



Universidad Nacional Autónoma de
México

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

**Recuperación de cubierta vegetal y control de
erosión por medio de técnicas de bioingeniería,
maguey (*Agave salmiana*) y nopal (*Opuntia
robusta*) en el Parque Ecológico Cubitos,
Pachuca de Soto, Hidalgo.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGO

P R E S E N T A

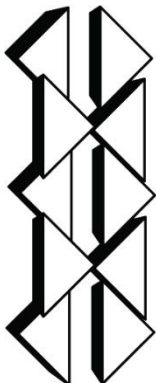
GUSTAVO ALONSO CERRILLOS VALLE.

ÁREA ESPECÍFICA: CIENCIAS AMBIENTALES

**LABORATORIO DE CONTAMINACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN
DE SUELOS**

**DIRECTORA DE TESIS: DRA. CLAUDIA JANETTE DE LA ROSA
MERA**

Ciudad de México, septiembre de 2021





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*“Ten cuidado de las cosas de la tierra.
Haz algo, corta la leña, labra la tierra, planta nopales, planta magueyes.
Tendrás que comer, qué beber, qué vestir.
Con eso estarás en pie, serás verdadero, con eso andarás.
Con eso se hablará de ti, se te alabará, con eso te darás a conocer.”
Huehuetlatolli de los Nahuas.*

Dedicatoria

A Dios.

Louis Pasteur dijo que “Un poco de ciencia aleja de Dios, pero mucha ciencia devuelve a Él”. Al principio me fue muy complicado entenderlo, pero al detenerme a ver lo bendecida que ha sido mi vida, me doy cuenta de que tengo mucho que agradecerle, no solo por lo maravillosa vida, si no por todo lo que ocurre en ella, tanto los momentos difíciles y de fracaso que son necesarios para crecer, para aprender, así como los momentos dulces y agradables que te hacen valorar todo lo que tienes a tu alrededor.

A mis Padres.

Por que a pesar de lo complicado que ha sido, siempre han estado conmigo, me han acompañado y guiado con amor, ternura, me han brindado la fortaleza necesaria para aprender a superar los obstáculos, me inculcaron valores y principios que actualmente ya no se encuentran en cualquier persona, gracias por que de una manera u otra no escatimaron en esfuerzos con tal de que yo pudiera realizar mi sueño y mi meta.

Espero que todos esos esfuerzos sean recompensados con la culminación de este trabajo, para Ustedes con mi más grande amor, admiración y respeto.

Gracias.

A mi hermano David.

Que te podría decir que no sepas ya, aun así, siempre es importante recordar aquellas cosas y acciones que nos hicieron y nos hacen felices, gracias, Deivid por apoyarme en momentos difíciles, por motivarme a seguir cuando ya no puedo más, por tus comentarios super fuera de lugar pero que siempre iban encaminados a hacernos reír, y pasarla bien, te amo mi hermano, y yo también quiero verte llegar hasta donde tu lo sueñes, hasta donde tú lo desees.

Yo estaré para apoyarte de igual manera.

Gracias.

A mi abuelo Gustavo.

Por guiarme para convertirme en un hombre de bien, por siempre estar al pendiente de mí, de aquello que me hacia falta, por enseñarme el valor del trabajo duro y el valor de la palabra y la honradez.

A mi abuela Juana.

Por enseñarme a no rendirme hasta lograr mis metas, a tener una fe y voluntad férrea, y también por siempre estar al pendiente de mí.

A mi abuela Meli.

Por todos aquellos consejos y enseñanzas de vida, que con mucho cariño me transmitía.

A mi familia.

¡Gracias a todos los que confiaron en mí, a mis Tíos, Tías y primos José, Montse, Bety, Carlos, Felix (hijo y padre), Dayis, Paty, Mercedes, Ana, Lupe, Betsi, Agustín, perdón si no escribo a todos, ¡¡pero de verdad somos bastantes!! Gracias a todos.

A Diana.

Por acompañarme en este difícil camino, por apoyarme, por permanecer a mi lado, por todo el apoyo que me sigues brindando, por ayudarme a seguir mis sueños y sobre todo por brindarme toda tu confianza y comprensión.

Muchas gracias por todo mi amor, Te amo.

A la familia de Diana.

Por abrirme la puerta de su casa, por brindarme también mucho apoyo y consejos para poder ser una mejor persona, la Señora Lidia, la Maestra Nora, el Maestro Adán, a Willy y a Diego.

A mis amigos.

Por todos aquellos momentos que vivimos juntos, las practicas, los viajes, los buenos y malos momentos, Yorch, Fer, Laila, Lili, Laura, Memo, Luis, Sandy, Angie, Antonio, Charlie, Valeria, Val, Naye.

A mi mejor amigo Ayala.

Por todos aquellos momentos que hemos vivido juntos, porque, a pesar del paso de los años, seguimos estando para apoyarnos y ayudarnos, por las borracheras, pero también por los consejos y los impulsos que a veces nos hacen faltan.

Agradecimientos

A la Universidad por permitirme ser parte de ella.

A la Facultad, por brindarme años de crecimiento profesional, personal y sobre todo, por darme la oportunidad de conocer a extraordinarios profesores, que con mucho empeño y cariño, se esmeran en hacernos mejores personas y profesionistas, ¡Gracias!

Con muchísimo cariño, admiración y aprecio agradezco a la Doctora Claudia de la Rosa, por adoptarme como su primer tesista, y sobre todo por el cariño y confianza que deposito en mi para poder lograr este objetivo.

Gracias también Doctora por la paciencia, la dedicación y por el apoyo que me brindo durante este tiempo, ¡Gracias!

A la Doctora Esther, por ayudarme a emprender este camino y darme las herramientas necesarias para poder convertirme en un profesionista enfocado y sensible a todo lo que me rodea, muchas gracias Doctora.

A la Maestra Lety[†] (Q.E.P.D.) por todos aquellos consejos que me dio, por ayudarme a comprender que todo lo que nos rodea es importante, Gracias!

A la Maestra Maricela, por la confianza y el apoyo que me ha brindado, y por todos los conocimientos que amablemente ha compartido conmigo.

A la Maestra Judith Villavicencio, por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, y también por la confianza brindada.

A la Maestra Bety, por que aun cuando cometemos errores, que extraordinario es tener a alguien como usted que con mucha dedicación nos enseña a corregir desde un punto de vista distinto

A mis sinodales: la maestra Elvia, la Dra. Hortensia y el Dr. Castillejos, muchas gracias por el tiempo empeñado en revisar este trabajo, por las correcciones que siempre son para mejorar, ¡Muchas Gracias!

Al Maestro Miguel, por todos las clases que me encaminaron a identificar una de las ramas de la biología que hoy más me gusta, Gracias.

A mis compañeros y amigos de trabajo, German, Jorch, Edgar, Yoko, Dioni, Pablo, muchas gracias por su apoyo, amistad y confianza.

Al maestro Carlos Piedragil de la SEMARNAT, que en el tiempo que estuve en la secretaría me brindo la confianza y el apoyo para poder crecer profesionalmente.

A todos los maestros que tuve en la facultad, Muchas gracias por todo el esfuerzo para ayudarnos a entender lo complejo y hermoso que es el planeta entero, desde la célula más pequeña, hasta la montaña más alta.

Índice:

1.	Resumen	1
2.	Introducción.....	2
3.	Marco Teórico.....	4
3.1	Zonas áridas y semiáridas	4
3.2	Problemática de las zonas áridas y semiáridas	4
3.3	Degradación del suelo.....	5
3.4	Calidad del suelo	7
3.5	Vegetación	8
3.6	Bioingeniería	8
3.6.1	Funciones de las técnicas de bioingeniería.....	9
3.6.2	Materiales empleados en la bioingeniería	10
3.6.3	Principales técnicas y métodos de ingeniería biológica	11
3.7	Técnicas de restauración de suelo	12
3.7.1	Cubiertas orgánicas convencionales y no convencionales.	12
3.7.2	Procesos de revegetalización.	13
3.7.3	Cubierta vegetal y empleo de especies nativas.....	13
3.7.4	Abonos orgánicos (composta)	14
3.7.5	Geotextiles biodegradables (yute).....	14
3.8	Especies vegetales	14
3.8.1	Especies vegetales nodrizas.....	15
3.8.2	Generalidades de la Subfamilia <i>Agavoideae</i> (Magueyes, Yucas Y Parientes).....	15
3.8.3	Historia y generalidades de la Subfamilia <i>Opuntioideae</i> (Choyas, Nopales y Parientes)	18
4.	Hipótesis	21
5.	Justificación	21
6.	Preguntas de investigación	21
7.	Objetivo general	21
7.1	Objetivos particulares	22
8.	Zona de estudio	22
8.1	Clima	22
8.2	Flora	23
8.3	Fauna	23
9.	Geología y tipo de suelo	24
10.	Método	24
10.1	Trabajo en campo:	24

10.2	Trabajo en laboratorio:	26
10.2.1	Parámetros Físicos:	26
10.2.2	Parámetros Químicos:.....	27
10.2.3	Parámetros Biológicos:.....	27
11.	Resultados y discusión	28
11.1	Resultados parámetros físicos y químicos	28
11.1.1	Parámetros físicos	28
11.1.2	Resultados parámetros químicos	29
11.2	Resultados parámetros biológicos:.....	32
11.2.1	Porcentaje de supervivencia:	32
11.2.2	Cobertura vegetal (C.V.):.....	34
11.2.3	Comparación de las medidas de altura inicial y altura final:.....	38
11.2.4	Tasa relativa de crecimiento (T.R.C.):.....	42
11.2.5	Evaluación del control de erosión:	43
12.	Conclusiones	46
13.	Bibliografía	48

Índice de Figuras:

Figura 1. Mapa de las principales causas de la degradación del suelo en México (SEMARNAT y CP, 2003).	2
Figura 2. Los Agaves en la cultura Mexica, obtenida de García (2007).	15
Figura 3. Morfología general del género <i>Agave</i> , obtenida de García (2007).	16
Figura 4. Estructuras reproductivas de la especie <i>Agave salmiana</i> ; Ilustración: Trejo, (2017).	18
Figura 5. Códice Mendocino 1541, donde se muestra la alegoría fundacional de México-Tenochtitlan (Reyes, 2016).	19
Figura 6. Señaladas aparecen las partes: (1) cladodio o penca, (2) espinas, (3) flor y (4) fruto, donde se pueden apreciar las semillas (Bravo, 1978).	20
Figura 7. Ejemplar de <i>Opuntia robusta</i> ; Imagen de Manuel Nevárez	20
Figura 8. Floración <i>Opuntia robusta</i> (Enciclovida, 2019).	21
Figura 9. Mapa del Parque Ecológico Cubitos, elaborado con datos obtenidos del INEGI (2018), Bing (2018) y CONABIO (2012).	22
Figura 10. Disposición de los organismos en el área de trabajo del Parque Ecológico Cubitos.	25
Figura 11. Puntos principales del procedimiento del proyecto.	26
Figura 12: Porcentaje de supervivencia de <i>Agave salmiana</i>	32
Figura 13: Porcentaje de supervivencia de <i>Opuntia robusta</i>	33
Figura 14. individuo de <i>Opuntia robusta</i> tratamiento 3, con lesión en cladodio.	33
Figura 15. individuo de <i>Opuntia robusta</i> tratamiento 2, con lesión en cladodio.	33
Figura 16. Individuo de <i>Agave salmiana</i> tratamiento 4, sin ningún tipo de lesión.	34
Figura 17. Individuo de <i>Agave salmiana</i> tratamiento 3, sin ningún tipo de lesión.	34
Figura 18: Cobertura vegetal inicial en los distintos tratamientos de <i>Agave salmiana</i>	35
Figura 19: Cobertura vegetal final en <i>Agave salmiana</i>	35
Figura 20: Cobertura vegetal inicial en <i>Opuntia robusta</i>	36
Figura 21: Gráfica de cobertura vegetal inicial en los distintos tratamientos de <i>Opuntia robusta</i>	37
Figura 22. Organismo de <i>Agave salmiana</i> al término del proyecto.	38
Figura 23. Organismo de <i>Agave salmiana</i> al inicio del proyecto.	38
Figura 24. Organismo de <i>Opuntia robusta</i> al término del proyecto.	38
Figura 25. Organismo de <i>Opuntia robusta</i> al inicio del proyecto.	38
Figura 26: Promedio inicial de alturas en <i>Agave salmiana</i>	39
Figura 27: Promedio final de alturas en <i>Agave salmiana</i>	39
Figura 28: Promedio inicial de alturas en <i>Opuntia robusta</i>	40
Figura 29: Promedio final de alturas en los distintos tratamientos en <i>Opuntia robusta</i>	41
Figura 30: Análisis de T.R.C de los distintos tratamientos de <i>Agave salmiana</i>	42
Figura 31: Análisis de T.R.C de los distintos tratamientos de <i>Opuntia robusta</i>	43
Figura 32: Evaluación de retención de suelo en tratamientos de <i>Agave salmiana</i>	44
Figura 33: Retención promedio del suelo en tratamientos de <i>Agave salmiana</i>	44
Figura 34: Retención de suelo en tratamientos de <i>Opuntia robusta</i>	45
Figura 35: Retención promedio del suelo en tratamientos de <i>Opuntia robusta</i>	46

Índice de Tablas:

Tabla 1. Superficie afectada por procesos de degradación del suelo en México, (SEMARNAT y C.P., 2003). ...	6
Tabla 2. Superficie relativa afectada por degradación del suelo según nivel en México, (SEMARNAT y C.P., 2002).	6
Tabla 3. Coordenadas extremas de polígono de trabajo.	25
Tabla 4. Parámetros físicos evaluados en el proyecto.	28
Tabla 5. Parámetros químicos evaluados en el proyecto:	29

1. Resumen

En el presente trabajo, se evaluó la implementación de técnicas de bioingeniería en el parque Ecológico Cubitos cuyo objetivo fundamental consistió en promover la retención del suelo a través de la recuperación de la cubierta vegetal, usando además especies nativas del Parque Ecológico Cubitos en Pachuca de Soto, Hidalgo y además son especies endémicas de México, las cuales fueron: *Agave salmiana* (Maguey pulquero) y *Opuntia robusta* (Nopal camueso).

Se evaluó la recuperación de la cubierta vegetal y el control de la erosión, mediante las siguientes técnicas de bioingeniería que se dividieron en 3 tratamientos experimentales y un tratamiento testigo, los tratamientos fueron: Tratamiento 1: Mezcla de abono orgánico (composta) y geotextil (yute), Tratamiento 2: Mezcla de suelo con abono orgánico (composta), Tratamiento 3: Uso de geotextil (yute) y Tratamiento 4: Testigo. Mensualmente se evaluaron los siguientes parámetros biológicos: altura, porcentaje de cobertura vegetal, medición de retención de suelo, tasa de supervivencia y tasa relativa de crecimiento, de todos los grupos, tanto de grupos experimentales como del grupo testigo. Entre los resultados obtenidos de los registros mensuales, se obtuvo que el porcentaje de supervivencia en los organismos de *Agave salmiana* fue del 100%, frente a los organismos de *Opuntia robusta* donde el porcentaje de supervivencia disminuyó hasta en 40%. De los resultados de cubierta vegetal, se obtuvo que los organismos de *Agave salmiana* tuvieron una mayor cobertura, en específico el tratamiento 4 ya que de 98.23cm² incremento a 197.40cm², es decir que en promedio la cobertura vegetal de ese tratamiento, aumento en 99.cm², seguido de los tratamientos: 2, 3 y 1, con 106 cm², 91.20cm² y 62.80cm² respectivamente de cobertura promedio. De la Tasa Relativa de Crecimiento o T.R.C. los organismos de *Agave salmiana* muestran un mayor crecimiento relativo, el tratamiento 4 en específico, con un promedio en el crecimiento de 0.00076 mm/mm/d seguido del tratamiento 1 con un crecimiento promedio de 0.00054 mm/mm/d. De los organismos de *Opuntia robusta* el tratamiento con mayor crecimiento relativo promedio fue el 2, con un crecimiento relativo de 0.00142 mm/mm/d, seguido del tratamiento 3, con un crecimiento relativo promedio de 0.00098 mm/mm/d. Los parámetros químicos analizados en suelo fueron pH, porcentaje de materia orgánica, concentraciones de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio. La materia orgánica al inicio del proyecto en la zona alta y en la zona baja registraron concentraciones de 1.66% y 1.03% respectivamente, lo que la caracteriza como baja, ya que el contenido fue menor al 4% de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. Los físicos fueron: Densidad aparente, densidad Real, porcentaje de espacio poroso, conductividad y textura. El porcentaje de espacio poroso mostró valores iniciales de 58.88% y 61.28% para la zona alta y baja respectivamente; y al término del proyecto, los valores fueron ligeramente menores, con 56.23% y 57.76% para la zona alta y baja respectivamente.

2. Introducción

En la actualidad el 23% de la superficie del planeta presenta algún grado de degradación con tasas estimadas entre 5-10 millones de hectáreas, afectando alrededor de 1500 millones de personas a nivel mundial (Stavi y Lal, 2014). El origen de esta problemática es multifactorial (actividades humanas, variaciones climáticas, cambios/evolución de la naturaleza) y al mismo tiempo multifacético (productiva, social, etc.), donde se combinan con distinto orden y magnitud: las políticas públicas (gobernanza), la cultura de uso, manejo y protección de los recursos naturales, el medioambiente, las características biofísicas del territorio y la variabilidad climática (Grainger, 2015; Gnacadja, 2015; UNCCD, 2015).

De acuerdo con información de la PAOT (2015), en México la desertificación forma parte de un problema de orden nacional que es la degradación de suelos forestales en suelos áridos, semiáridos y montañosos principalmente. El proceso más importante de degradación de suelos en México es la erosión hídrica, cuya superficie de afectación asciende al 37% del territorio nacional, otro tipo de degradación de gran importancia es la erosión eólica, la cual afecta el 23.25% de la superficie nacional.

Como parte del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2003), en la República Mexicana se realizó un estudio para evaluar la degradación de los suelos, este estudio indica que el 45.2% de la superficie del país presentaba algún tipo de degradación inducida por el hombre (Figura 1). Entre los niveles de degradación, se identificó que el predominante era de ligero a moderado, mientras que los procesos más importantes de degradación fueron la química (por la pérdida de fertilidad principalmente), la erosión hídrica y la erosión eólica. Estos tres procesos fueron responsables del 87% de los suelos degradados en el país. Además, se identificaron otras 3 causas de degradación, las cuales fueron zonas sujetas a un cambio de uso de suelo del terreno forestal (CUSTF), con fines agrícolas y de sobrepastoreo con un 17.5% en ambos casos, la deforestación en segundo lugar con 7.4%, seguida de la urbanización en tercer lugar con un 1.5%. Todas estas causas tienen una importante relación con la afectación de la cubierta vegetal, responsable de la conservación del suelo (SEMARNAT y C.P., 2003).

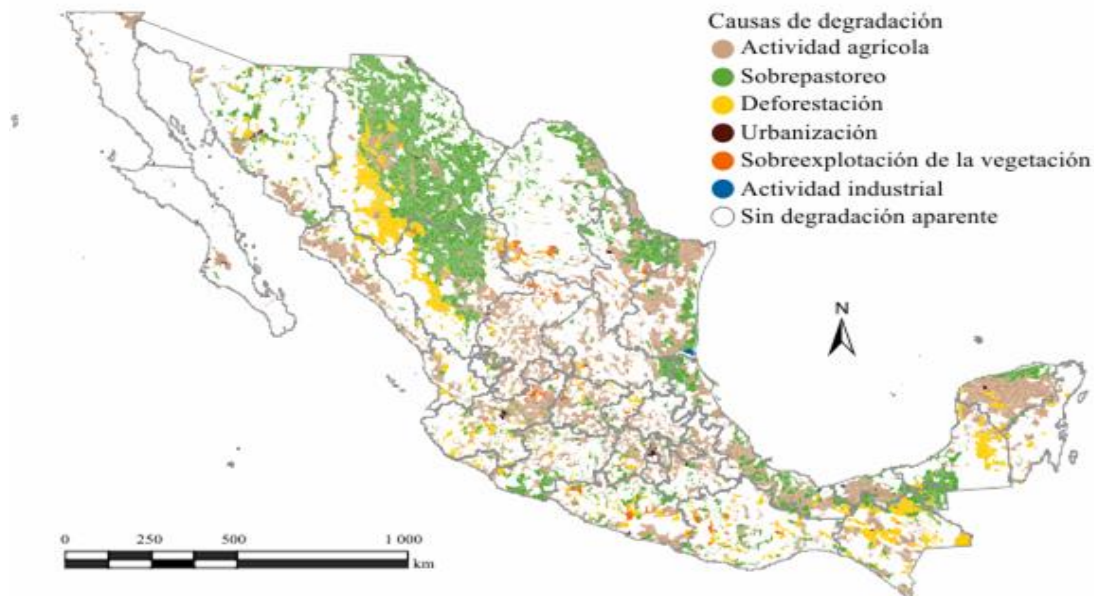


Figura 1. Mapa de las principales causas de la degradación del suelo en México (SEMARNAT y CP, 2003).

Nota de la figura 1: Las causas de la degradación de los suelos en el país involucran actividades de diversa índole: 35% de la superficie degradada se asocia a las actividades agrícolas y pecuarias (17.5% cada una de ellas) y 7.4% a la pérdida de la cubierta vegetal. El resto se divide entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales.

Uno de los efectos más notorios de la degradación sobre el suelo es la dificultad para el establecimiento de la vegetación, con lo cual se disminuye la capacidad de absorción del agua y los nutrientes, a la vez que genera deficiencias en la estructura del suelo, lo impermeabiliza y aumenta la escorrentía superficial; lo que se traduce en un incremento en la capacidad erosiva del suelo (Suárez 2001).

La erosión y desertificación que son fenómenos ligados a condiciones climáticas específicas, generalmente épocas secas, y adicionalmente se asocian a cambios físicos y químicos del suelo, inducidos por actividades humanas inadecuadas (Díaz, 2011).

Suarez (1998), menciona que la erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento y puede ser generada tanto por el agua como por el viento.

Por lo que entre las medidas para la recuperación de áreas degradadas se tiene el restablecimiento de una capa vegetal en áreas donde la vegetación ha sido eliminada por efectos naturales o antropogénicos. El éxito del establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas no es un proceso aislado, sino que depende de una apropiada selección de especies vegetales y las condiciones del suelo, como la distribución del tamaño de las partículas, la buena capacidad de retención del agua, la tasa de filtración, la densidad del suelo, la disponibilidad de los elementos minerales y el pH (Melgoza *et al.* ,2007).

En el Parque Ecológico "Cubitos" de Pachuca, Hidalgo, la erosión resulta ser una problemática grave, debido principalmente a los incendios que se presentan en la época seca del año y a la orografía del sitio, ya que se encuentran pendientes con una inclinación por arriba de los 6 grados, lo que provoca una pérdida de la cubierta vegetal, por lo que una alternativa para contrarrestar esta problemática es mediante el empleo de organismos vegetales vivos (plantas) como *Agave salmiana* (maguey pulquero) y *Opuntia robusta* (nopal camueso), abonos orgánicos (composta) y geotextiles (yute) que ayudarán a la estabilización y mejoramiento de la estructura del suelo, aumentando su fertilidad y facilitando el establecimiento de una cubierta vegetal.

3. Marco Teórico

3.1 Zonas áridas y semiáridas

Se consideran zonas áridas, aquellas áreas que reciben una precipitación pluvial media anual menor a 350 mm, y semiáridas a las que reciben entre 350 y 600 mm anuales. En ambos casos, la precipitación promedio anual es menor a la evaporación potencial máxima anual poniendo en evidencia un déficit hídrico. Estas regiones se caracterizan por una escasez de agua, con una distribución de la precipitación pluvial altamente errática y que ocurre en pocos eventos y de tipo torrencial (Challenger, 1998).

Estas zonas ocupan más de la mitad del territorio mexicano y están cubiertas en su mayor parte por diversos tipos de comunidades arbustivas que reciben el nombre genérico de matorral xerófilo, que alternan con pastizales y con algunos manchones aislados de vegetación arbórea (Rzedowski, 1978).

Tarango (2005), menciona que las Zonas Áridas y Semiáridas de México, poseen una riqueza enorme de plantas endémicas, entre ellas se encuentra un sinnúmero de plantas de la familia Cactaceae muchas de ellas endémicas de nuestro país, entre otras familias. Algunos ejemplos de este tipo de plantas presentes en zonas áridas y semiáridas se enlistan a continuación: Mezquite (*Prosopis spp.*), Ocotillo (*Fouquieria splendens*), diferentes tipos de Yucas (*Yucca spp.*); plantas con potencial forrajero como los Pastizales, el Nopal camueso (*Opuntia robusta*), Costilla de Vaca (*Atriplex spp.*), Guayacán (*Guaiaacum sanctum*), Castilla (*Rosa centifolia*), Jojoba (*Simmondsia chinensis*), Guajillo (*Acacia berlandieri*) y Ramoncillo (*Trophis mexicana*), además de plantas con potencial industrial como: Lechuguilla (*Agave lechuguilla*) Maguey pulquero (*Agave salmiana*), e inclusive plantas con potencial medicinal: Peyote Garambullo (*Mirtilocactus geometrizzans*), Chaparro Prieto (*Acacia rigidula*), Cenizo (*Atriplex canescens*), Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*), Damiana (*Turnera difusa*), toloache (*Datura stramonium*).

A pesar de que la diversidad florística de las comunidades arbustivas de zonas áridas es moderada (6000 especies descritas), éstas, aún poseen un considerable potencial de recursos naturales considerados como forestales, susceptibles de ser aprovechados de manera racional y sostenible, para contribuir al mejoramiento de los niveles de vida del sector rural, en particular, ya que ofrecen múltiples alternativas de utilización (Cervantes, 2005). Estas zonas de México no solo son refugio para una gran variedad de plantas, sino también de una gran diversidad de animales silvestres, entre ellos podemos encontrar: liebres (*Lepus spp.*), conejos (*Sylvilagus spp.*), zorras (*Urocyon cinereoargenteus*), coyote (*Canis latrans*), puma (*Puma concolor*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) y bura (*Odocoileus hemionus*), palomas (*Zenaida macroura*, *Z. asiatica*), y codornices (*Callipepla squamata*, *C. gambelii*) (Tarango 2005).

3.2 Problemática de las zonas áridas y semiáridas

Ceballos, *et al* (1998), mencionan que la torrencialidad con que se presenta la precipitación pluvial en las zonas áridas y semiáridas propicia el arrastre de grandes cantidades de suelo, dejando una alta erosión en las zonas afectadas; el suelo perdido es el de las capas más fértiles, lo que conlleva a su degradación y a la pérdida de su capacidad productiva. Además, menciona que actualmente, es común observar un sobrepastoreo, una excesiva deforestación y extracción de leña, entre otros. Mientras que Challenger (1998), afirma que estos aspectos no solo afectan las capacidades de estas regiones para producir, sino que contribuyen a la pérdida de biodiversidad y a su invasión por especies exóticas. En general, las zonas áridas y semiáridas de acuerdo con Tarango (2005), cuentan con ecosistemas frágiles, altamente susceptibles a la influencia de los factores climáticos y de las actividades humanas, lo que ocasiona la pérdida de recursos naturales y la capacidad productiva de los suelos, lo que se traduce en la degradación del suelo.

3.3 Degradación del suelo

La comunidad internacional ha reconocido, desde hace tiempo, que la desertificación constituye un problema mayor de carácter económico, social y ambiental, que concierne a numerosos países en todas las regiones del mundo (COP6, 2003). La degradación del suelo es extensa, ya que abarca aproximadamente el 23% de la superficie terrestre del planeta, aumenta a una tasa anual de 5 a 10 millones de hectáreas y afecta a alrededor de 1.500 millones de personas en todo el mundo. Tales procesos perjudiciales requieren acciones urgentes e integrales para detener la degradación del suelo (Stavi y Lal, 2015). Algunas de las zonas más impactadas han sido las zonas áridas y semiáridas, ya que son ecosistemas frágiles, altamente susceptibles a los factores climáticos y las actividades humanas, que ocasionan una sobreexplotación de recursos naturales, un sobrepastoreo, excesiva deforestación y extracción de leña, que llevan a una pérdida de vegetación nativa que provoca un grave problema de erosión y calidad del suelo. Esta degradación es uno de los principales problemas ecológicos a nivel mundial, ya que se estima que afecta al 65-70 % del total de zonas áridas y semiáridas. (Cruz y López, 2015).

Por tanto, la calidad del suelo está asociada directamente con la erosión, y esta puede ser controlada o reducida a un mínimo cuando se adoptan medidas apropiadas de conservación de suelos, entre ellas: la recuperación de cubierta vegetal, la que disminuye la erosión y mejora la calidad de este (Buringh, 1989). Una de las consecuencias de la erosión es que disminuye la fertilidad del suelo al perderse con el agua los nutrientes esenciales para los cultivos y provoca además otro problema de gran envergadura, la sedimentación (suelos desplazados del lugar original y depositado en otro). Con el ascenso del relieve y la intensidad de los aguaceros unidos a la mala protección de los suelos y a la acción del hombre, es de esperar un rápido deterioro. Uno de los conceptos más empleados para identificar las problemáticas, ha sido el de "calidad de suelos", ya que ayuda a resolver el problema anterior, al integrar e interconectar los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo en una situación determinada (Astier, Maass y Etchevers, 2002).

Entre los años 70's y 90's del Siglo XX se identificaron y reconocieron por su magnitud a nivel global cuatro tipos de degradación del suelo en su componente edáfico: 1) erosión hídrica, 2) erosión eólica, 3) degradación física y 4) degradación química; magnitudes que varían de un país a otro (Gnacadjá, 2012). Por ejemplo, en el caso de México, una estimación promedio basada en distintos reportes (Garrido y Cotler, 2010; SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACH, 2013) indica que el 69.7% de sus suelos presentan algún grado de degradación para el componente edáfico, donde la erosión hídrica aparece como la más importante con un 25.4%, seguida por la degradación química y la erosión eólica con el 20.1% cada una, y por último la degradación física con el 4.1%; problemática exacerbada en años recientes ante una mayor variabilidad climática (SEMARNAT-INECC, 2012).

Debido a la diversidad de aproximaciones que pueden usarse para estudiar la degradación del suelo, es muy difícil desarrollar un sistema único para medirla. En el caso de México, se han realizado distintos estudios que, por sus diversas aproximaciones, metodologías y definiciones, dificultan la comparabilidad de sus resultados. Ejemplos de esta divergencia son las recientes estimaciones publicadas en 2013 por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) como parte del estudio para delimitar la Línea Base Nacional de Degradación de Tierras, y en el cual estimaron en 61.7% la superficie nacional afectada por erosión hídrica, eólica, degradación química y física. En contraste, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publicó en 2014 los resultados preliminares del mapa de Erosión de Suelos en México, en el que muestra que cerca de 55% del territorio nacional está afectado por erosión hídrica y eólica. Cuando se comparan las cifras específicas para cada tipo de erosión, las diferencias son aún mayores.

El estudio de “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana”, publicado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Colegio de Postgraduados (CP) en 2003, menciona que el 44.9% del territorio nacional presentaba evidencias de degradación en 2002, mientras que en el 55.1% restante no mostraba indicios de degradación aparente. Dicho estudio además divide la degradación en procesos (es decir, degradación química y física y erosión hídrica y eólica), en tipos específicos dentro de cada proceso, niveles (ligero, moderado, fuerte y extremo) y causas de la degradación.

Con respecto a la superficie afectada por los diferentes procesos de degradación, la degradación química ocupaba el primer lugar (34.04 millones de hectáreas, 17.8% del país), seguida por la erosión hídrica (22.72 millones, 11.9%), eólica (18.12 millones, 9.5%) y la degradación física (10.84 millones, 5.7%); (Tabla 1).

Tabla 1. Superficie afectada por procesos de degradación del suelo en México, (SEMARNAT y C.P., 2003).

PROCESO DE DEGRADACIÓN	SUPERFICIE (Ha)	PORCENTAJE (%)
Degradación química	34 042.55	17.83
Degradación física	10 837.81	5.68
Erosión eólica	18 124.86	9.49
Erosión hídrica	22 725.71	11.9
Sin degradación aparente	105 194.46	55.1
Total	190 925.39	100

Fuente: “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana” SEMARNAT y C.P., (2003).

Notas de la tabla 1:

- I. Superficie nacional considerada: 1 909 818.5 Km². No incluye cuerpos de agua, asentamientos humanos, zonas urbanas, regiones desprovistas de vegetación y superficie insular.
- II. La superficie sin degradación aparente incluye terrenos estables bajo condiciones naturales o de influencia humana, pero que, debido a sus características de cobertura vegetal no perturbada, no se detectan procesos de degradación provocados por el hombre. También considera tierras sin vegetación y con influencia humana casi imperceptible, pero que pueden presentar procesos de degradación natural, como desiertos, regiones áridas montañosas, afloramientos rocosos, dunas costeras y planicies salinas.

Al considerar la degradación del suelo por niveles, el ligero y el moderado se presentaron en conjunto en 42.8% del país, mientras que el 2.1% restante se dividía entre los niveles fuerte y extremo (Tabla 2).

Tabla 2. Superficie relativa afectada por degradación del suelo según nivel en México, (SEMARNAT y C.P., 2002).

Nivel de degradación	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Ligera	43 606.41	22.8
Moderada	38 164.08	20.0
Fuerte	2 666.42	1.4
Extrema	1 299.2	0.7
Sin degradación aparente	105 194.46	55.1

Fuente: “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana” (SEMARNAT y C.P., 2003).

Nota de la tabla 2:

- I. Superficie nacional considerada: 1 909 818.5 Km². No incluye cuerpos de agua, asentamientos humanos, zonas urbanas, regiones desprovistas de vegetación y superficie insular.

3.4 Calidad del suelo

De acuerdo con Parr, *et al.*, (1992.), un suelo de calidad es aquél que tiene la capacidad de producir cultivos saludables y nutritivos en forma sostenida a largo plazo, y de promover, al mismo tiempo, la salud humana y animal sin detrimento de los recursos naturales base o del medio ambiente circundante. En cambio, Gregorich, *et al.*, (1994.), lo describen simplemente como la condición de un suelo para un uso determinado. Doran y Parkin (1994) definen la calidad del suelo como la capacidad que éste tiene para sostener la productividad biológica y mantener la calidad ambiental de tal forma que se promueva la salud vegetal, animal y humana; todo ello dentro de los límites que impone el ecosistema y el tipo de manejo que se le da.

El mejoramiento de la calidad de un suelo se percibe, en general, por incrementos y decrementos en el valor de algunas características, por ejemplo, puede incrementarse la tasa de infiltración o de aireación, debido a un aumento de la cantidad de macroporos, a un mayor tamaño y estabilidad de los agregados y una mayor cantidad de materia orgánica. Pero pudiesen reducirse la densidad aparente, la resistencia a la labranza, el crecimiento radical, la tasa de erosión y la pérdida de nutrientes (Parr *et al.*, 1992). En una síntesis, la definición de calidad de suelos incluye tres principios importantes: a) La productividad del suelo, que se refiere a la habilidad del mismo para promover la productividad del ecosistema o agroecosistema, sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; b) la calidad medio ambiental, entendida como la capacidad de un suelo para atenuar los contaminantes ambientales, los patógenos, y cualquier posible daño hacia el exterior del sistema, incluyendo también los servicios ecosistémicos que ofrece (reservorio de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, recarga de acuíferos, etc.); y, c) la salud, que se refiere a la capacidad de un suelo para producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos (Arshad y Coen, 1992; Parr *et al.*, 1992; Doran y Parkin, 1994).

Por lo que, entonces los indicadores hacen referencia a las características o propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, de esta manera tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos. Sin embargo, hay indicadores que requieren de más de 10 años para exhibir cambios como respuesta a un manejo determinado (Astier *et al.*, 2002).

Haberern (1992), en su propuesta desarrollada en Australia, menciona que los indicadores primarios de la calidad del suelo están relacionados principalmente con las características de los suelos, como su salud (tasa de infiltración, compactación, cantidad de carbono orgánico), su productividad, su grado de cobertura por pastizales y bioindicadores (presencia de lombrices de tierra, termitas).

Algunos indicadores físicos, químicos y biológicos importantes para conocer la calidad del suelo deben estar relacionados con: a) Los atributos de sustentabilidad (productividad, estabilidad y resiliencia), y b) los puntos críticos identificados. La forma de medir los diferentes indicadores seleccionados dependerá de los recursos (humanos, técnicos, económicos, e infraestructura) y del tiempo disponible, del rigor requerido y del tipo de audiencia a la que se destina el estudio. Los indicadores cualitativos pueden ser más útiles que los cuantitativos para mostrar rápidamente el comportamiento del sistema (Astier *et al.*, 2002).

3.5 Vegetación

La vegetación juega un papel fundamental en la conservación del suelo, por lo que es habitual que se considere a la recuperación de la cubierta vegetal como una de las técnicas indispensables para mitigar, los efectos de la desertificación. Una vez degradadas, la restauración de las zonas semiáridas presenta numerosos problemas debido a la escasez de recursos fundamentales para la vegetación, a unas condiciones ambientales especialmente limitantes para el desarrollo de las plántulas y a la alteración que los animales pueden provocar en las actuaciones de revegetación (Bertness y Callaway, 1994). Una de las principales características que presentan estos ambientes es su marcada heterogeneidad en la distribución espacial de los recursos bióticos y abióticos. En los ecosistemas semiáridos, la escasez de precipitaciones no permite la existencia de una cobertura vegetal continua, por lo que predominan formaciones abiertas en las que alternan manchas de vegetación dispuestas en una matriz de suelo desnudo. Junto a esta cobertura discontinua, las áreas sin vegetación presentan a su vez una notable variación en propiedades y elementos superficiales que tienen una gran importancia en la dinámica de los flujos de agua y nutrientes, como las costras físicas y biológicas, los fragmentos rocosos superficiales, la hojarasca y la micro topografía (Gil, 2003).

La vegetación controla la erosión en las cárcavas ofreciendo protección física al suelo frente al impacto de la lluvia y la escorrentía, y reduciendo la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno; por lo tanto, reduce la capacidad erosiva del agua. Si la velocidad se reduce lo suficiente, sedimenta los materiales que son arrastrados. A partir de este momento se puede regenerar la vegetación natural (Hudson, 1982). La intensidad de la erosión no depende solo del clima y otros factores naturales sino también del estado de la cobertura vegetal, la intensidad de los efectos erosivos es más pronunciada en los suelos donde la vegetación es débil (Bonilla, 1992).

La importancia de realizar la recuperación de la cubierta vegetal radica en que ésta es el principal factor para el control de la erosión, por medio de la estabilización y mejoramiento de la estructura del suelo, aumentando su fertilidad y facilitando la evolución de este (Cortina, 1993; Zhou y Shangguan, 2007).

El recubrimiento vegetal es uno de los principales indicadores del estado de un ecosistema o paisaje (Zhou *et al.*, 2007). El manejo de las diferentes formas de cubierta ya sea coberturas muertas, rotación de cultivos, asociaciones, intercalamiento, métodos de labranza mínima y cero labranzas, utilizados independientes o combinados, son medidas eficaces para la conservación de suelos y el agua (Altieri, 1996). Se ha observado que el crecimiento de las gramíneas reduce la escorrentía entre 50 a 60% y las pérdidas de suelo por la erosión entre 60 a 80%, el área alrededor de las cárcavas al ser sembrada con vegetales logra reducir la escorrentía entre un 65 a 90% y las pérdidas de suelo por erosión entre 75 a 90% (Morgan, 1986).

3.6 Bioingeniería

Sangalli (2008), indica que la ingeniería biológica o bioingeniería, es una rama de la ingeniería en donde las plantas vivas se utilizan como elemento constructivo, conjuntamente o no con material inerte (material leñoso, piedras, hormigón, mallas metálicas, geotextiles o productos sintéticos).

Schiechl (1992), menciona que, la bioingeniería es una disciplina constructiva que persigue objetivos técnicos, ecológicos, estéticos y económicos, utilizando sobre todo materiales vivos como semillas, plantas, partes de plantas, poblaciones y comunidades vegetales. Estos objetivos se consiguen aprovechando los múltiples rendimientos de las plantas y utilizando técnicas constructivas de bajo impacto ambiental.

La bioingeniería se utiliza en todos los ámbitos de obra civil así lo mencionan Gray y Sotir, (1995), especialmente en el ámbito de la consolidación de taludes, riberas y para el control de la erosión. Además, los métodos de Ingeniería Biológica pueden aplicarse en cualquier zona climatológica del planeta en donde las plantas, que se utilizan como material vivo constructivo, puedan crecer bien, como es el caso del trópico, las zonas subtropicales y en las zonas templadas. Los límites claros son las zonas climáticas frías, áridas y

semiáridas. En determinados casos, se puede compensar la escasez de agua por regadío o por riego, por tanto, las técnicas se pueden emplear en los siguientes ámbitos:

- Restauración de obras (carreteras, autopistas, ferrocarriles).
- Estabilización de taludes y control de la erosión.
- Regeneración de cursos de agua, marismas y espacios litorales.
- Recuperación de terrenos afectados por actividades extractivas (graveras, canteras, minas).
- Restauración de espacios degradados (vertederos, escombrera).

El resultado de las obras de bioingeniería son sistemas vivos, basados en la sucesión natural, es decir, que permanecen en equilibrio mediante una autorregulación dinámica sin necesidad de aporte de energía artificial (Sangalli, 2008).

3.6.1 Funciones de las técnicas de bioingeniería

Además, Sauli, Cornelini y Preti, (2002), ofrecen un listado de diversas funciones, en variación al propósito aplicado a las diversas técnicas empleadas, entre ellas, se mencionan las siguientes:

Funciones técnicas:

- Protección de la superficie del suelo contra la erosión debido al viento, las precipitaciones, el hielo y las corrientes de agua.
- Disminución de la velocidad de la corriente en las riberas.
- Agregación y estabilización superficial y/o profunda del suelo.
- Aumento de la rugosidad del terreno, creando así una defensa contra aludes.

Funciones ecológicas

Las funciones ecológicas cada vez están ganando más importancia, teniendo en cuenta que estas escasamente se pueden alcanzar por parte de la ingeniería clásica.

- Mejora del balance hídrico por un aumento de la interceptación, mejora capacidad de retención de agua del suelo y mejora del consumo de agua por las plantas.
- Disgregación mecánica del suelo por las raíces de las plantas.
- Compensación de las condiciones de temperatura en el suelo.
- Mejora de la cantidad de nutrientes en el suelo y así aumento de la fertilidad de suelos pobres.

Funciones estéticas:

- Restauración de cicatrices en el paisaje causadas por episodios catastróficos o por las actividades humanas (minería, obra pública, escombreras de inertes, escombreras mineras, vertederos de residuos industriales y urbanos).
- Integración de obras y construcciones en el paisaje.
- Pantalla visual para la ocultación de diferentes infraestructuras de fuerte impacto visual.
- Enriquecimiento de los paisajes mediante la creación de focos visuales y nuevas estructuras, formas y colores en la vegetación.

3.6.2 Materiales empleados en la bioingeniería

Gray y Sotir (1995), indican que, la bioingeniería utiliza materiales vegetales e integra materiales específicos de estructuras con vegetación. Los sistemas resultantes y sus componentes tienen ventajas y limitaciones que necesitan ser consideradas antes de seleccionarlos para su uso, entre los materiales específicos, hacen una división entre especies vegetales, ya que mencionan especies herbáceas y leñosas, como se describe a continuación:

3.6.2.1 Especies herbáceas

La vegetación herbácea ofrece una protección duradera contra la erosión superficial (lluvia y viento) sobre las pendientes, si bien, sólo proporciona una protección menor contra los deslizamientos superficiales de tierra. La vegetación herbácea ayuda a prevenir la erosión superficial mediante:

- La retención de las partículas del suelo.
- La reducción del desplazamiento de los sedimentos.
- La interceptación de las gotas de lluvia.
- El retardo de la velocidad de dispersión del agua.
- El aumento y mantenimiento de la capacidad de infiltración.
- Son usadas juntamente con las técnicas de estabilización y con otras técnicas de recubrimiento en bioingeniería, para aumentar la protección contra la erosión superficial.

3.6.2.2 Especies leñosas

Zeh *et al.* (1997), afirman que la vegetación leñosa, en comparación con la vegetación herbácea, enraíza más profundamente, hasta 2 m de profundidad, y proporciona una protección mayor contra los deslizamientos de suelo mediante:

- El refuerzo mecánico del suelo con el sistema radical.
- El drenaje de las aguas superficiales por medio de la transpiración y la interceptación.
- El refuerzo mecánico del suelo producido por el ramaje enterrado.
- Porciones de las fajas vivas también se enraízan y pasan a formar parte de la cobertura estabilizadora.

3.6.2.3 Componentes vegetales vivos

Tuttle *et al.*, (1992); Schiechl (1992), indican que una correcta elección del material vegetal vivo a utilizar en el ámbito de las obras de bioingeniería constituye la premisa fundamental para el éxito de las intervenciones. En este contexto se indican los siguientes criterios básicos:

- La elección, además, deberá estar dirigida a la protección de las especies más idóneas no sólo desde el punto de vista ecológico, sino también funcional, sobre todo donde se trata de intervenciones de reorganización y reequilibrio hidrogeológico.
- Debe subrayarse que la elección del material vegetal deberá privilegiar, en el ámbito de las especies consideradas, las que sean autóctonas de la zona, es decir, aquellas que ofrezcan la máxima adaptabilidad ecológica a las características edáficas y climáticas de la zona.
- El conjunto vegetal, en lo posible, deberá ser suficientemente diversificado entre especies arbóreas y arbustivas de diferente especie y tamaño, a fin de constituir unas poblaciones de suficiente variabilidad y estructura.

3.6.2.4 Materiales estructurales y técnicas empleadas en la ingeniería biológica

Las estructuras correctamente diseñadas e instaladas ayudan a estabilizar las pendientes contra los deslizamientos de tierra, y la protegen contra la formación de cárcavas. Las estructuras también juegan un papel determinante en el establecimiento de vegetación en pendientes empinadas o en áreas sujetas a una erosión severa. Las estructuras estabilizan las pendientes durante el periodo crítico de germinación, rebrote y crecimiento de las raíces. Sin esta estabilización, la actuación puede malograrse durante su momento de mayor vulnerabilidad (Schiechtl, 1986).

Los materiales de fibras naturales más utilizados en las técnicas mixtas de revestimiento son de origen vegetal: coco, esparto, yute, paja, celulosa, residuos forestales. Las geo mantas, geo redes y geo mallas orgánicas de fibras naturales son productos geo sintéticos degradables indicados para su uso en las técnicas mixtas de revestimiento de taludes en función de las características que transmite el tipo de fibra orgánica natural que las compone. Su utilización sólo deberá aprovecharse para el control temporal contra la erosión, hasta que la vegetación haya arraigado. Para una mayor longevidad y resistencia a la tracción se recomienda elegir entre fibras como el esparto o el coco, o para una mayor degradación, las fibras como la paja (Tuttle *et al.*, 1992).

3.6.3 Principales técnicas y métodos de ingeniería biológica

De acuerdo con la AEIP (1992), las técnicas se dividen en 4 grandes grupos:

1. Técnicas de recubrimiento
2. Técnicas de estabilización
3. Técnicas mixtas
4. Técnicas complementarias

3.6.3.1 Técnicas de recubrimiento:

Son técnicas destinadas a evitar la erosión superficial, y dentro de este grupo se distinguen:

- Siembras de diversos tipos, con o sin acolchados.
- Empleo de mantas orgánicas en las siembras.
- Recubrimiento con varas de salicáceas.

3.6.3.2 Técnicas de estabilización:

Estas técnicas permiten estabilizar el terreno hasta 2m de profundidad y se basan en la disposición de plantas leñosas obtenidas por reproducción vegetativa y colocada en filas horizontales.

Las plantas deben tener la capacidad de emitir raíces adventicias de manera que formen un entramado que permita la sujeción del terreno.

Dentro de estas técnicas se encuentran:

- Estaquillados de sauces.
- Lechos de ramaje.
- Sucesión de estacas y fajinas o rivalita viva.
- Trenzados de mimbre.

3.6.3.3 Técnicas mixtas:

Estas técnicas, a diferencia de las comentadas anteriormente conjugan la utilización de elementos vegetales con los materiales tales como: madera, acero galvanizado, rocas, hormigón. En estas técnicas, el material inerte actúa como estabilizador hasta que las plantas sean capaces de realizar esta función (Zeh *et al.*, 1997).

Dentro de estas técnicas se encuentran:

- Entramados de madera.
- Peldaños de leña.
- Enrejados vivos.
- Tierras reforzadas o muros verdes.
- Mallas tridimensionales y geo celdas.

3.6.3.4 Técnicas complementarias:

Junto con las técnicas constructivas propiamente dichas, se deben utilizar otras que completan y complementan las anteriores pero que no cumplen una finalidad de estabilización o protección frente a la erosión, son por ejemplo la plantación de especies leñosas con el fin de acelerar el desarrollo de la vegetación, la creación de barreras antirruido, los drenajes, las rampas para peces.

3.7 Técnicas de restauración de suelo

Carroll *et al.*, (1992), mencionan que, los principios de ingeniería para el control de la erosión son básicos, siendo la vegetación uno de los mejores materiales naturales para el control de erosión; sin embargo, los geo sintéticos fabricados y comercializados para aplicaciones en control de la erosión han variado significativamente en la última década. El problema de la retención del suelo, la protección, la revegetación y el refuerzo del césped puede ser resuelto con muchos materiales, tanto orgánicos como sintéticos, con propiedades específicas que deben tenerse en cuenta para lograr un rendimiento adecuado.

Entre los sistemas de control implementados para el control de la erosión que menciona Díaz (2011), se pueden encontrar los siguientes:

3.7.1 Cubiertas orgánicas convencionales y no convencionales.

Durante miles de años se han utilizado distintos tipos de cubiertas orgánicas para proteger a las semillas y el suelo de las fuerzas de la erosión y acelerar la fijación de la vegetación. Entre los beneficios de estas cubiertas destacan que pueden ayudar en la estabilización del suelo, reduciendo inmediatamente la erosión producida por el viento y el agua, reduciendo las fluctuaciones en las temperaturas del suelo para fomentar una rápida germinación de las semillas y un menor estrés por temperatura sobre las plántulas. Por lo que, además, al término de la vida útil de estas cubiertas, los residuos se pueden convertir en materia orgánica valiosa que se incorpora al suelo para otorgar humedad a largo plazo y brindar, al mismo tiempo, buena retención de nutrimentos a la planta.

Hudson (1982), en complemento, mencionó que existen varios tipos de elementos que se pueden emplear como cubiertas, entre ellas menciona las siguientes:

- a) Revestimiento orgánico suelto: La paja y el heno son los materiales más utilizados como revestimiento orgánico.
- b) Fijadores (tackifiers): De acuerdo con el ángulo de la pendiente las técnicas de disqueado se reemplazan por la utilización de espray viscosos que se usan para fijar las fibras de residuo orgánico a sí mismas y al suelo.

- c) Productos en rollo para el control de la erosión: Esta categoría está compuesta por prefabricados como: redes para la retención de residuos orgánicos, geotextiles de malla abierta, revestimientos para el control de la erosión y mantas de refuerzo de la vegetación.

3.7.2 Procesos de revegetalización.

Salamanca (1995), menciona que, las plantas para vivir dependen estrechamente del medio en el que se desarrollan; de él obtienen la energía, las materias primas y el espacio que necesitan y usan para crecer y conservarse. El suelo, la atmósfera y el agua son sus elementos constituyentes básicos. Las condiciones de habitabilidad para las plantas que ofrece el medio son la resultante de la interacción de diversos factores, que se pueden agrupar así:

- Factores climáticos: las características que actúan directamente sobre los vegetales son la radiación solar, la precipitación, la temperatura y el viento.
- Factores edáficos: el suelo es un sistema físico-biológico que actúa de forma compleja sobre la vegetación. Es la fuente y despensa de elementos nutritivos y agua, y contiene el oxígeno necesario para la respiración de las raíces y los microorganismos.
- Factores topográficos: la altitud, pendiente, exposición, orientación y formas del relieve son factores topográficos que ejercen una acción modificadora sobre los demás factores ambientales.
- Factores físicos, que a su vez se dividen en: temperatura, humedad, aireación del suelo.
- Factores químicos: tres son los factores que pueden afectar e incluso limitar severamente el desarrollo de la vegetación. Todos son factores edáficos, derivados de la desaparición del suelo superficial del afloramiento de horizontes inferiores como producto de las excavaciones: Presencia y disponibilidad de nutrientes, acidez y alcalinidad del suelo y toxicidad por la presencia de metales pesados como cobre, cinc, plomo, níquel, aluminio, manganeso, entre otros.

3.7.3 Cubierta vegetal y empleo de especies nativas

Rondón y Vidal (2005) proponen que las especies mejor adaptadas en zonas restauradas son las nativas que se han desarrollado "*in situ*", estas plantas, a pesar de las perturbaciones periódicas del suelo, han evolucionado bajo el clima local y son capaces de completar el ciclo de vida y mantener sus poblaciones. A su vez, también mencionan que es necesario que la cubierta vegetal posea características morfológicas y fisiológicas como: Propagación sencilla y rápida, follaje grande y fuerte, rápido crecimiento, resistencia contra la sedimentación, resistencia a plagas o enfermedades y que ofrezcan alguna utilidad a las comunidades.

Brown (1993), dice que para que la restauración se logre se deben realizar los estudios de campo necesarios, que permitan conocer las condiciones del sitio a reforestar y definir las especies a establecer, el vivero de procedencia, el medio de transporte, las herramientas a utilizar, la preparación del suelo, el diseño, los métodos, los puntos críticos de supervisión durante las actividades de campo, la protección, el mantenimiento y los parámetros con los cuales se evaluará el éxito de la plantación

El desarrollo de una restauración depende de cinco factores fundamentales de acuerdo con Brown (1993):

- I. La selección correcta de especies en el sitio a reforestar.
- II. El uso de germoplasma de la mejor calidad genética y fenotípica posible con un suministro oportuno y permanente.
- III. Un buen sistema de producción de planta y transporte de ésta al sitio a reforestar.
- IV. Plantar en la época adecuada para asegurar el mayor porcentaje de sobrevivencia de la especie.
- V. La aplicación de técnicas silvícolas apropiadas para favorecer el desarrollo de las plantas y un buen manejo del predio reforestado, entre ellas, el uso de abonos orgánicos.

3.7.4 Abonos orgánicos (composta)

Román, Martínez y Pantoja (2013), mencionan que el compostaje es un proceso biológico, que ocurre en condiciones aeróbicas (presencia de oxígeno), con la adecuada humedad y temperatura, se asegura una transformación higiénica de los restos orgánicos en un material homogéneo y asimilable por las plantas; a su vez, Jen-Hshuan Chen (2006), considera algunas ventajas del uso de abonos orgánicos ya que cada tipo de fertilizante tiene ventajas y desventajas, y estas se integran para lograr un óptimo desempeño para realizar el balance de nutrimentos, a continuación, se enlistan las principales ventajas de los abonos orgánicos:

- El suministro de nutrientes es más balanceado, esto ayuda a mantener plantas saludables.
- Así mismo mejoran la actividad biológica en el suelo, lo que implica la movilización de nutrimentos desde las fuentes químicas y orgánicas y la descomposición de sustancias tóxicas.
- Mejoran la colonización de micorrizas, lo cual aumenta el suministro de fósforo (P).
- Incrementan el crecimiento de raíces debido a la buena estructura del suelo.
- Aumentan el contenido de materia orgánica del suelo, y la capacidad de intercambio de nutrientes, además de incrementar la retención de agua en el suelo, lo que promueve los agregados del suelo y el amortiguamiento contra la acidez, la alcalinidad, salinidad, pesticidas y metales pesados tóxicos.
- Liberan nutrientes lentamente y lo contribuyen al pool residual de P y nitrógeno (N) orgánicos en el suelo, reduciendo la pérdida de N y la fijación de P; además de suministrar micronutrientes.
- Suministran alimento y promueven el crecimiento de microorganismos y lombrices.
- Ayudan a suprimir ciertas enfermedades de las plantas y parásitos.

3.7.5 Geotextiles biodegradables (yute)

Algunas de las técnicas de Bioingeniería más comúnmente empleadas para el favorecimiento de la recuperación de la cubierta vegetal, es el uso de algunos geotextiles, como el yute que pueden ser sintéticos o naturales, incluyendo yute, fibra de coco, sisal de cereales, paja, nylon, hojas de palma, polipropileno, poliéster y polietileno (Rickson, 2006; Bhattacharyya *et al.*, 2010; Sarsby, 2007); estos están contruidos a partir de materiales orgánicos, y resultan ser muy eficaces en el control de la erosión y el establecimiento vegetal (Langford y Coleman, 1996).

A los geo sintéticos se les define como "textiles permeables utilizados en relación con el suelo, la fundación, roca, tierra o cualquier ingeniería geotécnica" (John, 1987).

El yute aporta propiedades relevantes para mantener la humedad y su instalación en los suelos sin estructura evita que este se erosione (Aashto *et al.*, 1990; Chattopadyay *et al.*, 1997; Chakravarty, 2005). Debido a las propiedades que presenta se utiliza en las técnicas de bioingeniería (represa de rocas, control de agua de escorrentía y diques) para ayudar a controlar la erosión con mejores resultados. Esta técnica tiene muchas ventajas, ya que, al requerir menor mantenimiento se logra reducir el costo total.

La longevidad de los geo textiles depende de varios factores externos, como el efecto de los rayos ultravioleta (UV) y la degradación debido a la temperatura al agua. La energía de los fotones puede ser mayor o igual que la fuerza de química —los vínculos entre los polímeros— y, en consecuencia, se pueden romper las fibras o producir degradación (Khanna, 2005).

3.8 Especies vegetales

Guaritagua (1990), estima que, para comenzar a restaurar el suelo, es necesario tener conocimiento del sistema que se va a manipular, ya sea por recopilación de información previa o desarrollando investigación directa; Brown (1993), por otro lado, menciona que primero se debe establecer una cobertura vegetal estabilizadora del terreno, usando una diversidad de especies herbáceas nativas o naturalizadas.

3.8.1 Especies vegetales nodrizas

Huelgas y De Val (2014), mencionan que una planta nodriza es aquella que facilita el crecimiento y desarrollo de otras especies de plantas (especies blanco) que crecen bajo su copa. En realidad, las plantas nodrizas crean microambientes más favorables que aquellos encontrados en los espacios abiertos: la zona debajo de la cubierta de la planta nodriza suele tener mejores condiciones de luz, temperatura, nutrientes y humedad; lo que permite a la especie blanco crecer más fácilmente. Este tipo de interacción positiva entre dos especies (con efectos benéficos sobre uno de los organismos) se conoce como “facilitación”. Actualmente se considera que esta interacción puede ser determinante en la estructuración y funcionamiento de algunos ecosistemas, sobre todo en ambientes altamente estresantes como los desiertos, montañas altas o zonas degradadas.

De acuerdo con la información bibliográfica, se identificó que *Agave salmiana* (maguey pulquero) (*Metl*, de náhuatl) de la familia Asparagaceae, y *Opuntia robusta* (Nopal camueso) (*nohpalli* o *nochtli* de náhuatl) de la familia Cactaceae, resultaron ser las más adecuadas de acuerdo con sus características, que se describen a continuación:

3.8.2 Generalidades de la Subfamilia *Agavoideae* (Magueyes, Yucas Y Parientes)

García- Mendoza (2007), menciona que, entre las plantas más conspicuas del paisaje mexicano, en especial de las zonas áridas y semiáridas de México, están los agaves o magueyes, considerados especies claves de esas regiones, tanto por su abundancia como por la cantidad de recursos que proporcionan a otros organismos

Los agaves (del griego *Agave*- maravilla) o magueyes (palabra de origen antillano), conocidos por los mexicanos con el nombre de *metl* (Figura 4), han sido y son característicos de los paisajes áridos y semiáridos de México, donde sobresalen tanto por su tamaño, como por la gran variedad de formas que han adoptado como resultado de un largo proceso evolutivo. Pertenecen a la familia botánica de las Agaváceas, cuyo centro de origen se encuentra en México y su uso como recurso se remonta a la época prehispánica (10 000 a 8 000 años a.C.) para la elaboración de infinidad de productos, de los cuales sólo algunos han prevalecido o se han transformado a lo largo de la historia.

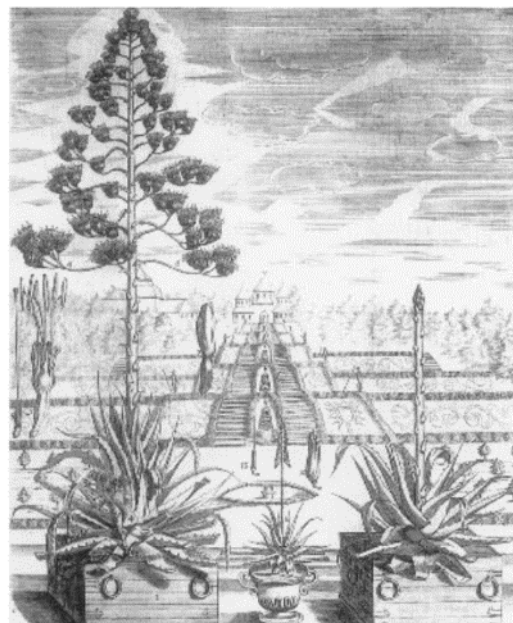


Figura 2. Los Agaves en la cultura Mexica, obtenida de García (2007).

Se puede decir que los agaves o magueyes se hallan asociados con todo tipo de paisaje. Aunque muestran preferencia por los matorrales xerófilos del Altiplano, tanto en el Desierto Sonorense, como en el Chihuahuense y en las zonas semiáridas del sur de México (Cervantes, 2005).

El profundo conocimiento de la naturaleza que tenían los indígenas desde la época prehispánica les permitió utilizar los magueyes en múltiples formas, ya que de sus pencas obtenían hilos para la elaboración de costales, tapetes, morrales, ceñidores, redes de pesca y cordeles; las espinas se usaban como agujas o clavos; las pencas completas eran utilizadas como tejas para techar sus casas; además de obtener el pulque, la bebida ritual por excelencia para ellos. La mayoría subsisten en la actualidad (Ramírez, 2000).

Los usos de los magueyes como recurso natural de zonas áridas y semiáridas pueden organizarse en tres grupos, a saber:

1. Magueyes productores de bebidas fermentadas: magueyes pulqueros:

Esta bebida era producto de la fermentación de la savia extraída de algunos magueyes que formaban parte del paisaje natural de extensas zonas del país. El pulque se extrae de diferentes especies de maguey, siendo las principales el maguey manso o de pulque (*Agave salmiana*) y el maguey manos largas (*A. mapisaga*) aunque también se explotan otras especies. La savia dulce de sus hojas recibe el nombre de “aguamiel”, líquido incoloro, transparente, con sabor dulce y agradable, cuyos principales componentes químicos, además del agua son: sacarosa, glucosa, materias albuminoides y sales minerales. Sus componentes químicos constituyen un excelente medio para la proliferación de microorganismos (García, 1992).

2. Magueyes productores de bebidas destiladas: tequileros y mezcaleros.

El mezcal se produce en casi todos los lugares de México donde hay agaves. Son famosos los mezcales de Oaxaca y los norteños, pero en casi todo el país existen agaves y con ellos se elabora esta bebida. Los magueyes de los Valles Centrales de Oaxaca, en donde sobresale el *Agave angustifolia* o “espadín”. Estos magueyes son importantes porque de ellos se han obtenido durante mucho tiempo diversos productos tales como alimentos, bebidas, forraje, fibras y medicamentos, lo que indica que han desempeñado un papel preponderante en el desarrollo cultural de esa región (Cervantes, 2005).

3. Magueyes productores de fibras: henequén y lechuguilla.

Las fibras extraídas de las hojas de los magueyes y otras plantas de la familia de las agaváceas o muy afines a ellas, reciben el nombre coloquial de “ixtle” y debido a su resistencia son conocidas como “fibras duras”, que se utilizan en la elaboración de cuerdas, costales, cepillos, morrales y muchos otros objetos. Numerosas especies de agaves son utilizados en la industria fibrera como es el caso de la lechuguilla (*Agave lechuguilla*), característica del Desierto Chihuahuense; el henequén (*A. fourcroydes*), de la Península de Yucatán; el sisal de Chiapas y Yucatán (*A. sisalana*); el espadín de Oaxaca (*A. angustifolia*) y el zapupe tamaulipeco (*A. angustifolia* var. *deweyana*), por citar algunos. Otras agaváceas, llamadas comúnmente “palmas” (*Yucca spp.*) así como algunas nolináceas o “palmillas” (*Nolina spp.*), botánicamente muy cercanas a las agaváceas, que también son utilizadas en la obtención de fibras duras (Cervantes, 2005).

3.8.2.1 Morfología, fisiología y entorno.

Los agaves son plantas perennes, con hojas dispuestas en espiral y arregladas en rosetas en el ápice de un tallo, el cual puede ser corto y apenas sobre pasar unos centímetros del suelo, o bien, ser largo y erecto —en este caso llega a medir hasta tres metros de altura; en varias especies el tallo se dobla hacia el sustrato y reptar sobre el suelo o las rocas, por lo que es difícil observarlo, ya que pueden surgir rosetas a lo largo y, además, quedar cubiertos por las hojas secas. Las hojas por lo general son suculentas, fibrosas, con la base dilatada y carnosa; su forma varía de lineal a lanceolada u ovada (Figura 5); las de las especies más pequeñas no sobrepasan veinte gramos de peso, mientras que las de los magueyes pulqueros son las más grandes del género, llegando a pesar más de treinta kilos cada una (García, 2007).

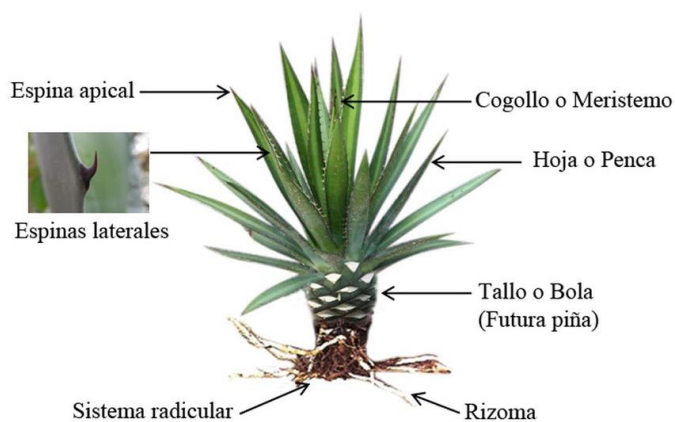


Figura 3. Morfología general del género *Agave*, obtenida de García (2007).

Entre las especializaciones morfológicas a las condiciones adversas, García- Mendoza (2007), menciona que consisten en modificaciones en la estructura básica de una planta como respuesta a las presiones del

ambiente. Los *Agaves* poseen estrategias para sobrevivir en ambientes secos o periódicamente secos, especialmente en el suelo, con fuertes fluctuaciones de temperatura entre el día y la noche, las cuales tienden a limitar la pérdida de agua por transpiración y a acumularla en tejidos especializados, además, nos ofrece un listado de características que definen a los agaves, entre ellas se observa que:

- El desarrollo de succulencia en las hojas es una de sus adaptaciones más conspicuas, ya que el agua almacenada durante la época de lluvias permite que las plantas sobrevivan durante algún tiempo en ausencia de suministro de agua del exterior, lo que ocurre cuando las condiciones del suelo son tales, que la raíz ya no es capaz de extraerla de él.
- Son plantas xerófitas, es decir que están adaptadas a vivir en condiciones climáticas desfavorables, con largos periodos de sequía y altas temperaturas.
- El sistema de la raíz de los agaves es superficial, lo cual facilita la absorción de agua de lluvia, generalmente escasa, que sólo humedecen la superficie del suelo; de tal manera que la probabilidad de supervivencia de una roseta en sequías prolongadas depende del volumen de agua y de los carbohidratos almacenados durante la época favorable.

Respecto a su reproducción, García- Mendoza (2007), refiere que, los agaves se reproducen de manera sexual y asexual. La reproducción sexual se logra mediante la polinización que efectúan algunos animales, principalmente murciélagos nectarívoros y, en menor grado, insectos diurnos y nocturnos (palomillas, abejas, abejorros) y aves (colibríes, aves percheras). En el maguey pulquero (*Agave salmiana*), el espadín (*A. angustifolia*), el blanco (*A. americana*), el papalometl (*A. potatorum*) y el de cerro (*A. asperrima*), el sistema de reproducción es de tipo semélparo o monocárpico, es decir, las plantas mueren después de reproducirse; la semelparidad es una forma de reproducción poco común en las plantas con flores y pudo haber evolucionado debido a la altura de la inflorescencia, ya que las flores a mayor altura son más atractivas para los polinizadores; subsecuentemente, al incrementar las plantas progresivamente su esfuerzo reproductivo, los recursos asignados al despliegue floral alcanzaron un máximo, causando la muerte de la planta. Otras especies pueden ser consideradas iteróparas o policárpicas, pues sólo muere la roseta que tiene la inflorescencia, pero no el individuo; es el caso del cacalotentli (*Agave angustiarum*), las gallinitas (*A. stricta*) y el maguey Chamula (*A. chiapensis*).

3.8.2.1.1 *Agave salmiana*

Agave salmiana ha sido cultivado por más de 5000 años, y muchas de sus características probablemente han sido moldeadas por esta larga asociación con el hombre (Martínez del Río & Eguiarte, 1987). Es una de las especies que más se utilizan en la producción de pulque en México. Pertenece al subgénero *Agave* y se encuentra dentro del grupo *Salmianae*, que tiene un número total de cinco especies, de las cuales tres son endémicas de nuestro país (García, 1995).

Es una especie, robusta, mediana a grande, presenta un tallo pequeño a grueso, con raíz fibrosa revestida de escamas, en general forma rosetas macizas de 1.5-2 metros de alto y con el doble de ancho, son carnosas y macizas, verdes a grisáceas, profundamente convexas en la base, cóncavas hacia arriba, con espina terminal pungente de aproximadamente 5 a 8.5 cm de largo y con abundantes espinas marginales; son largas, acanaladas, simples, enteras, más o menos lanceoladas, con el ápice agudo de color verde oscuro; la longitud de las hojas es según las variedades; la prefoliación es central, la yema central alcanza casi toda la longitud de la planta; las yemas laterales nacen cerca del suelo; la inflorescencia es paniculada, robusta, de seis a ocho metros de altura, con 15 a 24 pedúnculos laterales; el escapo floral con brácteas carnosas y suculentas. Las flores son hermafroditas, tienen ovario ínfero, perianto de seis piezas, androceo de seis estambres largos, gineceo constituido por un ovario oblongo y cilíndrico, trilobulado, multiovalado, estilo central y con los frutos superpuestos (Figura 6). El fruto es una cápsula oblonga, con seis casillas longitudinales y tres lóbulos. Las semillas son negras, triangulares, con el embrión recto y el endospermo carnoso (Granados, 1993; Rangel y Galván, 1992; Martínez del Río y Eguiarte, 1987).

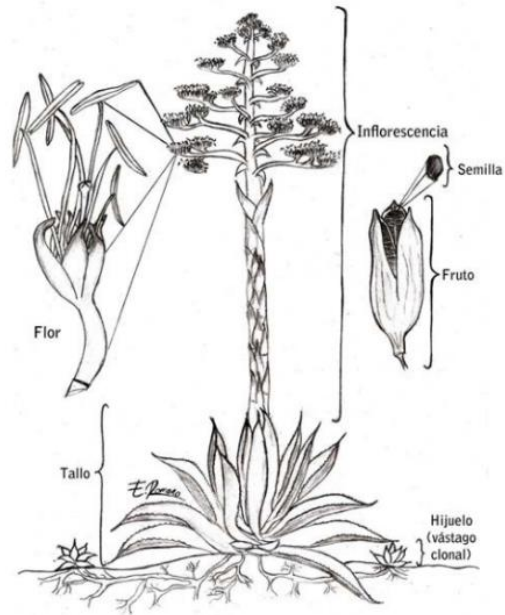


Figura 4. Estructuras reproductivas de la especie *Agave salmiana*; Ilustración: Trejo, (2017).

En condiciones de cultivo, alcanza la edad reproductiva alrededor de los ocho años. (Eguiarte, Souza & Silva, 2000).

De acuerdo con Martínez del Río y Eguiarte (1987), el periodo de floración de *A. salmiana* ocurre desde el final de la época seca hasta el comienzo de la época lluviosa, a partir de mayo y hasta julio.

3.8.3 Historia y generalidades de la Subfamilia *Opuntioideae* (Choyas, Nopales y Parientes)

La familia Cactaceae pertenece al orden Caryophyllales. Es nativa del Continente Americano, siendo México el país que contiene más de 50% de sus especies y un 50% de endemismos, tanto a nivel genérico como específico (Bravo, 1978; Bravo y Sánchez-Mejorada, 1982). Su clasificación comprende tres subfamilias: *Pereskioideae*, *Opuntioideae* y *Cactoideae* (Barthlott y Hunt, 1993).

La familia de los cactus (biznagas, tatechos, nopales y choyas) se originó en el continente americano y se distribuye naturalmente desde el sur de Canadá hasta la Patagonia, en Argentina. De las 1,400 especies de cactus, 670 viven en México, y de estas, 508 son endémicas; algunos especialistas los dividen en dos grupos: *Opuntia* y *Nopalea*. Aunque los tallos de ambos grupos son muy similares, la forma de las flores es distinta. Las del género *Opuntia* parecen copas con pétalos pequeños y son polinizadas por insectos, las de *Nopalea* son elongadas y con pistilo y estambres largos y sobresalientes, y las polinizan los colibríes. El territorio mexicano se considera el centro de mayor diversidad de cactus del continente, pero también es centro de la diversidad de nopales, ya que este grupo vegetal lo conforman aproximadamente 200 especies, de las cuales 101 (93 de *Opuntia* y ocho de *Nopalea*) viven en México. De las noventa y tres especies de *Opuntia*, sesenta y dos son endémicas del país y de las ocho especies de *Nopalea*, seis son endémicas (SEMARNAT, 2017).



Figura 5. Códice Mendocino 1541, donde se muestra la alegoría fundacional de México-Tenochtitlan (Reyes, 2016).

Reyes (2016) a través de su publicación de el “El nopal, un icono de la patria” menciona que, junto con el maguey y el mezquite, el nopal formó el triunvirato de plantas sagradas del México prehispánico. Ellas fueron el eje de la economía cazadora-recolectora de los nómadas del altiplano mexicano, además de que esa planta fue el fin del peregrinar mítico, en julio de 1325, cuando los aztecas encontraron el oráculo (Figura 7): el nopal sobre el que se posaba el águila agarrada con una de sus patas de una tuna. Era una tuna que simbolizaba al corazón humano obtenido en los sacrificios humanos, corazones llamados *teonochtli* (tuna divina) o *cuauhnochtli* (tuna de águila). El nopal era sagrado, cósmico, con las raíces conectaba al inframundo y con las tunas (los corazones sagrados) al cielo.

De acuerdo con Cervantes (2005), los nopales tienen un variado potencial de aprovechamiento, sin embargo, con base en su importancia económica, destacan tres tipos de uso: nopales como verdura, nopales tuneros y nopales forrajeros:

3.8.3.1 Los nopales como verdura.

Los nopales verdura, son conocidos comúnmente con el nombre de “nopalitos” y su cultivo se ha difundido en los últimos años, ya que un gran número de especies de nopal son aptas para el consumo como verdura fresca. Entre las especies utilizadas pueden mencionarse: el nopal de castilla (*Opuntia ficus-indica*), (*O. Robusta*), el nopal cardón (*O. streptacantha*) y el nopal criollo (*Opuntia sp.*). Esto explica que en el mercado se puedan encontrar gran diversidad de nopalitos.

3.8.3.2 Nopal tunero.

El fruto de los nopales aplanados o *platiopuntias* es conocido comúnmente como “tuna”, la cual se trata de una baya carnosa cilíndrica y jugosa. Su explotación a nivel comercial se lleva a cabo en dos zonas bien definidas: la primera comprende las porciones áridas y semiáridas del centro-norte de México y la segunda, las zonas semiáridas del centro– sur del país.

3.8.3.3 Nopales forrajeros.

Los principales nopales utilizados como forraje son variedades de dos especies del género *Opuntia*: *O. ficus indica* y *O. robusta*, aunque CONAZA ha intensificado la experimentación con fines de propagación del “nopal tasajillo” (*O. leptocaulis D.C.*), muy abundante en todo el Desierto Chihuahuense

3.8.3.4 Morfología, fisiología y entorno.

De acuerdo con Bravo (1978), dentro de las características principales del género *Opuntia* podemos mencionar las siguientes:

Son plantas, suculentas arborescentes, arbustivas o rastreras, simples o cespitosas, generalmente espinosas. Tronco bien definido o con ramas desde la base, erectas, extendidas o postradas. Artículos globosos, claviformes, cilíndricos o aplanados (cladodios), muy carnosos o leñosos. Limbo de las hojas pequeñas,

cilíndrico, carnoso, muy pronto caduco. Aréolas axilares con espinas, pelos, glóquidas y a veces glándulas; generalmente las de la parte superior de los artículos son las productoras de flores, espinas solitarias o en grupos, desnudas o en vainas papiráceas (Figura 8). Flores generalmente hermafroditas, ovario ínfero con una cavidad y muchos óvulos. Estambres numerosos, más cortos que los pétalos, grueso: lóbulos del estigma cortos. Fruto en baya, seco o jugoso, espinoso o desnudo, globoso, ovoide hasta elíptico. El género *Opuntia* se divide en dos subgéneros: el *Cilindropuntia* (en general, éste no tiene mayor importancia económica) y el *Platyopuntia*.

El subgénero *Platyopuntia* agrupa a las especies del género *Opuntia* que presenta tallos aplanados (penca, cladodios o raquetas). Dentro del subgénero se reconocen 28 series de especies. Una serie de mayor interés es la *Streptacanthae* que agrupa diversas especies, las cuales son plantas arborescentes, ramosas, artículos glabros, verdes, espinas blancas, o ligeramente amarillentas. Flores grandes, amarillas, hasta anaranjadas; fruto carnoso, comestible y muy agradable. A esta serie pertenecen la mayoría de las especies que producen frutos comestibles (Bravo, 1978).

Las especies de estos dos géneros desempeñan un importante papel en el ecosistema por presentar raíces fibrosas muy extendidas y superficiales, pudiendo durante las noches captar, a través de la región pilífera, el rocío que recubre el suelo, y de esta forma, introducir el agua al tallo con un movimiento ascendente. Estudios de Llovera-Lozano (1985) indican que asociadas a sus raíces se encuentran bacterias nitrificantes, capaces de absorber e introducir en la planta y en el suelo, el nitrógeno del aire.

Montiel y Olivares (1997), refieren micorrizas relacionadas con una mayor absorción de fósforo, agua y nutrientes, enriqueciendo así el suelo donde habitan.

3.8.3.4.1 *Opuntia robusta*

Bravo (1982) manifiesta en "Las Cactáceas de México" que el uso comestible de las cactáceas constituye uno de los más importantes y tradicionales del que tenemos conocimiento, obviamente el género *Opuntia* es el más conocido por su uso como verdura y por las tunas, entre las especies que enumera se encuentran: *Opuntia streptacantha*, *Opuntia megacantha*, *Opuntia joconostle*, *Opuntia robusta*, *Opuntia ficus-indica*, *Opuntia hyptiacantha* y *Opuntia lasiacantha*. Además, menciona que el sistema radicular de las cactáceas tiene propiedades que propician el mejoramiento de los suelos.



Figura 7. Ejemplar de *Opuntia robusta*; Imagen de Manuel Nevárez

Cornejo & Arreola (2008) menciona que *Opuntia robusta* es utilizada en experimentos de restauración de suelos en el municipio de Ojuelos, en Jalisco.

Corresponde a un cactus breñoso, de tallo muy ramificado desde la base; de color azul plateado, presenta segmentos ovalados, aplanados, circulares u oblongos de 15 a 40 cm. de largo o más, de unos 30 cm. de diámetro y muy gruesos de hasta 2,5 cm. de espesor; con espinas (hojas modificadas) blancas de 8 a 12 por areola, de hasta 5 cm. de longitud (Figura 9).

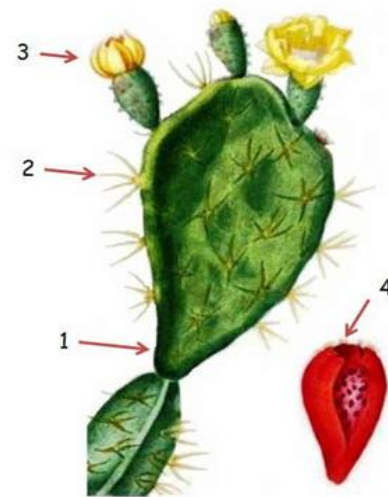


Figura 6. Señaladas aparecen las partes: (1) cladodio o penca, (2) espinas, (3) flor y (4) fruto, donde se pueden apreciar las semillas (Bravo, 1978).

Floración: flores de color amarillo muy intenso y en forma de platillo (Figura 10), miden aproximadamente 7 cm. de diámetro. Florece en primavera-verano. Fruto: globosos, subglobosos o elípticos de color rojo y con pulpa roja en su interior. En estas plantas es frecuente encontrar tanto flores unisexuales, como hermafroditas (González, Riojas & Arreola 2001).



Figura 8. Floración *Opuntia robusta* (Enciclovida, 2019).

4. Hipótesis

El acolchado con geotextil (yute), mezcla de suelo con abono orgánico (composta), el uso de especies vegetales nativas (*Agave salmiana* y *Opuntia robusta*), promoverán la retención de suelo, para evitar la erosión, además de que se propiciarán las condiciones adecuadas para la recuperación de la cubierta vegetal.

5. Justificación

En el Parque Ecológico “Cubitos”, la erosión es un problema grave ya que tiene laderas con pendientes superiores a los 6 grados, además de ser un sitio de paso para los pobladores, que lo atraviesan para llegar a la ciudad de Pachuca, al igual que la presencia de incendios en la época seca del año y lluvias torrenciales en las laderas de pendientes altas; lo que ha provocado una grave erosión y pérdida de cubierta vegetal. Por lo que ayudará a su control en el área deteriorada del Parque por medio del empleo de técnicas de bioingeniería, en donde se emplean materiales vegetales vivos (plantas) y geotextiles (yute) favorecerá a la estabilización y mejoramiento de la estructura del suelo, aumentar su fertilidad y facilitar el establecimiento de una cubierta vegetal.

6. Preguntas de investigación

- ¿Alguna de las técnicas de bioingeniería seleccionadas como el acolchado con geotextil (yute) más la mezcla de suelo con abono orgánico (composta), beneficiará más a alguna especie?
- ¿El uso de técnicas de bioingeniería mejorarán los parámetros biológicos y físicos y químicos del suelo?
- ¿El uso de técnicas de bioingeniería como el acolchado con geotextil y la mezcla de abono orgánico, mejorarán la cubierta de protección al suelo, y contribuirán a la formación de la cubierta vegetal?

7. Objetivo general

- Identificar mediante el registro mensual de la cobertura vegetal y crecimiento de los organismos vegetales, si de las técnicas empleadas implementadas en *Agave salmiana* y *Opuntia robusta*, alguna de ellas proporciona un aumento, tomando en cuenta que las técnicas fueron el acolchado con geotextil (yute) y la mezcla de suelo con abono orgánico (composta).

7.1 Objetivos particulares

- Comprobar si las técnicas de bioingeniería seleccionadas mejoran la calidad del suelo, a través del análisis de indicadores físicos (textura, densidad aparente, color), químicos (pH, Materia orgánica), y biológicos (cobertura vegetal).
- Comparar la tasa de supervivencia y crecimiento de los organismos empleados para identificar que tratamientos muestran mejores resultados de acuerdo con cada técnica implementada.

8. Zona de estudio

El Parque Ecológico Cubitos, fue decretado área natural protegida (ANP), en la categoría de Parque Estatal el 30 de diciembre del 2002, en una superficie de 132 ha. Se localiza en Pachuca Hidalgo (Figura 11), entre los paralelos 20° 06' 33" y 20° 07' 39" de longitud norte y 98° 44' 60" y 98° 45' 00" de longitud oeste. Perteneció al sector del parte agua de la Región Sur de la Sierra de Pachuca y los lomeríos que lo conforman se ubican en la Provincia Ecológica de los Lagos y Volcanes de Anáhuac (SEDESOL, 1993; Consejo Estatal de Ecología, 2002).

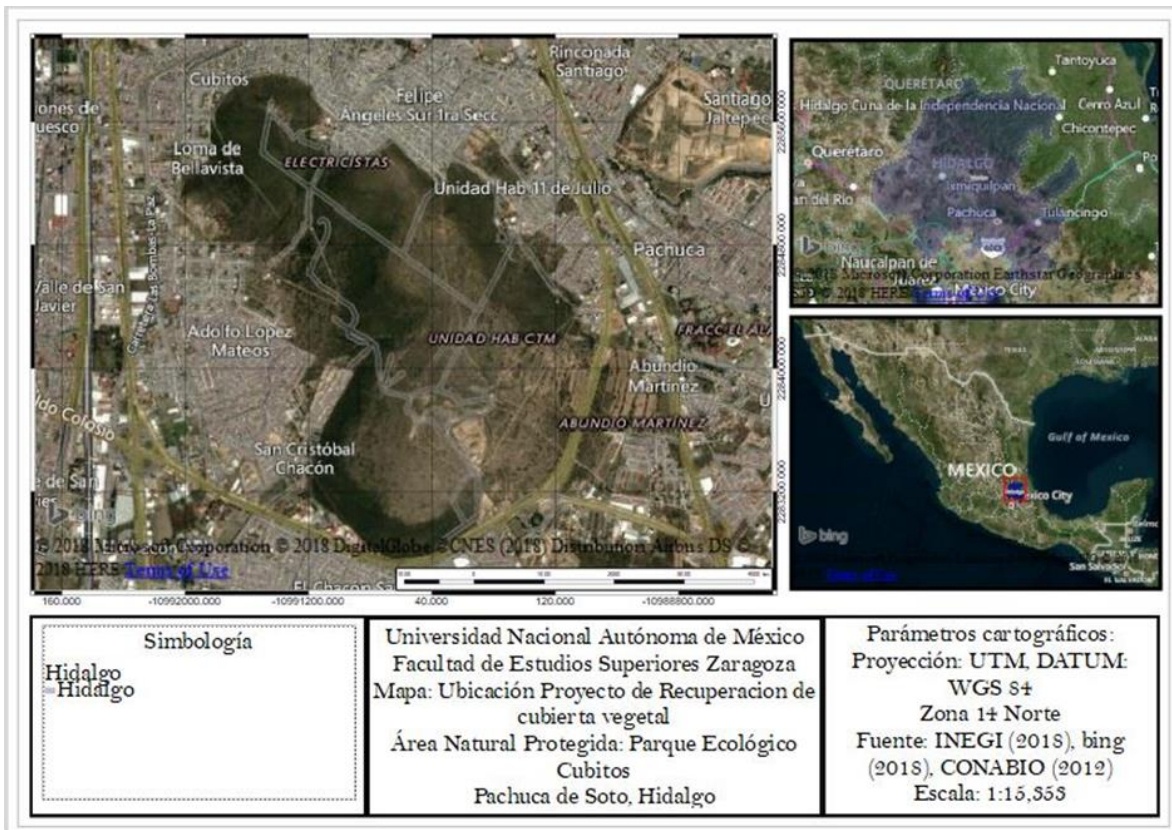


Figura 9. Mapa del Parque Ecológico Cubitos, elaborado con datos obtenidos del INEGI (2018), Bing (2018) y CONABIO (2012).

8.1 Clima

Es semiseco (BS1) con verano cálido; los registros mínimos de temperatura son de 10 °C, aunque el rango normal es de 8.5°C, la temperatura máxima es de 22.7°C, que se registra en el mes de abril con 27.95°C y la mínima en febrero con 1.01°C. La precipitación muestra un comportamiento errático donde los mínimos anuales ocurren cada cinco años con 291 mm. Los meses más lluviosos son julio con 83.56 mm y septiembre con 117.8 mm, mientras que en diciembre se registran los valores mínimos de 7.15 mm (García, 2003).

8.2 Flora

Los tipos de vegetación presentes son: matorral micrófilo, matorral rosetófilo y matorral crasicale. La flora está constituida por 141 especies, 101 géneros y 37 familias; de acuerdo con la FE de erratas a la Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010, publicada el 14 de noviembre de 2019., cuatro especies están sujetas a protección especial (SEMARNAT, 2019). La vegetación del parque corresponde a un material xerófilo, donde predominan principalmente el matorral micrófilo y rosetófilo. Además, en el área se localiza un pastizal inducido posiblemente a partir del matorral desértico rosetófilo (Barrios y Medina, 1996).

El matorral rosetófilo prospera cuando hay pendientes moderadas y alta pedregosidad, y en él se presentan especies como *Agave lechuguilla*, para algunas áreas se observan *Mammillaria magnimama*, *M. biuncifera*, *Ferocactus latispinus*, *Echinocereus cinerascens*, *Coryphanta sp.* y *Stenocactus sp.*, que constituyen parte de los estratos inferiores. En el estrato medio superior se observa a *Dalea versicolor*, *Zaluzamia augusta*, *Baccharis conferta*, *Jatropha spp.*, *Senecio spraecox* y micrófilos como *Mimosa biuncifera*, cuya alternancia se observa con frecuencia en la porción oeste del parque, *Opuntia streptacantha*, *Yucca filifera* y *Dasyliion acrotriche*. En el estrato arbóreo se observan pocos elementos de *Schinus molle* (Barrios y Medina, 1996; COEDE, 2002). Las especies que han sufrido una reducción notable en este ecosistema son, izote o palma (*Yucca filifera*), uña de gato o garabatillo (*Mimosa biuncifera*), y guapilla o lechuguilla (*Hechtia podantha*), asimismo, están dentro de las consideradas como en peligro de extinción de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010: garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), nopal arrastradillo (*Opuntia cantabrigiensis*), nopal duraznillo (*Opuntia leucotricha*) y biznaguilla (*Coryphantha cornuta*) (G.E.H, 2002).

8.3 Fauna

Con respecto a la fauna silvestre, el grupo de los anfibios está representado por dos especies, dos géneros y dos familias; los reptiles por seis especies, cinco géneros y cuatro familias; las aves por 23 especies, 22 géneros y 14 familias y los mamíferos presentan 20 especies, 17 géneros y siete familias. Así mismo se han registrado 36 especies, 30 géneros y siete familias de lepidópteros; cuatro especies, tres géneros y tres familias de arácnidos y 56 especies, 33 géneros y seis familias de abejas. Cinco especies están amenazadas, dos especies están sujetas a protección especial, una especie se encuentra en peligro de extinción y una especie se considera como rara de acuerdo con la FE de erratas a la Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010, publicada el 14 de noviembre de 2019. (Velázquez, 2010).

En cuanto a la araneofauna, se encuentra la araña manchada de jardín (*Neoscona oaxacensis*), araña de jardín bandeada (*Argiope trifasciata*), araña tejedora (*Neoscona arabesca*), araña manchada de Orizaba (*Neoscona orizabensis*), y araña tejedora de orbes laberinto (*Metepeira labyrinthea*) (Flores y Espinosa, 2016).

De la mastofauna presente, se tienen registradas 17 especies de mamíferos entre ellos se mencionan algunos posibles depredadores de nidos de las aves que habitan el parque como cacomixtle (*Bassariscus astutus*), ardilla (*Spermophilus variegatus*), algunos organismos pertenecientes la familia *Leporidae* (Liebres y conejos), entre ellos *Lepus californicus* (Liebre cola negra), *Lepus californicus* subsp. *Texianus* (ruyé), así como perros y gatos domésticos. En cuanto a la avifauna, se cuenta con un listado preliminar donde se tienen registradas 23 especies de aves, incluyendo tres especies amenazadas y dos con protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2001. Además, entre el listado de especies reportados, se encuentran el pinzón mexicano (*Haemorhous mexicanus*), cucarachero desértico (*Campylorhynchus brunneicapillus*), tortolita mexicana

(*Columbina inca*), churrinche (*Pyrocephalus rubinus*), mosquero llanero o papamoscas llanero (*Sayornis saya*), cuitlacoche piquicurvo (*Toxostoma curvirostre*), toquí pardo o tarengo (*Melospiza fusca*, anteriormente *Pipilo fuscus*), y turpial o calandria café (*Icterus spurius*) (Rendón, 2008).

Adicionalmente, en el parque se ha reportado la presencia del chipe patilludo (*Geothlypis formosa*) por Carbó y Zuria (2012), con lo cual las autoras, mencionan que este registro sugiere una posible ampliación de su distribución en el estado, y que los individuos pueden migrar a mayores altitudes y utilizar el matorral xerófilo en la época invernal.

9. Geología y tipo de suelo

Se considera una estructura intrusiva riolítica en forma de dique silicificado que se emplazó en una falla preexistente de rocas andesíticas; presenta rocas ígneas y sedimentos, las rocas volcánicas del Oligoceno se encuentran en los depósitos tobáceos de Cubitos; la toba volcánica es un tipo de roca formada por la acumulación de piroclastos (fragmentos de roca arrojados durante una erupción explosiva) de grano fino, particularmente cenizas volcánicas (DGG, 1993). Los suelos que se presentan en el Parque se denominan Vertisoles Pélicos y Feozem Háptico (DGG, 1983). De acuerdo con el conjunto de datos vectoriales edafológico del INEGI (2014), el suelo dominante sobre el área del proyecto es Feozem Háptico (Cuando se habla de háptico, esto significa que no muestra ninguna característica especial y/o adicional a la del grupo al que pertenece).

10. Método

El plan de trabajo para el proyecto de recuperación de cubierta vegetal consistió en visitas mensuales al Parque ecológico de Cubitos, situado en Pachuca, Hidalgo.

Y el método de trabajo se dividió en 2 etapas:

- a) Trabajo de campo.
- b) Trabajo en laboratorio.

Siendo ambas realizadas durante los meses de octubre de 2017 a noviembre de 2018, y correspondiendo a los periodos de lluvias y de secas.

10.1 Trabajo en campo:

Mediante recorridos en el parque, se buscó una zona perturbada, es decir con una erosión visible, sobre todo sin cubierta vegetal. Una vez identificada una zona con esas características, se procedió a delimitar la zona de trabajo, demarcando un polígono de 10 metros de largo por 5 metros de ancho, dividido a su vez en 4 sub cuadrantes de 2.5 metros de largo por 5 metros de ancho con las siguientes coordenadas extremas (Tabla 3: Coordenadas extremas de polígono de trabajo). Además de la delimitación de subzonas, el área de trabajo del proyecto, se dividió en 2 zonas, denominadas “Zona alta” y “Zona baja”, estas zonas fueron señaladas debido a la pendiente de 4 grados calculada con el clisímetro, los grupos acomodados en la Zona alta, correspondieron a aquellos que no se les agregó el abono orgánico, esto con la finalidad de evitar que en caso de lluvias los nutrientes se desplazaran hacia la Zona baja y causar una interferencia en los datos colectados mes tras mes, los grupos en Zona alta fueron: Testigo y Yute; y en Zona baja: Composta y Composta Yute.:

Tabla 3. Coordenadas extremas de polígono de trabajo

Coordenadas UTM; SRC: WGS 84, EPSG: 4326; Zona 14 Norte;		
Punto	Norte	Este
1	20.09830	-98.73666
2	20.09834	-98.73668
3	20.09839	-98.73661
4	20.09835	-98.73658

Una vez realizada la delimitación del área de trabajo, previo a la selección de los organismos, se realizó un primer muestreo de suelo de las subzonas marcadas, y posteriormente a los 6 meses de trabajo se realizó el segundo muestreo de suelo, y un tercer muestreo fue realizado al término del proyecto, esto para evaluar e identificar si es qué al cabo de un año, existieron cambios en el suelo de los tratamientos aplicados; lo siguiente fue seleccionar los organismos de las especies de *Agave salmiana* y *Opuntia robusta*, de las cuales se obtuvieron 20 organismos de cada especie.

Para realizar la selección de los organismos adecuados para el proyecto, se tomó en cuenta que estos fueran trasplantados de la zona de estudio, es decir nativos de la zona, en cuanto al tamaño del individuo, se marcaron aquellos que en promedio tuvieron una altura de 10 cm tanto para *Agave salmiana* y *Opuntia robusta*, con una tolerancia de +/- 5 cm para cada tratamiento, también se buscó que los organismos estuvieran en un buen estado general, es decir que no estuvieran lesionados tanto de las hojas o cladodios, como de las raíces. Durante todas las visitas registradas, uno de los puntos importantes del proyecto, fue que mensualmente se adiciono la misma cantidad de agua (medida con el mismo vaso de precipitados, que en todos los casos fue siempre de 300ml) a todos los organismos empleados en el proyecto.

De acuerdo con los organismos obtenidos, las unidades experimentales quedaron conformados por 4 tratamientos, cada uno con 5 organismos de cada especie, la descripción de cada tratamiento se enlista a continuación:

- Tratamiento 1: Mezcla de composta y geotextil (yute).
- Tratamiento 2: Mezcla de composta con el suelo de la zona.
- Tratamiento 3: Uso de geotextil (yute).
- Tratamiento 4: Grupo testigo (control).

El acomodo de los organismos seleccionados en cada tratamiento quedo definido de la siguiente manera, tal y como se muestra en la Figura 12: (Disposición de los organismos en el área de trabajo del Parque Ecológico Cubitos).

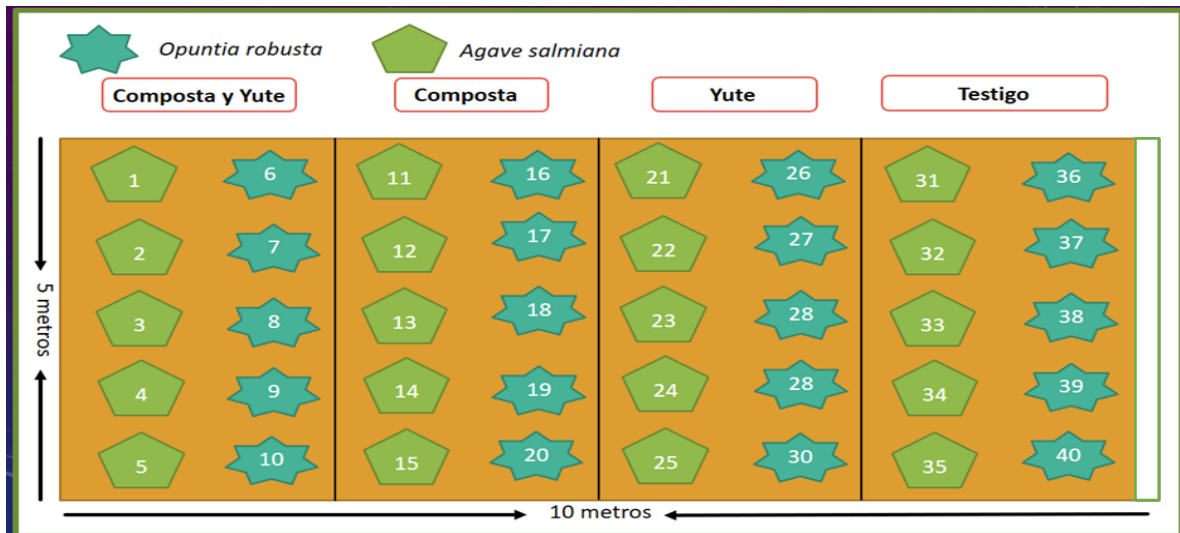


Figura 10. Disposición de los organismos en el área de trabajo del Parque Ecológico Cubitos.

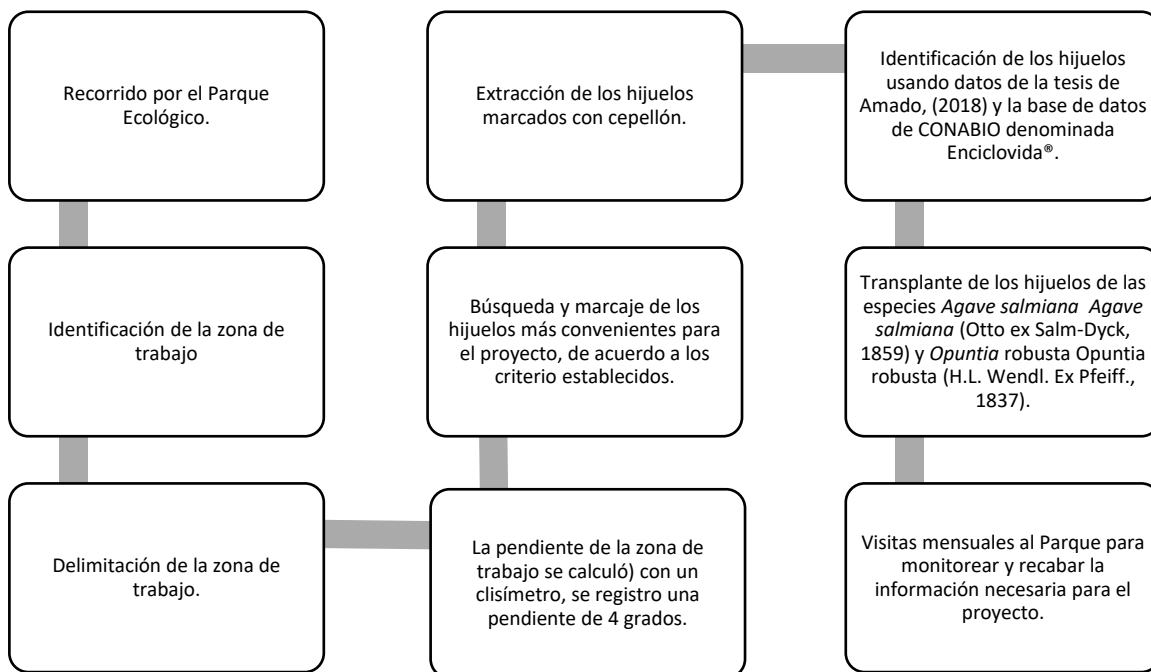


Figura 11. Puntos principales del procedimiento del proyecto.

10.2 Trabajo en laboratorio:

Consistió en el análisis de las muestras de suelo para evaluar parámetros físicos y químicos de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, los análisis se dividieron en tres fases: inicial, intermedia y final del proyecto

Los parámetros físicos, químicos y biológicos, se describen a continuación:

10.2.1 Parámetros Físicos:

Corresponde a los análisis de suelo realizados de acuerdo con lo especificado en la NOM-021-RECNAT-2000 de análisis de suelo, Ríos (1985). Esto al inicio del proyecto (octubre de 2017), seis meses después (mayo de 2018) y al término de este (noviembre de 2018) en donde los parámetros con 3 repeticiones cada uno a analizar fueron los siguientes:

- I. Densidad aparente (Gómez, 1985): De acuerdo con el método de la probeta, se define como el peso de una unidad de volumen de suelo que incluye su espacio poroso. Es importante para el manejo de los suelos por reflejar la facilidad de circulación de agua.
- II. Densidad Real a través del método del picnómetro: La densidad real de un suelo puede ser calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: La masa y el volumen de una cierta cantidad del suelo.
- III. Porcentaje de espacio poroso: Este se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse.
- IV. Textura: Se obtuvo mediante el método del Bouyoucos, en donde se eliminó la materia orgánica y la floculación debido a los cationes de Ca y Mg, para después tomar dos lecturas, una a los 40s para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y la otra lectura a las 2 horas para partículas de diámetro mayores a 0.002mm (limo y arena).
- V. Conductividad empleando el conductímetro: Método para la determinación de la conductividad eléctrica del extracto de saturación de un suelo por medición electrolítica y una celda de conductividad como sensor.

10.2.2 Parámetros Químicos:

Corresponden al mismo periodo que los parámetros físicos ya descritos.

- I. pH por el método electrométrico para la determinación en muestras de suelo en una solución de agua pura (destilada).
- II. Porcentaje de Materia orgánica y Porcentaje de Carbono orgánico: Estos se evalúan a través del contenido de carbón orgánico con el método de Walkley and Black.
- III. Porcentaje de Nitrógeno inorgánico (método micro-Kjeldahl): Se utiliza como índice de disponibilidad de nitrógeno en el suelo.
- IV. Cantidad de Fosforo extraíble (método de Olsen): Este método, es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para la determinación de fosforo disponible tanto en suelos neutros, como en alcalinos.
- V. Ca, Mg, Na y K: Método para determinar los cationes solubles en el extracto de saturación por medición en un aparato de absorción atómica (Ca y Mg) y en un espectrofotómetro de flama (Na y K) en los extractos diluidos.

10.2.3 Parámetros Biológicos:

- I. Porcentaje de supervivencia: El registro se obtuvo de acuerdo con la cantidad de organismos trasplantados al inicio, en comparación con la cantidad de organismos vivos al término del proyecto por tratamiento y especie.
- II. Cobertura vegetal (C.V.): Esta se estimó mediante la fórmula para el área de una elipse, a través de la medición de 2 semiejes, y nos indicó la capa de vegetación natural terrestre que cubre cada individuo empleado en el proyecto.
- III. Comparación de las medidas de altura inicial y altura final en cada tratamiento por especie: El registro se obtuvo mensualmente, y al término del proyecto se realizó un análisis estadístico a partir de las medias, que nos permitiera identificar el tratamiento que presentó una diferencia significativa.
- IV. Tasa relativa de crecimiento (T.R.C.): Es el incremento (exponencial) en tamaño en relación con el tamaño de la planta tal como era al principio de un intervalo dado. (Registro mensual del crecimiento de los organismos trasplantados), la TRC es un indicador importante de la estrategia de la planta con respecto a la productividad y los regímenes de disturbio del ambiente.
- V. Evaluación de retención de suelo en tratamientos: Este registro se obtuvo llevando a cabo la medición de la altura de suelo que se acumuló en cada organismo, la medición fue realizada a través de una regla inmersa en el suelo, a un costado de cada organismo.

11. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del proyecto se encuentran divididos de acuerdo con los parámetros: físicos, químicos y biológicos.

11.1 Resultados parámetros físicos y químicos

11.1.1 Parámetros físicos

Los resultados de los parámetros físicos se muestran a continuación, en la tabla 4:

Tabla 4. Parámetros físicos evaluados en el proyecto.

Fecha muestreo y sitio:	nov-17		may-18		nov-18	
Parámetros:	Z. Alta	Z. Baja	Z. Alta	Z. Baja	Z. Alta	Z. Baja
Δ aparente (g/cm ³)	0.930	0.870	1.025	1.003	0.930	0.860
Δ real (g/cm ³)	2.305	2.295	2.040	1.930	2.125	2.036
Espacio poroso (%)	58.880	61.280	49.360	47.520	56.230	57.760
Conductividad (dS/m)	0.248	0.229	0.780	0.650	0.565	0.562
Textura	Franca	Franca	Franca	Franca	Franca	Franca

11.1.1.1 Densidad aparente

Los resultados encontrados (tabla 4), muestran que seis meses después del trasplante de los hijuelos, la densidad aparente en el suelo aumentó en ambas zonas, excepto en el tercer muestreo, realizado en noviembre, ya que la densidad descendió, de acuerdo con esto, la NOM-021-RECNAT nos indica que son suelos arenosos con mezcla de limo y arcillas, orgánicos y de origen volcánico, esto porque se encuentran en el rango establecido menor a 1.00 y en el rango de 1.0 a 1.19 g/cm³. Jacome (2013), en un proyecto realizado en el mismo parque ecológico, reporta valores de densidad aparente de 1.06 a 1.23 g/cm³, y afirma que, de acuerdo con este tipo de suelo, hace que la penetración de raíces sea más fácil y aumente la capacidad de almacenar agua en la zona radical.

11.1.1.2 Densidad real

Los valores son ligeramente mayores (tabla 4), y esto nos indica de acuerdo con López y Pardo (2009), que las densidades permiten la presencia de algunas especies vegetales, lo cual se vuelve evidente, si observamos las figuras 18 a 21, en donde la vegetación de especies oportunistas se hizo notar, al cabo de unos meses del proyecto, ya que por ejemplo, en el primer muestreo los valores de densidad real fueron para la zona baja de 2.295 g/cm³ y para la zona alta 2.305 g/cm³ y al término del proyecto se mantuvieron, presentando una ligera disminución, para la zona baja la densidad real terminó en 2.036 g/cm³ y para la zona alta el valor fue de 2.125 g/cm³.

11.1.1.3 Espacio poroso

Una vez que se obtuvieron los valores de densidad aparente y densidad real, se calculó el porcentaje de espacio (tabla 4), el cual en el primer muestreo mostro valores de 58.88% y 61.28% para la zona alta y baja respectivamente, y para el último muestreo, estos valores fueron ligeramente menores, con un 56.23% y 57.76% para las zonas alta y baja respectivamente, estas disminuciones se pueden atribuir al crecimiento radical de los organismos trasplantados, lo que nos podría indicar que el suelo fue el adecuado para realizar el trasplante, y por ello se favoreció el crecimiento de las plantas empleadas.

11.1.1.4 Conductividad

En la tabla 4, se identifica que la conductividad en el primer muestreo fue de 0.248 y 0.229 ds/m para la zonas alta y baja respectivamente, y en el último muestreo existió un aumento de la conductividad, ya que al estar presente organismos que retienen agua, por ende, se retienen sales y minerales, pero aun cuando existió un aumento, la NOM-021-RECNAT, nos indica que estos valores, se reportan como efectos despreciables de la salinidad al encontrarse < 1.0 la conductividad eléctrica.

11.1.1.5 Textura

De acuerdo con el procedimiento mostrado en la NOM-021-RECNAT del triángulo de textura del suelo, la clase textural resultó ser Franca (C), ya que se obtuvieron 37.48% Arena; 22.58% Arcilla; 40% Limo. (tabla 4).

11.1.2 Resultados parámetros químicos

Los resultados evaluados en el proyecto se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Parámetros químicos evaluados en el proyecto:

Fecha de muestreo y sitios:	nov-17		may-18		nov-18	
	Z. Alta	Z. Baja	Z. Alta	Z. Baja	Z. Alta	Z. Baja
Parámetros:						
pH	8.180	8.010	8.880	8.840	8.917	8.660
M.O (%)	1.660	1.270	0.980	0.880	1.025	1.032
C orgánico (%)	0.960	0.736	0.568	0.510	0.594	0.598
N (mg Kg ⁻¹)	7.200	9.600	6.090	6.510	2.492	1.767
P (mg Kg ⁻¹)	15.044	14.990	33.700	34.800	30.900	44.4
K (Cmol (+) Kg ⁻¹)	1.050	1.099	1.243	1.209	1.147	1.232
Ca (Cmol (+) Kg ⁻¹)	3.089	3.141	3.883	3.968	3.750	3.940
Mg (Cmol (+) Kg ⁻¹)	0.735	0.743	0.984	1.039	0.882	0.974

11.1.2.1 pH

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT, el suelo del proyecto (tabla 5), presentó un pH de medianamente alcalino al inicio del proyecto, en la zona alta de 8.18 y en la zona baja de 8.01, a fuertemente alcalino al término, ya que en la zona alta fue de 8.917 y en la zona baja de 8.660; Esto genera un interesante contraste con los resultados de García *et al.*, (2005) de que los suelos semiáridos, pueden encontrarse en un rango de neutro a básico (7.5-8.3), en parte se verifica, pero no aplica completamente en todas las zonas, ya que en el cuadro 5, los valores de pH al término del proyecto se encuentran por encima de lo propuesto por García y colaboradores. De acuerdo también con las necesidades nutrimentales para un correcto desarrollo, Gentry (1982), comento que para que los Agaves se desarrollen mejor, tanto a nivel individual como poblacional, sobre planicies extensas con suelos aluviales, de profundidad y textura medias y pH de neutro a ligeramente alcalino, por lo cual, en cuanto a este género, el pH, indica que si pueden desarrollarse de una manera adecuada.

Para el caso de *Opuntia robusta*, la EcuRed (2021), afirma que esta especie puede cultivarse en suelos arcillosos siempre que el drenaje sea bueno y los suelos no permanezcan húmedos, es muy adaptable tanto en suelos ácidos, neutros como básicos (alcalinos), pero prefiere un pH en el rango de 6 a 7,5; esto se podría traducir en por qué a pesar del uso de abono, al ser un suelo con mayor tendencia a alcalino al menos en la zona de trabajo, el crecimiento de esta especie fue menor, además del tipo de metabolismo ya mencionado.

11.1.2.2 Porcentaje de materia y carbono orgánicos

El porcentaje de materia orgánica de acuerdo con la NOM-021-RECNAT para suelos de origen volcánico, al inicio del proyecto fue muy bajo, debido a que se encontraba inferior al límite establecido de 4%, es decir, para la zona alta de 1.66% y para la zona baja de 1.270%, y al término del proyecto se identificó un decrecimiento, ya que para la zona alta el resultado fue de 1.025% y para la zona baja de 1.032%. Respecto al porcentaje de carbón orgánico, este también resultó ser bajo, ya que, de un 0.960% al inicio del proyecto para la zona alta y un 0.736% para la zona baja, al término del proyecto, se identificó una disminución, para la zona alta de 0.594% y para la zona baja de 0.598% (tabla 5); de acuerdo a estos resultados, aun cuando las condiciones nutrimentales son desfavorables, García (2007), menciona que los magueyes al ser plantas xerofitas, están adaptadas a vivir en condiciones ambientales desfavorables, y las especializaciones morfológicas a las condiciones adversas consisten en modificaciones a la estructura básica de una planta como respuesta a las presiones del ambiente, por ende, esto se puede traducir en que aun cuando la planta sufra de estrés hídrico o bajos niveles nutrimentales, este género, tiene la capacidad de adaptarse y sobrevivir; Bernabé y Lamas (2011), explican que el género *Opuntia* al ser también una planta xerofita, se puede desarrollar en suelos sueltos, arenosos, poco fértiles, superficiales, pedregosos, además esta especie está siendo utilizada para prevenir la erosión, combatir la desertificación y recuperar áreas degradadas, que tienen pedregosidad, o pendiente elevada o bajo contenido de materia orgánica.

11.1.2.3 Nitrógeno (N)

Los valores reportados en la tabla 5, y en análisis con la NOM-021-RECNAT, nos muestran que, al inicio del proyecto, los valores de la zonas son los siguientes: alta 7.20 mg Kg⁻¹ y zona baja 9.60 mg Kg⁻¹, estos, son reportados como valores muy bajos en cuanto a concentración, y al término del proyecto estos valores descendieron aún más, ya que para la zona alta, se encontró descendió hasta 2.492 mg Kg⁻¹ y para la zona baja hasta 1.767 mg Kg⁻¹, una de las explicaciones de esta disminución, podría ser que al ser absorbido por la planta, este disminuye en concentración en el medio, aunque también podrá estar asociado a las fuertes lluvias que se producen en el sitio de estudio, ya que la existir fuertes lluvias, estos nutrientes se podrían estar desplazando colina abajo.

11.1.2.4 Fósforo (P)

La concentración para la zona alta al inicio del proyecto fue de 15.04 mg Kg⁻¹ y para la zona baja fue de 14.99 mg Kg⁻¹ (tabla 5), lo que de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, sugiere concentraciones altas, y al término del proyecto, estas concentraciones aumentaron al doble, ya que para la zona alta se registró 30.90 mg Kg⁻¹ y para la zona baja, un aumento hasta 44.40 mg Kg⁻¹, de acuerdo con Jacome (2013), en su proyecto también identificó un aumento, tal y como le reporta a continuación: "*Fósforo (P) se encuentra en una concentración media para las zonas A y C, pero es alta para la Zona B al iniciar el experimento, (ZA = 9.08 mg Kg⁻¹; ZB = 11.11 mg Kg⁻¹ y ZC = 10.68 mg Kg⁻¹) y al finalizar, las concentraciones son altas para las tres Zonas (ZA = 13.09 mg Kg⁻¹; ZB = 15.05 mg Kg⁻¹ y ZC = 20.19 mg Kg⁻¹)*". Hagos et al., (2005), recomienda que es importante considerar los nutrientes como los nitratos, fósforo; aniones, cationes y algunos elementos traza que son esenciales para la nutrición de las plantas y estos solo estarán disponibles cuando la materia orgánica se descomponga de tal manera que estén accesibles a las plantas; y en el caso del Fosforo, es importante señalar que la deficiencia de P en las plantas, incluyen el retraso de la madurez, mala calidad de forrajes, frutos y semillas, así como una reducción de la resistencia de las plantas a enfermedades (Crops, 1999). Tomando en cuenta esta información la importancia de evaluar este nutriente se encuentra en que en caso de querer realizar algún tipo de aprovechamiento económico de las especies señaladas, este nutriente juega un papel clave en la producción de frutos, o pensando de manera ecológica, la formación de frutos y semillas de buena calidad pueden asegurar en un futuro la germinación de estas semillas, y por ende la continuación de la especie, tratando de mantener un equilibrio ecológico derivado de la conservación de las especies nativas.

11.1.2.5 Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

Conocer la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de un suelo es fundamental, pues este valor nos indica el potencial de un suelo para retener e intercambiar nutrientes. Además, la CIC afecta directamente la cantidad y frecuencia de aplicación de fertilizantes. (INTAGRI, 2015.), bajo este argumento, la importancia de realizar los análisis correspondientes a estos nutrientes es que en el caso del K^+ suple del uno al cuatro por ciento del extracto seco de la planta, tiene muchas funciones. Activa más de 60 enzimas (sustancias químicas que regulan la vida). Por ello juega un papel vital en la síntesis de carbohidratos y de proteínas.; el Ca^{++} es esencial para el crecimiento de las raíces y como un constituyente del tejido celular de las membranas y el Mg, es el constituyente central de la clorofila, el pigmento verde de las hojas que funciona como un aceptador de la energía provista por el sol; por ello, del 15 al 20 por ciento del magnesio contenido en la planta se encuentra en las partes verdes.

11.1.2.6 Potasio (K^+)

Por eso, al analizar la tabla 5, los resultados de K^+ muestran que, al inicio del proyecto, para la zona alta, la concentración fue de $1.05 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y de $1.09 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ para la zona baja, lo que de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, indica que son concentraciones altas, mientras que, para el término del proyecto, estas concentraciones incrementaron ligeramente, para la zona alta hasta $1.147 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y $1.232 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ para la zona baja, lo cual sigue siendo alto. La FAO (2002), en su Manual de los fertilizantes y su uso, detalla que, siendo el Potasio uno de los macronutrientes más importantes para la planta es importa identificar que mientras mayor concentración exista, esto será mas favorecedor para la planta, ya que el K^+ mejora el régimen hídrico de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y salinidad. Las plantas bien provistas con K^+ sufren menos enfermedades.

11.1.2.7 Calcio (Ca^{++})

Las concentraciones de calcio al inicio del proyecto (tabla 5), mostraron que para la zona alta había $3.089 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y para la zona baja $3.141 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ clasificadas como concentraciones bajas, y al término del proyecto, se identificó un ligero aumento, ya que la zona alta registro $3.750 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, y la zona baja $3.940 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, pero aun clasificadas como concentraciones bajas, de acuerdo a la NOM-021-RECNAT, esto es lo que nos puede indicar, es que es absorbido por las plantas (Barros *et al*, 2005).

11.1.2.8 Magnesio (Mg^{++})

El último elemento analizado (tabla 5), registro una concentración inicial para la zona alta de $0.735 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, mientras que para la zona baja de $0.743 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, esto de acuerdo con la NOM-021-RECNAT, indica que dichas concentraciones son bajas, y para el término del proyecto, se identificó un aumento en las concentraciones, para la zona alta de $0.882 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, y finalmente para la zona baja de $0.974 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, pero aun siendo concentraciones bajas; El Magnesio (Mg) es el constituyente central de la clorofila, el pigmento verde de las hojas que funciona como un aceptador de la energía provista por el sol; por ello, del 15 al 20 por ciento del magnesio contenido en la planta se encuentra en las partes verdes (FAO, 2002). Por ello es que, si existe una concentración adecuada de Mg en el suelo, las plantas de alguna forma pueden llevar a cabo sus procesos fotosintéticos, y en el caso de las plantas empleadas, a pesar de identificar una concentración baja de acuerdo con la NOM-021.RECNAT, estas no perdieron la coloración verde característica, por lo que esto nos podría estar indicando que aún cuando las concentraciones son bajas, existe la cantidad suficiente para que las plantas no sufran de un estrés por deficiencia de nutrientes.

11.2 Resultados parámetros biológicos:

11.2.1 Porcentaje de supervivencia:

De acuerdo con los registros mensuales obtenidos de los organismos pertenecientes a la especie de *Agave salmiana*, en los 4 tratamientos realizados (1 (C-Y), 2 (C), 3 (Y) y 4 (T)), se obtuvo un 100% de supervivencia, es decir sobrevivieron todos los organismos trasplantados en cada tratamiento, tal y como se muestra en la Figura 14, frente a los organismos pertenecientes a la especie de *Opuntia robusta*, en donde en el tratamiento 1 (C-Y), el porcentaje de supervivencia fue de 40%, a comparación de los tratamientos 2 (C), 3 (Y) y 4 (T) de la misma especie, en donde el porcentaje de supervivencia fue de 60%, tal y como se muestra en la Figura 15:

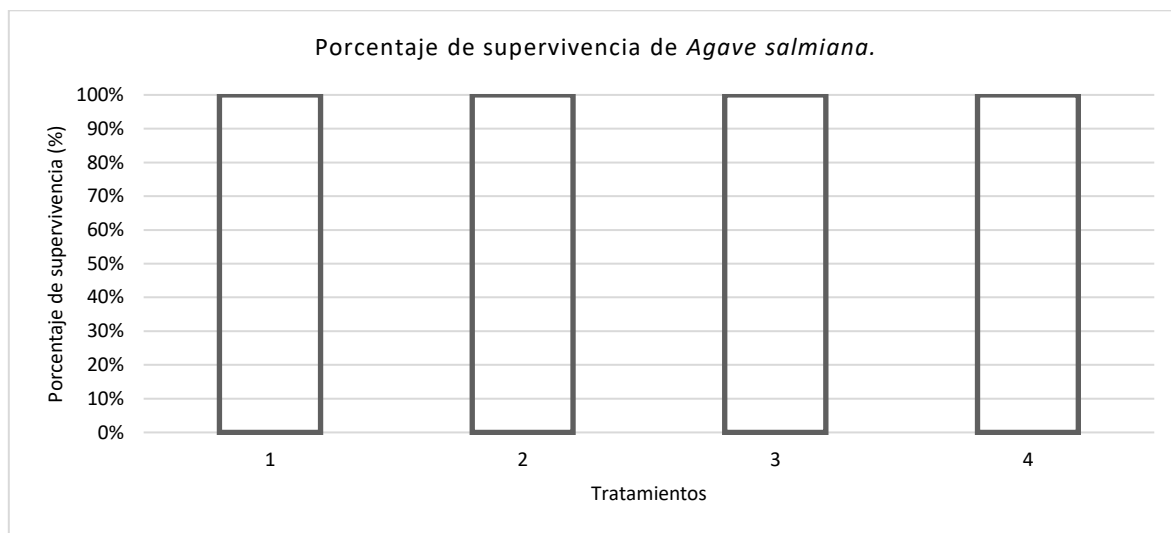


Figura 12: Porcentaje de supervivencia de *Agave salmiana*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

De acuerdo con los datos obtenidos, se puede observar una reducción en la cantidad de organismos pertenecientes a la especie *Opuntia robusta* (Figura 15), por ejemplo, en el tratamiento 1 (C-Y), de 5 organismos trasplantados al inicio del proyecto, al término, solo lograron sobrevivir 2 organismos, y en los tratamientos 2(C), 3(Y) y 4(T), se observó una reducción de 2 organismos en cada tratamiento, es decir que de los 5 organismos trasplantados para cada tratamiento, al final del proyecto solo lograron sobrevivir 3 organismos en cada tratamiento; aunado a esto, los meses en los que más reducción de organismos se observó fue durante el periodo de sequía (de febrero a inicios de junio), en comparación con los organismos de la especie de *Agave salmiana* (Figura 14), en donde en su tasa de supervivencia en cada tratamiento fue de 100%.

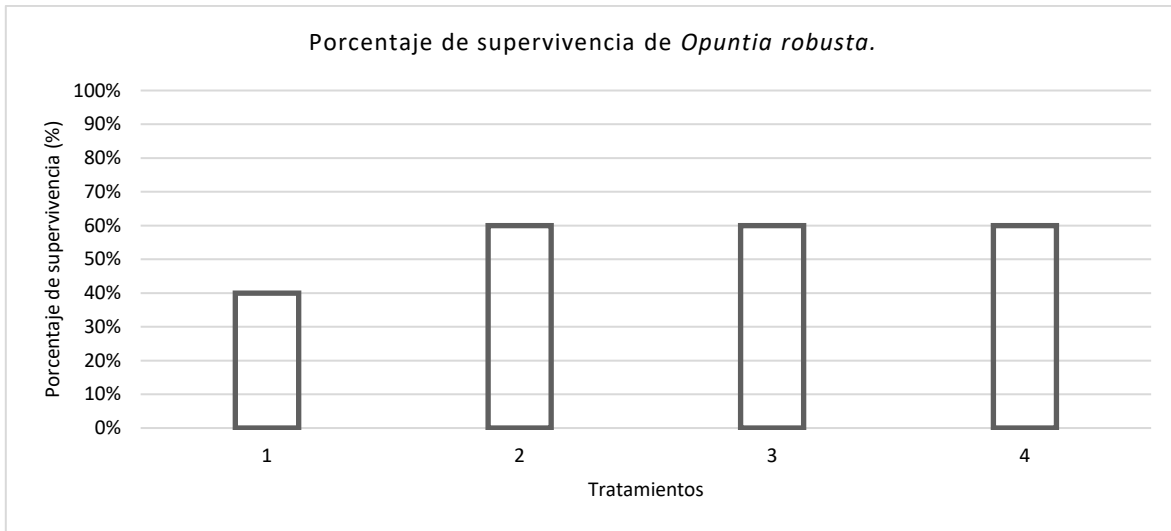


Figura 13: Porcentaje de supervivencia de *Opuntia robusta*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

El éxito de supervivencia de *Agave salmiana* se puede atribuir a su textura y a que no son atractivas a los herbívoros esto debido al contenido de fibras y saponinas; Theilkuhl (1969), argumenta que en el género de *Agave* se destacan las saponinas como principal componente (con cantidades presentes de hasta 24% en su organismo). El rol biológico de las saponinas no es comprendido completamente, pero se ha registrado que pueden funcionar como parte del sistema de defensa de las plantas contra patógenos y herbívoros; tal y como lo demuestran Valdés *et al.*, (2015), al mencionar su peculiar toxicidad, además de dar un sabor amargo a los alimentos, por eso es que en las Figuras 18 y 19, no se aprecia ninguna lesión en los individuos de esta especie.

La pérdida en los organismos de *Opuntia robusta* se podría explicar como resultado de la alimentación de algunos herbívoros del parque, ya que se obtuvieron registros fotográficos en donde se pueden apreciar lesiones en algunos de los cladodios (marcadas con un círculo rojo), (Figura 16 y 17).



Figura 14. individuo de *Opuntia robusta* tratamiento 3, con lesión en cladodio.



Figura 15. individuo de *Opuntia robusta* tratamiento 2, con lesión en cladodio.



Figura 16. Individuo de *Agave salmiana* tratamiento 4, sin ningún tipo de lesión.



Figura 17. Individuo de *Agave salmiana* tratamiento 3, sin ningún tipo de lesión.

11.2.2 Cobertura vegetal (C.V.):

La cubierta vegetal es la medición de la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, y esta se estima mediante la fórmula para el área de una elipse.

Los organismos de la especie *Agave salmiana* presentaron un marcado incremento en los resultados de C.V. (cm^2), ya que como se muestra en la Figura 20, al inicio del proyecto, en promedio, el tratamiento que representaba la mayor cobertura era el tratamiento 4, con 98.32 cm^2 de C.V, seguido de los tratamientos 3, 2 y 1 con 54.70 cm^2 , 47.64 cm^2 y 29.91 cm^2 respectivamente.

Al realizar la evaluación de las medias (promedios) de la variable de cobertura vegetal inicial de los distintos tratamientos aplicados en *Agave salmiana*, se identificó que solo el tratamiento 4, resultó ser significativamente diferente al tratamiento 1, mientras que los tratamientos 2 y 3, no presentaron diferencias significativas al evaluarlos frente al tratamiento 4 o grupo testigo.

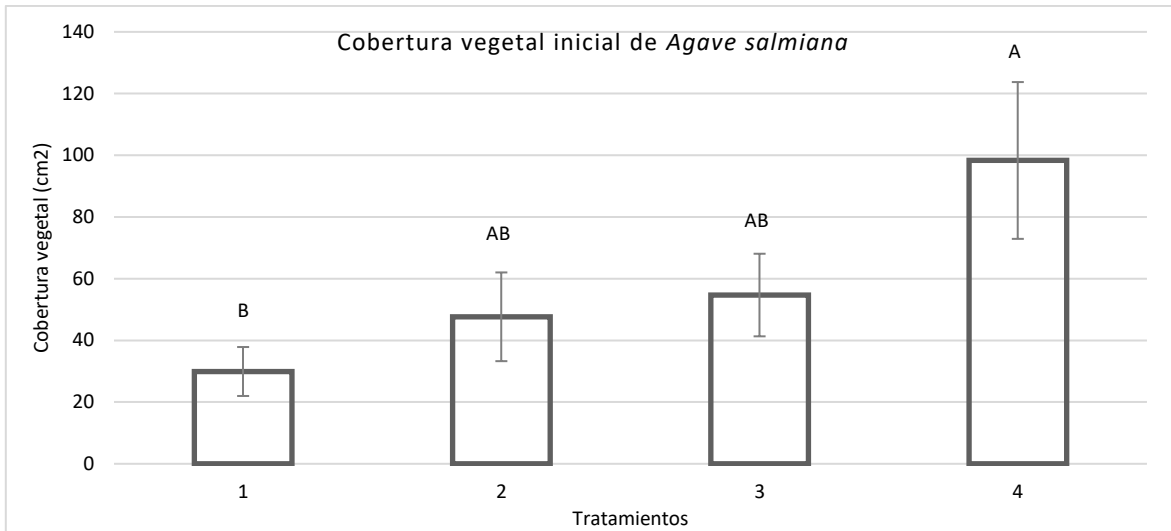


Figura 18: Cobertura vegetal inicial en los distintos tratamientos de *Agave salmiana*.
 Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y);
 Tratamiento 4: Grupo testigo (T).
 Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Mientras que en la Figura 21, se muestra el incremento promedio de los diferentes tratamientos de cobertura vegetal, en los organismos de *Agave salmiana*, en donde se identificó que el tratamiento 4, volvió a registrarse como el de mayor cubierta vegetal, ya que de 98.23cm² incrementó a 197.40cm², es decir que en promedio la cobertura vegetal de ese tratamiento aumentó en 99.cm², seguido de los tratamientos: 2, 3 y 1, con 106 cm², 91.20cm² y 62.80cm² respectivamente.

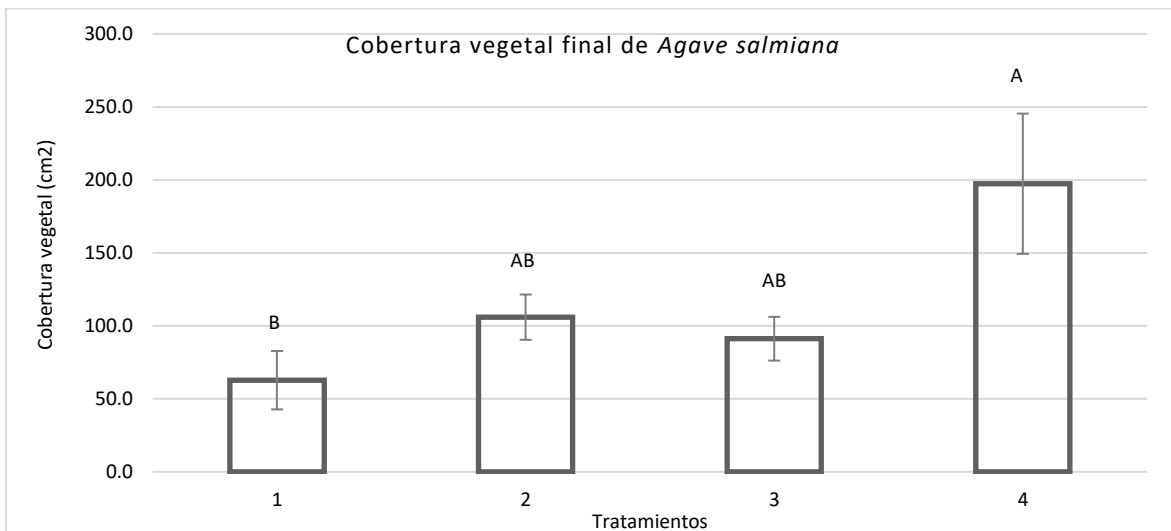


Figura 19: Cobertura vegetal final en *Agave salmiana*.
 Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y);
 Tratamiento 4: Grupo testigo (T).
 Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Con respecto a la evaluación de las medias de la variable cobertura vegetal final en la especie *Agave salmiana*, el grupo que resultó ser significativamente diferente, fue el 4, es decir que frente al grupo 1 existe una diferencia significativa, lo cual nos indica que el uso de un geotextil más un abono orgánico, al menos en esta especie resulta no ser tan beneficiosa, ya que en comparación con el tratamiento 1, los tratamientos 2 y 3 no son significativamente diferentes, y por tanto esto nos refuerza que en la especie de *Agave salmiana*, por si mismas pueden crecer a un ritmo medianamente constante, esto podría ser debido al uso tan eficiente del agua que absorben del ambiente.

Respecto a la cobertura vegetal de los organismos de *Opuntia robusta*, al inicio del proyecto el tratamiento 2, representaba la mayor cobertura con 9.05cm², seguido de los tratamientos 3, 4 y 1, con 6.58cm², 6.05cm² y 0.50cm² respectivamente. Y al realizar el análisis estadístico, en primera instancia estos nos indicaron que el tratamiento 1 resultó ser significativamente diferente, al inicio del proyecto tal y como se muestra en la Figura 22.

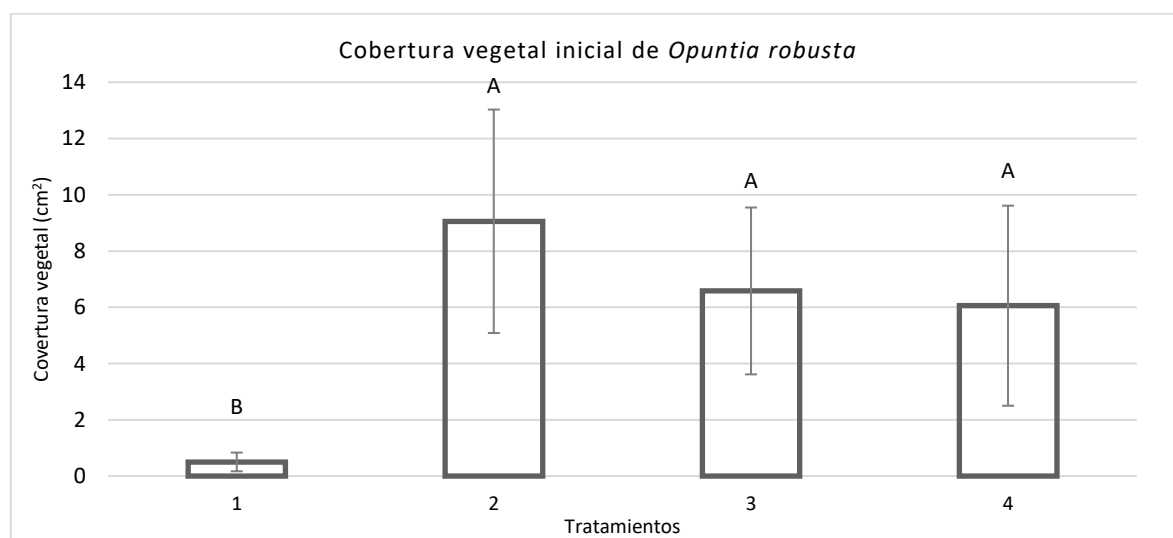


Figura 20: Cobertura vegetal inicial en *Opuntia robusta*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Al término del proyecto, se identificó que el tratamiento que presentó una mayor cobertura vegetal de la especie *Opuntia robusta*, fue el tratamiento 2, ya que terminó en 17.2cm², seguido de los tratamientos 3, 4 y 1, con 13.4cm², 11.4cm² y 2.0cm² respectivamente. Y de acuerdo con el análisis de las medias (promedios) elaborado con el programa SAS/STAT, de la variable de cobertura vegetal inicial, ninguno de los tratamientos resultó ser significativamente diferente con el grupo 4(T), es decir que aun cuando existía una marcada diferencia en el tamaño de los organismos, estadísticamente no son diferentes (Figura 23).

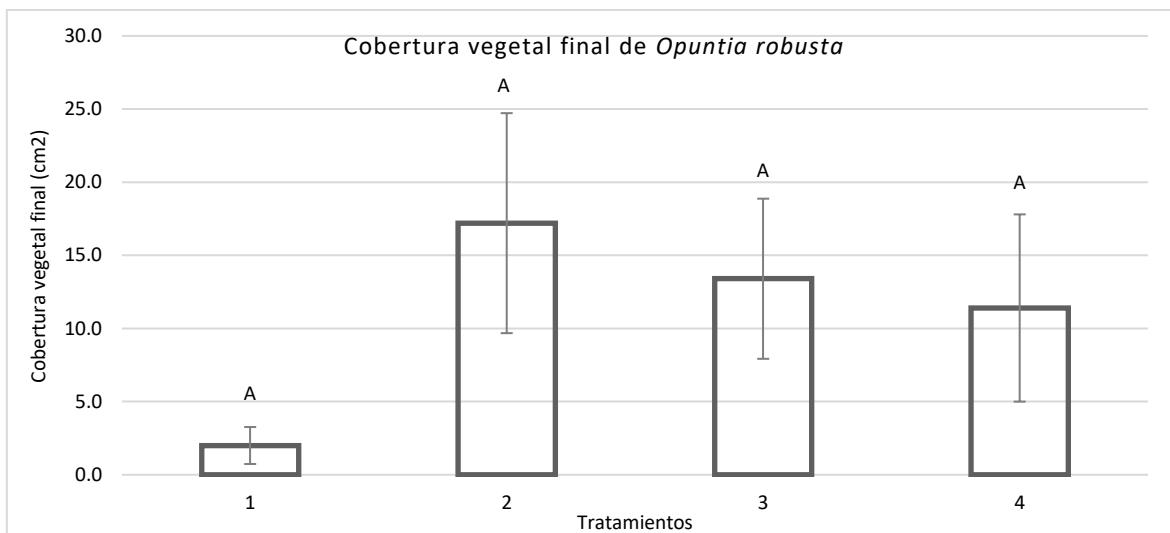


Figura 21: Gráfica de cobertura vegetal inicial en los distintos tratamientos de *Opuntia robusta*. Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T). Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Es importante señalar que, al término del proyecto, en ambas especies se observó la presencia de plantas acompañantes, por ejemplo, en las figuras 18 y 19, del tratamiento 4 de *Agave salmiana*, se observa que además de la apertura de las hojas del individuo, se encuentra vegetación acompañante a la periferia del individuo (marcada con círculos rojos). En las figuras 20 y 21, del tratamiento 1 de *Opuntia robusta*, el incremento en la masa de los cladodios es evidente, además de la presencia de algunas plantas acompañantes, lo cual nos indica que las propiedades del suelo resultan ser aptas para el establecimiento de dichas especies, además de las características de la planta ya que al ser cactáceas, estas son eficientes en cuanto al uso del agua; tal y como Wang *et al.*, (2001); Wu y Zhao (2001) hablan de que la conservación del suelo no solo depende del incremento de la cubierta vegetal sino también y más importante, del desarrollo de una estructura estratificada compleja, especialmente cerca de las capas cercanas al suelo.

Gentry (1982), menciona que los *Agaves* son plantas que pueden convivir con una amplia variedad de vegetación, destacando: la vegetación xerófita, pastizales, matorrales y bosques. Esto se debe a que generalmente forma grupos o conglomerados dispersos dentro de la vegetación de pastizal y se le encuentra combinado con nopaleras y matorral micrófilo, y de acuerdo con lo mencionado con el autor, se confirma en el presente proyecto, a través de las figuras 18 y 19. Además se vuelve evidente al identificar que los organismos que presentaron mayor aumento en la cobertura vegetal del total del área de trabajo fueron los individuos de *Agave salmiana*, ya que tomando en cuenta todos los tratamientos, en promedio se obtuvo un aumento de 56.70 cm² en la cubierta vegetal.

Por otro lado, Sinisterra *et al.* (2011), identifica la importancia del género *Opuntia* para la restauración ecológica, ya que menciona que el uso de este género debe considerarse si se pretende reducir, fragmentar, derivar caudales, sellar escarpaduras, además de proporcionar recursos para las comunidades aledañas y la fauna silvestre, todo esto debido a sus atributos, entre los cuales destacan: una propagación vegetativa fácil y rápida, anclaje profundo, atracción de la fauna silvestre mediante la producción de frutos comestibles. Estas afirmaciones resultan interesantes, ya que esto podría explicar por qué es que a los organismos de *Opuntia robusta* al término del proyecto presentaron una mayor cantidad de lesiones en los cladodios, y, por ende, un menor aumento de la cubierta vegetal, ya que al término del proyecto se obtuvo un promedio de todos los tratamientos de 5.44cm².



Figura 23. Organismo de *Agave salmiana* al inicio del proyecto.



Figura 22. Organismo de *Agave salmiana* al término del proyecto.



Figura 25. Organismo de *Opuntia robusta* al inicio del proyecto.



Figura 24. Organismo de *Opuntia robusta* al término del proyecto.

11.2.3 Comparación de las medidas de altura inicial y altura final:

Este parámetro resultó ser indispensable, ya que aparte de la obtención de estas medidas, las cuales indican que organismos crecen a mayor velocidad y con qué tratamiento, además, a partir de los datos de alturas, es como se obtiene la tasa relativa de crecimiento.

El promedio de altura inicial en los tratamientos de *Agave salmiana* (Figura 28) arrojó que el tratamiento 4, tiene una diferencia significativa respecto a los demás, ya que el promedio fue de 9.04 cm de altura, en comparación con el tratamiento 2 con 5.80 cm de altura que fue el que más se le acercó.

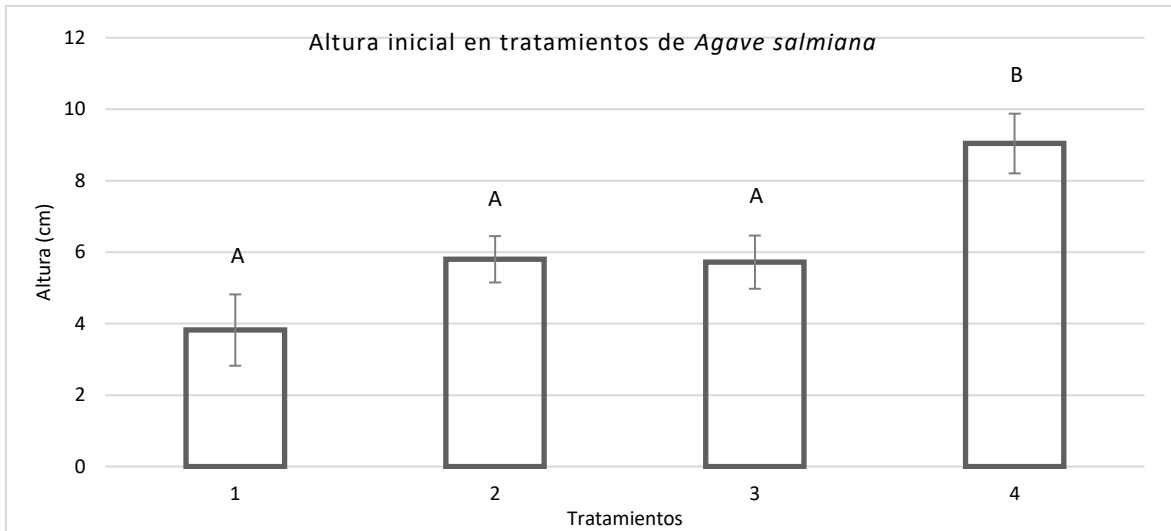


Figura 26: Promedio inicial de alturas en *Agave salmiana*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Al término del proyecto, el análisis de las medias nos reveló que estadísticamente ningún tratamiento presentó diferencia significativa (Figura 29), pero aun así, se identificó que el tratamiento 1, fue el que mayor crecimiento presentó, ya que de 3.82 cm creció hasta 6.6 cm, es decir hubo un crecimiento de 2.78cm, en comparación con el tratamiento 4, que al inicio del proyecto fue el mayor, ya que de 9.04 cm, solo creció a 9.86 cm, lo que significa un crecimiento total de 0.82 cm, esto nos podría estar indicando que la implementación de un geotextil más un abono orgánico, si benefician a los organismos de *Agave salmiana* en cuanto a altura se refiere; es importante señalar, que la altura de las plantas fue tan diferente, debido a que unas semanas antes de empezar el proyecto, se había iniciado un proyecto que involucro el uso de estos organismos, por lo que no se identificaron plantas que fueran todas del mismo tamaño.

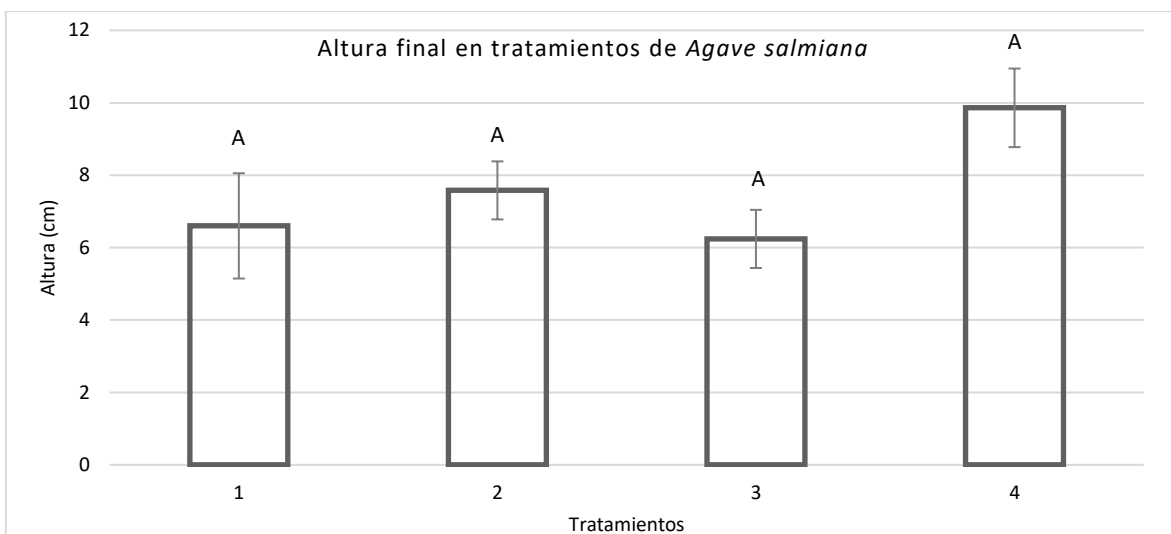


Figura 27: Promedio final de alturas en *Agave salmiana*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Al realizar la comparación del crecimiento de los distintos tratamientos de *Agave salmiana*, es importante señalar, que en general todos los organismos crecieron; Ramírez, Peña y Aguirre (2014), mencionan que cuanto mayor es la reserva de agua, en condiciones de déficit de humedad, el incremento de asignación de recursos al crecimiento radical es más improbable, lo que podría explicar que especies como *A. salmiana* hayan sobresalido por no asignar más biomasa a la raíz al ser sometidas a déficit hídrico. Es decir, que cuando un organismo del género *Agave* es regado de forma constante, su crecimiento no será inhibido, y por eso, en los resultados obtenidos, todos los organismos de los distintos tratamientos tuvieron crecimiento. Además, Urdaneta, Valdivia, Aguirre, Trejo y Cárdenas (2004), mencionan que *A. salmiana* tolera el déficit de humedad drástico y que su crecimiento continúa como resultado del control de sus procesos fisiológicos y bioquímicos independientemente del estrés.

En cuanto al crecimiento promedio de los organismos de *Opuntia robusta* al inicio del proyecto se obtuvo que el tratamiento 1, fue el que tenía una mayor altura frente a los otros tratamientos, pero estadísticamente, no se identificó ninguna diferencia significativa entre los tratamientos tal como se puede observar en la Figura 30, el tratamiento 1 tuvo una altura inicial de 8.62 cm, seguido del tratamiento 2 con 7.66 cm de altura.

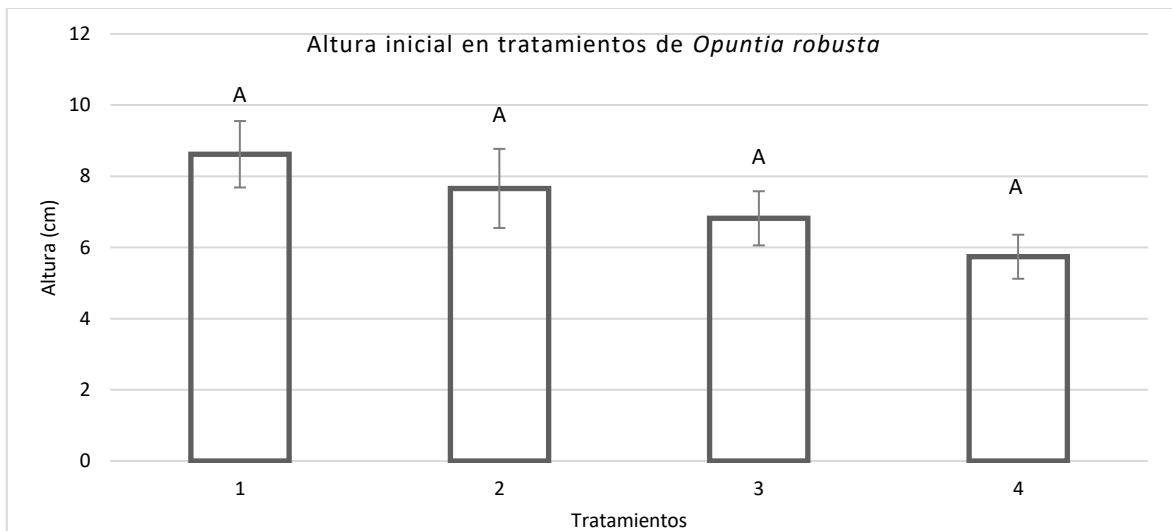


Figura 28: Promedio inicial de alturas en *Opuntia robusta*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Los resultados obtenidos (Figura 31), arrojaron que el tratamiento 2 fue el que presentó un mayor crecimiento, ya que de 7.66cm creció hasta 9.02 cm, sin embargo, algunos tratamientos como el 1, disminuyeron, esto debido a la presencia de organismos de fauna herbívoros, ya que el tratamiento pasó de 8.62 cm a 5.32 cm debido a las lesiones ocasionadas por mordidas de organismos herbívoros presentes en el parque Ecológico tal como se muestra en la figura 16.

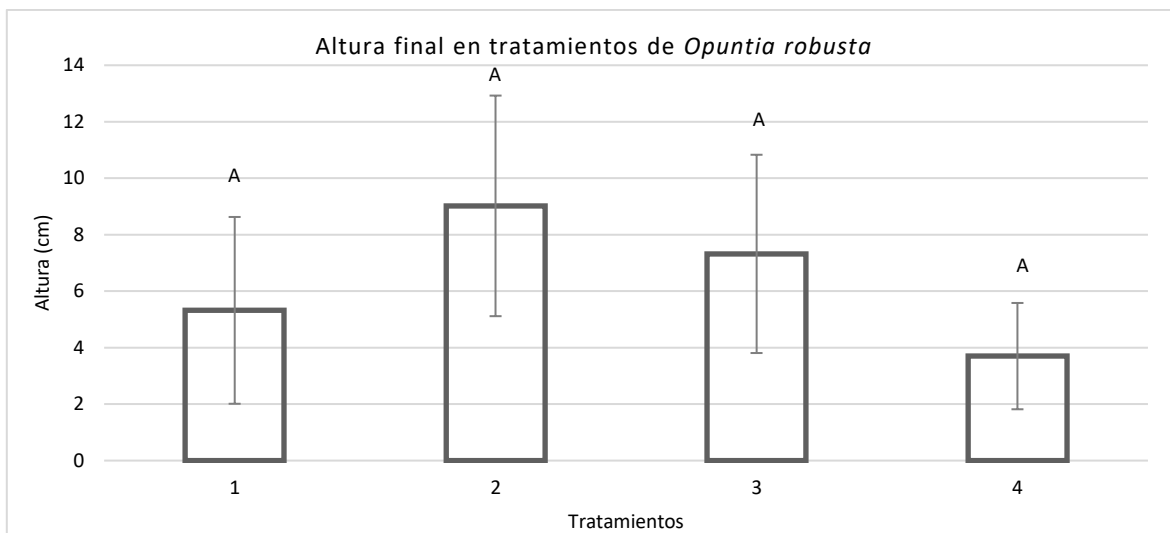


Figura 29: Promedio final de alturas en los distintos tratamientos en *Opuntia robusta*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Al realizar el análisis de las alturas en los tratamientos de *Opuntia robusta*, se obtuvo que en todos los tratamientos hubo crecimiento, ya que al realizar las mediciones mensuales, aun cuando varios organismos se vieron afectados por herbívora, estos seguían creciendo, por eso es que se menciona que, aunque estadísticamente no existiera una diferencia significativa al término del proyecto, esto no revela que no existiera un crecimiento, solo nos indica, que, el uso de alguna técnica no representa un beneficio significativo en el crecimiento de organismos de esta especie.

En algunos organismos se identificaron lesiones en los cladodios, e inclusive la pérdida de organismos completos ocasionadas por organismos herbívoros habitantes del parque, ya que como se mencionó anteriormente, existen varias especies de liebres silvestres que, dentro de su dieta general, se encuentran algunas cactáceas, entre ellas, el género *Opuntia*; esto afecta directamente a los datos obtenidos ya que afecta en los datos de alturas registradas; Nobel (1994), expresa que los miembros del subgénero *Opuntia* han desarrollado modificaciones estructurales, particularmente en la anatomía de la epidermis y la succulencia de los tallos, que en combinación con el metabolismo ácido de las crasuláceas (plantas tipo CAM) contribuyen a su adaptación a los ambientes áridos ya que tales características anatómicas contribuyen a reducir la tasa de transpiración, y esto nos podría estar explicando por que a pesar de que *O. robusta* son plantas muy carnosas, el tiempo para poder realizar una evaluación de su crecimiento debe ser más prolongado, ya que como menciona Bravo- Hollis (1978), estas plantas han desarrollado notables estrategias para la supervivencia en ambientes de poca disponibilidad de agua, entre ellas se pueden mencionar aquellas que les permiten el almacenamiento de esta entre sus tejidos, como por ejemplo los parénquimas que son responsables de la succulencia, pero a su vez, son responsables del lento crecimiento.

En otro estudio realizado en el mismo parque por Lázaro (2018), identificó que los organismos del género *Opuntia* a los que se les implementó un geotextil no mostraron un crecimiento significativo, es más, los organismos empleados por dicha autora que no tenían un acolchado presentaron una mayor altura final, por lo que los resultados aquí obtenidos en este proyecto, siguen la misma tendencia de resultados, ya que en el caso de este proyecto, los organismos al término que mostraron un mayor aumento en la altura, fueron aquellos que tenían una mezcla de suelo con un abono orgánico.

11.2.4 Tasa relativa de crecimiento (T.R.C.):

La TRC de las plantas, se calculó a partir de la altura máxima de las plantas al inicio del proyecto y al final del proyecto, para lo cual se utilizó un modelo de crecimiento exponencial que de acuerdo con Charles Edwards *et. al.* (1986). La fórmula empleada es la siguiente:

$$TRC = [\ln(\text{altura final}) - \ln(\text{altura inicial})] / t (\text{días})$$

Donde las unidades de tasa de crecimiento son: (mm/mm/d) o (d-1).

Como tal, la T.R.C. nos indica cual es el crecimiento diario de los organismos seleccionados, y en el caso de los tratamientos de *Agave salmiana*, el tratamiento que presentó un mayor crecimiento relativo fue el 4 (Figura 32) ya que al término del proyecto, tuvo un crecimiento de 0.000767687 mm/mm/d. frente al tratamiento 1 que fue el siguiente con un crecimiento relativo de 0.00054 mm/mm/d. y al realizar el análisis estadístico, este nos arrojó que fue el mismo tratamiento quien posee una diferencia significativa.

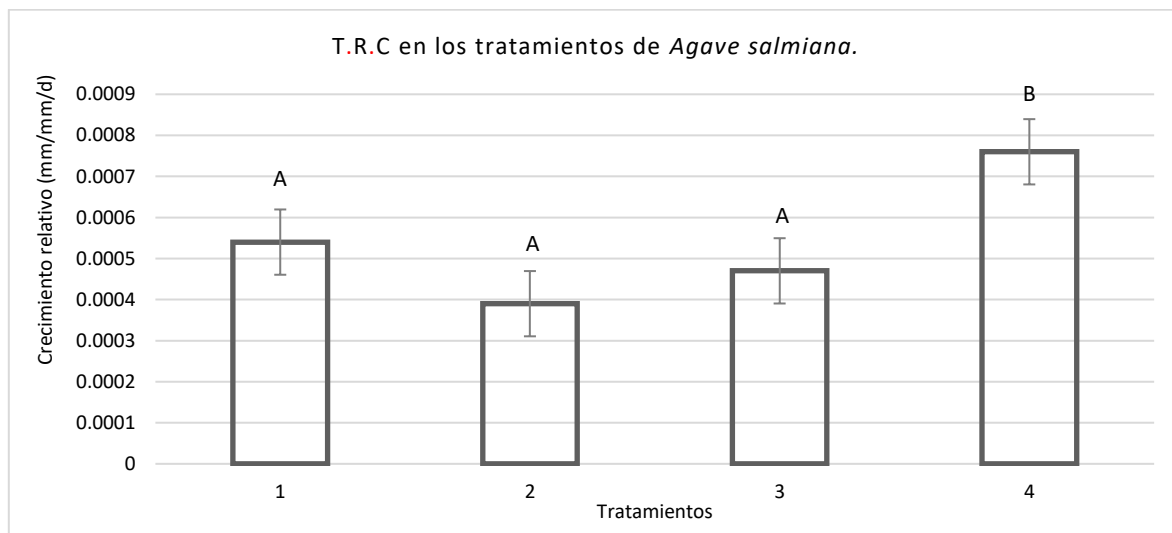


Figura 30: Análisis de T.R.C de los distintos tratamientos de *Agave salmiana*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Por ejemplo, Ramírez *et. al.* (2014), a través de su estudio, encontraron que los efectos de la condición de humedad del sustrato y de la especie fueron altamente significativos sobre los porcentajes de biomasa de la raíz y las hojas y la interacción de ambos factores también fue significativa, es decir que siempre y cuando exista humedad en el sustrato (suelo) donde se encuentran los individuos del género *Agave* estos seguirán creciendo. Además, mencionan que independientemente de los ajustes o “plasticidad” de los procesos fisiológicos de las especies de *Agave*, las plantas jóvenes de este género son capaces de sobrevivir hasta 14 meses enfrentando condiciones extremas de sequía con restricciones crecientes de humedad en el suelo. Esto se ve reflejado en el experimento, ya que a pesar de que se emplearon diferentes tratamientos, todos fueron regados continuamente, cómo ya se explicó en el método, con el mismo vaso de precipitados, y respetando la misma cantidad de agua, por lo cual, el crecimiento es constante al menos en el tiempo de duración del proyecto.

En los diferentes tratamientos realizados en los organismos de *Opuntia robusta* se identificó que el tratamiento 2 fue el que presentó un mayor crecimiento relativo, ya que fue de 0.00142 mm/mm/d. frente al tratamiento 3 que fue de 0.00098 mm/mm/d. esto es indicativo de que en esta especie el uso de técnicas

como el abono orgánico y el yute es beneficioso para la especie, ya que el tratamiento testigo tuvo un crecimiento de 0.00034 mm/mm/d. aunado a esto, el análisis estadístico reveló que existió una diferencia significativo de los tratamientos 2 y 3 frente a los tratamientos 1 y 4, además de esto, está el hecho de que hubo una importante pérdida de ejemplares o lesiones a los mismos ocasionados por organismos herbívoros habitantes del parque, esto podría estar justificando el corto crecimiento de los tratamientos 1 y 4, ya que por ejemplo, el tratamiento 1 tuvo un crecimiento de 0.00031 mm/mm/d. por debajo incluso del tratamiento 4 lo cual se puede observar en la Figura 33.

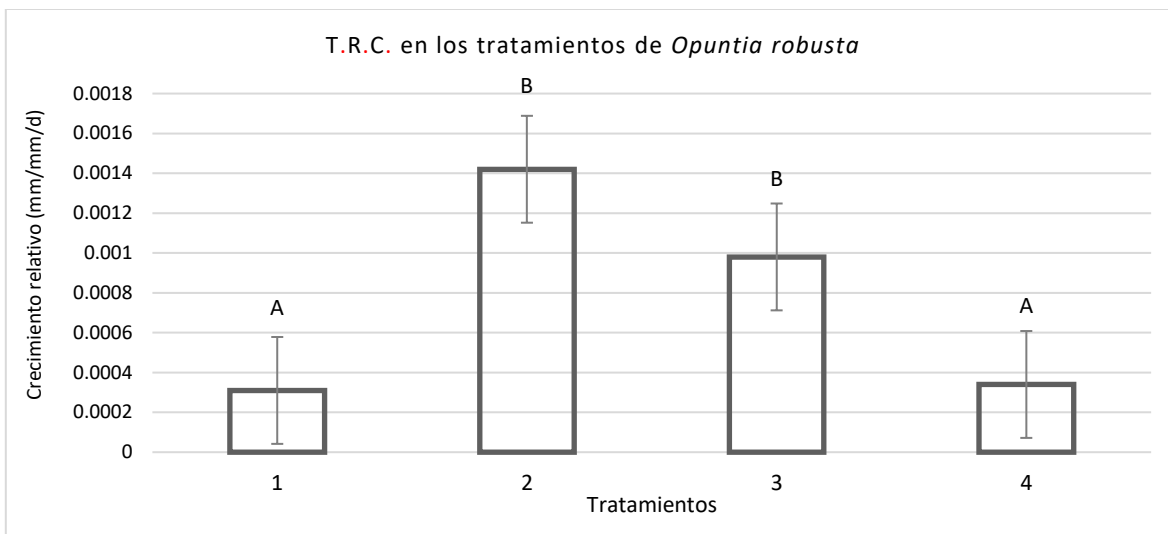


Figura 31: Análisis de T.R.C de los distintos tratamientos de *Opuntia robusta*.
 Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).
 Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Lázaro (2018), reporta que para la especie *Opuntia streptacantha* el uso de acolchados no marcó una diferencia significativa, aunque en su estudio, no reporta lesiones ocasionadas por herbívora, esto nos podría estar indicando que aun cuando pertenecen al mismo género, la especie *Opuntia streptacantha* no resulta ser tan apetitosa como lo fue *Opuntia robusta*; pero aun y cuando existieron lesiones en los organismos usados se identificó un crecimiento en todos los tratamientos, pero también esto nos refuerza en el sentido de que se debe de tener mayor tiempo para la evaluación de cactáceas en proyectos de restauración.

11.2.5 Evaluación del control de erosión:

Este parámetro, corresponde a la cantidad de suelo retenido, y se obtuvo a través de la medición de la altura de suelo que se acumuló en cada organismo.

De manera que en la Figura 34, se puede observar la retención de suelo en cada tratamiento de los organismos de *Agave salmiana* a lo largo del periodo del proyecto. Por tanto, es importante señalar que la tasa de mayor erosión del sitio corresponde a los meses de precipitación, es decir de finales del mes de mayo a principios del mes de septiembre, y esto resulta ser importante de señalar, ya que, es durante esta temporada, que todos los tratamientos perdieron parte del suelo que ya habían retenido.

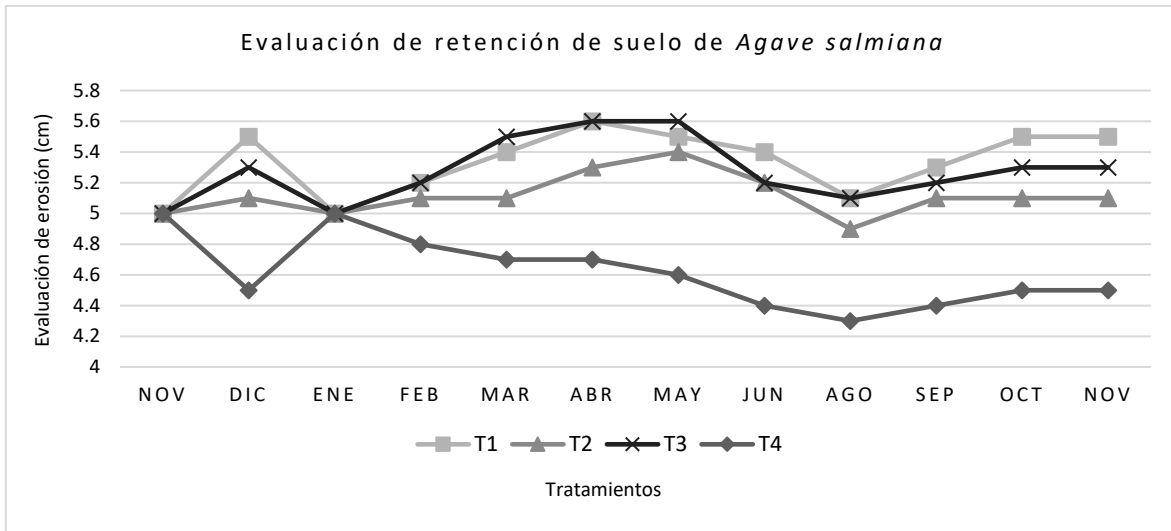


Figura 32: Evaluación de retención de suelo en tratamientos de *Agave salmiana*.
 Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y);
 Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

De todos los tratamientos empleados en los organismos de *Agave salmiana*, se encontró que la implementación del yute con cualquier otro tratamiento aporta importantes beneficios con respecto a la retención del suelo; tal y como sucede en el tratamiento 1, ya que en promedio retuvo 0.35 cm de suelo, seguido del tratamiento 3 con un promedio de retención de 0.27cm.

A diferencia del tratamiento 2 que tuvo una retención promedio menor de 0.11 cm; mientras que el tratamiento 4, se identificó que al final proyecto hubo una pérdida promedio de suelo de 0.04 cm. Por lo tanto, estos datos indican que cuando el suelo está “desnudo”, la erosión suele ser evidente (Figura 35).

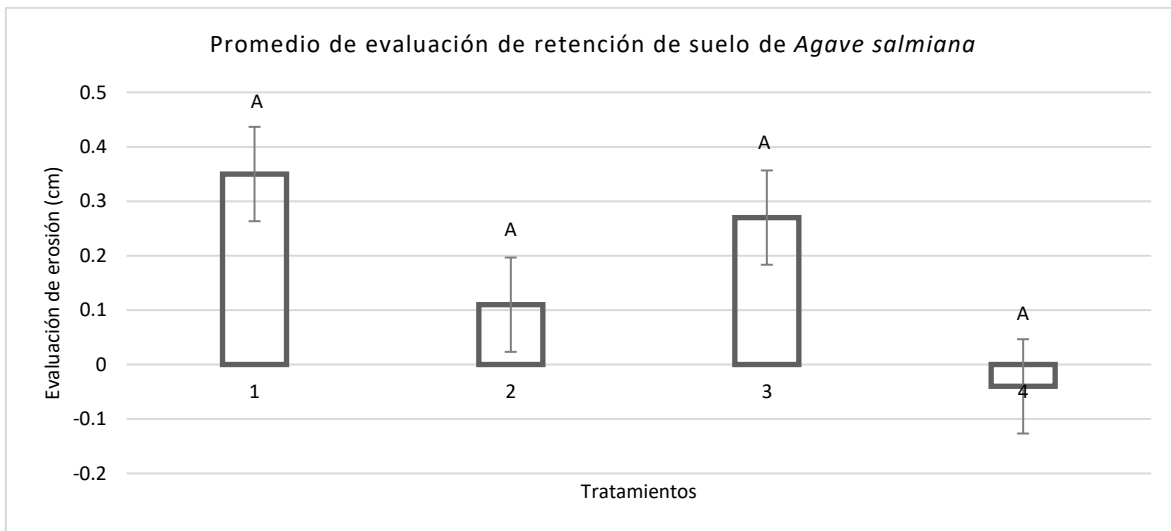


Figura 33: Retención promedio del suelo en tratamientos de *Agave salmiana*.
 Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y);
 Tratamiento 4: Grupo testigo (T).
 Las letras diferentes denotan una diferencia significativa entre los tratamientos.

Los resultados obtenidos con los organismos de *Agave salmiana*, aunque estadísticamente no son significativos, si concuerdan con lo que argumenta Olvera (2000), ya que él en su estudio realizado en Oaxaca, afirma que en pendientes de hasta 40 % con riesgo de erosión, el uso de *Agave* puede ser utilizado como línea intermedia para la formación paulatina de terrazas. Mientras que Ruiz *et al.*, (2001), mencionan que en Oaxaca se evaluaron coberturas vegetales para la reducción de la erosión y conservación de la humedad, así como especies con potencial para barreras vivas a diferentes altitudes, empleando principalmente organismos del género *Agave*.

Por otro lado, Rodríguez (2005) determinó, que el uso del agave bajo el sistema de curvas de nivel y muros vivos, en zonas catalogadas como de alto riesgo de erosión, permitiría disminuir la pérdida de suelo entre 861 y 957 toneladas por año.

En los organismos de *Opuntia robusta* se pudo observar la tasa de erosión más alta a partir del mismo período de precipitación (Figura 36), a excepción del tratamiento 4, que, desde el primer mes, se identificó con una erosión mayor a la de los tratamientos empleados.

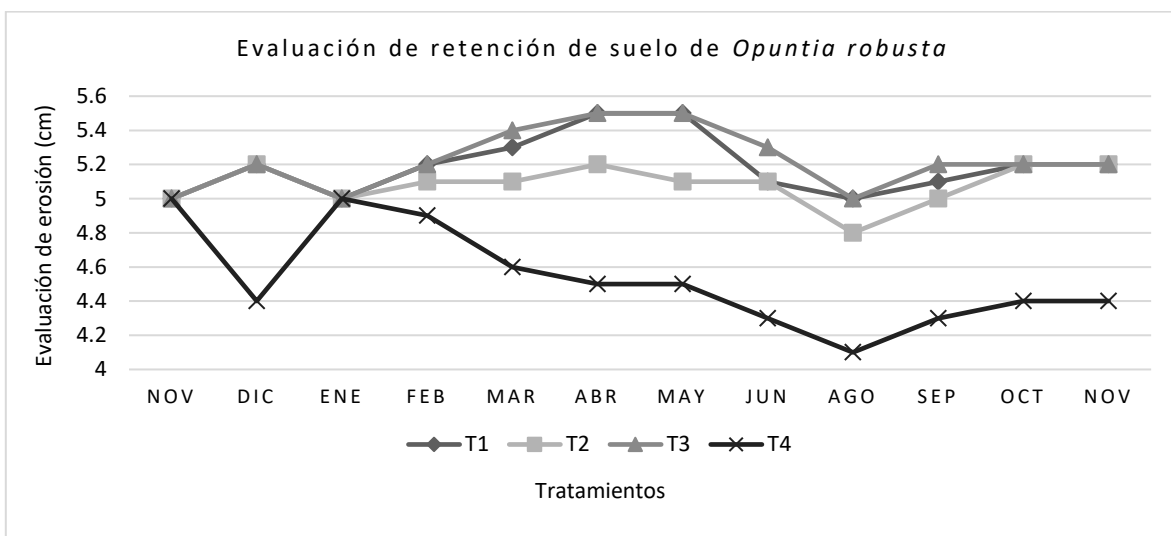


Figura 34: Retención de suelo en tratamientos de *Opuntia robusta*.
 Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y);
 Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Al obtener los promedios de retención del suelo, en los tratamientos de *Opuntia robusta* (Figura 37), en general se encontró que, si retuvo suelo, aunque este estuvo por debajo de los tratamientos de *Agave salmiana*; en promedio, el tratamiento 3 retuvo 0.25cm de suelo, seguido del tratamiento 1 y 2, las cuales retuvieron 0.21cm y 0.09 cm de suelo respectivamente, a diferencia del tratamiento 4, el cual perdió 0.05cm de suelo.

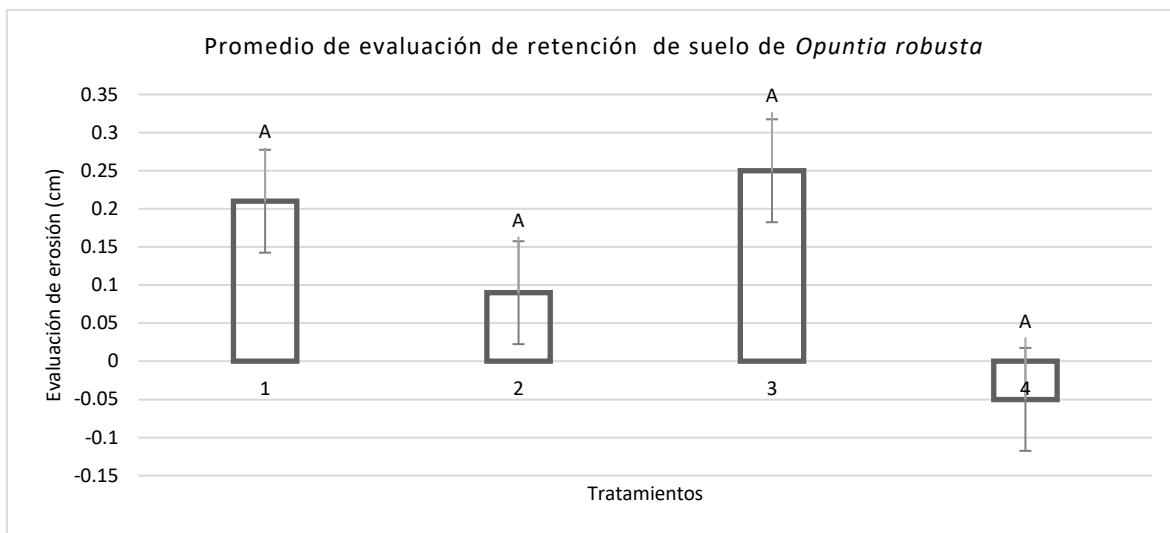


Figura 35: Retención promedio del suelo en tratamientos de *Opuntia robusta*.

Simbología: Tratamiento 1: Mezcla de composta y yute (C-Y); Tratamiento 2: Mezcla de composta (C); Tratamiento 3: Yute (Y); Tratamiento 4: Grupo testigo (T).

Observando los resultados obtenidos de control de erosión realizado con los organismos de *Opuntia robusta* estos demuestran que, en general la familia Cactaceae es adecuada para proyectos de rehabilitación ecológica, pero no para reducir la tasa de erosión del suelo, Sinisterra *et al.*, (2011), nos menciona varios usos de la familia Cactaceae específicamente de la especie *Opuntia robusta*, ya que menciona que esta especie es mayormente recomendada para reducir, fragmentar y derivar caudales, sellado de escarpaduras, por lo que estas plantas de acuerdo a esta descripción podría ser empleada como una especie complementaria, ya que, esta especie es capaz de producir recursos para organismos aledaños y la fauna silvestre.

12. Conclusiones

En ambas especies empleadas, tanto en *Agave salmiana* como en *Opuntia robusta*, se identificó una retención de suelo, se registró que fue más evidente en aquellas plantas que tenían un geotextil implementado como lo demuestran los resultados, aunado a esto, si hubo un aumento de la cobertura vegetal, esto se puede explicar debido a que el uso de un geotextil como el yute, contribuye a aumentar la humedad y ayudar a retener un mayor cantidad de suelo y generar las condiciones adecuadas para el establecimiento en primer lugar de las plantas trasplantadas para el proyecto, y también de diferentes estratos de vegetación, empezando por plantas acompañantes; considero importante señalar que, en la mayoría de los tratamientos empleados, se pudieron avistar, excretas procedentes de organismos de fauna, las cuales, podrían tener cierta carga de semillas, que, en algún momento pueden germinar, para de esta forma contribuir aún más a la recuperación de la cubierta vegetal; así como observar plantas acompañantes y/u oportunistas en ambos tratamientos, de ambas especies, *Agave salmiana* y *Opuntia robusta*.

En cuanto a la supervivencia, la especie de mayor porcentaje de supervivencia fue *Agave salmiana*, ya que en todos los tratamiento, la supervivencia fue de 100%, y de acuerdo con la información recabada, una de sus estrategias de supervivencia es formar saponinas en el tejido de sus hojas lo cual produce un sabor desagradable, similar al de jabón, además de brindar protección contra vientos y fuego; en cuanto a *Opuntia robusta*, el porcentaje de supervivencia disminuyó hasta un 40% lo que nos indica que aun cuando también posee estrategias de supervivencia como los son espinas, y una muy alta carnosidad donde almacenar agua, esta especie resulta ser muy apetecible para la fauna local del parque ecológico.

Se identificó un mejoramiento y mantenimiento en las propiedades tanto físicas como químicas del suelo, como la densidad aparente, y espacio poroso, que, a la larga, contribuirán al establecimiento de una mayor cobertura de vegetación en la zona, y respecto a las propiedades químicas del suelo, al estar usando constantemente los nutrientes disponibles, la vegetación juega el rol de incorporarlos nuevamente a un sistema biogeoquímico, y con esto evitar el empobrecimiento del suelo, además el uso de un abono orgánico como la composta, demostró de manera Individual mejorar las concentraciones de nutrientes, de forma conjunta, el abono más el geotextil, si mostraron beneficios, aunque no como se esperaba para las dos especies, ya que la combinación de técnicas resultó ser ligeramente mejor para *Opuntia robusta* al menos para mejorar la altura.

13. Bibliografía

- Albaladejo, J.R., Peter, D., Balabanis, P. y Rubio, J. L., (1993). *Estimating erosion rates field experiments. In Fantechi, Desertification in a European Context Physical and Socio-Economic Aspects Proceedings of the European School of climatology and natural hazards course. Preceptorate General Science, Research and Development, Brussels, pp 279-292.*
- Amado, F. G., (2018). *Evaluación de técnicas mixtas de bioingeniería con Agave salmiana.* [Tesis de licenciatura]. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Arshad, M. A. y G. M. Coen., (1992). *Characterization of soil quality: physical and chemical criteria.* American Journal of Alternative Agriculture 7, pp 25-31.
- Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP), (1992). *1as Jornadas de Bioingeniería.*
- Astier C. M., Maass M. M., y Etchevers B. J., (2002). *Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable.* Agrociencia, 36 (5), pp 605-620.
- Barrios, R. M. y Medina, J.C., (1996). *Estudio florístico de la Sierra de Pachuca.* CONABIO e IPN.
- Barros, I., Williams, J.R. y Gaiser, T., (2005). *Modeling Soil Nutrient limitations to Crop Production in Semiarid NE of Brazil White a Modified EPIC Version II* 181: pp 567-568.
- Barthlott, W. y Hunt. D. R., (1993). *The families and genera of vascular plants. Vol. 2, Springer-Verlag, Cactaceae.* P.p. 161- 197
- Base Referencial Mundial (WRB), (1998). *Sistema Universal de Clasificación de Suelos.* División de Comunicación de la FAO.
- Bernabé F. S. y Lamas, C. M.A., (2011). *Aptitud agroclimática de áreas áridas y semiáridas de Argentina para el cultivo de atún (Opuntia ficus indica) como fuente de bioetanol.* Quebracho - Revista de Ciencias Forestales, 19 (1-2), 66-74. ISSN: 0328-0543. en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48122207007>
- Bertness, M. D. y Callaway, R. M., (1994). *Positive interactions in communities.* Trends in Ecology and Evolution 9: pp 191-193.
- Bravo H., H., (1978). *Las Cactáceas de México.* Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. v. 1.
- Bravo H. H. y Sánchez M. H., (1982). *Las Cactáceas de México.* Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. v. 2,3. México, D.F
- Brown, R., Foster, R., Gross, E. y Liegel, L., (1993). *Restauración de Ecosistemas Perturbados por la Pequeña Minería en la Región de Guayana de Venezuela.* Venezuela: Corporación Venezolana de Guayana / USDA Forest Service Restoration Advisory Team.
- Carbó-Ramírez, P., y Zuria, I., (2012). *Registro del chipe patillado (Geothlypis formosa) en Hidalgo: confirmación de su presencia en el estado y ampliación de su distribución.* Huitzil, Revista Mexicana de Ornitología (Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México, A.C. (CIPAMEX)) 13 (1). ISSN 1870-7459.
- Carroll Jr, R.G, Rodencal J., Collin J.G., (1992), *Geotextiles and Geomembranes.*, Volume 11, Issues 4-6, pp. 523-534.
- Celaya, M, H., y Castellanos, V, A. E., (2011). *Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas.* Terra Latinoamericana, 29(3), 343-356.
- Cervantes, R. M. C., (2005). *Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México.*, Colegio de Geografía-Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Chen, JH., (2006). *El uso combinado de fertilizantes químicos y orgánicos y / o biofertilizantes para el crecimiento de los cultivos y la fertilidad del suelo.* Taller internacional sobre el manejo sostenido del sistema suelo-rizosfera para la producción eficiente de cultivos y el uso de fertilizantes (Vol. 16, p. 20). Departamento de Desarrollo Territorial de Bangkok.
- CONAFOR-UACH (Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo), (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación.* Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo.
- Consejo Estatal de Ecología., (2002). Gobierno del Estado de Hidalgo.
- Consejo Estatal de Ecología., (2002). Gobierno del Estado de Hidalgo.
- Cornejo D. L. A., y Arreola N. H. J., (2008). *Usos actuales y potenciales de las cactáceas de Jalisco,* Instituto de Botánica, Departamento de Botánica y Zoología, Universidad de Guadalajara.
- Cruz, F, G., y López, L, A. B., (2015). *Empleo de Técnicas de Bioingeniería en la Recuperación de la Cubierta Vegetal y Control de Erosión en Zonas Semiáridas.* En Redescubriendo el suelo: su importancia ecológica y agrícola (203-221). México: CONACYT, UNAM. FES Zaragoza.

- Díaz M, C., (2011). *Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización*. Ingeniería e Investigación, 31(3).
- Dirección General de Geografía., (1983), DGG. *Carta Climática de Pachuca, Escala 1: 50 000*.
- Dirección General de Geografía., (1993), DGG. *Carta Edafológica de Pachuca, Escala 1: 50 000*.
- Doran, J. W., y Parkin, T. B., (1994). *Defining and assessing soil quality*. In: *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America. Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA. pp: 3-21.
- EcuRed, (2021). *Opuntia robusta Wendl.* DOI: https://www.ecured.cu/index.php?title=Opuntia_robusta_Wendl&oldid=3790603.
- Eguiarte, L.E., V. Souza y A. Silva-Montellano., (2000). *Evolución de la Familia Agavaceae: Filogenia, biología reproductiva y genética de poblaciones*. Boletín de la Sociedad Botánica de México 66: 131-150.
- Fabián V. Y., Montiel S. D., Olivares O. J. L, Zavaleta B. P. y Fierro A. A., (2004). *Efecto simbiótico entre poblaciones micorrízicas sobre Opuntia matudae establecida en una ladera altamente erosionada*. Memoria del X Congreso Nacional y VIII Congreso Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y otras Cactáceas de Valor Económico. Universidad Autónoma Chapingo.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)., (2008). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, Un Marco Conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*. ISBN 978-92-5-305511-1. Viale delle Terme di Caracalla.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)., (2017). *Propiedades físicas del suelo*. FAO Sitio web: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.
- Flores-Grez, E., Espinosa-Organista, D. N., (2016). *Araneofauna como bioindicadores del Parque Ecológico "Cubitos"* (PDF). Boletín de la Sociedad Mexicana de Entomología (2): 57-63. ISSN 2448-4768.
- García, C., Hernández, T., Pascual, J.A., Moreno, J.L., y Ros, M., (2005). *Microbial activity in soil of SE Spain exposed to degradation and desertification processes. Strategies for their rehabilitation* In: Gara; C. Hernández, M. T., (Eds.), *Research and perspectives of soil Enzymology in Spain*. CEBAS-CSIC, pp 93-143.
- García, C., Hernández, T., Roldan, A., Albaladejo, J., y Castillo, V., (2000). *Organic amendment and mycorrhizal inoculation as predice in afforestation of soils with Pinus halepensis Miller: effect on their microbial activity*. Soil Biol. Biochemist. 32, pp 1173- 1181.
- García, E., (2003). *Modificaciones al sistema de clasificación de climas de Köppen*. UNAM.
- García M, A., (1992). *Con Sabor a Maguey, Instituto de Biología*, UNAM, pp. 9-48.
- García M, A. (1995). *Riqueza y endemismos de la familia Agavaceae en México*. Conservación de plantas en peligro de extinción: diferentes enfoques, pp 51-75.
- García, M. A. J., (2007) *Los agaves de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 14-23.
- Garrido, A. y H., Cotler., (2010). *Degradación de suelos en las cuencas hidrográficas de México*. pp. 104-107. In: H. Cotler A., A. Garrido Pérez, N. Luna González, C. Enríquez Guadarrama y M. L. Cuevas Fernández (eds.). *Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización*. Pluralia.
- Gentry, Howard Scott., (1982). *Agaves of continental North America*. The University of Arizona Press, Tucson. 670 p.
- Gil, F. M., (2003). *La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de los factores bióticos y abióticos*. Revista Ecosistemas, 12(1).
- González D. A, Riojas L.M.E, Arreola N.H.J., (2001) *El género Opuntia en Jalisco. Guía de campo*. Univ. de Guadalajara y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 135 pp
- Gobierno del Estado de Hidalgo (G.E.H.), (2002), *Decreto de creación del Parque Ecológico Cubitos*.
- Granados, D., (1993). *Los Agaves en México*. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C. M., y Ellert. B. H., (1994). *Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils*. Canadian Journal of Soil Science 74: pp 367-385.
- Gray, D. H., y Sotir, R. B., (1995). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. A Practical Guide for Erosión Control*. New York: John Wiley & Sons, INC.,
- Guariguata, M., (1999). *Bases Ecológicas Generales para el Seguimiento de Proyectos de Restauración de Bosques*. En: *restauración ecológica y reforestación: Bogotá*. (Eugenia Ponce de León, ed.), pp. 83- 95. Fundación Alejandro Escobar.
- Haberern, J., (1992). *A soil health index*. Journal of Soil and Water Conservation 47: pp 6-10.
- Hagos, M.G., y Smit, G.N., (2005). *Soil enrichment by Acacia mellifera subsp. detinens on nutrient poor sandy soil in a semiarid southern African savanna* Journal of Arid Environments 61: pp 47-59.

- Huelgas M. P., y de Val de Gortari Ek., (2014). *La historia de las plantas nodriza, Una madrastra como nunca la habías visto*. Revista Saber Más, de Divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Hudson, N., (1982). *Conservación del suelo*. Editorial Reverte España.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)*, escala: 1:250000. edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INTAGRI. 2015. *La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo. Serie Suelos*. Núm. 09. Artículos Técnicos de INTAGRI. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo>.
- Jácome, C., (2013). Control de la Erosión del Suelo por medio de Técnicas de Bioingeniería en el Parque Ecológico Cubitos, en el Estado de Hidalgo. [Tesis de licenciatura]. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Khanna, S., (2005). *Aging Effects of Environmental Factors on Rolled Erosion Control Products*. Texas A&M University.
- Lázaro L. N. V., (2018). *Empleo de nopal (Opuntia streptacantha) para la recuperación de cubierta vegetal y control de erosión en el Parque Ecológico Cubitos, Pachuca, Hidalgo*. [Tesis de licenciatura]. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Llovera, L. J., (1985). *Aislamiento y caracterización de bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico de rizosfera de nopal*. [Tesis de Maestría] Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- López-Fando, C. Pardo, M. T., (2009). *Changes in soil Chemical Characteristic with different tillage practices semi-arid environment*.
- López-Acevedo y Roquero., (2003). *Edafología (3ª ed.)*. Mundi-Prensa. p. 234. ISBN 84-8476-148-7.
- López, R., Villavicencio, F. E., Real, R. M. A., Ramírez-Barajas, J. L., y Murillo, A. B., (2003). *Micronutrientes en suelos de desierto con potencial agrícola*. Terra latinoamericana, 21(3), 333-340.
- Martínez del Río, C. y Eguiarte, L.E., (1987). *Bird visitation to Agave salmiana: comparisons among hummingbirds and perching birds*. The Condor 89: pp 357-363.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., y Acevedo, E., (2008). *Carbono orgánico y propiedades del suelo*. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8(1), pp 68-96.
- Melgoza, C. A., Ortega, O. C., Morales, N. C. R., Jurado, G. P., Verín, C. V. S., Royo, M. M. H., y Álvarez, C. P., (2007). *Propagación de plantas nativas para la recuperación de áreas degradadas: opción para mejorar ecosistemas*. Tecnociencia Chihuahua, 1(3). pp 38-41.
- Mena, V. L., Tamargo, S. B., Salas, O. Eva., Plaza, P. L. E., Blanco, H. Y., Otero G. Anselmo., y Sierra G. G., (2015). *Determinación de saponinas y otros metabolitos secundarios en extractos acuosos de Sapindus saponaria L. (jaboncillo)*. Revista Cubana de Plantas Medicinales, 20(1). pp 106-116.
- Montiel S., D. y J. L. Olivares O., (1997). *Presencia de la micorriza vesículo arbuscular en cuatro cultivares de nopal (Opuntia spp.) en Huichapan, Hidalgo*. Memoria del VII Congreso Nacional y V Congreso Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT), (2010). *Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo*. México. Diario Oficial de la Nación. 153 pp.
- FE de erratas a la Modificación del Anexo Normativo III, *Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. publicada el 30 de diciembre de 2010, publicada el 14 de noviembre de 2019.
- Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT), (2000). *Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos estudio, muestreo y análisis*. México. Diario Oficial de la Nación. 75 pp.
- Olguín, I. J., (2004). *Manual de Cactáceas y Agaves del Jardín Botánico "Ollintepelt" Parque Ecológico Cubitos, Pachuca. Hgo*. [Tesis de licenciatura]. UAM Xochimilco.
- Olvera S. M.D., (2000). *Modelos tipo y beneficios de las líneas vegetativas intermedias en suelos de ladera*. X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4. Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Chihuahua, Chihuahua, México, 16-18 de agosto de 2000. ANEI. A.C. ANEI-S40008.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX (PAOT), (2000). *Los suelos de México*. http://www.paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/03_Suelos/3.1_Suelos/index.htm
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX (PAOT), (2019). *La degradación de suelos en México*. http://www.paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/compendio_2000/03dim_ambiental/03_03_Suelos/data_suelos/RecuadroIII.3.3.2.htm

- Parr, J. F., Papendick, R. I., Hornick, S. B., y Meyer, R. E., (1992). *Soil quality: Attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture*. American Journal of Alternative Agriculture 7. pp 5-11.
- Ramírez, J., (2000). *Los magueyes plantas de infinitos usos.*, www.conabio.gob.mx.biodiversitas/agave.htm, CONABIO, México.
- Ramírez-Tobías, H. M., Peña-Valdivia, C. B., y Aguirre, J. R. (2014). *Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de Agave a la restricción de humedad*. Botanical Sciences, 92(1). pp 131-139.
- Rangel, S., y R. Galván., (1992) *Notas sobre el género Agave en el valle del mezquital*. Cactáceas y Suculentas Mexicanas 37. pp 93-99.
- Rao, N. K., Hanson, J., Dulloo, M. E., y Ghosh, K., (2007). *Manual para el Manejo de Semillas en Bancos de Germoplasma (Manuales para Bancos de Germoplasma No. 8)*. Biodiversity International.
- Rendón-Hernández, G., (2008). *Biología reproductiva de aves residentes en un parque urbano: el parque ecológico cubitos, Hidalgo, México*. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Reyes, A. J. A. (2016). *EL NOPAL "Un icono de la patria"*. Relatos e Historias de México. <https://relatosehistorias.mx/nuestras-historias/el-nopal>
- Rodríguez., (2005). *Chile de agua con duraznos y maíz con agave mezcalero, dos sistemas de cultivo alternativos para laderas degradadas en Oaxaca*. ISBN 959-250-156-4.
- Román, P., Martínez, M. M., y Pantoja, A., (2013). *Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. Food & Agriculture Org. <http://www.fao.org/docrep/019/i3388s/i3388s.pdf>.
- Rondón, J. A., y Vidal, R., (2005). *Establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas (principios y métodos)*. Forest Latin, 38. pp 63-82.
- Ruiz V. J., Bravo, M. E. G., y Loaeza R., (2001). *Cubiertas vegetales y barreras vivas: Tecnologías con potencial para reducir la erosión en Oaxaca, México*. TERRA Latinoamericana, enero-marzo, año/vol. 19, número 001. Universidad autónoma de Chapingo. pp. 89-95.
- Salamanca S. B., (1995). *Deterioro de ecosistemas y necesidades de investigación*, Preprint.
- Sangalli, P., (2005). *¿Qué es la ingeniería biológica o bioingeniería?* QEJ Brico Jardinería y Paisajismo B&P. No. 130. pp 12-30.
- Sauli, G., Cornelini, P., y Preti, F., (2002). *Ingegneria naturalistica Manuale settore idraulico*.
- Schiechl, H. M., (1980). *Bioengineering for land reclamation and conservation*. University of Alberta Press, Edmonton.
- Schiechl, H. M., (1986). *Manual de ordenación de cuencas hidrográficas. Estabilización de laderas con tratamientos del suelo y la vegetación*. Guías FAO: Conservación 13/1.
- Schiechl, H. M., y Stern, R., (1992). *Ingegneria naturalistica. Manuale delle opere in terra*. Ed. Castaldi-Feltre.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (1993). *Ordenamiento Ecológico General del Territorio Nacional*. Instituto Nacional de Ecología.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Y Colegio de postgraduados (SEMARNAT- C.P.). (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., (2010). *Áreas naturales protegidas*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., (2011). *Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras*. ISBN: 978-607-7908-42-5.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)., (2017). *Nopal, planta que documenta la historia de México*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/nopales-previo?idiom=es>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (SEMARNAT-INECC)., (2012). *Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. ISBN: 978-607-8246-50-2.
- Sinisterra, J. A., Calle, Z., Murgueitio, E., Sánchez, M., Rodríguez, G., Vargas-Ríos, O., y Reyes, B. S. P., (2011). *Avances en la rehabilitación ecológica de la cárcava Monte Caldera, San Luis Potosí*. En La Restauración Ecológica en la Práctica: Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia.
- Stavi, I., y Lal, R., (2015). *Lograr una degradación neta de la tierra: retos y oportunidades*. Diario de ambientes áridos, 112. Pp 44-51.
- Suárez Díaz, J., (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Edición UIS, Bucaramanga. ISBN 958-33-0800-5.
- Suárez Díaz, J. (2001)., *Control de erosión en zonas tropicales*. 551.302 Su773c Ej. 1. Universidad Industrial de Santander.

- Tarango A. L.A., (2005). *Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México*. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, vol. IV, núm. 2, 2005, pp. 17-21. Universidad Autónoma Chapingo.
- Theilkuhl, Juan F., (1969). *Algunos aspectos de los géneros Agave y Fourcrea como causantes de enfermedades ocupacionales*. Rev. Colombiana. C. Quím. Farm., Volumen 1, Número 1, p. 73-104, 1969. ISSN electrónico 1909-6356. ISSN impreso 0034-7418.
- Tuttle, R. W., Ralston, D. C., Sotir, R. B., Gray, D. H., Adams, C. A., Saele, L. M., y Reckendorf, F. F., (1992). *Soil bioengineering for Upland slope protection and erosion reduction: Chapter 18*. Department of Agriculture.
- Urdaneta, A. B. S., Valdivia, C. B. P., Aguirre, J. R., Trejo, C., y Cárdenas, E. (2004). *Efectos del potencial de agua en el crecimiento radical de plántulas de Agave salmiana Otto Ex Salm-Dyck*. Interciencia, 29(11), pp 626-631.
- Vázquez A. A., (1997). *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo: Chapingo: México*. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos.
- Velázquez V.; D.K., (2010). *Diagnóstico Ambiental del Parque Ecológico Cubitos, ubicado en el municipio de Pachuca, Estado de Hidalgo*. [Tesis Licenciatura] FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Wang, Z.Y., Wang, G.Q., Li, C.Z., y Wang, F.X., (2003). *Research and application of the vegetation erosion dynamics*. Sci. China. 33. pp 1013–1023.
- Wu, Q., Zhao, H., (2001). *Basic laws of soil and water conservation by vegetation and its summation*. Journal of Soil and Water Conservation 15 (4). pp 13–16.
- Zeh, H., Pollanzi, P., y Sauli, G. (1997). *Tecniche di ingegneria naturalistica: rapporto di studio n. 4*, Il Verde Editoriale.