



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**Evaluación de técnicas mixtas de bioingeniería con
*Agave salmiana***

T E S I S

Para tener el título de

BIÓLOGO

P R E S E N T A:

Amado Flores Gabriela

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Esther Matiana García Amador

INVESTIGACIÓN FINANCIADA CON EL PROYECTO:IN218317, A
TRAVÉS DE PAPIIT,UNAM

Ciudad de México, junio 2018



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.

*Dedicado a
mi mamá, a mis hermanas y
a Jesús Segura*

Agradecimientos

Le agradezco a mi mamá por su incansable lucha de querer lo mejor para mí, por permanecer a mi lado y su incondicional apoyo. A mis hermanas Alejandra y Jessica, quienes siempre me han inspirado a ser mejor persona y profesionista, las cuales quiero mucho y admiro. También le agradezco a Miguel, mi pequeño sobrino que irradia felicidad sobre mi ser y que espero llegar a ser una inspiración para él.

Gracias a mi Chucho, por todos los momentos increíbles que hemos pasado juntos, por ser la persona más maravillosa del mundo, por que siempre me has ayudado de las miles de maneras que se puede ayudar a alguien, por tu inmenso amor y cariño. Para ti todo mi agradecimiento y amor, eres parte de mí y de este trabajo. Te amo.

Gracias a Viri, por ser mi mejor amiga, por todas las aventuras y locuras; por tu inmensa sonrisa que me contagia de alegría, en esta nueva etapa espero que sigamos juntas. Este trabajo es tuyo también.

Gracias a la Dra. Esther, quien me brindo su paciencia, comprensión y asesoría a lo largo de todo este proceso, además me dio el ánimo para seguir adelante y concluir este proyecto; a la maestra Lety por sus consejos y ayuda. Gracias profesoras por todo el tiempo y dedicación.

Gracias a la Universidad, por los mejores momentos que he vivido, por ser pública, porque me brindaste la oportunidad de ser lo que anhelaba, ser feliz, ser bióloga.

Índice general

Lista de figuras	VII
Lista de tablas	VIII
Resumen	1
1. Introducción	2
2. Marco Teórico	4
2.1. Suelo	4
2.1.1. Degradación del suelo	4
2.1.2. Degradación química	5
2.1.3. Degradación física	6
2.1.3.1. Erosión del suelo	6
2.1.3.2. Erosión eólica	6
2.1.3.3. Erosión Hídrica	7
2.1.4. Degradación Biológica	7
2.2. Recuperación de la cubierta vegetal	8
2.2.1. Selección de especies	8
2.2.2. <i>Agave salmiana</i>	8
2.2.2.1. Clasificación taxonómica	8
2.3. Técnicas de Bioingeniería	10
2.3.1. Técnicas de recubrimiento	10
2.3.2. Geotextiles (yute)	10
2.4. Evaluación de las erosión	11
2.4.1. Control de erosión	11
2.4.2. Zanjas	11
3. Justificación	12
4. Hipótesis	13
5. Objetivo general	13
5.1. Objetivos Particulares	13

6. Método	14
6.1. Descripción de las zona de estudio	14
6.2. Fauna	15
6.3. Vegetación	15
6.4. Geología y suelo	15
6.5. Hidrología	15
6.6. Clima	16
6.7. Trabajo en campo	16
6.7.1. Evaluación de la erosión	17
6.7.2. Selección de ejemplares	18
6.7.3. Evaluación del porcentaje de vegetación	18
6.7.4. Implementación de las técnicas de bioingeniería	19
6.8. Diseño experimental	21
6.8.1. Cobertura	21
6.8.2. Tasa relativa de crecimiento	21
6.8.3. Trabajo en laboratorio	21
7. Resultados y discusión	22
7.1. Parámetros físicos	22
7.2. Parámetros químicos	23
7.2.1. Micronutrientes	26
7.2.2. Capacidad de Intercambio Catiónico	27
7.3. Crecimiento de plantas	28
7.3.1. Altura	28
7.3.2. Cobertura	29
7.3.3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)	30
7.4. Técnicas de bioingeniería	31
7.4.1. Zanjas	31
7.5. Evaluación de erosión	34
7.6. Evaluación de porcentaje de vegetación	34
8. Conclusiones	37
9. Bibliografía	38
10. Anexos	45

Índice de figuras

Figura 1. Principales tipos de degradación(Lal, 1998)	5
Figura 2. El ciclo de la erosión eólica (García, 1967).	7
Figura 3. Imagen de <i>Agave salmiana</i> en Parque Cubitos, Hidalgo.	9
Figura 4. Mapa satelital del Parque Ecológico Cubitos, ubicado en el Estado de Hidalgo	14
Figura 5. Zonas de estudio.	17
Figura 6. Evaluación de la erosión, por el método de reglas	18
Figura 7. Método de línea de Canfield.	19
Figura 8. Tratamiento y testigo.	19
Figura 9. Zanjas en zona 1.	20
Figura 10. Relación entre pH y disponibilidad de nutrientes en el suelo.	24
Figura 11. Presencia de <i>Bouteloua y Prosopis</i>	26
Figura 12. Alturas de testigos y tratamientos de <i>Agave Salmiana</i> de las tres zonas de trabajo.	29
Figura 13. Coberturas de testigos y tratamientos de <i>Agave Salmiana</i> de las tres zonas de trabajo.	30
Figura 14. Tasa Relativa de Crecimiento (TCR) de <i>Agave salmiana</i>	31
Figura 15. Acumulación de materiales disgregados (clastos) en las zanjas de las tres zonas de estudio	32
Figura 16. Zanja 1.	32
Figura 17. Zanja 2.	32
Figura 18. Zanja 3.	33
Figura 19. Posición de zanjas.	33
Figura 20. Zona 1.	35
Figura 21. Zona 2.	35
Figura 22. Zona 3.	36
Figura 23. <i>Agave salmiana</i> , como nodriza de una herbácea y una cactácea.	36

Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros físicos de las tres zonas de estudio.	23
Cuadro 2. Parámetros químicos de las tres zonas de estudio.	25
Cuadro 3. Micronutrientes en los tres suelos trabajados (ppm).	27
Cuadro 4. CIC en los tres suelos trabajados (Cmol Kg-1).	28
Cuadro 5. Porcentaje de la cubierta vegetal, al inicio y final del experimento en las tres zonas de estudio.	34
Cuadro 6. Tabla ANOVA para Col_2 por Col_1	45
Cuadro 7. Tabla ANOVA para Col_3 por Col_1	45
Cuadro 8. Tabla ANOVA para Col_4 por Col_1	46

Resumen

Las zonas semiáridas de México ocupan más de la mitad del territorio y poseen gran cantidad de recursos naturales, que al ser sobre explotados provocan pérdida de la vegetación nativa y un grave problema de erosión; por lo cual el objetivo de este trabajo fué la recuperación de la cubierta vegetal y el control de la erosión con el fin de aumentar la fertilidad del suelo en el Parque Ecológico Cubitos; localizado al suroeste de la ciudad de Pachuca, en el Estado de Hidalgo, México, 20°, 07' y 21" Norte, 98°, 44' y 09" Oeste, por medio del empleo de técnicas de bioingeniería, en donde se utilizaron materiales vegetales vivos como el *Agave salmiana*, geotextiles (yute) rodeando al maguey para facilitar su estabilización y mejoramiento de la estructura del suelo, y aumentar su fertilidad; construcción de zanjas perpendiculares al flujo de agua y viento para facilitar el control de la erosión. Se trabajó en tres zonas erosionadas donde se realizó el análisis de suelo antes y después de la aplicación de las técnicas. Los resultados obtenidos en 15 meses muestran diferencias significativas en la Tasa Relativa de Crecimiento y Cobertura; con un mayor crecimiento (2 cm) del *Agave salmiana* tratamiento con respecto al testigo en las tres zonas de estudio y solo en la Zona uno, los tratamientos presentaron una cobertura mayor (25.8 cm²) que los testigos, aumento la concentración de Fósforo (P) y Potasio (K) al final del experimento, al igual que el % de Materia Orgánica y la Capacidad de Intercambio Catiónico en especial el Ca⁺⁺ con (16.95 Cmol Kg⁻¹) con respecto al suelo inicial; en el caso de las zanjas la profundidad disminuyó hasta llenarse por completo, se determinó la pérdida de suelo de 4 cm suelo año en la parte alta con suelo desnudo y de 2 cm suelo año en suelo con vegetación por la técnica de reglas modificado de la técnica de corcholatas y roldanas, se incrementó el porcentaje de vegetación en promedio en un 68.8% en las tres zonas de estudio, por nodrizaje y presencia de especies pioneras; propiciando la recuperación de la cubierta vegetal.

1. Introducción

Los ecosistemas áridos y semiáridos de México ocupan casi el 60 % del territorio y desde un punto de vista ecológico, son importantes porque mantienen alta diversidad florística estimada en 6,000 especies de plantas, de las cuales, aproximadamente el 50 % son endémicas (Rzedowski, 2006). Uno de los aspectos que confiere mayor importancia a estas comunidades, es la abundancia en especies de distribución restringida, una de estas es el género *Agave* (Villarreal & Encina, 2005).

El 75 % de las especies del género *Agave* son endémicas, y algunas de ellas tienen relevancia antropogénica desde la época prehispánica (Aguirre *et al.*, 2001). La riqueza actual de especies en *Agave* se puede explicar en función del desarrollo de adaptaciones fisiológicas, morfológicas y ecológicas ocurridas hace 8 a 10 millones de años y que favorecieron que las nuevas especies de *Agave* colonizaran las recién formadas zonas áridas que corresponden al actual Altiplano Central Mexicano. En este contexto *Agave salmiana* está adaptada a diferentes hábitats, incluyendo cerros y laderas inclinadas y se desarrolla tanto a nivel individual como poblacional, sobre suelos con textura medias y con un pH de neutro a ligeramente ácido (García *et al.*, 2010)

Sin embargo, estos ecosistemas se ven amenazados debido a la reducción de la cubierta vegetal que tiene como consecuencia la pérdida de especies y variación genética, deterioro general de los suelos.

En México, una evaluación del estado de los suelos de la nación (realizada por el Colegio de Posgraduados y la Universidad Autónoma de Chapingo, en el marco del Inventario Nacional Forestal y de Suelos) encontró que 45 % de la superficie nacional está afectado por algún grado de degradación del suelo, aunque la mayor parte de ésta se encuentra afectada de manera ligera 23.2 % a moderada 19.7 %, y sólo 1.4 % presenta una afectación severa, y 0.9 % una de tipo extremo (SEMARNAT, 2006).

Los factores más importantes causantes de la degradación del suelo a nivel mundial son, en orden jerárquico: el sobrepastoreo (responsable del 35 %), la deforestación (29 %), las prácticas agrícolas inadecuadas (28 %), la extracción de leña (7 %) y el desarrollo urbano e industrial (1 %) (SEMARNAT, 2006).

Numerosas investigaciones coinciden en señalar que la mejor forma de evitar la degradación y erosión de los suelos, es la conservación, restitución o aumento de la cubierta vegetal. La cubierta vegetal tiene un papel decisivo en la generación, protección y conservación del suelo, resaltando que: favorece la fijación del suelo, el descenso de la evaporación de la superficie del suelo, el desarrollo de un microclima que permite el desarrollo de seres vivos ligados a las plantas, el aumento del contenido de materia orgánica, etc. (Belmonte & Romero, 2013).

El uso de plantas como material para estabilizar el suelo está frecuentemente asociado al empleo de materiales inertes; una rama de la ingeniería que aprovecha estos elementos es la bioingeniería. La definición dada por el Profesor Hugo Schiechtl, uno de los principales expertos en la materia es la siguiente: "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 y comunidades vegetales. Estos objetivos se consiguen aprovechando los múltiples rendimientos de las plantas y utilizando técnicas constructivas de bajo impacto ambiental" (Valenzuela & Sangalli, 2008).

Una serie de técnicas que utilizan principalmente material vegetal vivo, como elementos de construcción o combinándolo con materiales inertes con el fin de ayudar a establecer las condiciones físicas necesarias e ideales dentro de las primeras fases (Valenzuela & Sangalli, 2008).

Las técnicas de Ingeniería Biológica se emplean 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, escombreras)

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 (Valenzuela & Sangalli, 2008). Se trabajó en el Parque Ecológico Cubitos, que es un área natural protegida, ubicada en el suroeste de la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Fue decretado parque estatal el 30 de diciembre del 2002, en una superficie total de 132 hectáreas, las que corresponden a un matorral xerófilo. Ocupa una planicie sedimentaria que asciende gradualmente hacia los cerros del Zopilote y Cubitos formando un gradiente que va de sitios de llanuras hasta las áreas cerriles. En este gradiente se desarrolla el matorral crasicaule, rosetófilo, micrófilo y pastizales (COEDE, 2004).

2. Marco Teórico

2.1. Suelo

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (2012), define al suelo como la capa superficial de material mineral y orgánico, no consolidado, que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental y tiempo) y que debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó. El proceso de formación del suelo comienza con la desintegración de la roca madre que está expuesta en la superficie de la corteza terrestre, a partir de la meteorización ocasionada por las lluvias, el viento, la exposición al sol y la actividad mecánico-biológica de las raíces de las plantas. En el caso de la actividad biológica, las cianobacterias y los líquenes son los primeros colonizadores del sustrato rocoso, liberan ácidos orgánicos débiles, como el ácido carbónico, que disuelve lentamente la roca madre. El efecto mecánico del crecimiento de las raíces acelera la ruptura de las rocas, además de que la presencia de las plantas permite una gran actividad de micro y meso organismos y la acumulación de materia orgánica en diferentes estados de descomposición, la cual también contribuye a la formación del suelo. Aunque el suelo está en constante formación, el proceso es sumamente lento. Se calcula que para tener un centímetro de suelo en la capa superficial son necesarios entre 100 y 400 años, por lo cual se considera que el suelo es un recurso natural no renovable en la escala de tiempo humana (SEMARNAT 2012).

2.1.1. Degradación del suelo

La degradación del suelo, definida por Lal (1998), es la pérdida de su productividad actual o potencial, que implica el desmejoramiento del suelo en su capacidad inherente para producir bienes y servicios y para realizar sus funciones de regulación ambiental. Particularmente dos de las funciones del suelo de concernimiento directo al bienestar de la humanidad como son la productividad agrícola y la capacidad de regulación ambiental dependen de la calidad del suelo y de sus propiedades. Oldeman & Van Lynden (1998) señalan que hay dos grandes categorías de procesos de degradación de suelos:

- Los procesos relacionados con el desplazamiento de material del suelo por el agua o por el viento que conlleva a la ocurrencia de pérdida de material del suelo o bien de la deforestación de la tierra, como efectos *in situ*.

- Procesos que determinan el deterioro *in situ* de las cualidades del suelo. Tales procesos pueden ser de naturaleza química (agotamiento de nutrientes, pérdida de materia orgánica, salinización, acidificación contaminación), física (sellado y encostramiento de la superficie del suelo, compactación, anegamiento), y también biológica, conducente a un desbalance de la actividad biológica en el episuelo.

Considerando la segunda categoría, Lal & Steward (1990) agrupan los procesos de degradación del suelo en tres tipos principales: física, química y biológica (Figura 1).

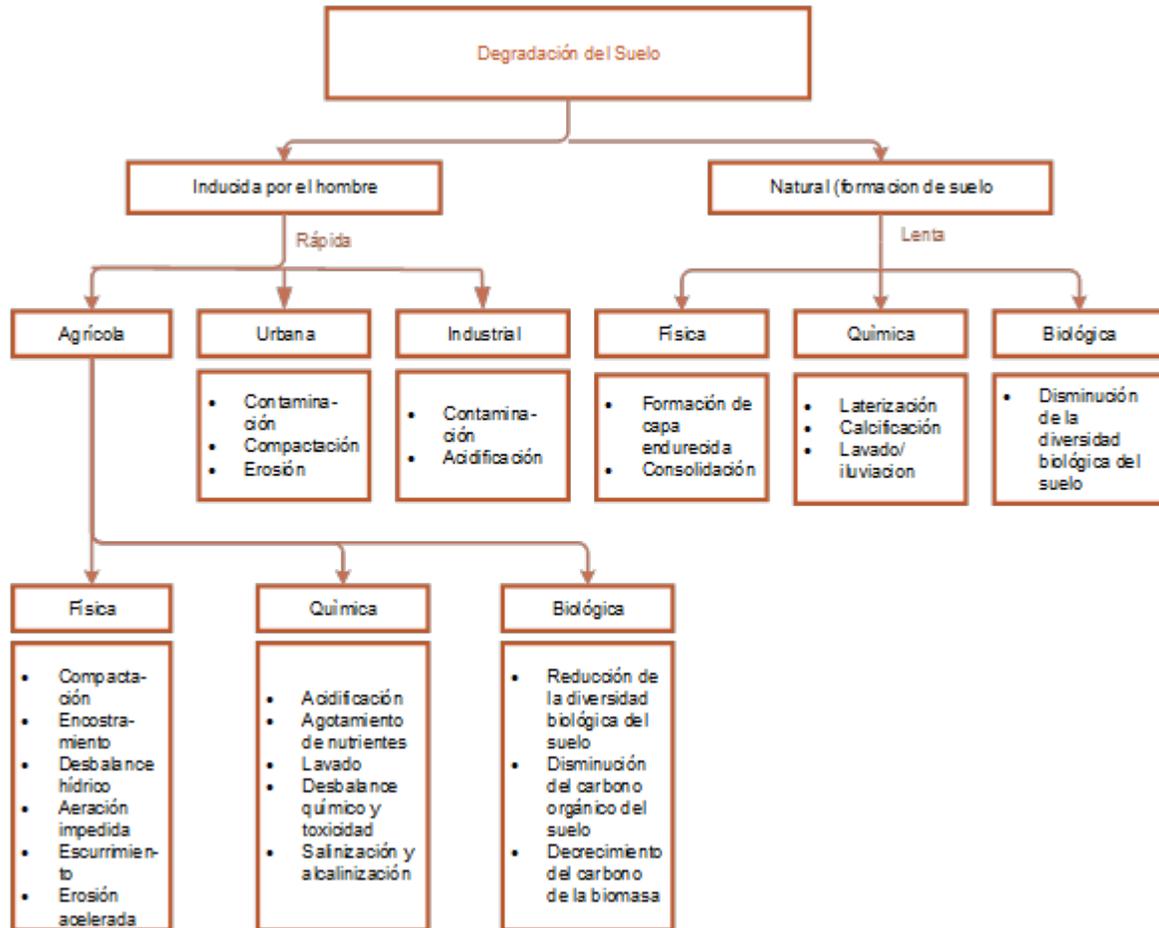


Figura 1. Principales tipos de degradación (Lal, 1998)

2.1.2. Degradación química

La degradación química del suelo está muy asociada a la intensificación de la agricultura, que genera una reducción de su fertilidad por el agotamiento de nutrientes. Otros factores que conducen a la degradación química son la acidificación, contaminación y la salinización (SEMARNAT, 2015).

2.1.3. Degradación física

La degradación física se refiere a todos aquellos procesos que resultan en cambios adversos que pueden afectar las condiciones y propiedades físicas de los suelos. Casi todos los procesos causantes de la degradación física están muy relacionados entre sí y conllevan a una reducción de la porosidad, y en consecuencia a un deterioro de las relaciones aire-agua en el suelo. Los principales procesos de degradación física del suelo son: compactación del suelo, sellado y encostramiento (López, 2002).

2.1.3.1. Erosión del suelo

La erosión es el proceso de desprendimiento y arrastre de suelo y/o fragmentos de roca por acción del agua, viento, el hielo o la gravedad (SCSA, 1982). En un sentido más amplio, la erosión es un fenómeno ligado a la evolución fisiográfica de la corteza terrestre, que a través de su acción lenta y efectiva ha contribuido a esculpir el relieve terrestre. En el desarrollo de los procesos erosivos, pueden distinguirse dos clases de erosión: la geológica o natural y la acelerada o antrópica (López, 2002). La erosión geológica es un proceso lento e imperceptible, es el desgaste natural de la superficie terrestre sin la intervención del hombre. La erosión natural contribuye a la formación del relieve, a los procesos de meteorización de las rocas y a la formación de los suelos. La erosión antrópica o acelerada es la erosión inducida por la actuación del hombre que interfiere y rompe el equilibrio existente entre los suelos, la vegetación, el agua, el viento, lo cual da lugar a formaciones terrestres erosivas y otras condiciones anormales como son las cárcavas o zanjas, los subsuelos descubiertos por la erosión laminar, los derrumbes, las carreteras socavadas, los lagos y reservorios colmatados y los cauces de los ríos obstruidos por sedimentos (López, 2002). El viento y el agua son los principales agentes generadores de la erosión, y es de acuerdo con el agente erosivo actuante que se distinguen dos formas generales de erosión: eólica e hídrica (López, 2002).

2.1.3.2. Erosión eólica

El proceso de la erosión eólica puede representarse como un ciclo que involucra al conjunto de los procesos de estabilización, inestabilización y erosión ocasionada por el viento, con la inclusión de las condiciones que resultan de dichos procesos (García, 1967). Cada uno de los procesos del ciclo de la erosión eólica origina un producto específico, el que a su vez induce o da lugar a otro proceso, los cuales se integran para dar lugar al ciclo como se representa en la Figura 2.

Asociados al ciclo de la erosión eólica se presentan los procesos de formación y remoción del suelo. Cuando se trata de controlar la erosión, los esfuerzos deben ser orientados en el sentido de modificar los procesos que afectan a la remoción del suelo para que la intensidad de las pérdidas que los afectan no exceda la tasa de su formación (García, 1967). Los principales factores que disminuyen la magnitud de la erosión eólica, son: la rugosidad del terreno, la precipitación, la forma del relieve, la longitud del área expuesta y la cobertura vegetal (López, 2002). De hecho, las zonas más severamente afectadas por este proceso de degradación son aquellas de climas áridos y semiáridos (Donahue, *et al.*, 1990).

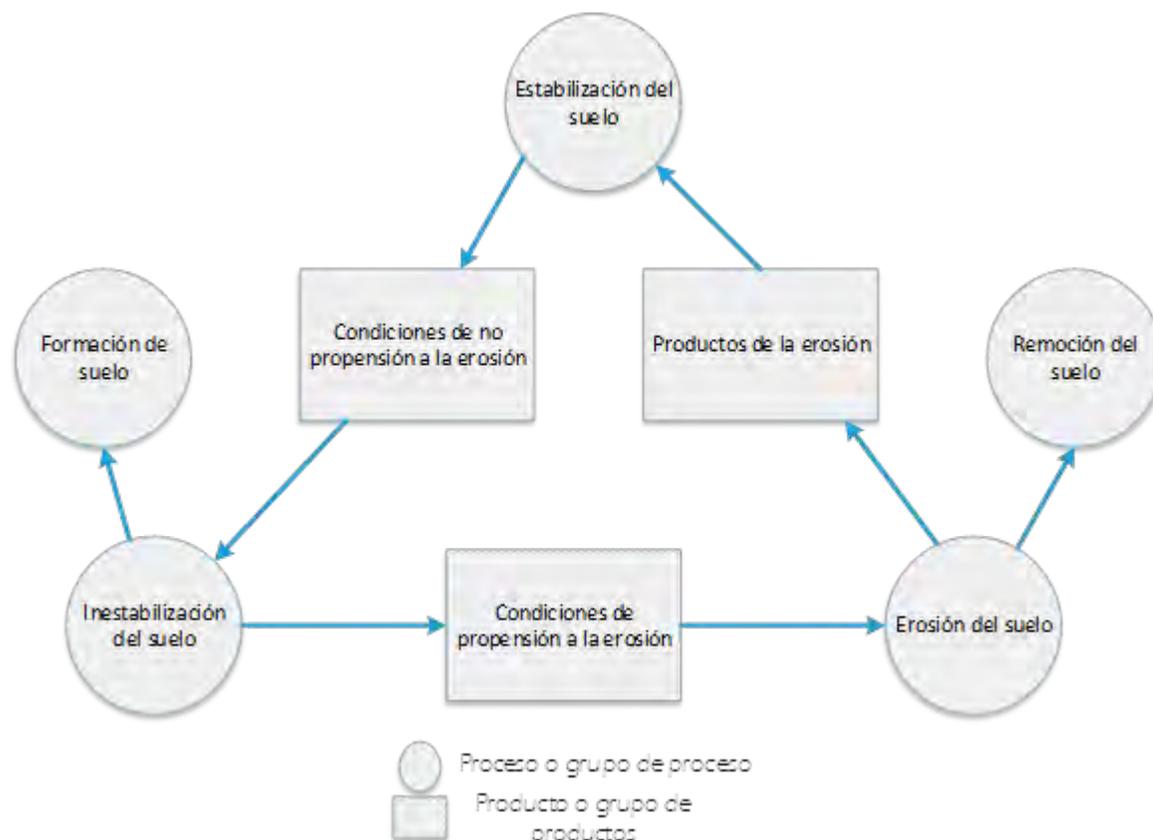


Figura 2. El ciclo de la erosión eólica (García, 1967).

2.1.3.3. Erosión Hídrica

La erosión hídrica es un proceso continuo que consiste en la separación de las partículas y agregados de la masa del suelo, su transporte y sedimentación, siendo el agente activo el agua. La erosión hídrica se inicia cuando las gotas de lluvia golpean los terrones y agregados en la superficie de un suelo desnudo, causando el movimiento de las partículas más finas como sedimento en suspensión en el flujo de agua, el cual en su movimiento cuesta abajo, va abriendo surcos a lo largo de la vía. La denudación del suelo propicia el desarrollo de los procesos de erosión, y más en áreas donde las condiciones climáticas dificultan el restablecimiento de la vegetación protectora (Donahue, *et al.*, 1990).

2.1.4. Degradación Biológica

La degradación biológica se refiere a la pérdida de materia orgánica (humificada) por acción de la mineralización acelerada. Sin embargo, el término de degradación biológica del suelo, es frecuentemente equiparado con el agotamiento o pérdida de la cobertura vegetal, a la par de la materia orgánica, y también para demostrar la disminución de los organismos beneficiosos del suelo (Steiner, 1996).

2.2. Recuperación de la cubierta vegetal

La vegetación juega un papel fundamental en la conservación del suelo (Maestre, 2002), por lo que es habitual que se considere a la recuperación de la cubierta vegetal como una de las técnicas para evitar la degradación y erosión de los suelos (Belmonte & Romero, 2013). Numerosas investigaciones realizadas en zonas áridas y semiáridas han puesto de manifiesto las marcadas diferencias en las propiedades edáficas que se dan entre las manchas de vegetación y las zonas desnudas circundantes. Así, si se compara con los espacios desnudos contiguos, el suelo debajo de la vegetación suele presentar una mejor estructura más materia orgánica, mayor capacidad de almacenamiento de agua y de infiltración, más elevados de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes, así como un notable incremento en la actividad microbiana. Junto con esta mejora en las condiciones edáficas, la vegetación también es capaz de mejorar las condiciones microclimáticas respecto a los espacios desnudos, disminuyendo la radiación incidente, la temperatura del suelo y la demanda de evaporación (Maestre, 2002).

2.2.1. Selección de especies

La vegetación seleccionada debe cumplir con ciertos atributos que permitan la protección de las vertientes de los procesos erosivos, a través de la fijación del suelo, aumento de la evapotranspiración e incrementar la retención y retardación del flujo superficial. Para esto, es necesario que la cubierta vegetal posea características morfológicas y ecofisiológicas (Rondón & Vidal, 2005). Las mejores especies para la restauración, 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. También, estas especies están adaptadas a la fauna herbívora y las características patogénicas de la región. En contraparte, las especies exóticas no están favorecidas por las condiciones locales del clima, patógenos o animales herbívoros (Rondón & Vidal, 2005).

2.2.2. *Agave salmiana*

2.2.2.1. Clasificación taxonómica

Según Granados (1999)

- Reino: *Plantae*
- División: *Magnoliophyta*
- Clase: *Liliopsida*
- Orden: *Asparagales*
- Familia: *Agavaceae*
- Género: *Agave L.*
- Especie: *Agave salmiana*



Figura 3. Imagen de *Agave salmiana* en Parque Cubitos, Hidalgo.

Son plantas xerofitas (siempre verdes) (Figura 3), las cuales han desarrollado adaptaciones en sus hojas, como en raíces, permitiéndoles sobrevivir en ambientes adversos, con baja precipitación y variaciones considerables de temperatura durante el día y la noche (García, 2007).

Presenta hojas gruesas y suculentas de forma lineal-lanceoladas, de 70 cm a 2 m de largo por 16 a 40 cm de ancho (Figura 3), reduciendo el área expuesta al sol, la forma acanalada de la misma permite que el agua fluya al interior de la planta, presenta una cutícula gruesa en la epidermis que evita la pérdida de agua. Posee dientes en el margen y una espina terminal, mejor conocida como púa, lo que les permite el almacenamiento de agua y supervivencia durante la temporada de sequía, permitiendo que la púa terminal y los dientes no den paso a la transpiración y son protección contra depredadores (García, 2007).

De las aproximadamente 273 especies de agave de los 8 géneros 205 (75 %) crecen en México, siendo 151 (55 %) especies endémicas. Las principales zonas son: Hidalgo, Tlaxcala, Edo. México y Puebla, aunque también se le encuentra marginalmente en San Luis Potosí, Michoacán, Querétaro, Morelos, Guanajuato, Veracruz y Oaxaca (García & Galván, 1994). En el estado de Hidalgo, la siembra de maguey se lleva a cabo en gran diversidad de hábitats, desde valles y planicies, hasta cerros y laderas pedregosas, por lo cual se estima que 27 especies, se encuentran en el estado de Hidalgo entre ellas *Agave salmiana* (Pérez & Rodríguez, 2010).

De los 71 municipios donde se desarrolla el maguey de forma óptima en el estado de Hidalgo, se cuenta con una superficie total de 851,222.48 hectáreas de terrenos destinados a usos agropecuarios, de los cuales el 20 % corresponde a suelos con problemas de erosión leve, el 58 % son considerados con erosión moderada, el 7 % presentan erosión fuerte y el 15 % son considerados como suelos con erosión extrema (Pérez & Rodríguez, 2010).

Por lo tanto, los agaves (magueyes) son un recurso que en algunas regiones se utilizan para detener el efecto erosivo que presentan los suelo siendo, además, una alternativa de producción sustentable, si se planifica su uso y su manejo. Este es uno de los factores más importantes que determinan la productividad y sostenibilidad agrícola de las áreas de ladera (Olvera, 2000).

2.3. Técnicas de Bioingeniería

Entre las tecnologías utilizadas para el control de la erosión se encuentran la bioingeniería. 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 (Díaz, 2011). Esta comprende una serie de técnicas que utilizan material vivo como elemento de construcción, solo o combinado con materiales inerte dentro del campo de la restauración (Sangalli, 2005).

2.3.1. Técnicas de recubrimiento

Son técnicas destinadas a evitar la erosión superficial. Dentro de este grupo se distinguen: siembras de diversos tipos, con o sin acolchados (cubrir con el yute); hidrosiembras tanto de especies herbáceas como especies leñosas; empleo de mantas orgánicas en las siembras; traslado de tepes, o de fragmentos de plantas: rizomas y estolones, principalmente; recubrimiento con varas de salicáceas (Sangalli, 2005).

2.3.2. Geotextiles (yute)

Una de las variedades de materiales usados en la aplicación para el control de erosión, son los revestimientos orgánicos convencionales, en esta categoría se encuentran los geotextiles (Díaz, 2011).

Estas son más amigables con el medio ambiente pues se biodegradan como resultado de la acción de los microorganismos; a diferencia de los productos sintéticos (Sarsby, 2007).

Los beneficio de los geotextiles son:

- Ayudar en la estabilización del suelo, reduciendo inmediatamente la erosión producida por el viento y el agua.
- Reducir las fluctuaciones en las temperaturas del suelo para fomentar una rápida germinación de las semillas y un menor estrés por temperatura sobre las plántulas.
- Retener la humedad, con la finalidad de obtener una rápida germinación de las semillas y crecimiento de las plantas.
- Transformar estas cubiertas en materia orgánica valiosa que se incorpora al suelo para otorgar humedad a largo plazo y brindar, al mismo tiempo, buena retención de nutrientes a la planta (Díaz, 2011).

2.4. Evaluación de las erosión

La evaluación de la erosión se puede hacer de manera indirecta o directa. La estimación de pérdidas de suelo por métodos directos implica la implementación de ensayos en campo con mediciones frecuentes o periódicas; si bien las pérdidas calculadas corresponden al fenómeno conforme éste ocurre en la realidad, las técnicas para su estimación son muy variadas, y en función de ello lo es asimismo su confiabilidad. Las ventajas en términos de precisión que se derivan de los ensayos directos en campo son claras (León, 2001).

En relación a los modelos experimentales, los más conocidos son las parcelas de escurrimiento y las parcelas con clavos de erosión. Las parcelas de escurrimiento involucran la captación del caudal líquido y sólido, pero son difíciles de implementar por costos y tecnología. Por su parte, la metodología de los clavos y roldanas, es un método experimental sencillo, directo, de gran precisión y principalmente de bajo costo, en los cuales la estimación de pérdida de suelo se realiza totalmente en terreno (Pizarro *et al.*, 2004).

2.4.1. Control de erosión

Cuando hay manifestaciones de erosión, se pueden emplear medidas para su control. Estas medidas no demandan ingentes esfuerzos económicos; son implementaciones de prácticas menores para la conservación de suelos que integran sencillas técnicas de intervención del terreno atendiendo adecuadamente los agentes erosivos y los parámetros que imparten resistencia al mismo frente a la erosión (León, 2001). Para un control efectivo contra la erosión hay que complementar las plantaciones con obras de conservación, especialmente en la fase de establecimiento. Cualquier práctica que promueva el manejo de vegetación permanente, en sentido contrario a la pendiente, ayudará a reducir el escurrimiento, a captar sedimentos y a aumentar la infiltración del agua en el suelo, reduciendo la erosión causada por la acción de la lluvia o el riego (Carlson & Añazco, 1990).

2.4.2. Zanjas

Las zanjas de infiltración son canales sin desnivel construidos en laderas, los cuales tienen por objetivo captar el agua que escurre, evitando procesos erosivos de manto, permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Pizarro *et al.*, 2004).

Cabe señalar que, el diseño de las zanjas de infiltración atiende fundamentalmente a los siguientes criterios:

- El espaciamiento entre zanjas debe ser tal que permita un control adecuado de la erosión.
- La capacidad adecuada de las zanjas debe almacenar un determinado volumen de agua producido por la lluvia y favorecer el crecimiento de las plantas (Pizarro *et al.*, 2004).

Este tratamiento se recomienda para zonas áridas y semiáridas debido a que el flujo directo representa el componente principal del flujo hídrico y las precipitaciones máximas en 24 horas alcanzan montos de nivel medio (Francke *et al.*, 1998)

- Disminuir la velocidad de las aguas de lluvias
- Aumentar la infiltración del agua en el suelo
- Reducir la escorrentía superficial
- Retener los sedimentos removidos por el flujo hídrico
- Acumular el agua de lluvias para el riego (Francke *et al.*, 1998)

3. Justificación

El Parque Ecológico Cubitos representa una parte de las zonas áridas de México caracterizándose por la baja precipitación y la diversidad de plantas que a través del tiempo y espacio han sabido adaptarse a condiciones de poca agua, altas temperatura y suelos erosionados. Asimismo ha presentado incendios que provoca la desaparición de la cubierta vegetal y el suelo desnudo puede verse afectado por diversos procesos erosivos que implican la pérdida de nutrientes en el mismo. Por lo que es importante revertir la erosión del suelo a través de recuperar la cubierta vegetal del área deteriorada, por el empleo de técnicas de bioingeniería, en donde se utilizan materiales vegetales vivos (plantas), inertes (rocas) y geotextiles (yute) aumentando la cubierta vegetal y fertilidad del suelo.

4. Hipótesis

La especie *Agave salmiana* con tratamiento de acolchado aumenta la cubierta vegetal y evita la pérdida de suelo.

5. Objetivo general

Evaluar las técnicas de bioingeniería de acolchado y zanjas en la especie nativa: *Agave salmiana*; para recuperación de la cubierta vegetal y en consecuencia el aumento de la fertilidad del suelo.

5.1. Objetivos Particulares

- Comparar las técnicas de acolchado y zanjas para la recuperación de la cubierta vegetal.
- Emplear la especie nativa *Agave salmiana* en la recuperación de la cubierta vegetal y control de erosión
- Evaluar la erosión del suelo por la técnica de reglas, técnica modificada de clavos y roldanas.
- Realizar análisis físicos y químicos del suelo antes y después de la aplicación de las técnicas de bioingeniería.

6. Método

6.1. Descripción de las zona de estudio

El parque se localiza en la porción Noreste de la Cuenca del Valle de México entre los paralelos 20°06'33" y 20°07'39" de Longitud Norte y 98°45'00" y 98°44'60" de Longitud Oeste. Pertenece al sector de parteaguas de la Región Sur de la Sierra de Pachuca y los lomeríos que lo conforman están en la provincia ecológica de los Lagos y Volcanes de Anáhuac (Chimal,*et al.*, 2015)

Está dividido en tres zonas: de recuperación, de uso restringido y de uso intensivo; las dos primeras corresponden a la reserva ecológica del Parque y la última está compuesta por una Casa Ecológica, un Museo Natural, un Tuzuario, Serpentario, Acuario, un Jardín Botánico, un Laberinto, un Bosquete, 17 Viveros, una Tirolesa de 200 metros, un Área de Eco juegos, y por último el Centro de Información y Documentación del Medio Ambiente (Figura 4).

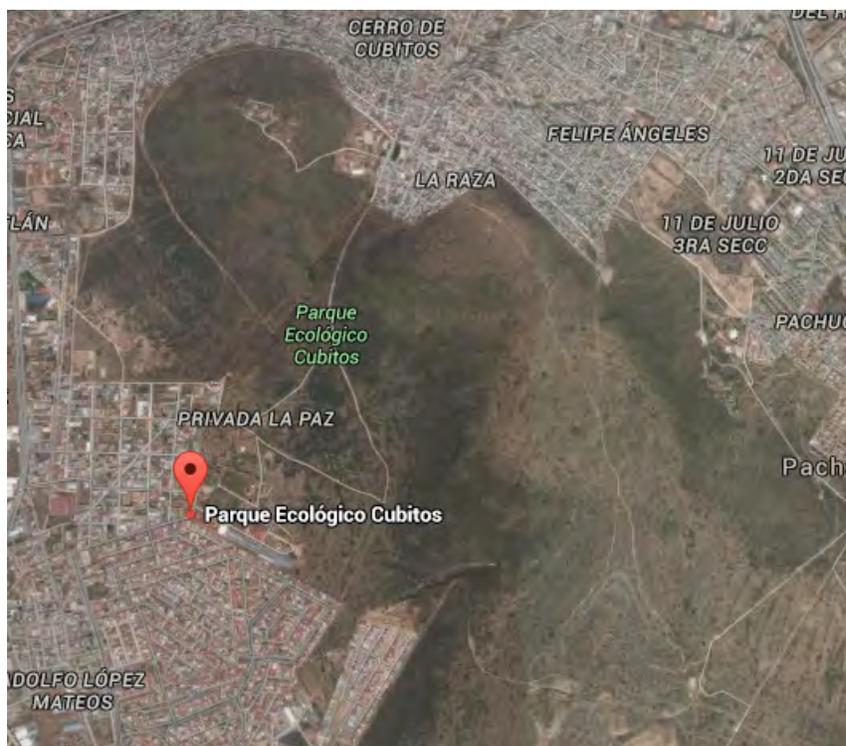


Figura 4. Mapa satelital del Parque Ecológico Cubitos, ubicado en el Estado de Hidalgo

6.2. Fauna

En el Parque se han encontrado 22 especies de aves, mariposas, camaleones, lagartijas, arácnidos, el grupo de los anfibios está representado por 2 especies, 2 géneros y 2 familias; los reptiles por 6 especies, 5 géneros y 4 familias; las aves por 23 especies, 22 géneros y 14 familias; y los mamíferos presentan 20 especies, 17 géneros y 7 familias. Así mismo se han registrados 36 especies, 30 géneros y 7 familias de lepidópteros; 4 especies, 3 géneros y 3 familias de arácnidos y 56 especies, 33 géneros y 6 familias de abejas (COEDE, 2004).

6.3. Vegetación

El principal tipo de vegetación en el parque es el matorral xerófilo que se encuentra subdividido en matorral microfilo, matorral rosetofofilo y matorral crasicauale. El parque cuenta además con otros tipos de vegetación como pastizal, un bosque de coníferas, un bosque de yucas y jardín botánico con cactáceas. Entre la vegetación correspondiente al matorral xerófilo abundan especies como: *Agave lechuguilla*, *Hechtia podantha*, *Coryphantha ssp.*, *Stenocactus ssp.*, *Senecios praeco*, *Yucca filifera*, *Opuntia streptacantha*, *Opuntia spinulifera*, *Opuntia robusta*, *Schinus molle*, entre otros (COEDE, 2004).

Clasificándose según la NOM-059-SEMARNAT-2010, 4 especies sujetas a protección especial, 2 especies en peligro de extinción y 7 especies amenazadas.

6.4. Geología y suelo

Las condiciones geológicas-estructurales de Cubitos están conformadas, principalmente por una estructura intrusiva de composición riolítica en forma de dique altamente silicificado (roca maciza) que se emplazó en una zona de falla preexistente en el paquete de rocas andesíticas. De acuerdo a la carta geológica (INEGI, 2017), el Parque presenta rocas ígneas y sedimentarias, estableciéndose tres tipos principales de rocas y sedimentos: derrames de lava riolítica, depósitos de flujos piroclásticos andesíticos y depósitos fluviales de régimen torrencial consistentes en una alternancia de horizontes muy laminados, cortados por superficies de erosión con niveles conglomeráticos. Normalmente estos depósitos rellenan las depresiones existentes en los distintos cuerpos de lava riolítica.

De acuerdo a la clasificación de los suelos de la carta edafológica elaborada por la Dirección General de Geografía (INEGI, 2017), ordenados con el sistema de clasificación de suelos son los denominados Vertisol Pélico y Feozem Háplico.

6.5. Hidrología

Hidrológicamente, el territorio del Parque se localiza en la Subcuenca del Río Avenidas, la cual pertenecen a la Región Hidrológica 26 Pánuco. La baja precipitación y el lento escurrimiento del agua no permiten la formación de cuerpos hídricos importantes. Los principales ríos de área y que drenan al seno de la Cuenca del Valle de México son el río de las Avenidas Calabazas. En el parque se encuentran pocos reservorios que contengan

agua durante todo el año, entre ellos destaca el Maguey y El Pirul, ubicados en la parte Suroeste, limitando la zona de Uso intensivo y Zona de Uso de Recuperación. También existen barrancas como: El Romerillo y La Liebre, las cuales reciben el agua que escurre de forma laminar de los cerros de Cubitos y El Zopilote (INEGI, 2004)

6.6. Clima

De acuerdo al sistema de clasificación de Koepen modificado por García (1998), la región de estudio comprendida entre los 2.245 a los 2.495 m de altitud, presenta el subtipo BS1kw, caracterizado por ser semiseco templado con verano cálido. El promedio de la temperatura es de 16.5 °C y la temperatura máxima extrema registrada en el mes de abril (27.95 °C) y la mínima extrema en febrero (1.01 °C). El clima seco de esta región se debe principalmente a que las corrientes de viento cargado de humedad provienen del Golfo de México chocan contra las montañas de la sierra de Pachuca, pasando al otro lado en forma de vientos secos, generando el clima semiárido que lo caracteriza. A este fenómeno se le denomina efecto de sombra de montaña o sombra orográfica (Medina, 1980). Durante el año los meses más lluviosos son junio con 61.38 mm y septiembre con 59.72 mm, en tanto en diciembre registra los valores mínimos. Durante el año las heladas se registran en enero con el mayor número seguido de diciembre y febrero.

6.7. Trabajo en campo

Se realizó un recorrido por el Parque Ecológico seleccionando visualmente el área con mayor erosión, lo que propició la pérdida de cubierta vegetal y se eligieran 3 zonas de estudio. (Figuras 5). Localizadas en Norte 20°0.57033' W 98°44.124', Norte 20°0.572' W 98°44.107' y Norte 20°5.894' W 98°44' respectivamente.

Se colecto suelo superficial (0-15 cm) de las concavidades que se realizaron en las diferentes zonas, este suelo se almaceno en costales y en el laboratorio se formará una muestra compuesta a la que se le realizarán los análisis físicos y químicos de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000. Se evaluó la variación en la concentración de nutrimentos en las diferentes áreas de trabajo antes y después de la aplicación de las técnicas de bioingeniería.



(a) Zona 1

(b) Zona 2



(c) Zona 3

Figura 5. Zonas de estudio.

6.7.1. Evaluación de la erosión

Se evaluó la erosión del suelo por el método de Reglas (modificado de clavos y rondanas). Se utilizaron reglas de fierro de 10 cm de largo, la cual se introdujeron en el suelo hasta la marca de los 3 cm. Se colocaron en distintos sitios, con tres repeticiones con y sin vegetación (Figura 6).



Figura 6. Evaluación de la erosión, por el método de reglas

6.7.2. Selección de ejemplares

Durante el recorrido se seleccionaron, 26 ejemplares de *Agave salmiana*; hijuelos de entre 10 y 25 cm; que se presentan en el área del Parque y que son nativas por lo que están adaptadas a estas condiciones y es más fácil su supervivencia; son resistentes a la sequía y a condiciones climáticas extremas, con reproducción vegetativa por lo que se recomiendan para emplearlas en la recuperación de la cubierta vegetal (Pérez & Rodríguez, 2010).

6.7.3. Evaluación del porcentaje de vegetación

Se hizo por el método de Línea (Canfield, 1941) de 15 metros. En la línea de muestreo, se procedió a contar todas las intercepciones o proyecciones de las plantas (ramas, tallos, hojas, flores) sobre la línea y se registró la información. Esto se hizo al inicio y final del proyecto con el objetivo de comparar el porcentaje de vegetación (Figura 7).

La línea de intercepción se basa en el principio de la reducción de un transecto a una línea. Este método se aplicó para estudiar la vegetación densa dominada por arbustos y para caracterizar la vegetación graminoide (Canfield, 1941). El método de líneas de intercepción produce datos para cálculos de cobertura y frecuencia de especies; es rápido, objetivo y relativamente preciso (Cuello, *et al.*, 1991)



Figura 7. Método de línea de Canfield.

6.7.4. Implementación de las técnicas de bioingeniería

Acolchado: Para su elaboración se removió un poco de suelo, se realizó una cavidad, se trasplantó un ejemplar, en agosto, y se cubrió con el yute, el cual se fijó al suelo con rocas (Figura 8).



(a) Ejemplar con acolchado

(b) Ejemplar sin acolchado

Figura 8. Tratamiento (a) y testigo (b).

Zanjas o canales: Son canales que por lo regular se construyen en la parte alta de las parcelas son perpendiculares al flujo de agua y viento; se colocó una capa de yute para percibir la caída de suelo dentro de la misma (Figura 9).



(a) Zanja



(b) Zanja

Figura 9. Zanjas en zona 1.

6.8. Diseño experimental

El diseño experimental consistió en aplicar las técnicas de bioingeniería en las diferentes zonas. Se colocó acolchados (yute) a las especies seleccionadas, estos serán nuestros tratamientos y los testigos son los que carecen del mismo, con 5 repeticiones de cada uno. Se construyó una zanja en cada zona de trabajo, de manera perpendicular a la pendiente por donde escurre el agua de lluvia, con una profundidad de 11, 12 y 12 respectivamente.

Mensualmente, se midieron las variables de crecimiento que son: Altura (del suelo hasta la hoja más alta del magüey), Diámetro 1 (Norte-Sur), Diámetro 2 (Oeste-Este) de cada planta durante 15 meses; con el objetivo de evaluar, cobertura y tasa relativa de crecimiento.

6.8.1. Cobertura

La cobertura se calculó midiendo el diámetro 1 y el diámetro 2 de tratamientos y testigos, se realizó un promedio de estos y se aplicó la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{D_1 + D_2}{4}\right)^2 * \pi$$

Donde:

D_1 = Diámetro 1

D_2 = Diámetro 2

Los diámetros permitirán calcular el área del círculo medio, que fue considerado como cobertura.

6.8.2. Tasa relativa de crecimiento

La tasa de crecimiento relativo (TCR), es una variable útil para evaluar el desempeño de una especie ante cualquier condición ambiental que pueda afectar su crecimiento (Valladares *et al.*, 2004). La tasa de crecimiento relativo (TCR) se calculó sacando un promedio general de crecimiento de los tratamientos y testigos; y posteriormente se aplicó la siguiente fórmula:

$$TCR = \frac{\ln(L_2) - \ln(L_1)}{t}$$

Donde:

L_2 = altura final

L_1 = altura inicial

t = tiempo en días

6.8.3. Trabajo en laboratorio

Se efectuó los análisis físicos y químicos al suelo: Densidad aparente, Capacidad de Campo, Textura, pH, % de Materia Orgánica, Conductividad Eléctrica, Carbonatos Totales, Con-

centración de Macronutrientes: Fosforo y Nitrógeno; Concentración de Micronutrientes: Hierro, Zinc, Mangeneso, Cobre; Capacidad de Intercambio Cationico: Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio (NOM-021-RECNAT-2000). Se evaluaron los cambios en los nutrimentos antes y después de aplicar las técnicas de bioingeniería.

7. Resultados y discusión

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza entre tratamientos y testigos; en la especie *Agave salmiana*; y entre las técnicas de bioingeniería que son: zanjas y acolchados. Se utilizo el programa StatGrafics para los siguientes parámetros:

- Altura
- Cobertura
- Tasa relativa de crecimiento

Se hizo un análisis exhaustivo sobre los cambios que sufrió el suelo en cuanto a los nutrimentos antes y después de la aplicación de las técnicas de bioingeniería. Se evaluó la erosión por medio del método de reglas y por medio de la evaluación de porcentaje de vegetación se determinó el aumento la cubierta vegetal.

7.1. Parámetros físicos

El suelo inicial, el de los testigos y tratamientos (Cuadro 1); presentaron los siguientes resultados:

Los tres tipos de suelo presentaron una clase textural franca (Cuadro 1); esta clase es la que posee las propiedades medias en cuanto a finura, retención hídrica, cohesión; asegura las mejoras cualidades para el desarrollo de las plantas por poseer un adecuado gradiente de partículas finas, que brindan superficie activa, almacenaje de nutrientes y agua; y una fracción gruesa que posibilita buena permeabilidad y por lo tanto aeración (Pelligrini, 2014). La composición del suelo franco puede variar ligeramente, se encontraron las proporciones de Arena 51.8 %, Limo 34 % y Arcilla 14.2 %. Los Agaves tienden a crecer más en suelos con alto porcentaje de arena porque el tamaño del poro es mayor en estos suelos y esto facilita la difusión de oxígeno a las raíces y tienden a crecer menos en suelos arcillosos. También el tamaño de las partículas del suelo juega un papel importante en relación de nutrientes con el agave porque afecta la disponibilidad de agua y el intercambio de elementos(Nobel,1988).

La capacidad de campo es mayor en el suelo de los tratamientos con respecto al suelo de los testigos y al suelo inicial; esto se debe a que el geotextil (yute) por su porosidad y estructura de fibras entrelazadas aleatoriamente, poseen una alta permeabilidad, permitiendo el paso del agua y reteniendo las partículas del suelo (AMANCO, 2012). Además, que la retención de humedad en el suelo es una de las características de la mejora del mismo (FAO, 1996).

La densidad aparente es ligeramente mayor en el suelo inicial ($1,01g/cm^3$) con respecto al suelo de los testigos ($0,98g/cm^3$) y tratamientos ($0,93g/cm^3$) (Cuadro 1); esto se debe a que el suelo inicial estaba sin vegetación y esto implica cierto grado de compactación en el suelo. Los cambios de Densidad Aparente son debido a cambios de textura, grado de compactación, estructura y porcentaje de materia orgánica. Al menos las propiedades mencionadas guardan una estrecha relación con el espacio poroso, de modo que a mayor espacio poroso menor compactación y menor Densidad Aparente; y por lo tanto mayor retención de humedad, mayor aireación y drenaje más rápido.

Cuadro 1. Parámetros físicos de las tres zonas de estudio.

Parámetro	Antes del experimento	Después del experimento	
	Suelo Inicial	Suelo de los testigos	Suelo de los tratamientos
Clase textural	Franco	Franco	Franco
Capacidad de campo (%)	20.2	23.5	25.9
Densidad aparente (g/cm^3)	1.01	0.98	0.93

7.2. Parámetros químicos

El suelo de las tres zonas de estudio de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 presento los siguientes resultados (Cuadro 2).

El pH del suelo inicial y del tratamiento es fuertemente alcalino; mientras que el suelo del testigo es medianamente alcalino (Cuadro 2). El pH es muy importante porque influye en la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Figura 10). Con valores de pH superiores a 8.5 (fuertemente alcalino) los suelos tienen un alto contenido en bases de cambio Ca^{++} , Mg^{++} también se dificulta la absorción de algunos nutrientes como B, Cu, Fe, P y Zn (Andrades & Martínez, 2014).

En cuanto a la conductividad eléctrica, el suelo inicial presento niveles más altos (0.95 ds/m) con respecto al suelo del testigo (0.68 - ds/m) y el suelo del tratamiento (0.65-ds/m)(Cuadro 2); todos los valores están dentro del rango de efectos despreciables de salinidad de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.

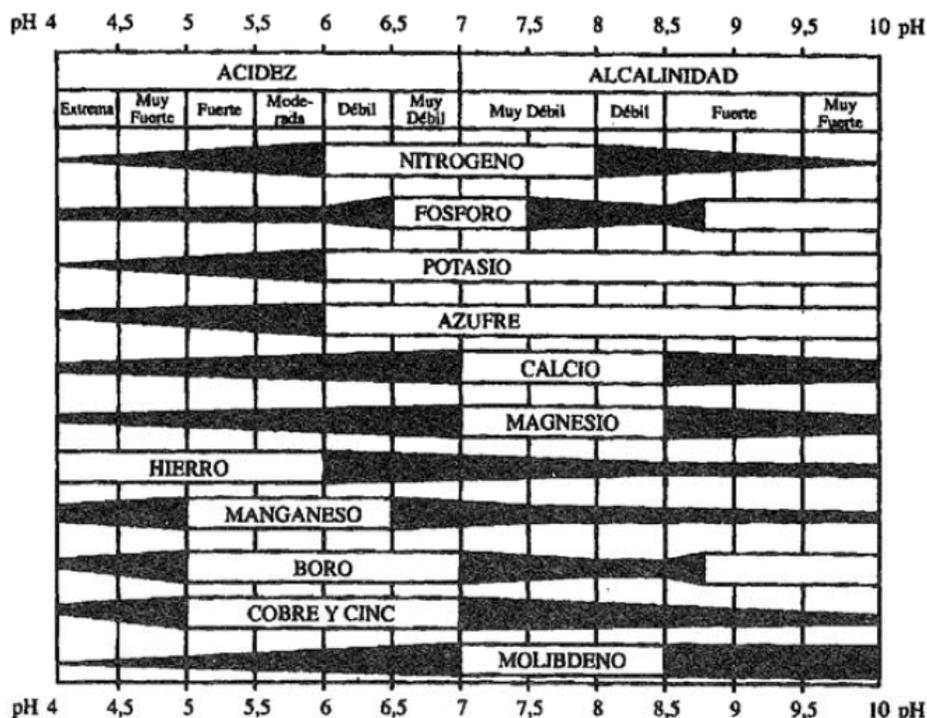


Figura 10. Relación entre pH y disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Los carbonatos totales de los tres tipos de suelo (Cuadro 2), según la NOM-021-RECNAT-2000 son de clase mediana, con lo cual la presencia de carbonatos tiene una acción positiva sobre la estructura del suelo (ya que el calcio es un catión floculante) y sobre la actividad microbiana (De los Ángeles, 2007).

La materia orgánica de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000; el suelo inicial y el suelo del tratamiento es muy bajo, se observa un porcentaje medio en el suelo del testigo (Cuadro 2), esto se debe a que el suelo de los tratamientos estaba cubierto por el geotextil (yute) el cual tiene como función la retención de partículas incluyendo la materia orgánica (Sarsby, 2007). El suelo de zonas áridas y semiáridas es típicamente bajo en materia orgánica por la escasa cubierta vegetal y limitada productividad. Sin embargo, se puede observar en el aumento de materia orgánica en el suelo de los testigos y tratamientos debido a que las plantas trasplantadas y plantas acompañantes que aparecieron durante el experimento tienen su importancia en la caída de sus hojas y renovación de sus raíces en el ciclo de nutrientes consiste en que retorna la materia orgánica y elementos minerales (Celaya & Castellanos, 2011).

El nitrógeno inorgánico en las tres muestras de suelo presenta niveles muy bajos de acuerdo NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 2). El escaso nitrógeno contenido en la materia orgánica de zonas áridas y semiáridas se transforma a compuestos inorgánicos vía los procesos de mineralización, que lo vuelven disponible para las plantas, por lo que se reconoce al nitrógeno como limitante para la productividad de las plantas en esos ecosistemas. La transformación de nitrógeno ocurre por la descomposición y mineralización llevada a cabo

por los microorganismos del suelo, sin embargo, en los ambientes áridos, no tienen siempre condiciones ideales para su actividad en cuanto a temperatura y humedad (Celaya & Castellanos, 2011). No obstante, se observa un aumento de 1.26 ppm entre el suelo inicial y tratamiento (Cuadro 2), esto es por la presencia de leguminosas en los tratamientos; y que, en diversas especies de esta familia entre otras, les permite aportar materia orgánica rica en nitrógeno al suelo de zonas áridas (Celaya & Castellanos, 2011).

En el fósforo los tres tipos de suelo presentan niveles altos (Cuadro 2), de acuerdo a lo documentado por Rivas, 2012; En los suelos semiáridos, los fosfatos son absorbidos sobre la superficie de los carbonatos de calcio, pues estos suelos de modo general presentan cantidades altas de P extractable por Olsen; López *et al.*, 2003 encontraron que la media general en cinco zonas de estudio de suelos áridos fue de 48.1 ppm lo cual indica que el sistema soporta altas densidades de plantas, principalmente leguminosas. En el parque cubitos hay presencia de hongos micorrizogenos arbusculares (HMA) en la rizosfera de *Bouteloua gracilis* (Figura 11 a), lo que propicia que exista una alta concentración de fósforo, también se considera que *Acacia schaffneri* y *Prosopis laevigata* son hospederos apropiados para los HMA provenientes de las rizosfera de *Bouteloua gracilis*. Estas leguminosas están presentes en las zonas de estudio (Rodríguez, 2010) (Figura 11 b y c). Se ha demostrado (Smith y Read 1997) que las plantas micorrizadas incrementan la captación de nutrimentos minerales, especialmente aquellos que son poco móviles en el suelo como el fósforo.

Cuadro 2. Parámetros químicos de las tres zonas de estudio.

Parámetro	Antes del experimento	Después del experimento	
	Suelo Inicial	Suelo de los testigos	Suelo de los tratamientos
pH (1:2)	8.6	8.23	8.65
C.E. (salinidad-ds/m)	0.95	0.68	0.65
Carbonatos totales (%)	6.99	3.80	4.79
M.O. (%)	21.3	45	31.6
P (ppm)	21.3	45	31.6
N – NO ₃ (ppm)	2.69	2.59	3.95



(a) *Bouteloua gracilis* en el Parque Cubitos



(b) *Bouteloua gracilis* en zonas de estudio



(c) *Prosopis laevigata* en Parque cubitos

Figura 11. Presencia de *Bouteloua* y *Prosopis*.

7.2.1. Micronutrientes

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000; el hierro en las tres muestras de suelo es marginal (Cuadro 3); conforme al estudio de Gaviola (1985) encontró que en los suelos áridos y semiáridos hay una alta correlación entre el Fe extractable y el pH del suelo, esto lo atribuye al aumento de solubilidad de los compuestos de Fe, al disminuir el pH edáfico. Sin embargo, el suelo inicial presenta menor Fe (2.56 ppm) con respecto al suelo del testigo (3.70 ppm) y al suelo del tratamiento (2.74 ppm) (Cuadro 3), esto se debe a la formación de complejos orgánicos solubles, principalmente quelatos, los que se originan a partir de los exudados de las raíces o como productos metabólicos de los microorganismos (Mengel & Kirkby, 1980). También Webley y Duff han demostrado que el ácido cetogluconico excretado por la rizósfera puede solubilizar Fe haciéndolo disponible para las plantas (Mengel & Kirkby, 1980).

El zinc en el suelo inicial presenta una concentración deficiente (Cuadro 3) de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000; según diferentes autores (Haque *et al.*, 1981; Aboulroos, 1980) la deficiencia de zinc es la más común entre los micronutrientes. La disponibilidad de Zn al igual que la de Fe, depende del contenido de agentes quelantes, por ejemplo, Hodgson *et al.*, 1966, encontró en suelo calcáreos que cerca del 75 % del Zn soluble está presente como complejos orgánicos, esta es la probable razón por la cual se relaciona la disponibilidad de Zn con la MO (Gaviola 1985); esto se observa, en que el suelo del testigo presenta una concentración de Zn adecuado y a su vez un mayor porcentaje de MO con respecto al suelo del tratamiento que presenta una concentración marginal y un menor porcentaje de MO (Cuadro 2).

El manganeso y el cobre en las tres muestras de suelo (Cuadro 3) es el adecuado de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000; resultado similar reporto Roca *et al.*, 2017; que en su zona de estudio no existen deficiencias de Mn ni de Cu, no obstante Roca *et al.*, 2017 también menciona que el Mn está claramente asociado a la distribución de la MO en el perfil del suelo y la profundidad; encontrándose los valores más altos siempre en la superficie de igual manera el Cu es el metal bioasimilable que se moviliza y desplaza a lo largo del perfil con mayor facilidad.

Cuadro 3. Micronutrientes en los tres suelos trabajados (ppm).

Parámetro	Antes del experimento	Después del experimento	
	Suelo Inicial	Suelo de los testigos	Suelo de los tratamientos
Fe	2.56	3.7	2.74
Zn	0.26	1.05	0.68
Mn	7.3	7.78	3.01
Cu	0.47	0.51	0.43

7.2.2. Capacidad de Intercambio Catiónico

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) que presenta el suelo inicial es baja de acuerdo a Garrido 1994 valores de CIC en un rango de 10 a 20 Cmol Kg⁻¹, corresponden a suelos pobres con un bajo nivel de fertilidad; mientras que el suelo del testigo y tratamiento presenta clases altas (Cuadro 4). En general la CIC está estrechamente relacionado con la fertilidad del suelo, según Garrido (1994), es la capacidad del suelo que permite retener los elementos necesarios para nutrir a las plantas, que de otra forma estarían en la solución del suelo para su lixiviado, cuanto mayor sea esta capacidad mayor será la fertilidad natural del suelo.

El calcio cambiante del suelo presenta una relación importante con el pH y con la disponibilidad de varios nutrientes (Thomson & Troeh, 2002); en el suelo inicial tiene una concentración media (6.75 CmolKg⁻¹) esto se debe a que a que la adsorción del Ca es más fuerte en arcillas con CIC elevada (Thomson & Troeh, 2002). Mientras que en

el suelo testigo (23.0 CmolKg⁻¹) y en el suelo tratamiento (23.7 CmolKg⁻¹) presentan concentraciones altas de Ca (Cuadro 4). El calcio, al igual que otros nutrientes se agota parcialmente en la zona que rodea a las raíces de crecimiento, este efecto parece resultar del agotamiento del agua del suelo en la misma zona. Realmente la concentración de calcio en el agua del suelo, persiste cerca de las raíces, aumenta ligeramente (Thomson & Troeh, 2002).

Se observa que en las tres muestras de suelo concentraciones altas (Cuadro 4) de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, la liberación de K⁺ fijado a la fase de intercambio es determinada por la humedad del suelo (López *et al.*, 2003).

El Mg indirectamente influencia la dispersión-floculación de partículas de suelo a través del intercambio catiónico (López, 2002); en este caso presenta una clase media en el suelo inicial mientras que en los suelos testigos y tratamientos es de clase alta, de acuerdo con lo reportado por Condori, 2015 encontró valores similares de Mg (3.46 Cmol Kg⁻¹) en las muestras de suelo de Quetena, San Luis Potosí; este valor es considerado como alto según Rioja, 2002.

Cuadro 4. CIC en los tres suelos trabajados (Cmol Kg⁻¹).

Parámetro	Antes del experimento	Después del experimento	
	Suelo Inicial	Suelo de los testigos	Suelo de los tratamientos
CIC	9.95	31.9	33.6
Ca	6.75	23.0	23.7
Mg	1.92	5.43	4.94
K	1.06	2.73	31.42

7.3. Crecimiento de plantas

7.3.1. Altura

En los primeros 6 meses (agosto 2015 a enero 2016), los tratamientos de las 3 zonas tuvieron un crecimiento menor con respecto a los testigos de: 2 cm en la zona 1, 5 cm en la zona 2 y 2 cm en la zona 3. En las tres zonas esta diferencia se va reduciendo hasta que en la zona 1 (agosto 2016) y zona 2 (julio 2016) el tratamiento tiene una altura igual a la del testigo (Figura 12) y en la zona 3 (septiembre) el tratamiento llega a tener un crecimiento mayor de 0.6 cm que el testigo. En la Figura 12 se observa que los testigos y tratamientos reducen su altura en la época seca (diciembre, enero, febrero y marzo). Esto es debido a que a estación de lluvias ocurre de mayo a octubre, mientras que, de noviembre a abril es la estación seca (Chimal, *et al.*, 2015). Y de acuerdo a lo estudiado por Ramirez- Tobiaz *et al.*, 2014, quienes encontraron que la especie *Agave salmiana* con riego restringido, inhibe significativamente su crecimiento.

y febrero (Figura 18). Así mismo en la época lluviosa (mayo, junio y julio) aumentan su cobertura tratamientos y testigos, hasta el mes de octubre en la zona 1 el tratamiento alcanza una mayor cobertura que los testigos (Figura 13) contrario a lo que sucede en la zona 2 y 3 que los testigos vuelven a tener una mayor cobertura respecto al tratamiento (Figura 13).

En el análisis de varianza muestra que hay diferencias significativas en las coberturas entre tratamientos y testigos ($p=0.05$). (Anexo 1).

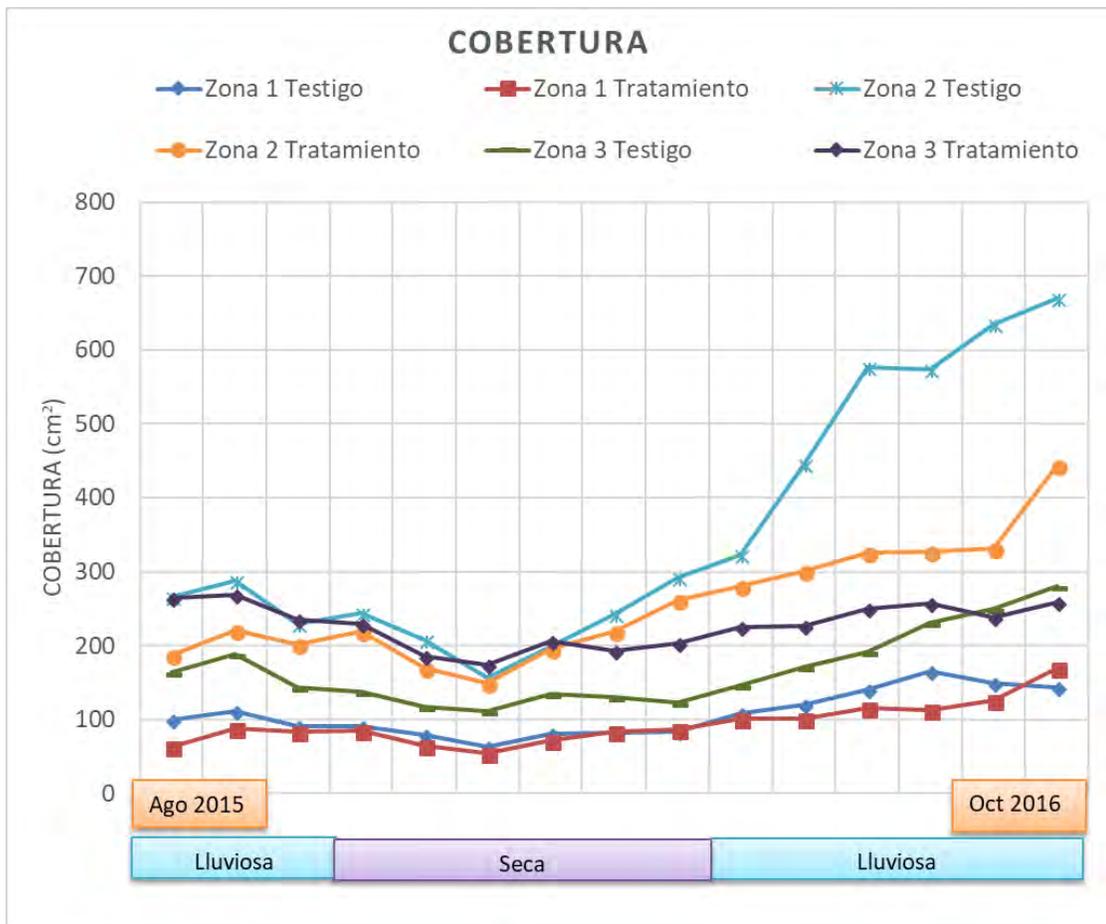


Figura 13. Coberturas de testigos y tratamientos de *Agave Salmiana* de las tres zonas de trabajo

7.3.3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)

En la Figura 14 se muestra que la Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) es mayor en los tratamientos respecto a los testigos, en las tres zonas de trabajo. Con base al análisis de varianza existen diferencias significativas ($p=0.05$) (Anexo 1). En comparación con el trabajo de Cervantes, 2014 quien también obtuvo diferencias significativas en la TRC entre tratamientos y testigos de la especie *Agave salmiana*, pero sus tratamientos son especies de agave micorrizadas que crecieron un poco más. Su resultado está dado debido a que, en etapas iniciales de desarrollo de plántulas, la simbiosis hongo- hospedero atraviesa por una etapa parasítica, caracterizada por la existencia de plántula-microorganismo.

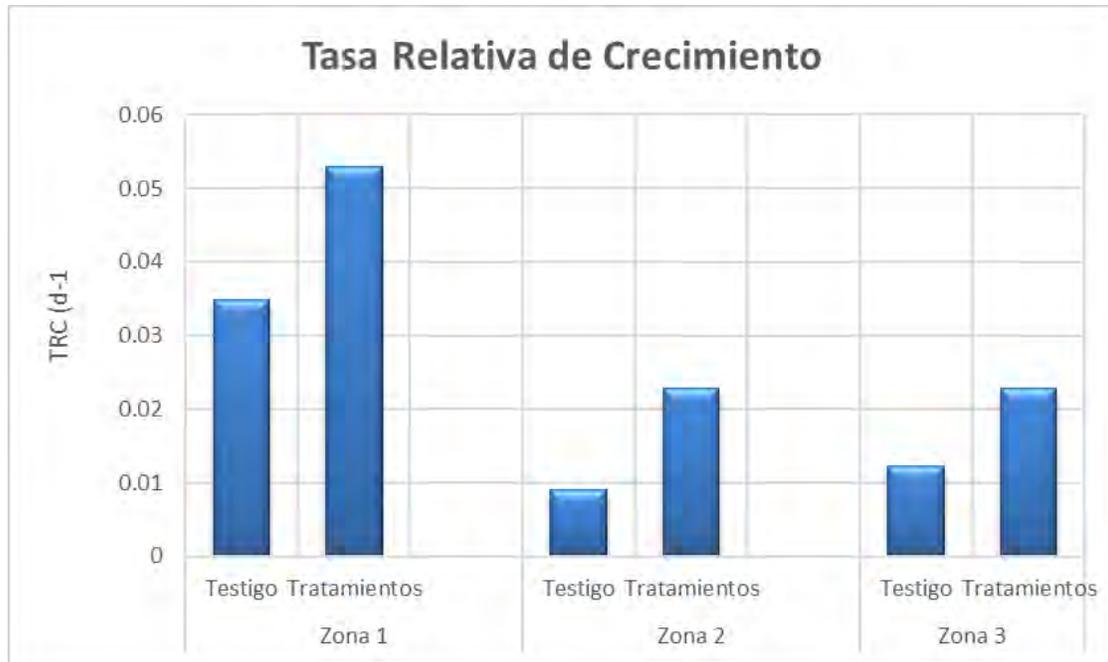


Figura 14. Tasa Relativa de Crecimiento (TCR) de *Agave salmiana*

7.4. Técnicas de bioingeniería

7.4.1. Zanjas

En las zanjas elaboradas, se observa la acumulación de partículas de suelo; paulatinamente hasta la desaparición de las mismas (Figuras 16, 17 y 18). Sin embargo, en la zanja 1 se reduce su profundidad más rápido (1.5 cm por mes) respecto a las zanjas 2 y 3 (Figura 15). Esto se debe a la posición de la zanja 1 (Figura 19a), ya que se construyó en la parte alta de la cárcava y la escorrentía superficial en las laderas se acrecienta por la inclinación del terreno; con pendientes largas y pronunciadas la velocidad y energía son mayores; para frenar dicha corriente es necesario establecer cortes en la pendiente con la construcción de terrazas de absorción que son efectivas en el control de la erosión (Benza, 1982). También el arrastre de partículas por agua y viento es mayor; Según Millar, Turk, Foth, (1961), citado por Suárez de Castro (1982), mientras más pronunciada es la pendiente, más rápidamente fluye el agua sobre la superficie del suelo, la capacidad de arrastre del agua aumenta muy rápidamente cuando el flujo aumenta su velocidad; la cantidad de suelo transportada por el agua en plena corriente es también mucho mayor, que el agua que transporta en movimiento lento. La zanja 2, estaba ligeramente menos perpendicular al flujo de agua con lo que su profundidad fue menor con respecto a la zanja 1 (Figura 19b).

La zanja 3 tarda más en desaparecer fue hasta septiembre 2016, cuando se cubrió por completo, esta se encontraba en la parte baja de la cárcava después de las especies (Figura 15) con lo cual la cubierta vegetal ayudó a proteger al suelo del impacto erosivo de las gotas de lluvia y, además, actúa como una protección mecánica contra el esfuerzo cortante del escurrimiento (Ruiz, *et al.*, 2001).

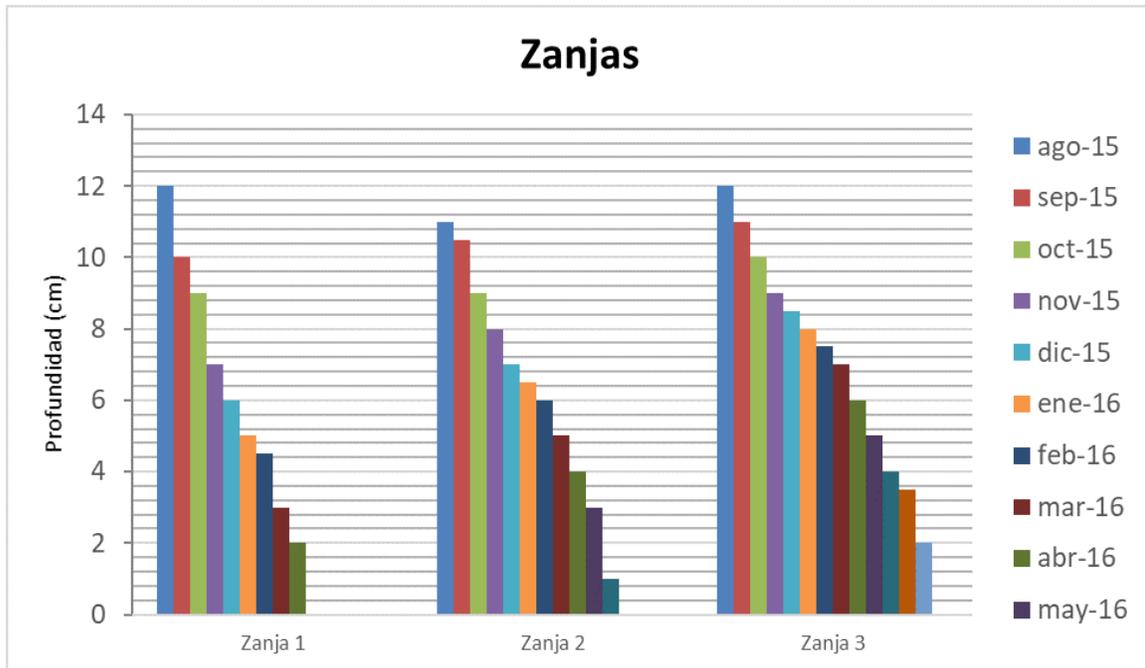


Figura 15. Acumulación de materiales disgregados (clastos) en las zanjas de las tres zonas de estudio

Agave salmiana como barreras vivas son obstáculos densos al nivel de la superficie, con el propósito de modificar y reducir la velocidad y el esfuerzo cortante del escurrimiento en una ladera (Ruiz, *et al.*, 2001)



(a) Al inicio del experimento



(b) Al final del experimento

Figura 16. Zanja 1.



(c) Al inicio del experimento



(d) Al final del experimento

Figura 17. Zanja 2.



(e) Al inicio del experimento

(f) Al final del experimento

Figura 18. Zanja 3 .



(g) Posición de zanjas 1 y 2



(h) Posición de zanja 3

Figura 19. Posición de zanjas.

7.5. Evaluación de erosión

Con el método modificado con reglas, se determinó que la pérdida de suelo fue de 4 cm de suelo año en la parte alta de la zona 1 y en suelo desnudo; Worthen y Aldrich (1967), indican que las laderas con pendientes fuertes producen de un modo general más escorrentía y más erosión, por el hecho de que el agua que corre a lo largo de la pendiente de la superficie no puede infiltrarse, por lo tanto, cuanto mayor sea la pendiente más rápido será el escurrimiento y el efecto erosivo del agua será proporcional a su velocidad. Pizarro, *et al.*, (2004) reportaron en su método de evaluación de la erosión hídrica superficial en los suelos desnudos en Chile que uno de los factores que influyen significativamente en el mayor o menor grado de la erosión hídrica corresponde con la pendiente del terreno y la ausencia de vegetación.

La pérdida de suelo en la parte baja fue de 2 cm suelo año en suelo con vegetación debido la acción de la cubierta vegetal contra el fenómeno de la escorrentía y erosión que son: protección directa contra el impacto de las gotas de lluvia y aumento de la fricción superficial y dispersión lateral de la escorrentía que reduce su volumen y velocidad (Ayres, 1960).

7.6. Evaluación de porcentaje de vegetación

En las tres zonas se determinó el porcentaje de vegetación (Cuadro 5). La zona 3 presento un porcentaje menor (3.45 %) en comparación con la zona 1 (30.90 %) y 2 (14.81 %) al inicio del experimento (Cuadro 5); al término del mismo en las tres zonas el porcentaje de vegetación aumenta en promedio un 63.89 %; es se debe principalmente al aumento de especies pioneras que son de particular importancia para la restauración ecológica, especialmente las leguminosas, por su gran capacidad de fijar nitrógeno (Linding *et al.*, 2002). Generalmente en el proceso de revegetación en sitios severamente degradados se ha concentrado el crecimiento de herbáceas que ha demostrado ser la más eficiente en la prevención de la erosión en las zonas de ladera (Federacafe, 1982) (Figuras 20, 21 y 22).

Cuadro 5. Porcentaje de la cubierta vegetal, al inicio y final del experimento en las tres zonas de estudio.

% de la cubierta vegetal	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
	30.9 %	84.98 %	14.81 %	78.23 %	3.45 %	77.63 %



(a) Al inicio del experimento



(b) Al final del experimento

Figura 20. Zona 1.



(c) Al inicio del experimento



(d) Al final del experimento

Figura 21. Zona 2.

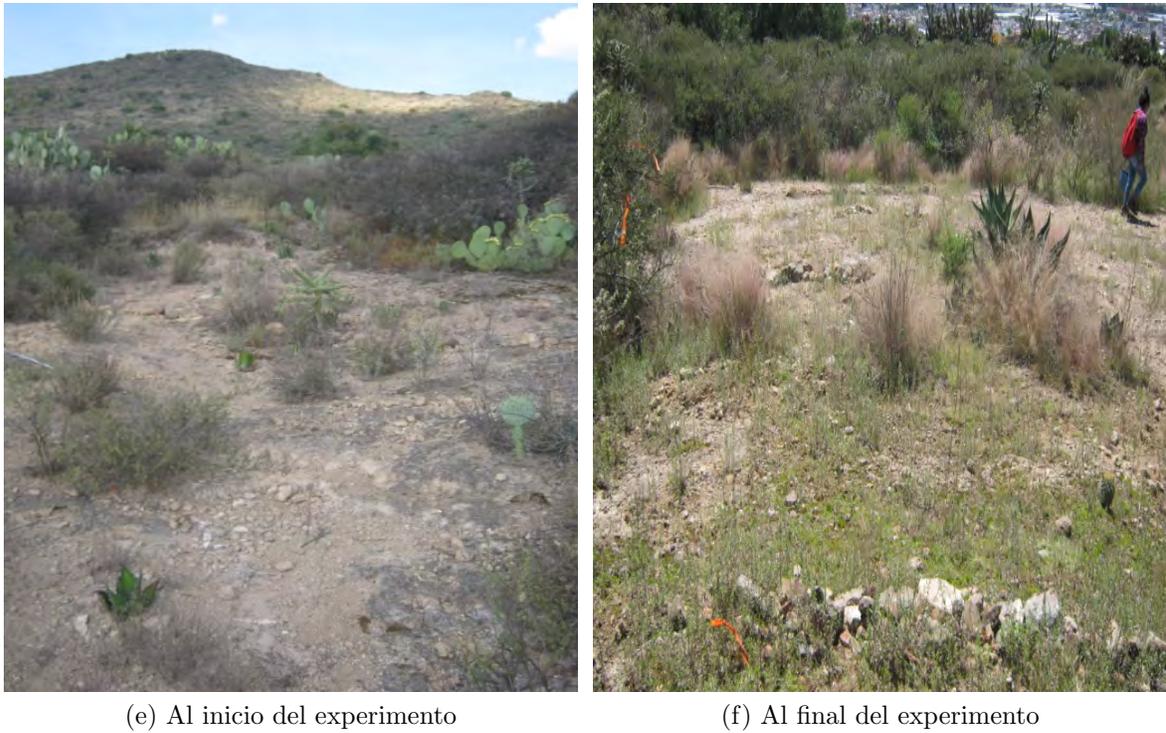


Figura 22. Zona 3 .

También se puede atribuir al proceso de nodrizaje de la especie *Agave salmiana* (Figura 23). Algunos de los factores que causan las interacciones entre nodrizas y protegidas en los ambientes áridos y semiáridos son el aumento de la humedad, el incremento de la fertilidad, la cobertura de la nodriza como trampa para atrapar semillas y como protección contra depredadores y como soporte para el crecimiento. La sombra de la nodriza reduce la luz por lo que limita la fotosíntesis, pero disminuye el riesgo de fotoinhibición por exceso de luz solar a que están expuestas las plántulas en las áreas abiertas (Romo, 2011).

Figura 23. *Agave salmiana*, como nodriza de una herbácea y una cactácea.

8. Conclusiones

- En la Tasa Relativa de Crecimiento y Cobertura se encontró diferencias significativas; en cuanto a que el Agave salmiana tratamiento alcanzo un mayor crecimiento (2cm) con respecto a los testigos en las tres zonas de estudio y solamente en la Zona uno los tratamientos tienen una cobertura mayor (25.8 cm^2) que los testigos.
- Las zanjas retuvieron en promedio 1cm de partículas de suelo por mes, sin embargo, la zanja 1 desaparece más rápido por su posición en la caracava.
- Aumento el porcentaje de vegetación en un 68.8 % en promedio de las tres zonas de estudio por nodrizaje y aumento de especies pioneras; propiciando la recuperación de la cubierta vegetal.
- Se determino la perdida de suelo de 4 cm suelo año en la parte alta con suelo desnudo y de 2 cm suelo año en suelo con vegetación por la técnica de corcholatas y reglas modificado.
- En el análisis físico hay una disminución de conductividad eléctrica y carbonatos totales en el suelo de testigos y tratamientos con respecto en el suelo inicial.
- La materia orgánica aumento en el suelo del testigo con respecto al suelo inicial
- Hubo un aumento de Py Zn en las muestras de suelo del testigo y del tratamiento.
- Aumento la Capacidad de Intercambio Catiónico en las muestras de suelo del testigo y del tratamiento en especial el Ca con ($16.95 \text{ Cmol Kg}^{-1}$) con respecto al suelo inicial.
- La importancia de la cubierta vegetal en las zonas áridas y semiáridas radica en el aumento de la fertilidad del suelo a través de las técnicas de bioingeniería que logran mantener la supervivencia de la vegetación nativa en sus primeras fases.

9. Bibliografía

- Aboulroos, S. (1980). *Zinc adsorption by soils and the uptake by plants*. Beitrâge zur Tropischen Landwirtschaft und Veterinâr medizin, 18(4), pp.375-376.
- Aguirre, J., Charcas, J. & Flores, J. (2001). *El Maguey Mezcalero Potosino*. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Amanco, (2012). *Manual de Geotextiles*. Departamento de Ingeniería de Diseño e Instalación de Geosintéticos, Departamento de Mexichem. Colombia. Recuperado de: <http://www.mexichem.com.mx/Sol-Integrales/geosinteticos/pdfs/Infraestructura/Catalogo20Funciones20Aplicaciones20Geotextiles.pdf>.
- Andrades, M. & Martinez, M. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. 3ra ed. Logroño, España: Universidad de la Rioja.
- Ayres, Q. (1960). *La erosión del suelo y su control*. 1st ed. Barcelona, España: Omega.
- Belmonte, F. & Romero, A. (2013). *La cubierta vegetal en las regiones áridas y semiáridas: consecuencias de la intercepción de la lluvia en la protección del suelo y los recursos hídricos*. En: F. Belmonte and A. Romero, ed., *Intercepción de la lluvia por la vegetación en España*, 1ra ed. Murcia, España: Instituto Euromediterráneo del Agua.
- Benza, G. (1988). *Cinco años de conservación de suelos con los campesinos de los andes peruanos*. Lima Perú: Programa Nacional de Manejo de Cuencas y Conservación.
- Canfield, R. (1941). *Application of the line interception method in sampling range vegetation*. Journal of Forestry, 39(1), pp.389-390. Recuperado de: <https://jornada.nmsu.edu/files/bil>
- Carlson, P. & Añazco, M. (1990). *Establecimiento y manejo de prácticas agroforestales en la sierra ecuatoriana*. 1ra ed. Quito, Ecuador: Red Agroforestal Ecuatoriana.
- Celaya, H. & Castellanos, A. (2011). *Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas*. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, 29(3), pp.344,346,349. Recuperado de: <http://www.agricultura.uson.mx/publicaciones/indexadas/Terra%20Hernan%20Mineralizacion%20Ensayo.pdf>

- Cervantes, C. (2017). *Establecimiento de plantas de Prosopis laevigata y Agave salmiana inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares en condiciones de invernadero*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_cervantes_gonzalez_cynthia.pdf
- Chimal, E., Araiza, M. & Román, V. (2015). *El efecto del fuego en la riqueza de especies de hongos micorrizógenos arbusculares asociada a plantas de matorral xerófilo en el Parque Ecológico Çubitos.*” Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 18(2), p.108. Recuperado de: <http://tip.zaragoza.unam.mx/index.php/tip/article/download/98/98>.
- Consejo Estatal de Ecología. (2004). *Programa de manejo del Área Natural Protegida Estatal Parque Ecológico Cubitos*. La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo. Recuperado de: <http://s-medioambiente.hidalgo.gob.mx/?p=1626>
- Condori, G. (2015). *Evaluación de indicadores de calidad de suelo con cobertura vegetal nativa tipo t'olar de cinco comunidades del altiplano xerofítico*. Revista Científica de Investigación INFO-INIAF, 5(1), p.79. Recuperado de: <http://ojs.aylluyachay.org/index.php/RI/download/80/77/>
- Cuello, N., Killeen, C., & Antezana, V. (1991). Línea de intercepción, una metodología apropiada para el estudio de las sabanas tropicales. En: Miranda, C., Restrepo, D., & Castellano E. ed., *Memoria del Curso de Vegetación y Ecología Tropical con un énfasis en los métodos*. (1980): Ecology and Field Biology. New York: Smith. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/255600333_Manual_de_Metodos_Basicos_de_Muestreo_y_Analisis_en_Ecologia_Vegetal
- De los Ángeles, M. (2007). *Diseño de Parque Municipal en Santa Cruz de los Cábanos*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Castilla-La Mancha. España.
- Díaz, C. (2011). *Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización*. Ingeniería e Investigación, 31(13), pp.82-84.
- Donahue, R., Miller, R. & Shickluna, J. (1990). *Soils, An introduction and plan growth*. 6ta ed. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (1996). *Manejo del suelo producción y uso de composte en ambientes tropicales*. Boletín de suelos de la FAO. Roma.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1982). *Cuarenta años de investigación en Cenicafé* 1ra ed, Colombia: Cenicafé.

- Francke, S., Vargas, R., Makita, M. & Tokugawa, K. (1998). *Manual de Control de Erosión. Ministerio de Agricultura*. 1ra ed. Santiago, Chile: Corporación Nacional Forestal. Recuperado de: http://eias.utralca.cl/otras_publicaciones.html
- García, A. (2007). *Los agaves de México*. Revista Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 87(1), pp.14-23.
- Garcia, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. 6ta ed. Ciudad de México. Recuperado de: http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf
- García, J. (1967). *Erosión eólica*. 1ra ed. Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, pp.22-23.
- Garcia, A. & Galvan, R. (1994). *Riquezas de las familias Agaváceae y Nolinaceae en México*. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 56, p.7
- Garcia, J., Méndez, J. & Talavera, D. (2010). *El género Agave ssp en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica*. Revista Salud Pública y Nutrición, 5(Edición especial), pp.112-12.
- Gaviola, S. (1985). *Micronutrientes en algunos suelos de la región árida y semiárida mendocina*. Micronutrientes en algunos suelos de la región árida y semiárida mendocina. Ciencia del suelo, 3(2), pp.25-28.
- Garrido, S. (1994). *Interpretación de análisis de suelos*. 1ra ed. Madrid, España: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Recuperado de: http://www.mapama.gob.es/ministerio_hojas/hd_1993_05.pdf
- Granados, D. (1999). *Los agaves en México*. Texcoco, México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Haque, I., Odell, T. & Walker, M. (1981). *Micronutrient cation status of some upland of Sierra Leone*. The journal of de faculty of food and agriculture, 58(1), p.89. Recuperado de: <https://journals.sta.uwi.edu/ta/index.asp?action=fullTextPermaLink0&articleId=2831&galleyId=2673>.
- Hernández, V. (2005). *Respuesta de plántulas de Agave durangensis a tres tipos de enviverado*. Informe Técnico Final. Secretaria de Investigación Y Posgrado. Instituto Politécnico Nacional. Pp. 4-6
- Hodgson, J., Linsay, W. & Trierweiler, J. (1966). *Micronutrient cation complexing in soils solution:II complexing of zinc and copper in displaced solution from calcareous soils*. Soil Science Society of America, Proceedings, 30, p.237.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2004). Citado el 10 de febrero del 2017. On line: <http://www.inegi.gob.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018). Mapa Digital de México. Recuperado de : <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIwLjA0Mjk5LGxvbjotOTguOTI5MjEsejo2&layers=c405,c408,c413>
- Lal, R. (1998). Soil quality and sustainability. Methods for Assessment of soil degradation. En: R. Lal, W. Blum, C. Valentine and B. Stewart, ed., *Methods of Assessment of Soil Degradation Advances in Soil Science*. Boca Raton, Florida: CRC Press
- Lal, R. & Stewart, B. (1990). *Soil degradation: a global threat*. Soil degradation. Advances in soil science. 11th ed. New York, USA.
- León, P. (2001). *Estudio y control de la erosión hídrica*. 1ra ed. Medellín, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia
- Lindig, R., Sáenz, N., Aureoles, E., Galindo, M., Gomez, R., Martinez, M. & Medina, E. (2002). *Efecto de la profundidad de los depósitos de arena volcánica en el establecimiento de la vegetación nativa en las inmediaciones del Volcán Parícutín, México*. Ciencia Nicolaita, 31, p.47.
- Lopez, R. (2002). *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. 2da ed. Mérida, Venezuela.
- López, R., Villavicencio, F., Real, M., Ramírez, J. & Murillo, B. (2003). *Macronutrientes en suelos de desierto con potencial agrícola*. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, 21(3), pp.336-338.
- Maestre, F. (2002). *La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de factores bióticos y abióticos*. Tesis de Doctorado. Universidad de Alicante, España.
- Medina, J. (1980). *Análisis fitogeográfico de la vertiente sur de la Sierra de Pachuca*. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. México
- Mengel, K. & Kirkby, E. (1980). *Principles of plant nutrition*. 5ta ed. Worblaugen, Suiza: Springer Netherlands.
- Nobel, P. (1988). *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- 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. Diario Oficial de la Federación del 30 de diciembre del 2010

- Norma Oficial Mexicana. (NOM-021-RECNAT-2000). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre del 2002.
- Oldeman, L. & Lynden Van G. (1998). Methods for Assessment of soil degradation. Advances in soil science. En R. Lal, W. Blum, C. Valentine & B. Stewart, ed., *Methods of Assessment of Soil Degradation Advances in Soil Science*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Olvera M. (2000). *Modelos tipo y beneficios de las líneas vegetativas intermedias en suelos de ladera*. Simposio 4. Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. 27-29 de octubre del 2000, Chihuahua, México.
- Otero, R., Valdés, C., Igarza, A. & Rodríguez, N. (2000). *Efecto de la norma e intervalo de riego en el crecimiento y desarrollo del henequén (Agave fourcroydes, Lem.) en fase de vivero*. Temas. P.46-47.
- Pavón, C. (2003). *Instalación de riego por goteo en una parcela de maíz*. Proyecto fin de Carrera. Universidad de Castilla - La Mancha. La Mancha, España.
- Pelligrini, A. (2014). Textura y color del suelo. En Lanfranco, J., Pelligrini, A. Cattani, M. *Contenidos de Edafología: Genesis, Evolución y propiedades físico químicas del suelo*. 1ra Edición. Ciudad de la Plata, Argentina Universidad Nacional de la Plata.
- Pérez, J. & Rodríguez, R. (2010). *Caracterización del hábitat y de atributo ecológicos de especies herbáceas y leñosas nativas de material xerófilo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pizarro, R., Flores, J., Sangues, C., Martinez, E. & García, J. (2004). *Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos*. Talca, Chile: María Cecilia Tapia Castro, p.146. Recuperado de: http://eias.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/disenio_de_obras_para_la_conservacion_de_aguas_y_suelos.pdf
- Ramírez-Tobías, H., Peña-Valdivia, C. & Aguirre, R. (2014). *Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de Agave a la restricción de humedad*. Botanical Sciences, 92 (1), p.133-135.
- Rivas, M. (2012). *Translocación de fósforo y nitrógeno en dos leguminosas inoculadas con hongos micorrizogenos arbusculares (HMA), bajo condiciones de invernadero*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Roca, N., Pozos, M. & Bech, J. (2017). *Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc, en suelos del no argentino*. Suelo, 25(1), pp.36-37.

- Rodríguez, R. (2010). *Caracterización del hábitat y de atributos ecológicos de especies herbáceas y leñosas nativas de matorral xerófilo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Romo, R. (2011). *Exploración de Mecanismos de Interacciones Bióticas en Comunidades Vegetales en un Gradiente Ambiental del Altiplano Mexicano*. Tesis de Doctorado. Instituto De Investigación De Zonas Desérticas. Universidad Autónoma De San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Rondón, J. & Vidal, R. (2005). *Establecimiento de la Cubierta Vegetal en Áreas Degradadas. (Principios y Métodos)*. Revista Latino-Americana de Enfermagem, 38(1), pp.67-38.
- Rzedowski, J. (2006). *La vegetación de México*. 1ra ed. Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, p. 504. Recuperado de:
<http://www.conabio.gob.mx/institucion/centrodoc/doctos/librosdigitales/VegetaciondeMexico/Portadaypaglegales.pdf>
- Sangalli, P. (2005). *¿Que es la ingeniería biológica o bioingeniería?*. BricoJardineria & Paisajismo, 30, pp.13-16. Recuperado de:
<http://www.horticom.com/pd/imagenes/61/269/61269.pdf>
- Sarsby, R. (2007). *Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay*. Geotextiles and Geomembranes, 25(4-5), pp. 302-310.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2006). *Gestión ambiental en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 1ra Edición. Ciudad de México, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. Compendio de Estadísticas Ambientales. 1ra ed. Ciudad de México, México, pp.122-128. Recuperado de: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe/00_intros/pdf.html
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Suelos, bases para su manejo y conservación*. 1ra Edición. Ciudad de México, México, pp. 15-16.
- Smith, S. & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. London, UK.: Academic Press.
- Smith, R. & Smith, T. (2002). *Ecology and Field Biology*. 6th ed. Virginy, USA: Benjamin-Cummings Publishing Company.
- Soil Conservation Society of America (1982). *Resource conservation glossary*. 3rd ed. Australia: Ankeny, Iowa.

- Soil Science Society of America. Glossary of Soil Science Terms. Recuperado de: www.soils.org. Fecha de consulta: julio de 2012.
- Steiner, K. (1996). *Causes of soil Degradation and Development Approaches to Sustainable Soil Management*. 1st ed. Filderstadt, Germany: Magraf Verlag. Recuperado de: [https://wocatpedia.net/images/c/c1/GIZ,_Steiner,_K.G._\(1999_Causes_of_soil_degradation_and_](https://wocatpedia.net/images/c/c1/GIZ,_Steiner,_K.G._(1999_Causes_of_soil_degradation_and_)
- Suarez de Castro, F. (1982). *Conservación de suelos*. 2da ed. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Thomson, M. & Troeh, F. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. Barcelona, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- Valenzuela, M. & Sangalli, P. (2008). *Bioingeniería o Ingeniería Biológica*. 1ra ed. San Sebastián, España: Asociación Española de Ingeniería del Paisaje. Recuperado de: <http://www.caminospaisvasco.com/Actividades/bioingenieria/introduccionbioingenieria>
- Valladares F. (ed.). (2018). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. 1ra ed. Barcelona, España. Recuperado de: https://issuu.com/ferherlo/docs/ecologia_bosque_mediterraneo_1
- Villarreal, Q. & Encina, D. (2005). *Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes*, México. Acta Botánica Mexicana 70, p.38
- Worthen & Aldrich. (1967). *Suelos agrícolas, su conservación y fertilización*. Traducido por José Luíz de La Loma. 2da ed. UTEHA. México.

10. Anexos

- ANOVA Simple-Col_2 por Col_1
Variable dependiente: Col_2(ALTURA) Factor: Col_1(MUESTRAS)

Cuadro 6. Tabla ANOVA para Col_2 por Col_1

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	331.907	5	66.3815	2.01	0.1185
Intra grupos	692.833	21	32.9921		
Total (Corr.)	1024.74				

La tabla ANOVA descompone la varianza de Col_2 en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 2.01204, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual a 0.05 , **no existe una diferencia estadísticamente significativa** entre la media de Col_2 entre un nivel de Col_1 y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

- ANOVA Simple-Col_3 por Col_1
Variable dependiente: Col_3(COBERTURA) Factor: Col_1(MUESTRAS)

Cuadro 7. Tabla ANOVA para Col_3 por Col_1

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	794979	5	158996	3.78	0.0135
Intra grupos	883931	21	42092.0		
Total (Corr.)	1.67891E6				

La tabla ANOVA descompone la varianza de Col_3 en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este

caso es igual a 3.77734, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual a 0.05 , **no existe una diferencia estadísticamente significativa** entre la media de Col.3 entre un nivel de Col.1 y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

- ANOVA Simple-Col.3 por Col.1

Variable dependiente: Col.3(COBERTURA) Factor: Col.1(MUESTRAS)

Cuadro 8. Tabla ANOVA para Col.4 por Col.1

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3533.24	5	706.648	3.78	0.0135
Intra grupos	3928.58	21	187.075		
Total (Corr.)	7461.82				

La tabla ANOVA descompone la varianza de Col.4 en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 3.77734, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual a 0.05 , **no existe una diferencia estadísticamente significativa** entre la media de Col.4 entre un nivel de Col.1 y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.