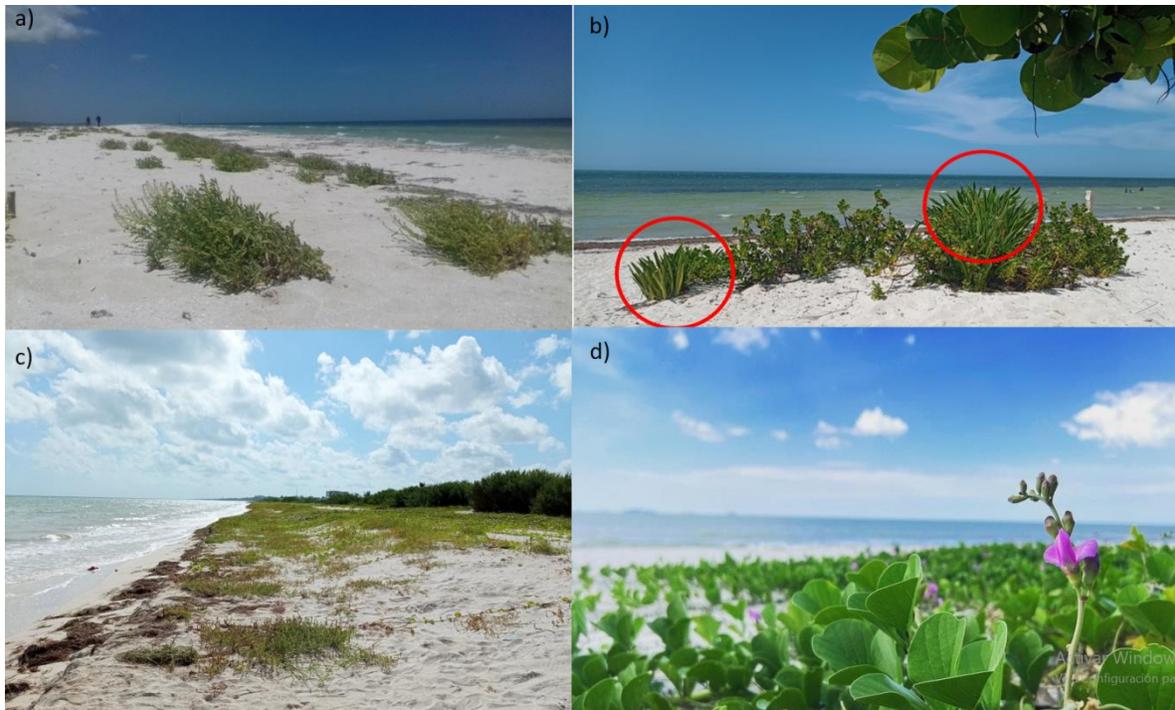
Las zonas costeras están constituidas por complejos ecosistemas que se encuentran en la interfaz entre el mar y la tierra, estos ecosistemas se consideran de los más productivos, ya que proveen un amplio rango de servicios ecosistémicos (Pessoa & Lindon, 2013; Leewis et al., 2012). Dentro de estos ecosistemas, se encuentran las playas y dunas costeras, sistemas constituidos por materiales sedimentarios no consolidados, la dinámica y conformación de estas se encuentra condicionada por el origen de estos materiales (material antigénico por rocas o material biogénico por organismos), y el efecto del viento, oleaje, mareas y corrientes (Cuevas & Euan 2009; Fernández, 2002). El estado de Yucatán se caracteriza por presentar playas arenosas disipativas (con pendiente suave) debido a que la parte sumergida de la plataforma continental se extiende por varios kilómetros. Así mismo, de acuerdo con la clasificación de Johnson 1919, la costa yucateca se clasifica como emergente dado que la superficie de la Península de Yucatán comenzó a emerger hace 12 millones de años, considerándola la región más joven de México, por ello el material sedimentario dominante de las playas está constituido de sedimentos carbonatados, en su mayoría es material calcáreo biogénico como fragmentos de concha, coral, etc. (Cuevas & Euan, 2009; Morales, 2009).

Las playas arenosas y las dunas costeras son ambientes sedimentarios que mantienen un flujo recíproco de materiales, esto permite asociarlas como parte de un mismo sistema, controlado por variaciones del nivel del mar, ya sea por oleaje y mareas o por cambios climáticos a nivel global; y el viento, creando así progresiones o retrocesos de la línea de costa. Cuando el nivel del mar es estable se produce acumulación de estos materiales (progradación) de acuerdo a la tasa o intensidad de los aportes. O, por el contrario, si domina la erosión, se perderán las estructuras de las dunas y playas, este desplazamiento de sedimentos está condicionado por la velocidad y amplitud del nivel del mar (Alcántara et al., 2005). Este sistema de sedimentos ascendentes y lavados en el frente de playa implica la construcción de bermas de playa (o por el contrario coloca la arena en el mar), el crecimiento de las bermas depende del transporte eólico, y oleaje, este último mediante el rebase, depositando sedimentos más allá de la cresta de la berma (rebase de agua u overtopping) (Baldock et al., 2005). Las dunas costeras son consideradas ambientes eólicos

ya que son una estructura sedimentaria originada por acción del viento sobre los sedimentos móviles, que pueden ser obstaculizados por algún impedimento topográfico o por la comunidad vegetal halófila que actúa como agente estabilizador al colonizar estos ambientes. Estos sistemas eólicos poseen ecosistemas de gran especificidad, con un gran valor ecosistémico gracias a la particularidad del entorno (Fernández & Garrote, 2002; Mejía, R., 2018;).

Fernández & Garrote (2002) consideran que los ecosistemas dunares son elementos geomorfológicos integrados en un sistema en equilibrio dinámico y que, para su formación necesitan tres condiciones básicas: aportación de arena considerable, vientos que la movilicen y un espacio para que se acumule.

Las dunas costeras presentan una gran cantidad de microhábitats dada su estratificación que va del mar a tierra dentro, comenzando con las dunas embrionarias, las cuales para los objetivos de este trabajo, se consideraran acumulaciones incipientes de arena localizadas entre la parte alta de la playa y el primer cordón dunar. En esta zona podemos encontrar a la vegetación pionera, compuesta por especies capaces de tolerar condiciones extremas como humedad, alta temperatura del suelo, estrés hídrico, arena en constante movimiento, y extrema salinidad, dado que esta zona tiene una elevada frecuencia de perturbaciones por su cercanía al mar (Gracia et al., 2009; Moreno-Casasola, 1982.) La península de Yucatán tiene una extensión de dunas vegetadas de aprox., 205km entre el golfo de México y el mar caribe, encontrándose 271 especies vasculares, de las cuales 19 son endémicas de la península de Yucatán. (Duran, 2011; Espejel, 1984). Aguirre (2021) realizó una caracterización ambiental y geomorfológica de 3 playas y dunas de Yucatán (Sisal, Telchac y Chuburná) donde registro 21 especies, pertenecientes a 20 géneros y 19 familias, de estas 4 son hierbas rastreras, 7 herbáceas, 8 arbustos y 1 árbol, así como una especie trepadora. Así mismo, identifiqué una sucesión ecológica de mar a tierra dentro, encontrando: *Ipomoea pes-caprae*, *Ambrosia hispida*, *Amaranthus gregii*, *Cakile edentula* *Suaeda linearis* y *Canavalia rosea* en los primeros 20 metros del frente de playa y dunas embrionarias. Estas últimas 3 especies fueron empleadas para los objetivos de este trabajo. Por otro lado, en la localidad de San Crisanto, Yucatán se ha observado *Hymenocallis littoralis* sobre las dunas embrionarias, esta como la cuarta especie empleada en este proyecto (Figura1).



**Figura 1.** a) Parches de *Cakile edentula*, foto tomada de Aguirre (2021); b) *Hymenocallis littoralis* en círculos rojos, foto tomada por Mariana Arcega; *Suaeda linearis* en parches al frente de playa, foto tomada por Jessica Esparza; d) *Canavalia rosea* al frente de playa tomada del usuario @kinzgarden de Instagram.

Estos sistemas proveen contribuciones ecosistémicas (generalmente llamados servicios ambientales), como son la protección a eventos extremos, reservas sedimentarias, espacios recreativos, y hábitat de especies endémicas o en alguna categoría de riesgo (Pedroza, 2013). Entre las contribuciones más valoradas de las dunas costeras se encuentran: los valores estéticos y recreativos, la protección contra mareas de tormenta, y la regeneración de playa (Mendoza-González et al. 2021).

Sin embargo, las costas arenosas y las dunas costeras, son sometidas a diferentes presiones, generalmente turística e industrial, lo que conlleva problemáticas costeras como la erosión o inundaciones (Benseny, 2013). La erosión costera es definida como la modificación o retroceso en la línea de costa preexistente, con la consistente pérdida de sedimentos. Simultáneamente pueden ocurrir procesos de acreción, que consisten en la sedimentación y crecimiento de la playa. Ambos procesos son naturales y contribuyen con la forma de las costas actuales (Rodríguez, 2019), sin embargo, la presión humana sobre las costas ha modificado su dinámica y estos procesos se han convertido en algunos casos, en problemas para el desarrollo costero.

Canul, A. (2020) señala que la erosión es un proceso geomorfológico que representa un ajuste en la línea de costa hacia un nuevo equilibrio, como respuesta ante el incremento del nivel del mar o algún cambio en el suministro de sedimentos, clima u oleaje. Por otro lado, La SEMARNAT (2013) señala que las dunas reciben, proveen, y almacenan arena para regular la flexibilidad y resiliencia del ecosistema. La resiliencia se define como la habilidad para absorber, recuperarse, resistir, y adaptarse con éxito a situaciones adversas (Pérez, 2017). Mata y colaboradores (2016), consideran que la resiliencia tiene gran importancia para la vulnerabilidad de un sistema, su sustentabilidad, el bienestar socioeconómico de las comunidades adyacentes, y el sano desarrollo de las mismas. Calafat, *et al* (2014), estudiaron la capacidad de resiliencia del sistema de dunas litorales de la playa de Remola, en Barcelona, tras aplicar una serie de medidas de restauración diseñadas para la recuperación y restauración del sistema duna-playa. Su estudio muestra que la morfología dunar dañada por diferentes accesos peatonales abiertos a la playa se recuperó transcurridos 10 años después de la implementación de técnicas de ingeniería blanda, originándose una nueva duna primaria.

Tradicionalmente se han implementado estructuras duras que buscan seguridad para los seres humanos que se establecen en la costa. Sin embargo, recientemente, las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) han demostrado que pueden abordar desafíos que afectan a la sociedad. Asimismo, los beneficios de las SBN las distinguen de la infraestructura gris o dura, ya que consiste en medidas de protección, gestión sustentable o la restauración de ecosistemas (IFCR 2021). Por otra parte, Vásquez (2016) considera que la infraestructura verde es una aproximación que intenta reconciliar el crecimiento urbano, bienestar social y protección ambiental, con énfasis en las contribuciones ecológicas o servicios (regulación climática, purificación del aire, reducción de ruido, refugio de especies nativas, provisión de espacios para recreación, esparcimiento y contacto con la naturaleza) provistos por los espacios verdes en las ciudades.

Silva et al. (2017), describieron cuatro proyectos desde la perspectiva de desarrollo de infraestructura verde, llevados a cabo en diferentes países de la costa latinoamericana (México, Chile, República Dominicana y Brasil), en diferentes hábitats costeros (arrecifes de corales, dunas costeras, playas y humedales). Se agruparon de acuerdo a su

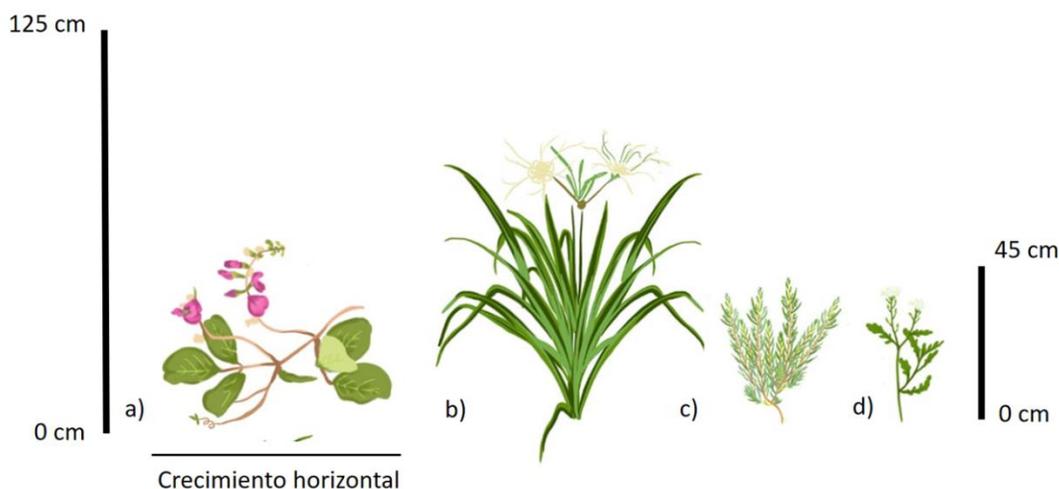
nivel de naturalidad en cinco categorías; 1) Basados en la naturaleza: acciones de conservación, o de restauración que pueden ser acompañadas de otras medidas que aumenten la resiliencia de los ecosistemas, que proveen servicios ecosistémicos de interés (por e.g., Recuperación de humedales ) 2) Ecosistemas diseñados: rehabilitación de ecosistemas creando estructuras que puedan llegar a tener el mismo nivel de complejidad que un ecosistema natural (por e.g., arrecifes de coral artificiales). 3) Ingeniería suave: medidas tradicionales de ingeniería que trabajan de la mano con los procesos ecológicos (por ejemplo: formación de dunas después de un relleno de playas). 4) Infraestructura física ecológicamente mejorada: Infraestructura civil tradicional que incluye adaptaciones para imitar ecosistemas naturales y sus funciones 5) Deconstrucción: Consiste en eliminar las estructuras ingenieriles (duras y/o blandas) con el fin de que se recupere el sistema utilizando como referencia un escenario natural.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 Caracterización de la vegetación embrionaria dunar

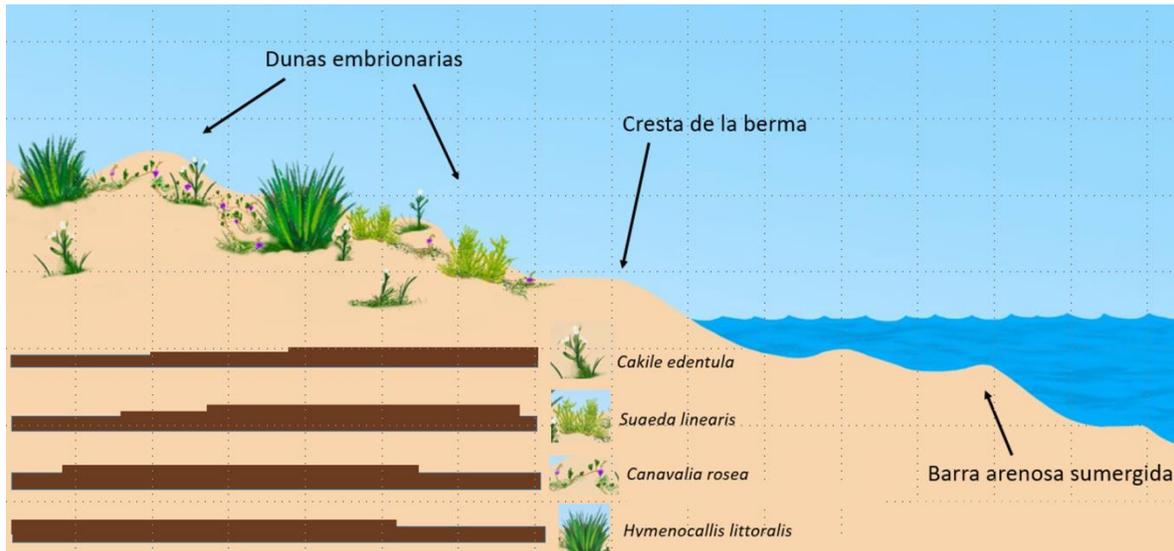
#### 5.1.1 Especies estudiadas

Se realizó un diseño experimental con 7 tratamientos y un control, conformado por cuatro diferentes especies de plantas pioneras de duna costera (en solitario y combinadas): Tres hierbas erectas, *Cakile edentula*, sus ramas crecen cerca de la base hacia afuera y hacia arriba, las hojas maduras son gruesas, carnosas, crenadas y ligeramente dentadas, flores blancas, especie que anualmente tira sus semillas una vez ya seco todo el individuo. (Maun et al. 1990 en Álvarez et al. 2019); *Suaeda linearis*, su estructura tiene tiernas hojas y brotes comestibles, sus tallos son erectos, las ramas son numerosas, ascendentes y delgadas (Lonard et al. 2016). *Hymenocallis littoralis*, posee hojas ensiformes de 60-70 cm de largo por 3-3.5 cm de ancho, y las flores son grandes, blancas (iNaturalistMX).; y una hierba rastrera, *Canavalia rosea*, sus tallos son gruesos y carnosos, crecen hasta 10 m o más, las ramas irradian hacia fuera tipo enredaderas que cubren las dunas o la misma vegetación (Mendoza et al. 2014). Las cuáles serán nombradas en adelante *C. edentula*, *S. linearis*, *H. littoralis* y *C. rosea*, correspondientemente (Figura 2).



**Figura 2.** Representación de los individuos y su tamaño empleado al momento de los experimentos (a) *C. rosea*, (b) *H. littoralis*, (c) *S. linearis*, (d) *C. edentula*. Elaborado por Juan Carlos Cortes Flores

Todas las especies seleccionadas, co-ocurren naturalmente en la zona de dunas embrionarias y hasta las dunas primarias (Figura 3). Estas especies fueron seleccionadas para el estudio porque son algunas de las especies frecuentemente afectadas por el oleaje durante tormentas, ya que se encuentran entre la vegetación pionera en el frente de playa en las comunidades vegetales de la duna costera de la costa de Yucatán.



**Figura 3.** Distribución de *C. edentula*, *S. linearis*, *C. rosea* e *H. littoralis* a lo largo del sistema playa-duna. Elaborado por Juan Carlos Cortes Flores. Fuente: Inspirado en Maximiliano et al., (2019) y Rodríguez (2019).

### 5.1.2 Propagación de las plantas.

Se realizó una colecta de semillas en las dunas primarias de Sisal, Chuburná y Telchac para buscar las especies seleccionadas. Las semillas se germinaron, y se trasplantaron al tener su primer par de hojas verdaderas en siete cajones de madera rellenos de arena sílica, los cuales se ubicaron al exterior del edificio del Instituto de Ingeniería de la UMDI Sisal durante 6 meses para permitir el crecimiento de las plantas con influencia costera<sup>1</sup>. En cada cajón se sembraron 45 individuos de plantas de una manera uniforme, de acuerdo a los tratamientos descritos en la Figura 4, para permitir la formación y desarrollo de raíces. Durante su desarrollo se procuró mantener la humedad del sustrato, por lo que las plantas

<sup>1</sup> Para mover los cajones con vegetación ubicados en el exterior del edificio al interior se utilizó una grúa hidráulica móvil, y para introducirlos al canal se usó una grúa viajera instalada en el techo de la nave del canal de oleaje en el LIPC

fueron regadas en promedio cada tercer día, de acuerdo con sus necesidades. De las semillas germinadas, las que no fueron ocupadas se mantuvieron como plántulas en condiciones controladas como sustitutas, en caso de registrar mortalidad en las plantas sembradas en los cajones del ensayo. En el Cuadro 1 se describe la colecta y manejo de semillas, así como el tiempo de germinación de cada una de las especies seleccionadas para los tratamientos experimentales.

Cuadro 1. Generalidades de la propagación y distribución de las especies utilizadas.

Nombre común	Nombre científico	Distribución	Tiempo de germinación	Colecta de semillas	Manejo de semillas
Frijol de playa	<i>Canavalia rosea</i>	Pantropical / Neotropical	8 a 21 días	Se recolectaron semillas directamente de las vainas secas de la planta, o sobre la arena, superficial o ligeramente enterradas, en forma seca o hinchada por hidratación.	Se hidrataron las semillas en un vaso con agua potable por 5 días hasta hincharse, lo cual indica que el embrión está por germinar. Cada dos días se les cambió el agua.
Roqueta	<i>Cakile edentula</i>	Neártica/subtropical	8 a 21 días	Se recolectaron semillas de la planta seca, y se mantuvieron en sus cápsulas.	Se hidrataron las semillas fuera de la capsula en un vaso con agua potable hasta que el embrión rompió la testa, o hasta que comenzara a crecer la plántula.
Romerillo	<i>Suaeda linearis</i>	Neotropical/ Subtropical	5 a 21 días	Se recolectaron racimos con semillas completamente secos de la planta.	Se hidrataron las semillas hasta que el embrión salió completamente.
Lirio de mar	<i>Hymenocallis littoralis</i>	Neotropical	30 a 35 días	Se colectaron cuidadosamente los bulbos que crecen en la base de la planta madre separándolos de sus raíces.	Se prepararon los bulbos, manteniendo una hoja de brote más joven que generalmente se encuentra en el centro de la planta (no debe ser cortada o arrancada).



**Figura 4.** Vegetación desarrollada en los cajones experimentales al momento inicial de siembra (arriba) y antes del traslado al canal de oleaje para correr ensayos después de 14 a 17 semanas de crecimiento (inferior): a) *H. littoralis*; b) *C. rosea.*; c) *C. edentula*; d) *S. linearis*; e) *C. rosea*- *C. edentula*; f) *C. rosea.* -*S. linearis*; g) *C. rosea.* - *S. linearis* - *C. edentula*.

### 5.1.3 Crecimiento y biomasa de las plantas

Se realizó un registro semanal del crecimiento de las plántulas a partir del día 45 aproximadamente desde su germinación debido a que el tiempo de germinación de las semillas no es simultáneo. Las plántulas fueron sembradas entre el 15 de abril y el 14 de junio, comenzando la medición y terminando hasta el día que fueron trasladadas e instaladas en el canal de oleaje para los experimentos con modelo físico (27 septiembre - 29 de octubre). Cualitativamente, cuando las plantas se introdujeron en el canal para los ensayos, eran semejantes a lo que se encuentra naturalmente en una duna embrionaria. Este procedimiento se realizó en todos los tratamientos con excepción del tratamiento de *H. littoralis*, pues sus bulbos fueron colectados posteriormente y sembrados el 19 de julio (6 semanas después del inicio de la medición de los demás tratamientos). La medición del crecimiento de *C. rosea* en los cajones, se realizó hasta la semana 7 debido a que en su crecimiento los ápices de la planta tiendan a enredarse entre ellos, lo que dificultó su medición. Finalmente se calculó el crecimiento anual promedio de las especies estudiadas, así como la tasa de correlación entre las 3 especies combinadas (correlación de las tasas de crecimiento con la función `corrcoef` en software Matlab).

Después de los experimentos realizados dentro del canal de oleaje, los cajones con los diferentes tratamientos de vegetación fueron desmontados para evaluar las siguientes variables biológicas: longitud de raíz primaria, tipo de raíz, peso húmedo y seco de estructuras aéreas y subterráneas. La extracción de plantas de los cajones se realizó volcando el cajón sobre una superficie plana para extraer las raíces completas y medir su longitud con una cinta métrica. Las plantas extraídas de los cajones fueron agrupadas en 3 de acuerdo con la sección del cajón donde se desarrollaron: enfrente (lo más cercano al mar), medio y atrás (lo más cercano a tierra dentro, cresta de la duna). Estas secciones tuvieron diferentes niveles de profundidad y por tanto sus raíces podían haber presentado diferencias en cada sección. Con una tijera, se cortaron los tejidos aéreos de los subterráneos determinando para cada sección el peso húmedo por medio de una báscula granataria y para secar los individuos y obtener el peso seco, se empleó un horno *Thermo Scientific* en el que se secaron los tejidos a 80°C por 24 horas, a excepción de los individuos de *H. littoralis* que estuvieron 48 horas en el horno (debido a la gran cantidad de agua que almacena en sus tejidos). Al salir del horno fueron colocados en un desecador

entre 15 y 20 minutos. Posteriormente se pesó cada sección (aérea y subterránea) con la misma báscula. En la Figura 5 se encuentra ilustrado el procedimiento para la obtención de las variables biológicas.

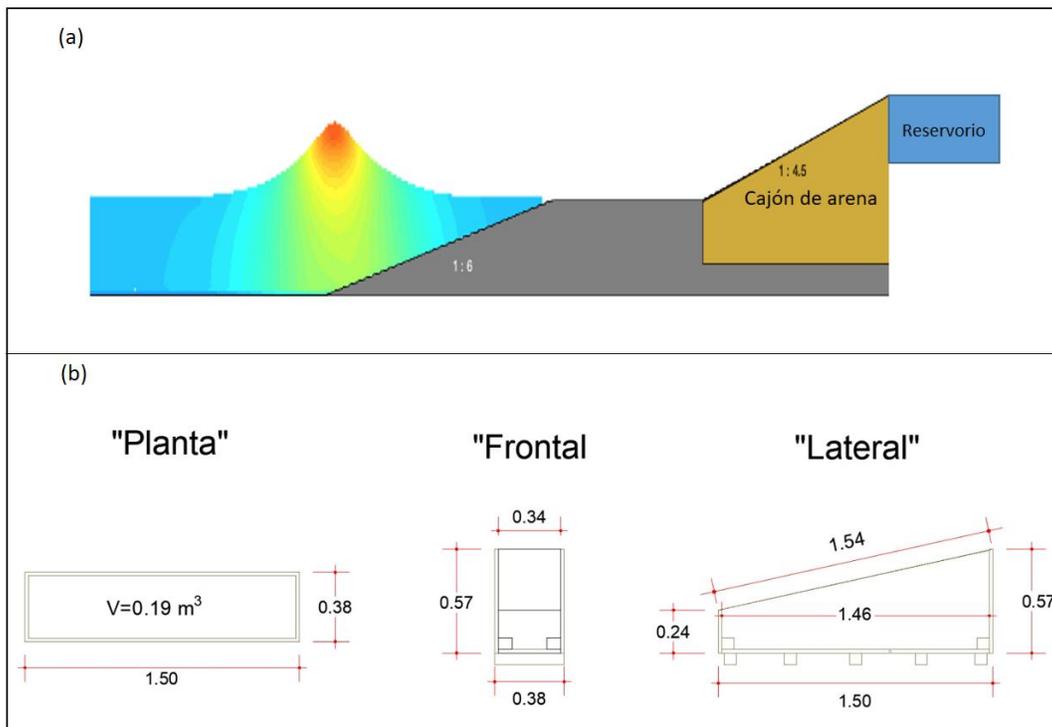


**Figura 5.** Procedimiento experimental para la obtención de variables biológicas de las plantas, (a) Germinación, (b) Siembra y crecimiento por 6 meses, (c) Experimento, (d) Extracción de organismos volcando cajones, (e) Medición de raíces con cinta métrica, (f) Peso húmedo con báscula granataria, (g) Secado en el horno, (h) 15-20 minutos en desecador, (i) Peso seco con báscula granataria.

## 5.2 Interacción oleaje-vegetación.

### 5.2.1 Modelo físico

Los ensayos se llevaron a cabo en el canal de oleaje de 40 m de largo, 0.80 m de ancho y 1.2 m de alto perteneciente al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) de la UNAM en Sisal. El canal está equipado con un generador de olas tipo pistón, que transfiere energía por medio de una pala de acero inoxidable de 1.2 m de carrera marca VTI, controlada con el software AwaSys7 de la Universidad de Alborg para la generación de las señales del oleaje utilizado. Dentro del canal, se construyó una rampa con una capa de concreto ( $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$ ) sobre una capa a base de grava y blocks, la cual presentaba una pendiente de 1:6, seguida de un lecho plano de 1.2 m de largo con el fin de inducir la rotura de las olas, y su propagación sobre unos cajones de prueba, que simulaban una duna vegetada (Figura 6a).



**Figura 6.** Arreglo experimental. (a) Diagrama de colocación de cajón dentro del canal de oleaje. Se muestra la rampa de cemento (gris), cajón de arena(amarillo) y un reservorio de acrílico para medir desbordamiento de

agua y sedimentos(azul). (b) Dimensión de los cajones utilizados para realizar los ensayos en el canal de oleaje.

La zona de experimentación del canal de olas se dividió longitudinalmente con un acrílico de 2.4 m, 0.87 m y 12 mm de largo, alto y grosor respectivamente, para realizar dos tratamientos diferentes de composición de vegetación de dunas costeras (Cuadro 2) de manera simultánea e independiente. En la cresta de la duna se instaló un depósito de acrílico para medir el rebase y el transporte de sedimentos generado por la ola desde la cara de la playa hacia tierra dentro por rebase de la duna, para 4 distintos niveles de agua ( $h=0.34$  m,  $0.39$  m,  $0.44$  m,  $0.49$ m). Asimismo, se realizó un experimento independiente sin plantas para caracterizar la hidrodinámica y transporte de sedimentos para cada nivel de agua. Se emplearon sensores de superficie (resistivos), sensores de presión, y corrientímetros (perfiladores acústicos Doppler).

En total, se construyeron ocho cajones de madera (Figuras 6b), con una capacidad volumétrica de  $0.191$  m<sup>3</sup>. Éstos fueron rellenos con arena sílica ( $D_{n50}=0.5$ mm) para generar un perfil promedio de duna costera con una pendiente topográfica de 1:4.5. inspirado en información morfológica de la duna generada en la playa de Sisal (Medellín & Torres-Freyermuth, 2021).

Los ensayos se realizaron con una onda solitaria con altura  $H=0.2$  m. Para medir la superficie se instalaron 17 sensores de nivel, y en dos puntos sobre la pendiente de arena se midió el flujo con velocímetros. Cada set de cajones de vegetación (Cuadro 2) fue sometido a 2 corridas de ola por cada nivel de agua, dando un total de 8 olas solitarias por cada set (32 ensayos totales).

Cuadro 2. Condiciones de los ensayos para cada set de vegetación.

		Set 1		Set 2		Set 3		Set 4	
Numero de ola	Nivel de agua (h)	<i>H. littoralis</i>	<i>C. rosea</i> – <i>C. edentula</i>	<i>C. rosea</i> - <i>Suaeda linearis</i> - <i>Cakile edentula</i>	Control	<i>C. edentula</i>	<i>S. linearis</i>	<i>C. rosea</i> - <i>S. linearis</i>	<i>C. rosea</i>
1	0.34 m								
2	0.34 m								
3	0.39 m								
4	0.39 m								
5	0.44 m								
6	0.44 m								
7	0.49 m								
8	0.49 m								

### 5.2.2 Medición morfológica

Para obtener la variación del perfil de la duna en cada uno de los tratamientos, se midió la morfología antes y después de cada ensayo (Figura 7c) dando un total de 9 perfiles por cada tratamiento de vegetación. Para ello, se utilizó un perfilador láser marca VTI, y con el software EPRO de la Universidad de Alborg se configuro para medir con precisión de 1 mma lo largo de un transecto, seleccionado de manera que no presentara vegetación para captar solamente el relieve de arena en cada tratamiento. También, se cuantificó en gramos el sedimento asociado al rebase de agua a partir del volumen de sedimento almacenado en el depósito de desbordamiento en el lado del sotavento (contenedores posteriores a la cresta de la duna).

Durante cada ensayo se tomaron videos desde diferentes posiciones con respecto a los cajones (vista frontal, trasera y laterales) para capturar de manera cualitativa el comportamiento de la vegetación y el perfil topográfico, frente a las olas.



**Figura 7.** Procedimiento experimental realizado en el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), (a) Traslado de cajones de zona de crecimiento de las plantas al canal de oleaje, (b) ensayos con onda solitaria, (c) transecto topográfico de playa previa y posterior a cada ensayo, (d) cuantificación del volumen de agua y sedimento captado en los cajones posterior a cada ensayo, (e) colocación de sedimento en vasos de precipitado y secado en el horno, (f) peso y división del sedimento en cuartos para obtener muestras representativas para la granulometría, (g) análisis granulométrico con el equipo CAMSIZER.

### 5.2.3 Medición del rebase de agua y sedimento en los reservorios.

El agua y sedimento captado dentro de los reservorios (Figura 7d) fueron vaciados posteriormente a cada ensayo con ayuda de una cubeta. El volumen del agua fue cuantificado a partir del volumen del reservorio, quitando el volumen correspondiente al sedimento. El sedimento captado de cada ensayo se sometió posteriormente a un tratamiento en el Laboratorio de sedimentos, donde el total de la muestra fue puesta en vasos de precipitado para secarla en un horno *Thermo Scientific* por 24 horas a 120°C. Terminando el tiempo de secado, cada muestra de sedimento fue pesada con una báscula analítica, y posteriormente se realizó un cuarteo para obtener una submuestra representativa para el análisis granulométrico utilizando el equipo *CAMSIZER* de la marca *Retsch Technology*. Este equipo, posee un software que realiza un análisis granulométrico por medio de imágenes a 30 Htz las cuales miden el tamaño y forma del sedimento, y finalmente obtiene parámetros estadísticos y la distribución del tamaño de grano. En la Figura 7 se encuentra ilustrado el procedimiento experimental realizado en el LIPC.

## 6 RESULTADOS

### 6.1.1 Tasas de crecimiento

Los resultados obtenidos del registro semanal de alturas a partir del día 45 desde su germinación, indican que los tratamientos individuales de *H. littoralis* y *C. rosea* presentaron el mayor crecimiento. En la Figura 8, panel *a* y *d* se observan alturas máximas de 85 cm y 90 cm respectivamente.

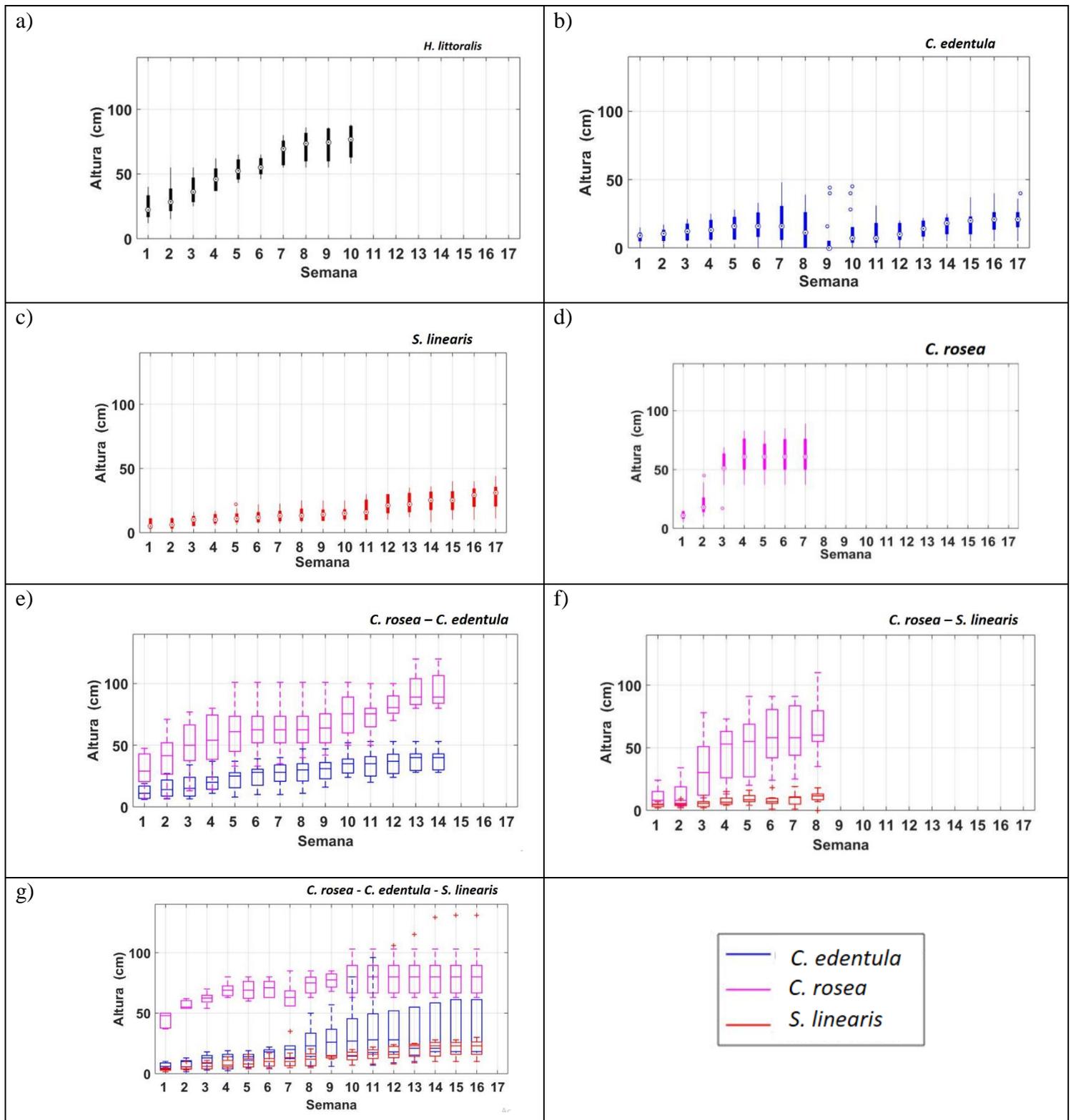


Figura 8. Crecimiento de las plántulas en cajones de crecimiento.: Panel a) *H. littoralis*; b) *C. edentula*; c) *S. linearis*; d) *C. rosea*; e) *C. rosea* - *C. edentula* ; f) *C. rosea* - *S. linearis*; g) *C. rosea* - *C. edentula* - *S. linearis*.

En el panel b de la Figura 8, se observa que *C. edentula* presenta alturas máximas de 48 cm en la semana 7, teniendo un crecimiento promedio de 14.24 cm a lo largo de las 17 semanas (Cuadro 3). Con respecto a *S. linearis* (panel c, Figura 8) se registró una altura máxima de 44 cm, con un crecimiento promedio de 16.64 cm (Cuadro 3). Por otra parte, en la Figura 8 se observa que los tratamientos con combinaciones de especies presentan el mismo tipo de crecimiento que de forma individual siendo *C. rosea* la especie con las tallas más altas, como se aprecia en la combinación del panel e) *C. rosea* y *C. edentula*, registrando individuos de hasta 120 cm. Asimismo, se observa que *S. linearis* presenta las menores tallas, tanto en solitario como en combinación, esto es consistente con la tasa de crecimiento que presentan las especies (Cuadro 4)

Cuadro 3. Promedio y desviación estándar del crecimiento de las especies estudiadas.

Especie	Crecimiento promedio	Desviación estándar
<i>H. littoralis</i>	51.15 cm	19.22
<i>C. rosea</i>	53.46 cm	27.20
<i>C. edentula</i>	14.24 cm	9.93
<i>S. linearis</i>	16.64 cm	8.9

Cuadro 4. Tasa de crecimiento promedio de las especies cm/año

Especie	cm/año
<i>H. littoralis</i>	261.62
<i>S. linearis</i>	64.23
<i>C. rosea</i>	151.84
<i>C. edentula</i>	42.12

Las especies utilizadas en los tratamientos combinados (con más de una especie (A) *C. rosea* - *C. edentula* - *S. linearis* (B) *C. rosea* – *C. edentula* (C) *C. rosea* – *S. linearis*; y en solitario muestran tasas de crecimiento con correlaciones altas, a excepción de las correlaciones menores a 0.50 del tratamiento de *C. edentula* con los tratamientos donde se encontraba esta especie combinada ((A) *C. rosea* - *C. edentula* - *S. linearis* y (B) *C. rosea* – *C. edentula*) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Correlación entre tasas de crecimiento de las tres especies utilizadas en los diferentes tratamientos, la especie que cuentan con una (A) corresponde a las que se encontraban en el tratamiento *C. rosea*- *C. edentula* - *S. linearis*, las *C. rosea* que cuentan con la letra (B) corresponden a las del tratamiento *C. rosea* - *C. edentula* , y las *C. rosea* que cuentan con una letra (C) corresponden a *C. rosea*- *S.linearis*, las *S.linearis* con letra (B) corresponden a las del *C. rosea*- *S.linearis*, las que no tienen letra se refieren a los tratamientos individuales.

<b>Especie</b>	<b>Especie</b>	<b>Correlación</b>
<i>C. rosea</i>	<i>C. rosea</i> (A)	0.9
<i>C. rosea</i>	<i>C. rosea</i> (B)	0.95
<i>C. rosea</i>	<i>C. rosea</i> (B)	0.94
<i>C. rosea</i> (A)	<i>C. rosea</i> (B)	0.89
<i>C. rosea</i> (B)	<i>C. rosea</i> (C)	0.97
<i>C. rosea</i> (A)	<i>C. rosea</i> (C)	0.84
<i>S. linearis</i>	<i>S. linearis</i> (A)	0.98
<i>S. linearis</i>	<i>S. linearis</i> (B)	0.95
<i>S. linearis</i> (A)	<i>S. linearis</i> (B)	0.95
<i>C. edentula</i>	<i>C. edentula</i> (A)	0.37
<i>C. edentula</i>	<i>C. edentula</i> (B)	0.39
<i>C. edentula</i> (A)	<i>C. edentula</i> (B)	0.96

### 6.1.2 Estructuras aéreas peso fresco y seco

En el Cuadro 6 se observa que el tratamiento de *H. littoralis* tiene el valor total más alto de peso fresco aéreo (7,479.7 gr.), seguido del tratamiento de *C. rosea* - *C. edentula* (237.7 gr.), el peso total más bajo corresponde al tratamiento de *C. edentula* (89.9 gr).

En el caso de las estructuras aéreas secas, se observa que el tratamiento con mayor peso es *H. littoralis* con un peso seco total aéreo de 885.29 gr., seguido del tratamiento *C. rosea*- *C. edentula* que obtuvo 51.5 gr.

Cuadro 6. Peso aéreo fresco y seco para los 7 tratamientos.

Tratamiento	Enfrente (gr)	Enfrente seco (gr)	Medio (gr)	Medio seco (gr)	Atrás (gr)	Atrás seco (gr)	Tejido perdido durante el ensayo o cosecha general (gr)	Tejido perdido durante el ensayo o cosecha general, seco (gr)	Peso fresco total aéreo en gramos (gr)	Peso seco total aéreo (gr)
<i>H. littoralis</i>	3,507.30	333.39	2,655.30	320.40	1,317.10	231.50	-	-	7,479.70	885.29
<i>C. rosea</i>	55.6	13.9	38.6	9.6	37.7	7.7	6.4	1.1	138.3	32.3
<i>C. edentula</i>	-	-	-	-	-	-	89.9	11.3	89.9	11.3
<i>S. linearis</i>	54.8	9.8	50.3	8.3	90.5	14.3	23.8	2.1	219.4	34.5
<i>C. rosea - C. edentula</i>	51.6	13	79.7	18	71.1	16	35.3	4.5	237.7	51.5
<i>C. rosea - S. linearis</i>	21.5	6.1	10.1	2.4	17.6	5.2	43.7	8.4	92.9	22.1
<i>C.rosea - C.edentula - S. linearis</i>	40.8	11.4	60.7	16.3	42.5	11.2	-	-	144	38.9

### 6.1.3 Estructuras subterráneas, peso fresco y seco

El tratamiento con mayor peso fresco en estructuras subterráneas fue *H. littoralis*, presentando un total de 1,583.1 gr. En el Cuadro 7 se observa que fue seguido del tratamiento *C. rosea - C. edentula - S. linearis*, el cual presentó un valor total de 59.2 gr. Asimismo, el peso fresco de estructuras subterráneas más bajo, corresponde a *C. edentula*.

En el caso de las estructuras subterráneas, el tratamiento con mayor peso seco volvió a ser *H. littoralis* con un total de 117.2 gr., seguido del tratamiento *C. rosea - C. edentula* con 9.5 gr. En el Cuadro 7 se observan los pesos de los 7 tratamientos.

Cuadro 7. Peso radicular fresco y seco para los 7 tratamientos.

Tratamiento	Enfrente (gr)	Enfrente seco (gr)	Medio (gr)	Medio seco (gr)	Atrás (gr)	Atrás seco (gr)	Tejido perdido durante el ensayo o cosecha general (gr)	Tejido perdido durante el ensayo o cosecha general seco (gr)	Peso fresco radicular (gr)	Peso seco radicular (gr)
<i>H. littoralis</i>	861.80	52.00	450.00	37.30	271.00	27.90	-	-	1,583.10	117.20
<i>C. rosea</i>	7.5	1.8	5.3	1.5	4.2	1	-	-	17	4.3
<i>C. edentula</i>	-	-	-	-	-	-	3.1	-	3.1	0.8
<i>S. linearis</i>	0.5	0.3	13	0.5	3.8	1.3	-	-	5.6	2.1
<i>C. rosea - C. edentula</i>	10.8	2.5	16.5	4	9.3	2	10.1	1	46.7	9.5
<i>C.rosea - S. linearis</i>	3.1	0.9	1.3	0.4	2	0.5	0.5	0.1	6.9	1.9
<i>C.rosea - C.edentula - S. linearis</i>	8	2.5	7	2.1	5.9	2		-	20.9	6.6

En el Cuadro 8 podemos observar la relación entre el peso aéreo seco y el peso radicular seco para los 7 tratamientos, en los casos anteriores, el tratamiento de *H. littoralis* obtuvo los mayores valores de peso fresco y seco, tanto aéreo como radicular, sin embargo, en las proporciones (relación tallo/raíz), los tratamientos que mostraron el valor más bajo fueron los tratamientos de: *C. rosea - C. edentula* y *C. rosea - C. edentula - S. linearis*, con una proporción de 1:5, seguidos de los tratamientos en solitario para *H. littoralis* y *C. rosea* que presentaron una proporción de 1:7. La mayor proporción entre la parte aérea y la subterránea la obtuvieron los tratamientos de *S. linearis* y el tratamiento de *C. edentula* con 1:16 y 1:14 respectivamente.

Cuadro 8. Pesos totales de estructuras aéreas y subterráneas frescas y secas, así como su relación

Tratamiento	Estructuras aéreas		Estructuras subterráneas		Relación tallo/raíz peso fresco	Relación tallo/raíz peso seco
	Peso fresco (gr)	Peso seco (gr)	Peso fresco (gr)	Peso seco (gr)		
<i>H. littoralis</i>	7,479.70	885.29	1,583.10	117.2	4.70	1:7
<i>C. rosea</i>	138.3	32.3	17	4.3	8.1	1:7
<i>C. edentula</i>	89.9	11.3	3.1	0.8	29	1:14
<i>S. linearis</i>	219.4	34.5	5.6	2.1	39.2	1:16
<i>C. rosea - C. edentula</i>	237.7	51.5	46.7	9.5	5.1	1:5
<i>C.rosea - S. linearis</i>	92.9	22.1	6.9	1.9	13.5	1:11
<i>C.rosea - C.edentula - S. linearis</i>	144	38.9	20.9	6.6	6.9	1:6

#### 6.1.4 Tipo de raíz

La especie *H. littoralis* presenta raíces tipo fasciculadas o fibrosas. Su desarrollo durante el crecimiento en los cajones fue superficial, con numerosas raíces que se extendían hacia las paredes laterales principalmente en dirección horizontal (Figura 9).



**Figura 9.** Raíces de *H. littoralis*

En el caso de *C. rosea* se encontraron raíces ramificadas, con dirección lateral y vertical a lo largo de los cajones donde crecieron. Las raíces se observaron enredadas entre

individuos y con nódulos radiculares. En contraste con las demás especies, estas raíces fueron las más largas (Figura 10).



**Figura 10.** Raíces de *C. rosea*

La especie *S. linearis* presentó raíces primarias, estas contaban con una raíz principal acompañada de varias raíces secundarias más delgadas y de menor tamaño a diferencia de la raíz principal, las raíces de esta especie se encontraban focalizadas debajo de la planta (Figura 11).



**Figura 11.** Raíces de *S. linearis*

Con respecto a *C. edentula*, también presentó raíces primarias, con una raíz principal acompañada de varias raíces secundarias más delgadas y de menor tamaño. Las raíces de

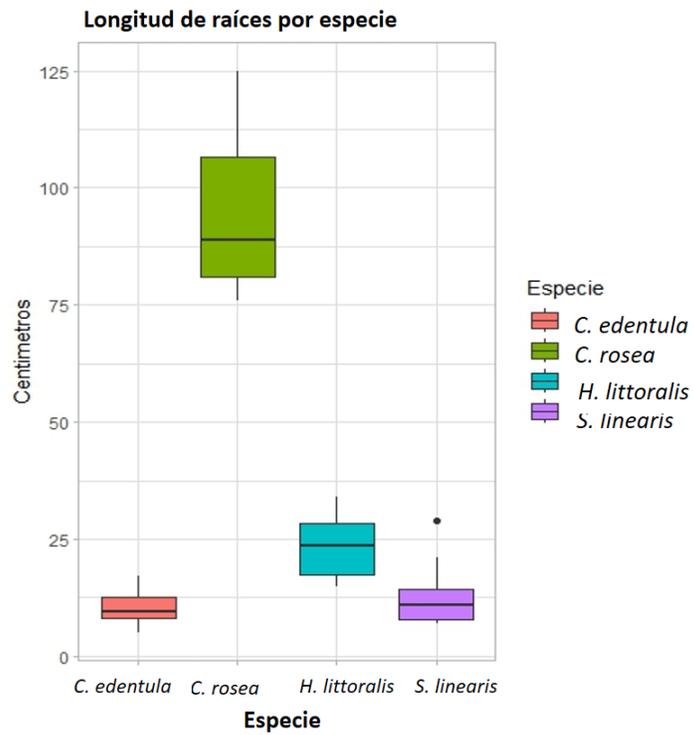
esta especie eran sumamente delgadas y frágiles y su crecimiento tenía dirección principalmente debajo de la planta en vez de a los lados (Figura 12).



**Figura 12.** Raíces de *C. edentula*

### 6.1.5 Longitud de raíces

Las diferentes especies utilizadas para el experimento difieren en la longitud de sus raíces, siendo *C. rosea* el tratamiento que presentó las raíces más largas (min. 75 cm, max.125 cm), (Figura 13).



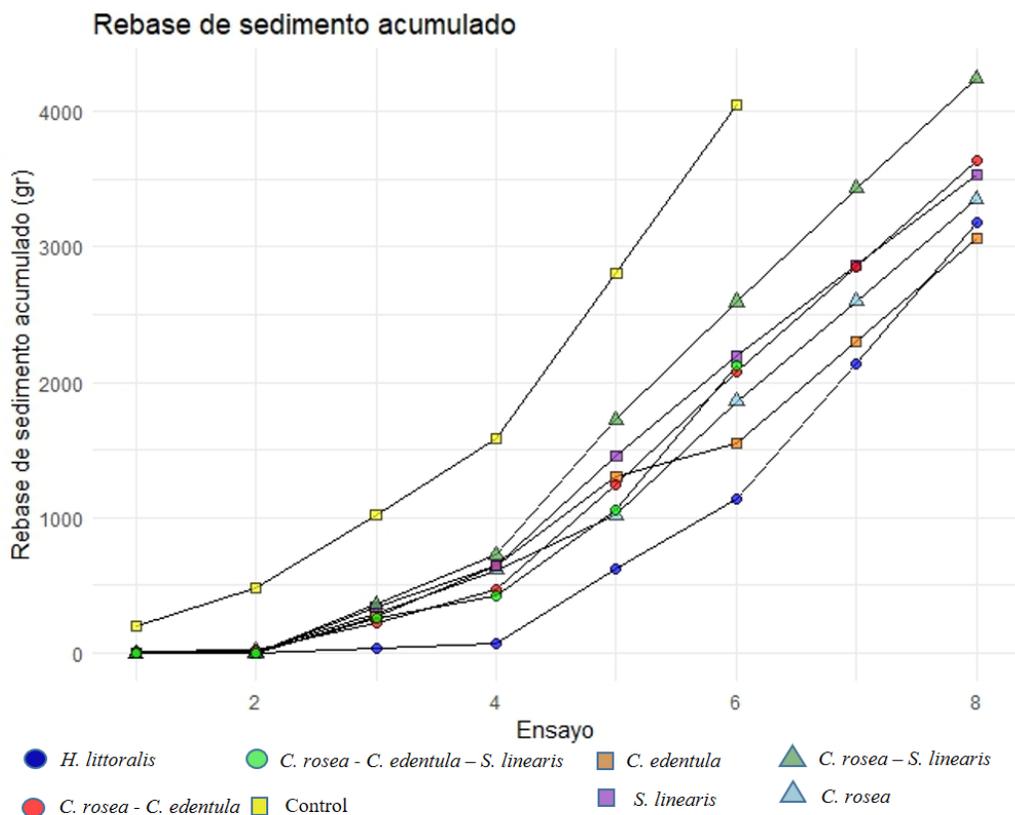
**Figura 13.** Longitud de raíces de todas las especies estudiadas. Tratamiento en solitario.

## 6.2 Modelado físico en el laboratorio

### 6.2.1 Volúmenes de Rebase de agua y sedimento en reservorios.

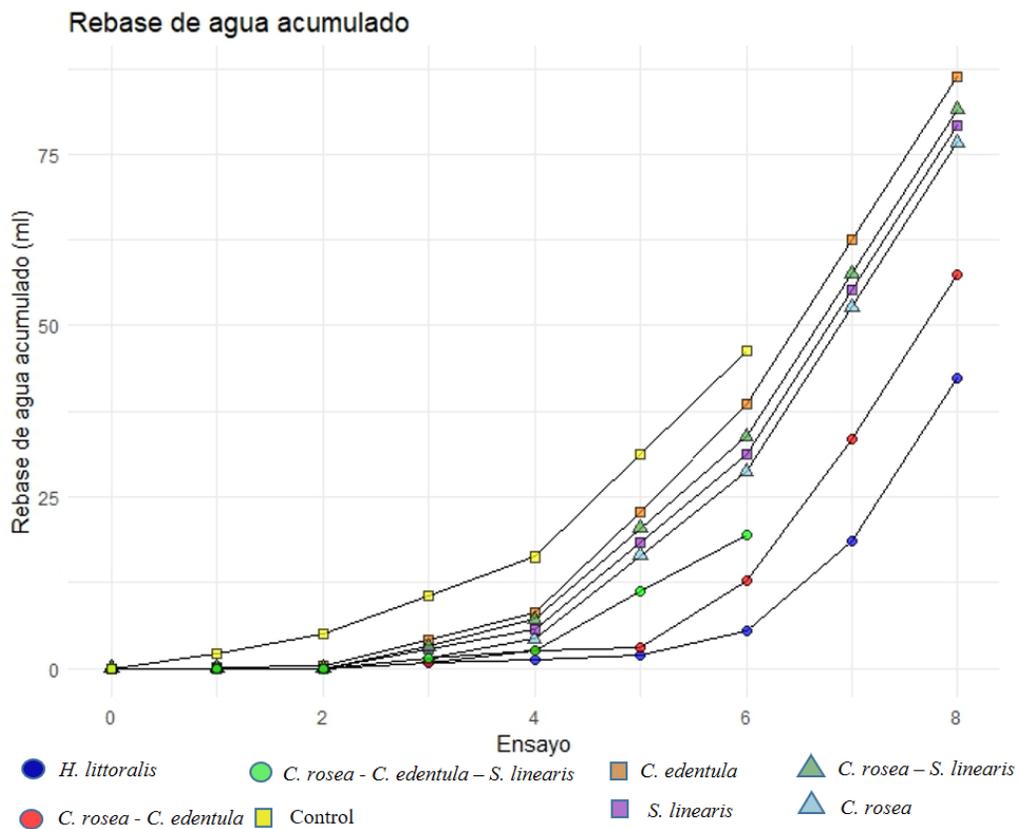
De manera general, los resultados muestran que el movimiento de sedimento (Figura 14) y rebase de agua (Figura 15) cuantificados en los reservorios fue mayor en el tratamiento control (cuando las plantas estuvieron ausentes), en comparación a los 7 tratamientos con vegetación.

Para el caso de rebase de sedimento en los reservorios, hasta el 4to ensayo, los tratamientos combinados con más de una especie impidieron el paso del sedimento al reservorio en comparación con los tratamientos en solitario, el tratamiento con mayor rebase después del control fue el de *C. rosea* - *S.linearis*, seguido del tratamiento *C. rosea* - *C. edentula*. El tratamiento que controló de mejor manera el paso del sedimento al reservorio fue el de *H. littoralis* (Figura 14).



**Figura 14.** Sedimento acumulado en los reservorios traseros después de cada ensayo.

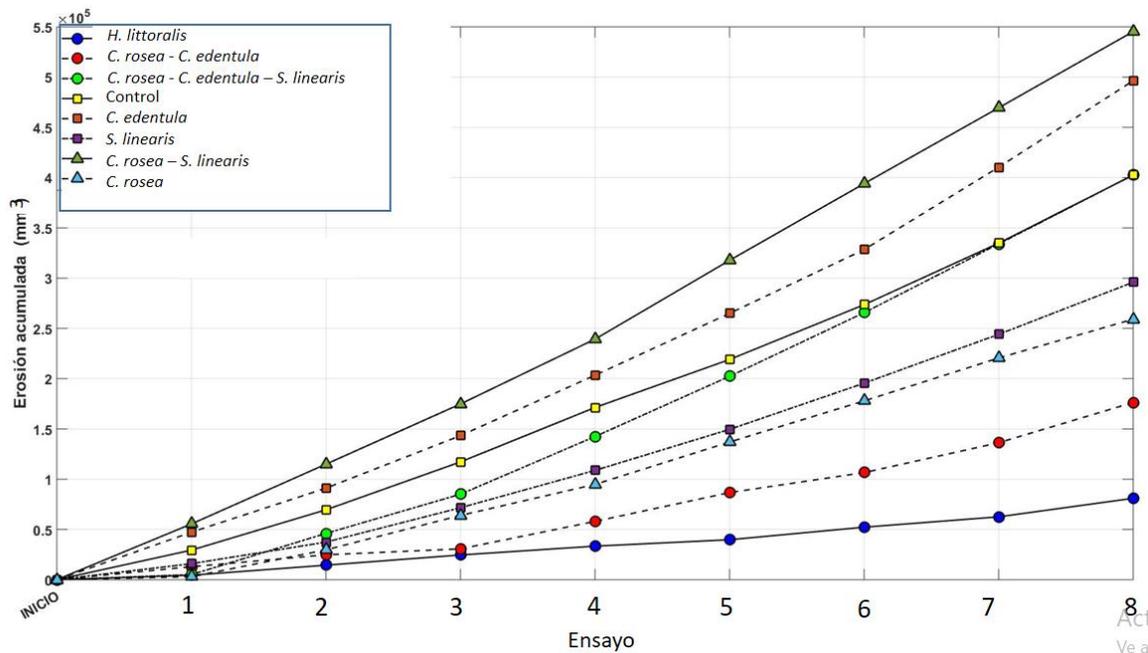
En el caso del rebase de agua, el segundo tratamiento con mayor rebase fue *C. edentula*, seguido del tratamiento *C. rosea*- *S. linearis*. Similar al caso anterior, las combinaciones de especies presentan menor rebase que de manera individual, donde el rebase de agua es mayor. (Figura 15).



**Figura 15.** Rebase de agua acumulada en los reservorios de acrílico después de cada ensayo.

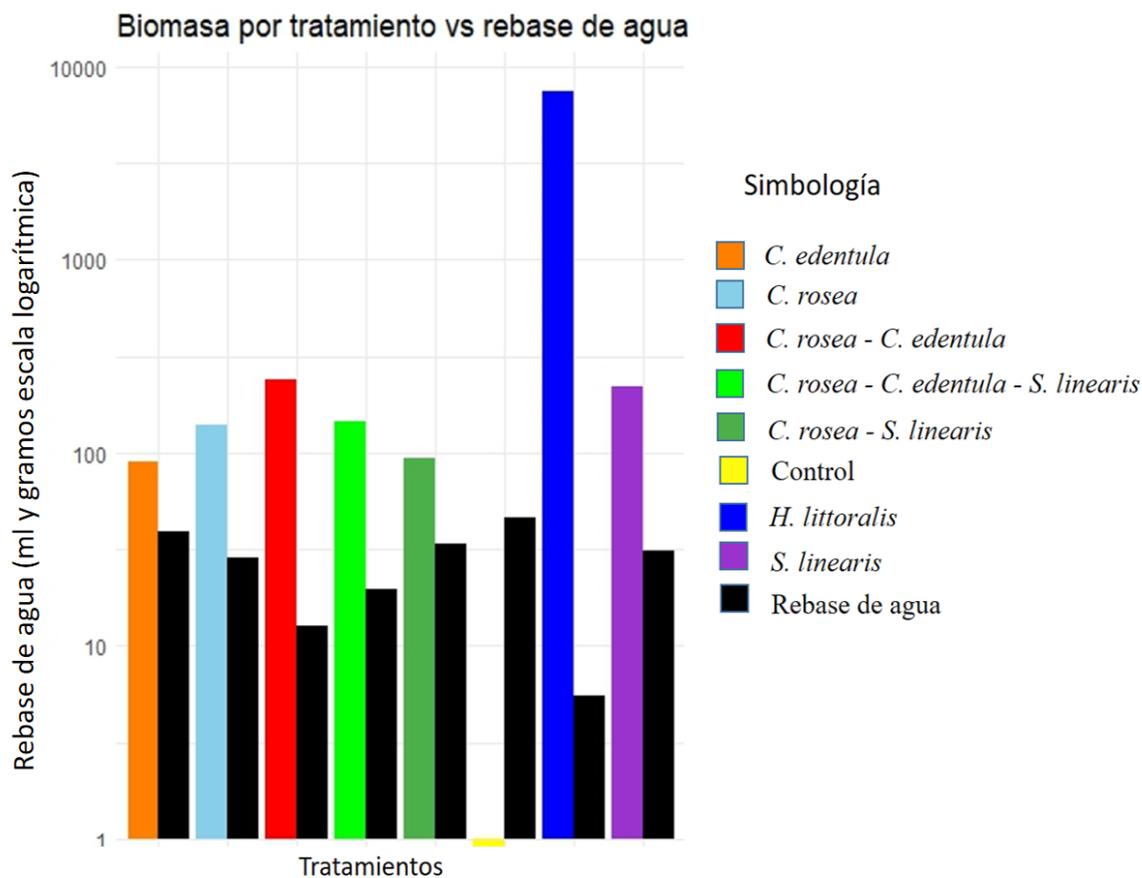
### 6.2.2 Morfodinámica de la duna

Los resultados en la Figura 16 muestran que los tratamientos con vegetación, estabilizan los sedimentos de la duna en diferente medida dependiendo de las especies y su combinación. En la mayoría de los casos, los tratamientos con vegetación fueron más efectivos al retener el sedimento en el perfil en la duna a comparación de los resultados encontrados en el tratamiento sin vegetación (control). El tratamiento que retuvo mayor cantidad de sedimentos en el perfil fue *H. littoralis*, seguido del tratamiento con *C. rosea - C. edentula*. Los tratamientos de *C. edentula* y *C. rosea - S. linearis* tuvieron como resultado mayor movimiento de sedimento (erosión acumulada) en los perfiles realizados después de cada ensayo, inclusive mayor que el tratamiento control (sin vegetación).



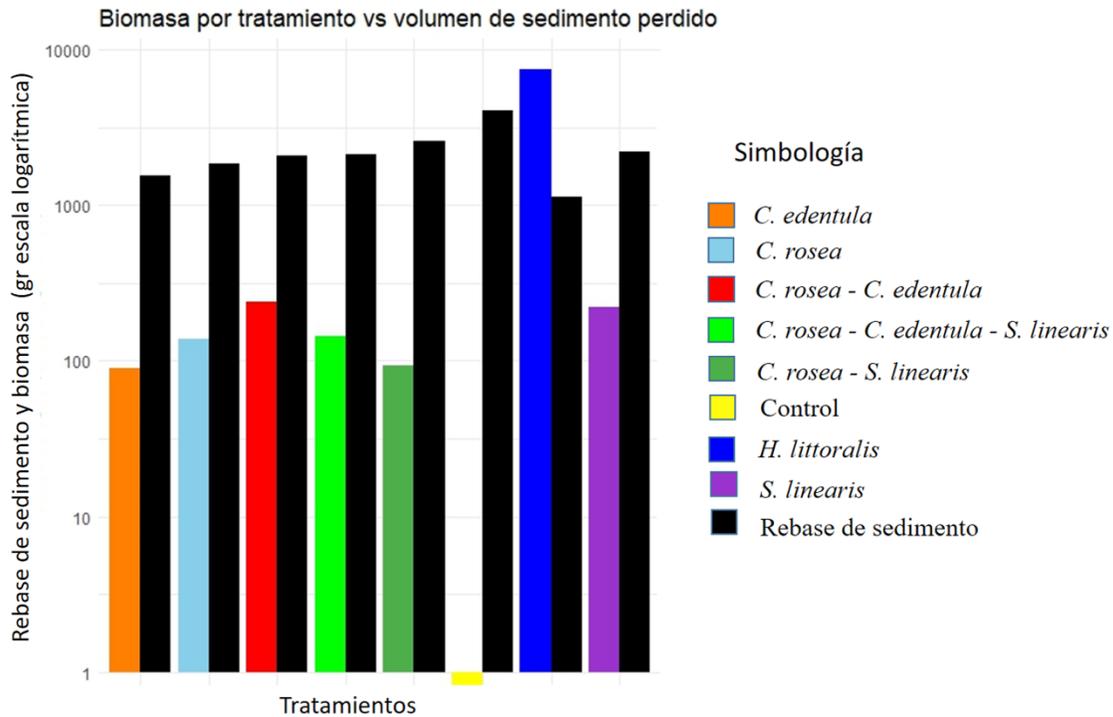
**Figura 16.** Volumen de erosión acumulada en los 8 ensayos, volumen calculado a través de 8 transectos sobre el mismo sitio dentro de los diferentes tratamientos posterior a cada ensayo.

### 6.2.3 Interacción biomasa vs volúmenes de rebase de agua y sedimento.



**Figura 17.** Biomasa (peso fresco total aéreo) por tratamiento comparado con el rebase de agua en los reservorios traseros, cada barra negra en el gráfico representa el rebase de agua para cada tratamiento.

En la figura 17 se observa que el tratamiento control (ausente de biomasa) tiene el valor más alto de rebase de agua, mientras que el tratamiento con *H. littoralis* tiene el valor más bajo de rebase (con la biomasa más alta) Otros tratamientos como "*C. rosea - C. edentula - S. linearis*" y "*C. rosea - C. edentula*" igual obtuvieron valores altos de biomasa, presentando menores rebases de agua.



**Figura 18.** Biomasa (peso fresco total aéreo) por tratamiento vs volumen de sedimento en los reservorios traseros, cada barra negra en el gráfico representa el sedimento acumulado en los reservorios para cada tratamiento.

La Figura 18 muestra que "*H. littoralis*" tiene la biomasa más alta y la menor pérdida de sedimentos, destacándose significativamente sobre los otros tratamientos. En términos de pérdida de sedimento, representado por las barras negras, el tratamiento de control muestra la pérdida de sedimento más alta. Otros tratamientos como "*C. rosea - C. edentula - S. linearis*", "*C. rosea - C. edentula*" y "*C. edentula*", con biomazas menores, presentan pérdidas similares de sedimento que el tratamiento en solitario de *S. linearis*, que presentó una biomasa mayor que los tratamientos combinados.

## 7 DISCUSION

### 7.1 Vegetación

En cuanto al crecimiento de la vegetación, los tratamientos de *C. rosea* e *H. littoralis*, presentaron el mayor crecimiento, a pesar de que en el caso de *H. littoralis* los bulbos fueron colectados cinco semanas después del inicio de las mediciones. Con respecto al crecimiento de *C. edentula*, se observó que un individuo llegó a medir más de 100 cm en un crecimiento horizontal del que brotaron nuevas ramificaciones.

En los tratamientos *C. edentula* y *C. rosea* - *S. linearis*, en la semana 7 de registro de crecimiento, se presentó una plaga de mosquita blanca, afectando la talla y la sobrevivencia principalmente durante las semanas 8 y 9, lo cual generó la mortalidad de más de la mitad de los individuos (28 de 45) los cuales fueron sustituidos por individuos nuevos que se estaban desarrollando paralelamente fuera del cajón experimental. En este sentido, el tratamiento de *C. rosea* - *S. linearis* presentó también una mortalidad de 6 individuos de *C. rosea* y 11 de *S. linearis*, y el resto de las plantas sufrieron infestación, pérdida de hojas y afectaciones en el crecimiento. Al respecto, Basilio 2006 menciona que el daño de una plaga no solamente es causado por la alimentación del insecto (succión de savia de la planta), sino que también producen sustancias llamadas fumaginas, las cuales promueven el desarrollo de hongos que afectan el desarrollo de la planta. Estos dos tratamientos se encontraban afectados al ser sometidos a los experimentos dentro del canal de oleaje. Muy probablemente, como resultado de la exposición a la plaga, la evaluación de las estructuras aéreas y subterráneas de estos tratamientos mostró los menores pesos para ambos. En cuanto a la relación entre el peso seco de las estructuras aéreas y subterráneas, los tratamientos con menor proporción fueron *C. rosea* - *C. edentula* y *C. rosea* - *C. edentula* - *S. linearis* con 1:5, estos tratamientos son los que visual y cualitativamente lucían mejor al momento de los experimentos en el canal de oleaje, seguido de los tratamientos de *H. littoralis* y *C. rosea* con 1:7.

## 7.2 Interacción oleaje-vegetación

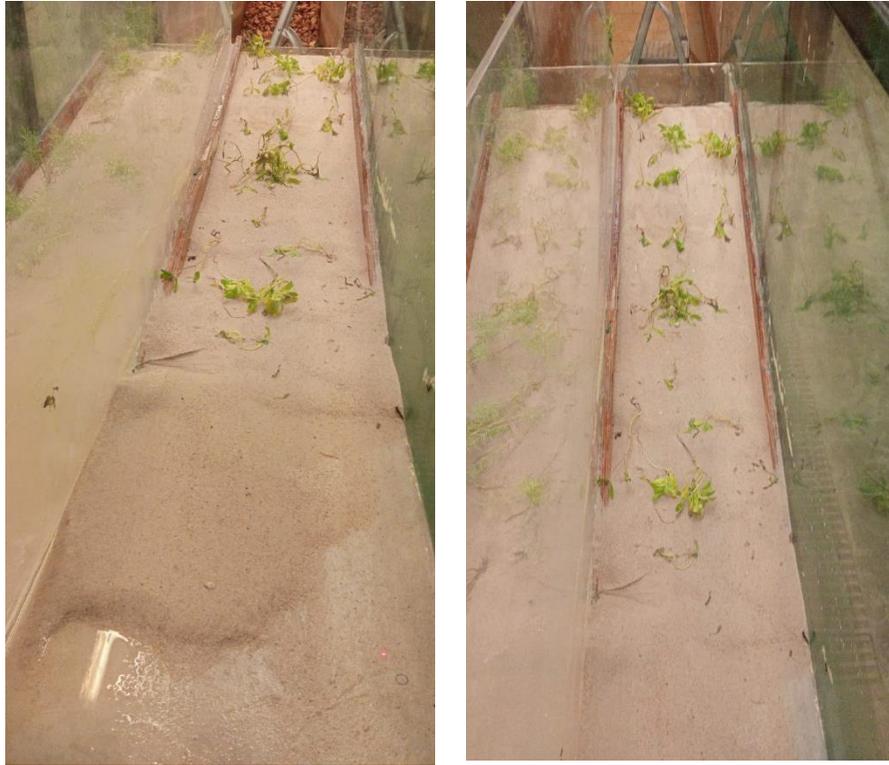
El objetivo de esta investigación fue analizar la capacidad protectora de la vegetación pionera sobre la retención de sedimentos en un canal de oleaje. Los resultados muestran que las diferentes especies y combinaciones de plantas pioneras protegen de diferente manera la duna embrionaria en contraste al tratamiento control (duna sin vegetación). En la mayoría de los casos, no solamente los tratamientos con vegetación redujeron el movimiento de sedimento sobre los perfiles de arena, sino que, además redujeron el paso del sedimento y el rebase de agua sobre la cresta de la duna. Esta investigación es evidencia experimental del rol protector que presentan las diferentes asociaciones de vegetación pionera de la península de Yucatán de manera general. Sin embargo, a pesar de que el tratamiento de *H. littoralis* fue el que presentó menor rebase de sedimento, menor rebase de agua y menor movimiento de sedimentos (especie con hojas verticales frondosas de hasta 88 cm durante los ensayos, con una estructura subterránea tipo bulbo con raíces que se extendían lateralmente y se entrelazaban entre individuos por su cercanía), esta especie no crece aislada como se sometió en el experimento, por lo que en caso de restauración, no se recomienda generar monocultivos con esta especie, si no realizar asociaciones que permitan crear una zonación para que otras especies se puedan establecer, comenzando con la ayuda de especies fijadoras de sustratos como lo es *C. rosea* (especie con las raíces más largas y resistentes), quien en este experimento demostró que en asociación con *C. edentula* evitaron menor rebase de agua, seguido de la asociación *C. rosea*- *C. edentula*- *S. linearis*, aunque para el caso del rebase de sedimento, casi todos los tratamientos obtuvieron valores semejantes, pues para la formación de dunas los sedimentos que se encuentran en la parte trasera de las playas son depositados por acción de las olas (Mendoza et al., 2021).

Estos resultados concuerdan con investigaciones anteriores, en este trabajo se encontró que las diferentes asociaciones de plantas y ellas de manera individual, previenen la pérdida de arena, sin embargo, estos datos coinciden con que esta función está condicionada por la especie, y el conjunto de ellas, así como por el tiempo que dure la tormenta (Silva et al. 2016; Maximiliano et al. 2019). Aunado a ello, Feagin et al. (2019) resaltó la importancia de las estructuras aéreas y subterráneas de las plantas al momento de responder a la

hidrodinámica del oleaje. Estos estudios fomentan el uso de la vegetación de duna costera al momento de desarrollar alguna estrategia de protección costera.

En el caso de los perfiles de arena, los resultados muestran que el tratamiento de *C. edentula* y el tratamiento *C. rosea* - *S. linearis* no retuvieron la arena en los perfiles, esto se puede relacionar con el mal estado de salud de los individuos de estos cajones al ser sometidos a los ensayos en el canal de oleaje, ya que ambos tratamientos se encontraban infestados por una plaga de mosquita blanca al realizarse los ensayos. Los resultados con respecto al rebase de agua en los reservorios muestran que el control fue el tratamiento que obtuvo los valores más altos, seguidos por los tratamientos con plaga (*C. edentula* y *C. rosea*- *S. linearis*). Con respecto al rebase de sedimento depositado en los reservorios, nuevamente el tratamiento control obtuvo los valores más altos, seguido del tratamiento *C. rosea* - *S. linearis*. En el tratamiento de *C. edentula* (uno de los infestados) se reportó poco sedimento en los reservorios (lugar 5 de 7, donde 1 es el tratamiento que reportó mayor sedimento), ya que la arena movilizada por las olas y la presencia de vegetación en mal estado generaron que la arena se deslajara hacia el frente, sin rebasar así la cresta de la duna (Figura 19).

Es importante considerar la capacidad de las diversas especies de plantas, como *C. rosea*, *H. littoralis*, *S. linearis* y *C. edentula*, así como su combinación, para integrarlas en proyectos de infraestructura costera verde, ya que ofrecen servicios ecosistémicos como la mitigación de la erosión y el control de inundaciones. Estos resultados destacan la importancia de integrar estrategias de conservación, restauración y propagación de la vegetación costera a través de buenas prácticas en los planes de manejo costero. Esto es crucial para promover la resiliencia de los ecosistemas costeros frente al cambio climático y otros impactos antropogénicos, asegurando la sostenibilidad a largo plazo de nuestras costas.



**Figura 19.** Depósito de arena deslavado al frente de la duna en el tratamiento *C. edentula*.

## 8 CONCLUSIONES

Esta investigación evidencia de manera experimental el rol protector que presentan las diferentes asociaciones de vegetación pionera de la península de Yucatán. Los resultados sugieren que la vegetación costera presente en dunas embrionarias juega un papel importante en la retención de sedimento y en el control de inundaciones al ser impactadas por el oleaje, siempre y cuando las estructuras aéreas y subterráneas de la vegetación se encuentren en buenas condiciones. Se observó que la capacidad protectora aumenta cuando las especies se combinaron, destacando a la especie *H. littoralis* como la más efectiva en estas funciones.

Dados los objetivos de esta investigación se concluye que los tratamientos donde crecieron *C. rosea* e *H. littoralis* presentan tasas de crecimiento mayores en comparación con *C. edentula* y *S. linearis*. Además, se observó que la vegetación de duna costera ayuda a reducir el movimiento del sedimento en contraste con un perfil sin vegetación. Finalmente, la proporción entre las estructuras aéreas y subterráneas fue menor en *C. rosea* e *H. littoralis* a diferencia de *C. edentula* y *S. linearis*, observando que en los tratamientos con menor proporción área/subterránea se presentó menor erosión (Cuadro 8). Ante esto, el deterioro de la vegetación costera sugiere posibles desafíos en la provisión de los servicios ecosistémicos de protección de calidad, derivados del buen estado de salud de la vegetación de las dunas costeras. Estos hallazgos resaltan la importancia de mantener la integridad de la vegetación costera, tanto en su hábitat natural como en un vivero, para garantizar su función de protección como ecosistemas costeros.

Aunque se deben realizar más estudios, nuestros resultados sugieren que la vegetación pionera presente en las dunas costeras de la península de Yucatán contribuye a la primera protección terrestre que reduce la energía del oleaje, (además de su importante valor en los procesos de sucesión del ecosistema de dunas costeras). Es por ello que, al momento de restaurar, es crucial determinar las comunidades y especies vegetales que existen en la zona. Esto incluye la identificación de especies nativas, exóticas, invasoras y/o parásitas para que las estrategias de restauración sean efectivas y contribuyan a fortalecer la resiliencia de estos ecosistemas frente a los impactos ambientales y climáticos.

Los resultados de este estudio proporcionan información crucial para el manejo sostenible de las dunas costeras, confirmando cuantitativamente su importancia como uno de los pilares a considerar en la adaptación costera basada en ecosistemas.

## 9 REFERENCIAS

- Álvarez, R., Mendoza, G., Pérez-, C., & Chiappa, X. Efecto del sitio de procedencia sobre los atributos de las semillas de *Cakile edentula* (Brassicaceae), especie estabilizadora de duna costera Effect of seed provenance on seed traits of *Cakile edentula* (Brassicaceae), a coastal dune stabilizing species.
- Alcántara, J., Costas, S., Delgado, I., Alejo, I., Alonso, I., & Hernández, L. (2005). Factores que controlan la interacción sedimentaria en el sistema duna-playa. *Geomorfología Litoral i Quaternari. Universidad de Valencia, València*, 45-58.
- Aguirre, J.(2021) Caracterización ambiental y geomorfológica de playas y dunas costeras de Yucatán. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Badillo, M., Mendoza, G., Salinas, L. H., Robles, P. J., Calderón, C., Arceo, D., Garnica A., Teutli, C., Salazar-, C. G., Chiappa, X., & Gallardo A. (2020). Guía de servicios ecosistémicos de la duna costera de la península de Yucatán.
- Baldock, T., Hughes, M., Day K., Louys,J. (2005) Swash overtopping and sediment overwash on a truncated beach, *Coastal Engineering*, Volume 52, Issue 7, Pages 633-645,
- Basilio , D. (2006). Efecto de condiciones de cultivo, aceites y dispersantes en la viabilidad y virulencia de conidios de *Paecilomyces fumosoroseus*, patógeno de la mosquita blanca (Homoptera: Aleyrodidae). Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México

Benseny, G. (2013). Gestores costeros. De la teoría a la práctica: una aplicación en áreas litorales.

D'Alessandro, F., Tomasicchio, G.R., Frega, F., Leone, E., Francone, A., Pantusa, D.,Barbaro, G., Foti, G. Beach–Dune System Morphodynamics. *J. Mar. Sci. Eng.* **2022**, *10*, 627. <https://doi.org/10.3390/jmse10050627>.

Duran, R., Torres, W., Espejel, I. (2011) Vegetación de dunas costeras. Revista diversidad y Desarrollo Humano en Yucatán I Ecosistemas y Comunidades.

Canul,, R. (2020) Desarrollo de una metodología para el control de la erosión y disminución de la vulnerabilidad costera : un enfoque a gran escala. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México

Calafat , A., Vírveda, S., Lovera , R., Lucena, J. R., Bladé , C., Rivero , L., & Ninot, J. (2017). Resiliencia en sistemas dunares litorales altamente antropizados: la restauración del sistema dunar de la playa del Remolar (Viladecans, Barcelona). *Geo-Temas*, 2017, vol. 17, p. 179-182.

Caso, R. (2016) Aplicación de una herramienta numérica para la predicción de la evolución de playa con duna en presencia de vegetación Tesis de maestría . Universidad Nacional Autónoma de México

Cuevas, A., & Euán, J. (2009). Morfodinámica del perfil de playa con sedimentos carbonatados en la Península de Yucatán. *Ciencias marinas*, 35(3), 307-320.

Enríquez, G. (2003). Criterios para evaluar la aptitud recreativa de las playas en México: una propuesta metodológica. *Gaceta Ecológica*, 68, julio–septiembre, 55–68. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906806.pdf>

Feagin, R., Furman, M., Salgado, K., Martinez, M. L., Innocenti, R. A., Eubanks, K., ... & Silva, R. (2019). The role of beach and sand dune vegetation in mediating wave run up erosion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 97-106.

Feagin, R., Innocenti, R., Bond, H., Wengrove, M., Huff, T., Lomonaco, P., Tsai, B., Puleo J., Pontiki, M. Figlus, J., Chavez, V, & Silva, R. (2023) Does vegetation accelerate coastal dune erosion during extreme events?.*Sci. Adv.***9**, eadg7135.

Fernández, E., & Garrote, J. (2002) Geomorfología y restauración dunar. Research gate

Fernández, T., Duo, E., & Ciavola, P. (2020). Dune reconstruction and revegetation as a potential measure to decrease coastal erosion and flooding under extreme storm conditions. *Ocean & coastal management*, 188, 105075.

Gracia, F., Hernández L., Hernández, A. I., Sanjaume, E. & Flor, G., 2009. 2110 Dunas móviles embrionarias. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 54 p.

Hanley, M. E., Hoggart, S. P. G., Simmonds, D. J., Bichot, A., Colangelo, M. A., Bozzeda, F., ... & Thompson, R. C. (2014). Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. *Coastal Engineering*, 87, 136-146.

IFCR (2021). Las soluciones basadas en la naturaleza. (2010). Urbanización resiliente. Primera respuesta al cambio climático en las costas del Golfo de México. *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*, 67-90.

iNaturalistMX. Disponible en <https://www.naturalist.mx>. Acceso [16/06/2024].

- Ley, C., Gallego, J., & Vidal, C. (2007), Manual de restauración de dunas costeras. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino.
- Leewis, L., Van, P. M., Rozema, J., & Janssen, G. M. (2012). Does beach nourishment have long-term effects on intertidal macroinvertebrate species abundance?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113, 172-181.
- Lonard, R. I., Judd, F. W., Stalter, R., & Brown, J. J. (2016). A Review of the North American Halophyte *Suaeda linearis* (Ell.) Moq. *Sabkha Ecosystems: Volume V: The Americas*, 73-84.
- López, M. (2007). Germinación, establecimiento y crecimiento de seis especies en matorrales de dunas costeras. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maun, M. A. (2009). The biology of coastal sand dunes. Oxford University Press.
- Marcomini, S. C., & López, R. A. (2006). Geomorfología costera y explotación de arena de playa en la provincia de Buenos Aires y sus consecuencias ambientales. *Revista Brasileira de geomorfologia*, 7(2), 61-71.
- Malavasi, M., Santoro, R., Cutini, M., Acosta, A. T. R., & Carranza, M. L. (2016). The impact of human pressure on landscape patterns and plant species richness in Mediterranean coastal dunes. *Plant Biosystems-an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 150(1), 73-82.
- Mata, M., Garza J.R. & Salles P. 2016. Camino a la Resiliencia: Monitoreo Socioeconómico de Akumal, Q. Roo. LANRESC, Yucatán, México.

- Maximiliano, C., Salgado, K., Martínez, M. L., Mendoza, E., Silva, R., Guevara, R., & Feagin, R. A. (2019). Does the functional richness of plants reduce wave erosion on embryo coastal dunes?. *Estuaries and Coasts*, 42, 1730-1741.
- Mejia, R. (2018) Dinámica eólica en dunas costeras del centro del estado de Veracruz, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.
- Mendoza, E., Odériz, I., Martínez, M. L., & Silva, R. (2017). Measurements and modelling of small scale processes of vegetation preventing dune erosion. *Journal of Coastal Research*, (77 (10077)), 19-27.
- Mendoza G., Martínez, M. L., & Lithgow, D. (2014). Biological flora of coastal dunes and wetlands: *Canavalia rosea* (Sw.) DC. *Journal of Coastal Research*, 30(4), 697-713.
- Mendoza G., Méndez D., Paredes A., Giraldo M. E., Arancibia E., Rioja R. (2021). Perception and social values regarding the ecosystem services of beaches and coastal dunes of Yucatan. *Sustainability*. 13 (7): 3592.  
<https://doi.org/10.3390/su13073592>. FI: 3.473.
- Mendoza G., Zepeda C., Francisco V., Hernández V., Hoil D., Secaira F., Aguirre J., Rioja R. (2022). Manual para la restauración de dunas costeras de la Península de Yucatán. ENES-Mérida. p. 139
- Meza, T. (2022), Perspectivas locales sobre el turismo en Sisal, Yucatán y sus implicaciones en la conservación de los ecosistemas de playas y dunas costeras en el contexto de la designación de pueblo mágico. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México

- Morales, J. (2009). La península que surgió del mar [Libro electrónico]. Edit. *Biblioteca básica de Yucatán*. ISBN 978-968-9315-30-8. Disponible en: <http://unidadeditorial.yucatan.gob.mx/files/4-La%20pen%C3%ADnsula%20que%20surgi%C3%B3%20del%20mar.pdf>
- Moreno P. (1982). Ecología de la vegetación de dunas costeras: factores físicos. *Biotica* 7(4): 577-602.
- Nicholls RJ, Hanson S, Herweijer C, et al. (2008). Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: exposure estimates (OECD Environment Working Papers (1)). Available from: <http://eprints.soton.ac.uk/52831/> [Google Scholar]
- Oderiz, I. (2014). Análisis morfodinámico de duna y perfil de playa en presencia de vegetación. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México
- Ortiz, M. A., & Méndez Linares, A. P. (1999). Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones geográficas*, (39), 68-81
- Pedroza, D., Cid, A., García, O., Silva-Casarín, R., Villatoro, M., Delgadillo, M. A., ... & Infante-Mata, D. (2013). Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF, México*.
- Pérez, J. R. G., & Lema, I. (2017) I. DE LA ZONA COSTERA DE SISAL, YUCATÁN.
- Pessoa, M. F., & Lindon, F. C. (2013). Impact of human activities on coastal vegetation-a review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 926-944.

Rodríguez , E., (2019)Evaluación del riesgo real y percibido ante la erosión costera en dos playas de Yucatán, y su relación con la pérdida de servicios ecosistémicos.. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

SEMARNAT. (2013). Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias. México.

<https://www.ileanaespejel.com/uploads/1/1/3/3/11330338/cd001496.pdf>

Silva, R., Martínez, M. L., Odériz, I., Mendoza, E., & Feagin, R. A. (2016). Response of vegetated dune–beach systems to storm conditions. *Coastal Engineering*, 109, 53-62.

Silva, R., Lithgow, D., Esteves, L. S., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Martell, R., Pereira, P., Mendoza, E., Campos, A., Winckler, P., Osorio, A., Osorio, J., & Rivillas, G. D. (2017). Coastal risk mitigation by green infrastructure in Latin America. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* (Vol. 170, No. 2, pp. 39-54). Thomas Telford Ltd.

Vásquez, A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (63), 63-86.

Vega, C., Gallego, J., & Vidal, C. (2007). Manual de restauración de dunas costeras. *Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas (MAGRAMA)*.