



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS BIOLÓGICAS**

ÁREA ECOLOGÍA Y CONSERVACIÓN

FACULTAD DE BIOLOGÍA

**RIEGO Y DEFOLIACIÓN SOBRE ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS Y
LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN EL TRÓPICO SECO DE
MICHOACÁN**

BIOL. FLOR PALOMA GARCÍA VARGAS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Director de tesis: Dr. Leonel López Toledo

Cotutor: Dr. Carlos Ernesto González Esquivel

Morelia, Michoacán a 24 de Agosto del 2017



**FACULTAD
DE
BIOLOGÍA**

AGRADECIMIENTOS

Al programa institucional de Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo por el impulso a continuar con mi preparación académica, el espacio y los recursos para poder cumplir con esta meta.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, registro de becario 661339) por la beca de manutención durante el transcurso de la maestría y por la oportunidad de realizar una estancia en el extranjero mediante la beca mixta en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Costa Rica. Así como al PAPIIT (DGAPA-UNAM) por financiar el proyecto TB200213 “Establecimiento, adaptación y calidad nutritiva de leñosas forrajeras en sistemas silvopastoriles del trópico seco”.

Al Dr. Leonel López Toledo, por su gran apoyo y asesoría para la elaboración de este proyecto y toda la maestría, así como al Dr. Carlos González Esquivel por el apoyo en campo y su apoyo y guía durante la tesis. Igualmente a la Dra. Mayra Gavito Pardo por sus consejos, guía y correcciones desde el inicio del proyecto.

Agradezco los comentarios y revisiones que ayudaron a dar forma y enriquecer este trabajo por parte de los doctores Horacio Paz Hernández y Daniel Val Arreola.

A Ana Lidia Sandoval, por la asesoría, ayuda y amistad durante las pruebas de laboratorio, así como a Maribel Nava Mendoza por su ayuda con el análisis de N y P en el autoanalizador.

A Netzahualcóyotl Barrón Valle por su amistad y apoyo incondicional en campo y laboratorio, de igual forma a Abraham López Salgado, Eloy Pat López y Michelle Chávez Gutiérrez. Por su gran ayuda en el laboratorio, no lo hubiera logrado sin ustedes.

A Francisco Mora Ardila, por todo el tiempo que invirtió en ayudarme a comprender y realizar los análisis estadísticos.

Al Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de Apatzingán, en especial al Ingeniero Héctor Rómulo Rico por su ayuda al facilitar el uso del terreno y a Don Nacho por el cuidado a la parcela.

A Brenda Pineda, Donovan Covarrubias, Gonzalo Álvarez, Guillermo Cruz por su apoyo en las mediciones y toma de datos.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Una vez más agradecer a Ana Lidia Sandoval y Netzahualcóyotl Barrón Valle, por su ayuda incondicional en campo, sus consejos y los buenos momentos que pasamos. Hicieron que el trabajo fuera más placentero. Agradezco su apoyo y sobre todo su amistad.

A Salvador Villalobos y su grupo de compañeros de la Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez” de la UMSNH por su ayuda en la parcela y los buenos momentos de compañía.

A Perla García Ramírez, por su amistad incondicional, el apoyo moral, la ayuda en campo y por siempre motivarme a seguir adelante y hacer las cosas lo mejor posible.

A mi Familia, mi mamá y mis hermanos por motivarme a continuar con mi preparación.

DEDICATORIA

A mis padres:

María Esther Vargas Álvarez

&

Manuel García Cuevas

A mi mamá por su apoyo incondicional, su fuerza y su amor. Gracias por ayudarme en todo, por tus consejos y tu amor. ¡Eres la mejor!

A mi papá, siempre me apoyaste en mis estudios y respetaste mis decisiones, te extraño demasiado. Gracias por tus enseñanzas y tu amor.

A mi pareja: Abraham, sabes que este logro también es tuyo, por la ayuda en campo, el apoyo en el laboratorio y el respaldo emocional que siempre me has dado. Gracias mi vida.

INDICE

| | |
|---|----|
| RIEGO Y DEFOLIACIÓN SOBRE ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS Y PROPIEDADES DEL SUELO EN EL TRÓPICO SECO DE MICHOACÁN | 1 |
| Resumen general | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL | 4 |
| LA GANADERÍA EN MÉXICO | 5 |
| SISTEMAS SILVOPASTORILES..... | 7 |
| ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS..... | 9 |
| ESTRATEGIAS Y ADAPTACIONES A LA SEQUÍA Y LA DEFOLIACIÓN | 10 |
| SEQUIA | 11 |
| DEFOLIACIÓN | 12 |
| ARBOLES FORRAJEROS Y SUS BENEFICIOS EN EL SUELO | 13 |
| JUSTIFICACIÓN DE ESTA TESIS | 15 |
| CONTENIDO DE LA TESIS | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 17 |
| OBJETIVO GENERAL | 17 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 17 |
| 3. MÉTODOS GENERALES | 18 |
| SITIO DE ESTUDIO | 18 |
| CLIMA | 19 |
| VEGETACIÓN | 19 |
| ESPECIES DE ESTUDIO..... | 19 |
| DISEÑO EXPERIMENTAL | 29 |
| 4. RESPUESTAS AL RIEGO Y LA DEFOLIACIÓN DE ESPECIES LEÑOSAS DEL TRÓPICO SECO. | 33 |
| Respuestas al riego y la defoliación de especies leñosas del trópico seco. | 34 |
| Resumen:..... | 35 |
| Abstract: | 36 |
| INTRODUCCIÓN..... | 37 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 40 |
| SITIO DE ESTUDIO | 40 |
| ESPECIES DE ESTUDIO | 40 |
| <i>DISEÑO EXPERIMENTAL</i> | 40 |
| ANÁLISIS ESTADÍSTICO | 42 |

| | |
|---|-----|
| RESULTADOS | 43 |
| PERIODO DE ESTABLECIMIENTO..... | 44 |
| EFFECTOS ACUMULATIVOS..... | 46 |
| DISCUSIÓN | 52 |
| RIEGO Y DEFOLIACIÓN | 53 |
| CONCLUSIONES..... | 57 |
| 5. EFECTO DE LAS ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO | 59 |
| INTRODUCCIÓN..... | 60 |
| OBJETIVOS..... | 63 |
| GENERAL | 63 |
| ESPECÍFICO | 63 |
| HIPÓTESIS..... | 63 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 64 |
| ÁREA DE ESTUDIO | 64 |
| DISEÑO EXPERIMENTAL | 64 |
| ESPECIES DE ESTUDIO..... | 66 |
| RIEGO..... | 66 |
| DEFOLIACIÓN..... | 67 |
| DETERMINACIONES DE LABORATORIO | 67 |
| PROPIEDADES FÍSICAS | 67 |
| PROPIEDADES QUÍMICAS | 68 |
| PROPIEDADES BIOLÓGICAS..... | 69 |
| ANÁLISIS ESTADÍSTICO | 69 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 70 |
| PROPIEDADES FÍSICAS | 72 |
| PROPIEDADES QUÍMICAS | 73 |
| PROPIEDADES BIOLÓGICAS..... | 75 |
| ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES | 78 |
| CONCLUSIONES..... | 82 |
| CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES..... | 84 |
| LITERATURA CITADA | 86 |
| ANEXO..... | 108 |

RIEGO Y DEFOLIACIÓN SOBRE ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS Y PROPIEDADES DEL SUELO EN EL TRÓPICO SECO DE MICHOACÁN



Resumen general

En la actualidad, los ecosistemas naturales están siendo modificados rápidamente, el Bosque Tropical Seco ha sido seriamente afectado durante las últimas décadas; esto se debe principalmente a su conversión en campos de cultivo o pastizales utilizados para la ganadería. La ganadería es una actividad comercial de gran importancia en estos sitios que presentan largos periodos de sequía, en donde el modelo que se ha utilizado y que se sigue utilizando es la ganadería extensiva, caracterizada por la presencia de grandes áreas convertidas a pastizales en donde el ganado pasta libremente. Dicho modelo se caracteriza porque los árboles y arbustos nativos suelen ser removidos en su totalidad por considerarse negativos al proveer sombra y limitar el crecimiento de los pastos. Por lo tanto, los sistemas ganaderos manejados bajo este modelo suelen presentar un solo estrato vegetativo, baja diversidad biológica y poca eficiencia de uso del suelo y del agua.

Por otro lado, estudios indican que la población humana presenta un crecimiento exponencial, aumentando la necesidad de cubrir necesidades básicas como la alimentación, con lo cual se pone aún más presión sobre los ecosistemas empleados para la ganadería. En este contexto, surge la necesidad de buscar e implementar alternativas que detengan o disminuyan el deterioro ambiental ocasionado por la ganadería extensiva, sin perder el desarrollo económico; esto lleva a la aplicación de nuevos sistemas para la producción animal.

Actualmente los sistemas Silvopastoriles presentan una serie de ventajas para la ganadería, como son: el incrementar la biodiversidad, disminuir la erosión, tener una alta eficiencia del uso de agua, presentar altos contenidos proteicos, aumentar la producción de carne y leche, por mencionar algunos. Por lo tanto, las prácticas silvopastoriles podrían ayudar al desarrollo de una producción pecuaria sustentable y promover un equilibrio ecológico y ambiental.

En Agosto de 2014 se estableció el experimento, durante los primeros seis meses las plantas recibieron riego parejo para promover su crecimiento. A partir de Febrero de 2015 se comenzó la aplicación de los tratamientos de riego y se realizó la primera defoliación, la segunda defoliación fue en Agosto 2015, y la última defoliación en Noviembre 2015.

Se utilizó un diseño en parcelas divididas en bloques al azar, antes de iniciar el experimento se preparó el terreno y se cercó todo el perímetro y se instaló un sistema de riego por goteo. Cada unidad experimental constó de una especie, un nivel de riego y un nivel de defoliación. Teniendo un total de 30 tratamientos, cuatro repeticiones y 120 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo constituida de tres surcos separados por 1.8 m, siendo solo útil para el experimento el surco central. Se utilizó una densidad de siembra de 40,000 plantas/hectárea y la distancia entre cada planta fue de 15 cm, evaluando así cerca de 240 plantas por especie. Las especies evaluadas fueron *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera*.

Palabras clave: Riego, Defoliación, Especies leñosas forrajeras, Trópico seco Michoacano, Sistemas silvopastoriles.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El Bosque Tropical Seco (BTS) es uno de los ecosistemas más extensos e importantes en México y Centro América (Murphy et al., 1995). Se encuentra distribuido a lo largo de la costa del Pacífico, desde el estado de Sonora hasta Chiapas. Para la vertiente del Golfo lo podemos encontrar desde el estado de Tamaulipas hasta la Península de Yucatán. En Centro América llega a distribuirse hasta Costa Rica (Pennington, 2000; Trejo-Vázquez, 1999). En las últimas décadas, el BTS se ha visto seriamente afectado, principalmente por su conversión a campos de cultivo o pastizales utilizados para la ganadería extensiva, quedando pequeños remanentes de la vegetación original (Maass et al., 2002). En México tan solo el 27% de la vegetación original se encuentra intacta, mientras que el otro 73% ha sufrido algún tipo de disturbio, conversión o alteración. Esto afecta la estructura, composición y funcionalidad del ecosistema (Trejo y Dirzo, 2000).

En América Latina, y principalmente en zonas con periodos largos de sequía, la ganadería es una de las principales fuentes de ingreso, ya que la agricultura no suele ser redituable (Villa-Méndez et al., 2008). El modelo que comúnmente se trabaja es la ganadería extensiva, ocupando y afectando grandes extensiones de tierra (Jiménez, 2000). La ganadería extensiva se caracteriza por convertir grandes extensiones de bosque en pastizales. Suelen removerse todos los árboles y/o arbustos de la vegetación original, debido a que se consideran negativos, pues la sombra limita el crecimiento de los pastos. Esto resulta en un sistema ganadero con un solo estrato vegetativo y poca eficiencia de uso del suelo.

Aunado a esto, se sabe que la población humana ha incrementado exponencialmente en las últimas décadas, aumentando así su demanda de alimento, en gran parte de origen animal (Murgueitio, 2009). Debido a lo anterior, surge la necesidad de buscar e implementar nuevas alternativas que detengan o disminuyan el deterioro ambiental ocasionado por la ganadería extensiva, sin perder el desarrollo económico tan importante en estas zonas.

En este contexto se han identificado alternativas para la producción ganadera, en las cuales se implementa la introducción de especies leñosas, ya sean árboles o arbustos con propiedades forrajeras. Estas prácticas, llamadas silvopastoriles, pueden ayudar al desarrollo de una producción pecuaria sustentable y promover un equilibrio ecológico y ambiental (Murgueitio y Ibrahim, 2008; Murgueitio et al., 2006; Pinto, 2002; Schroth y Fonseca, 2004).

LA GANADERÍA EN MÉXICO

La ganadería tradicionalmente se ha dividido en dos grandes tipos, extensiva e intensiva. Se conoce como ganadería intensiva a la crianza de ganado dentro de establos, donde se mantienen condiciones de luz y temperatura de forma artificial. Los animales reciben alimentos procesados con el fin de aumentar la producción en el menor tiempo posible mediante la implementación de tecnologías. Este tipo de ganadería se utiliza en algunos estados del Norte de México, pero no es la más utilizada en el país debido a sus altos costos de mantenimiento.

Por otro lado, la ganadería extensiva se realiza en espacios abiertos; suelen ser grandes terrenos en donde el ganado pasta, en comparación con la

ganadería intensiva, esta práctica necesita poca inversión y mano de obra, por lo que es menos eficiente en cuanto a la relación ganado-superficie y no proporciona productos tan homogéneos.

La ganadería extensiva es el modelo más utilizado en la producción agropecuaria en México y Latino América. En este modelo los animales pastorean libremente en grandes extensiones de bosques que son convertidas en pastizales; debido al gran tamaño de estos sitios es complicado tener supervisión y control total del ganado por lo que esta actividad suele ser irregular. El ganado se encarga de buscar y seleccionar su alimento, ya que su disponibilidad está sometida a ciclos naturales o estaciones de lluvias, por lo tanto la eficiencia de producción por unidad de superficie suele ser baja. Además, se sabe que algunos de los pastos utilizados presentan baja calidad nutritiva, es decir presentan altos contenidos de fibra y bajos contenidos proteicos (Barahona et al., 2005; Wilkins et al., 2000).

Así mismo, está documentado que los sistemas ganaderos extensivos afectan los ecosistemas naturales. Esto mediante fenómenos como la pérdida de la biodiversidad al desmontar la vegetación original. Las prácticas ganaderas en suelos inapropiados provocan erosión y compactación del suelo, así como cambio en los balances hídricos por efecto de lo anterior. Además, cuando el ganado tiene alimentación de mala calidad genera mayores emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de una mala digestión, entre otros problemas (FAO, 2008; Montagnini, 2011; Pinto, 2002).

SISTEMAS SILVOPASTORILES

Los sistemas Silvopastoriles (SSP) son un tipo de Agroforestería, es decir, son sistemas productivos que integran árboles, cultivos, ganado y forraje o pastos en un mismo espacio y tiempo. Esto con el fin de optimizar el uso del suelo y obtener una producción de forma sustentable, obteniendo beneficios económicos, sociales y ambientales (Murgueitio et al., 2011). Existen distintos tipos de Agroforestería según la interacción de los componentes.

Los sistemas silvopastoriles tienen como fin la producción pecuaria mediante la interacción de árboles o arbustos con propiedades forrajeras y los componentes tradicionales como los pastos, algunas herbáceas y los animales, todo bajo un sistema de manejo integral (Pezo e Ibrahim, 1998).

En los sistemas silvopastoriles el objetivo principal es la producción pecuaria involucrando especies leñosas forrajeras, que interactúan con un componente no leñoso y el componente animal (Mahecha, 2016; Murgueitio e Ibrahim, 2001). Las especies aprovechadas para las regiones tropicales secas, suelen ser nativas y/o estar bien adaptadas a condiciones adversas en cuanto a disponibilidad de agua, estas son de fácil manejo, rápido crecimiento y además presentan una gran capacidad de rebrote (Pizarro, 2002).

A comparación de los pastos, las leñosas forrajeras tienen menores requerimientos de agua y mayores contenidos proteicos. Al generar productos de alta calidad, se puede acceder a nuevos mercados como los orgánicos y ecológicos (Murgueitio y Solorio, 2008). Se sabe bien que pastos asociados a leguminosas u otras especies leñosas forrajeras incrementan la producción animal. Por ejemplo, se ha encontrado que en este tipo de sistemas

silvopastoriles, el ganado puede tener mayor ganancia en peso y producción de leche, que en sistemas de producción extensiva de monocultivo de pastos (Palma, 2006).

Otra ventaja de estos sistemas, es que en la época de lluvias, el ganado aprovecha el follaje, mientras que en las secas se alimentan de los frutos o de banco de proteína (Olivares-Pérez et al., 2011). Cabe mencionar que la gran mayoría de las especies leñosas forrajeras que se conocen o se han utilizado son leguminosas, muy importantes por el papel que tienen al incorporar nitrógeno al suelo (Gutiérrez et al., 2009).

Actualmente los sistemas silvopastoriles han tomado gran importancia debido a que proveen servicios ecosistémicos, por lo que se consideran una importante alternativa a la ganadería intensiva (Quiñones et al., 2006). Al ser una combinación de actividades forestales y ganaderas, existen interacciones tanto ecológicas como económicas dentro de los diferentes componentes. El follaje es utilizado en época de lluvias, mientras que el fruto lo es en época de secas, o puede ser cosechado y guardado como banco de proteínas evitando así el gasto en insumos como pasturas. En cuanto a las interacciones ecológicas, la diversificación de especies y estratos proporciona una mayor diversidad de especies bajo estos sistemas incrementando interacciones como la colonización micorrízicas y la polinización (Pinto-Ruiz et al., 2005; Young et al., 1987).

Algunos de los beneficios conocidos que ofrecen estos sistemas son: el mejoramiento de la calidad del suelo y del ciclo de nutrientes, retención de humedad, control de erosión, reducción del pisoteo y compactación del suelo. Así mismo se obtienen subproductos como leña, postes, alimento, medicina,

miel, entre otros. Finalmente, hay una mayor producción de forraje con altos contenidos proteicos (González-Gómez et al., 2006; Murgueitio e Ibrahim, 2008; Villa-Méndez et al., 2008).

ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS

Existe una gran cantidad de especies leñosas con potencial forrajero. El conocimiento de tales proviene principalmente de los productores al observar cuales árboles o arbustos come el ganado en la época de estiaje. En la actualidad se reconocen aproximadamente 200 especies leñosas forrajeras, la mayoría de ellas originarias del trópico seco y subhúmedo (Benavides, 1998; Pezo e Ibrahim, 1998; Roothaert, 2000). La familia *Leguminosae* es la más destacada debido a su excelente producción de biomasa en la temporada de sequía, así como su alto contenido proteico. La integración de árboles y arbustos forrajeros en la alimentación del ganado es una alternativa para mejorar la productividad y dar sustentabilidad a la ganadería (Palma, 2006).

Para que un árbol o arbusto se considere una especie forrajera debe cumplir con ciertas características. En primer lugar, que su contenido nutrimental sea el adecuado para el ganado y que sus compuestos secundarios no afecten su consumo. También debe de mantener niveles adecuados de biomasa, tolerar bien la poda y/o el ramoneo y resistir periodos largos de sequía (Benavides, 1993; Camero, 1992; Enríquez et al., 1999; Solano, 1994).

La gran mayoría de los estudios en sistemas silvopastoriles se han realizado con la leguminosa *Leucaena leucocephala* (Anguiano et al., 2012; Pérez-Guerrero, 1979). Sin embargo, existen muchas otras especies que

pueden ser buenas especies forrajeras, de las cuales no se ha explorado su potencial, sobre todo en los trópicos en donde se cuenta con una gran diversidad de plantas leñosas (Jiménez, 2000; Murgueitio et al., 2011).

Así, Pinto et al, 2004. Demostraron que especies arbóreas como *G. sepium*, *G. ulmifolia*, *L. leucocephala* y *P. dulce* son utilizadas en el valle central de Chiapas y contienen composiciones químicas adecuadas para el consumo en el ganado, por lo que es importante integrar su producción en prácticas silvopastoriles. Incluso se han evaluado algunas no leguminosas como *Azadirachta indica*, *Cnidoscolus aconitifolius*, *Ficus carica*, *Moringa oleifera*, *Morus alba* y *Trichanthera gigantea*. Encontrando altos contenidos de proteína y bajas concentraciones de metabolitos secundarios , por lo que se consideran una buena alternativa en la producción animal (García et al., 2006).

ESTRATEGIAS Y ADAPTACIONES A LA SEQUÍA Y LA DEFOLIACIÓN

Las especies leñosas utilizadas en los SSP en los trópicos secos, deben presentar ciertas adaptaciones a las condiciones adversas que se existen en dichos sitios. La sequía es el principal factor limitante debido a la marcada estacionalidad. La defoliación o el ramoneo al que se encuentran sometidas dichas especies generan un factor más de estrés. La capacidad de rebrote es una característica única de cada especie, depende en gran parte de la cantidad de meristemas, la vitalidad de la planta, la capacidad de crecimiento y la rapidez con que se recuperan los tejidos foliares (Briske y Richards., 1996; González-Gómez et al., 2006; Rusch y Skarpe., 2016).

En sentido se considera que una especie vegetal se encuentra bajo estrés conforme se aleja de las condiciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Es difícil establecer los límites ambientales favorables o desfavorables para cada especie en particular, pues cada una presenta adaptaciones que le permiten contrarrestar los efectos de dicho estrés.

SEQUIA

La resistencia de las plantas a la sequía se define como “el grado al cual una planta puede tolerar el déficit de lluvia”. En los bosques tropicales secos las plantas presentan adaptaciones evolutivas que les permiten sobrevivir largos periodos de sequía. Whittaker (1979) menciona algunos mecanismos por los cuales las plantas pueden soportar estos periodos de poca o nula absorción de agua.

- Sistemas radicales anchos y profundos.
- Tejidos almacenadores de agua.
- Cubiertas protectoras, pelos o cubiertas cerosas.
- Reducción de la superficie foliar o caducifoleidad.
- Tallos fotosintetizadores.
- Tolerancia de los tejidos a una reducida cantidad de agua, aun en condiciones de sequedad del aire.
- Altas concentraciones osmóticas que les permiten extraer la humedad de suelos muy secos.
- Crecimiento adaptado a las estaciones en que el agua está disponible.

Las especies que habitan en zonas tropicales secas, pueden presentar a la vez varias de las adaptaciones mencionadas anteriormente y así poder sobrellevar las condiciones ambientales.

DEFOLIACIÓN

Por otro lado, las plantas que son utilizadas como forraje están sometidas constantemente al consumo de sus tejidos por parte de animales herbívoros. La herbivoría es una interacción que puede influir en el crecimiento e incluso en la sobrevivencia de las plantas, dependiendo de la intensidad y la frecuencia con que se realice (Fulkerson y Donaghy, 2001). Esta interacción ha inducido adaptaciones tanto morfológicas, fisiológicas y fenológicas sobre las especies vegetales tratando de escapar o disminuir el consumo animal.

Esta relación entre plantas y animales se ha forjado durante millones de años de historia evolutiva. Las plantas han adquirido sistemas de defensa con el fin de evitar la depredación o, al menos, reducir sus consecuencias. El herbivorismo causado por mamíferos ha jugado un importante papel en la evolución de las plantas hacia formas de crecimiento resistentes, especialmente en los ecosistemas pastorales (Briske y Richards., 1996). Algunas plantas presentan una mayor tolerancia a la defoliación, principalmente por la disponibilidad de yemas axilares y meristemas que les permiten un crecimiento rápido para restaurar los tejidos perdidos por el consumo herbívoro. Estos mecanismos están muy extendidos en las gramíneas y también en algunas leguminosas. En conjunto, constituyen las plantas más abundantes en muchas comunidades de pastos (Hodgson e Illius., 1996).

Así mismo, se han identificado diversos mecanismos fisiológicos y morfológicos capaces de incrementar el crecimiento tras la defoliación. Estos incluyen compensación en la fotosíntesis, reparto de recursos, absorción de

nutrientes o la capacidad de rebrote. Los mecanismos compensatorios minimizan el daño causado por la defoliación (Anten y Ackerly, 2001).

Los mecanismos compensatorios en algunos casos pueden actuar de forma directamente proporcional a la intensidad y frecuencia de la defoliación, impidiendo que el crecimiento de la planta quede suprimido. En contadas ocasiones incrementan el crecimiento total de la planta, más allá del conseguido por las que no han sido defoliadas (Almario et al., 2013; Maass et al., 2002; McNaughton, 1983).

Es importante mencionar que estos mecanismos no siempre están relacionados de forma directa con la tolerancia de una planta al pastoreo. Por lo tanto especies con una tasa similar de fotosíntesis pueden presentar distinta tolerancia al herbivorismo (Briske y Richards., 1996; Nowak y Caldwell, 1984).

El grado de resistencia que pueda alcanzar una planta a la defoliación, está determinado principalmente por la cantidad y/o calidad de atributos que le confieran resistencia(Almario et al., 2013a; Simms y Fritz, 1992).

ARBOLES FORRAJEROS Y SUS BENEFICIOS EN EL SUELO

Es sabido que la actividad ganadera es la principal causante del cambio de uso de suelo, deterioro de las condiciones ambientales y la degradación de suelos (Lok et al., 2006; Murgueitio et al., 2006). Velázquez et al. (2002) estimaron que el BTS pierde aproximadamente el 9% de su superficie al año para ser transformado a potrero y un 7% para cultivos, así mismo Trejo y Dirzo (2002) estimaron una tasa de deforestación anual del 1.4%, para su conversión a zonas agropecuarias. Los impactos negativos de la ganadería extensiva sobre

las propiedades del suelo, incluyen erosión, pérdida de biodiversidad, pérdida de materia orgánica, compactación, entre otros, provocando el posterior abandono de tierras (Murguía-Flores, 2012; Rendón-Carmona et al., 2013).

Un método muy utilizado en estas zonas es el llamado roza, tumba y quema, al limpiar grandes extensiones de tierra para uso agropecuario. Los efectos de este métodos son, un aumento del pH en el suelo, cambios en los grupos microbianos, pérdida del carbono orgánico, así como pérdida de nitrógeno y fosforo (García-Oliva et al., 2011; Maass et al., 2002).

En respuesta a esto, se ha propuesto que los sistemas silvopastoriles y en general la asociación de árboles y arbustos forrajeros dentro de la producción pecuaria, ayuden a la mitigación e incluso la restauración de las propiedades del suelo (Crespo, 2008). La asociación de árboles y pastos ha demostrado tener grandes ventajas y efectos positivos en contraste a los monocultivos con pastos. Los árboles tienen la habilidad de aprovechar los nutrientes de capas más profundas del suelo y mediante el proceso de reciclaje de nutrientes hacen que estos sean disponibles para los pastos (Crespo, 2008; Jaramillo y Quintero, 2006).

Diversos estudios demuestran los efectos benéficos propiciados por esta interacción, principalmente en aumentos en materia orgánica, N, C, P, K, Ca, Mg y pH reportados por distintos autores, en donde sistemas silvopastoriles mejoran notablemente, con respecto a los monocultivos de gramíneas (Crespo, 2008).

Esto puede explicarse debido al aumento en el reciclaje de nutrientes propiciado por los distintos estratos vegetativos, la fijación de N, el microclima,

la incorporación de hojarasca y la actividad de la macro y meso fauna (Iriondo et al., 1998; Nodari et al., 2001; Ovalle y Avedaño., 1984)

JUSTIFICACIÓN DE ESTA TESIS

A pesar de los grandes beneficios que ofrecen los SSP, no deben considerarse sustitutos de la conservación de bosques naturales. La incorporación de árboles en los sistemas productivos, como los potreros, es sólo una herramienta complementaria para la protección y conexión de los bosques todavía existentes. Así mismo, es importante diversificar estos sistemas, ya que al contar con una mayor cantidad de especies interactuando se contribuye a un sistema que presente un buen funcionamiento ecológico (Almario et al., 2013; FAO, 2008; Sánchez et al., 2013).

Esta tesis abordó la problemática anteriormente planteada, específicamente aplicada al trópico seco Michoacano, que es una zona del estado con gran producción pecuaria y presenta condiciones climáticas adversas para la siembra de pastizales. Por ello, se estudió el efecto de la sequía y la defoliación en diferentes especies leñosas, dicha información podría ser útil al proponer diseños de sistemas silvopastoriles. Así mismo, se exploran los cambios en las propiedades del suelo tras el establecimiento de árboles forrajeros, esto para evaluar el efecto del riego, la defoliación y las especies sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Lo cual generara información útil para el manejo adecuado de SSP en esta zona.

CONTENIDO DE LA TESIS

Esta tesis contiene un capítulo introductorio, donde se presenta una introducción general sobre el tema de estudio y la problemática planteada. Posteriormente en el primer artículo, se explora el establecimiento de las especies leñosas forrajeras seleccionadas y su respuesta en variables de crecimiento y producción de biomasa, bajo los tratamientos: Riego (R) y Defoliación (D). En el segundo artículo se comparan los efectos de la introducción de las especies leñosas sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, en función de los tratamientos ya mencionados y las especies seleccionadas. Finalmente se hace una conclusión general y se dan algunas recomendaciones para el establecimiento y uso de leñosas forrajeras en el trópico seco Michoacano, según la experiencia obtenida.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Esta tesis es parte de un proyecto general que busca contribuir a la búsqueda de sistemas silvopastoriles sustentables en los trópicos secos, específicamente, este estudio pretende generar información básica para identificar especies leñosas forrajeras útiles para el establecimiento de sistemas silvopastoriles en el trópico seco michoacano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el potencial forrajero de cuatro especies de plantas leñosas forrajeras en tratamientos de riego y defoliación.
- Determinar el efecto de la introducción de especies leñosas forrajeras en combinación con tratamientos de riego y defoliación sobre las propiedades de suelo.

3. MÉTODOS GENERALES

SITIO DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en las instalaciones del INIFAP-Campo experimental Valle de Apatzingán (Figura 1), ubicado en el kilómetro 17.5 Carretera Apatzingán-Cuatro Caminos, con coordenadas 19° 24'23.59" N y 102° 0'47.91" W en el Municipio de Parícuaro, Michoacán. Este sitio presenta una altura de 360 metros sobre el nivel del mar y su distancia a la capital del estado es de 200 km (INAFED, 2010).

El campo experimental cuenta con un predio de 53 hectáreas, laboratorio, pozo profundo, invernadero y oficinas. Las actividades que se llevan a cabo son el desarrollo de tecnología en producción de cítricos y frutales.

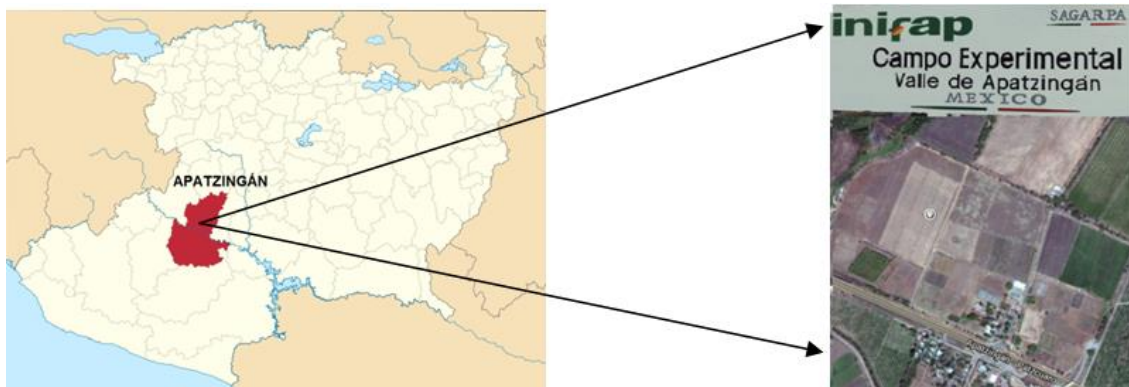


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

CLIMA

El clima es cálido semiárido todo el año. Se encuentra clasificado como tropical con lluvias en verano (Aw). La temperatura media anual es de 28°C con y la precipitación media anual es de 700 mm, con temporada de lluvias en los meses de Junio a Octubre (INIFAP, 2006; García, 1990).

VEGETACIÓN

La vegetación del municipio se encuentra dominada por Bosque Tropical Caducifolio y Bosque Tropical Espinoso. Gran parte del terreno ha sido modificada para la siembra de cítricos y otros árboles frutales que se cultivan en la zona. Su relieve lo conforman la Sierra Madre del Sur, la depresión del Tepalcatepec y la Sierra de Acahuato con los cerros de San Miguel, San Juan, La Majada, el Cantón y la Angostura (INAFED, 2010).

ESPECIES DE ESTUDIO

Las especies seleccionadas en este estudio (Figura 2), representan plantas leñosas de rápido crecimiento, nativas de zonas tropicales y con un alto contenido proteico (Pizarro, 2002). Estas especies son utilizadas localmente, sin embargo existe poca información sobre su potencial forrajero y su manejo agronómico.

1. *Leucaena leucocephala*. Esta una especie de la familia Fabaceae, subfamilia Mimosoideae. Es la especie más estudiada y conocida del género *Leucaena*. Puede crecer como arbusto o árbol de hasta 3 a 6 metros de altura, con un DAP de hasta 25 cm. Su follaje puede ser caducifolio o perennifolio dependiendo la disponibilidad de agua. Presenta hojas pinnadas con 6 a 8 pinas

que llevan de 11 a 23 pares de foliolos a lo largo. Presenta una inflorescencia de tipo globular y color blanquecino. Su vaina es aplanada y de color marrón. En su interior contiene entre 15 y 30 semillas de tipo ortodoxo y puede mediar de 13 a 18 cm. Presenta reproducción monoica y su polinización es de tipo entomófila (Zárate, 1994).

L. leucocephala es originaria de Centroamérica, se distribuye desde México hasta Nicaragua y recientemente se introdujo en Asia y África. Su principal uso ha sido dentro de sistemas agroforestales a nivel mundial (Anguiano *et al.*, 2012; Parrotta, 1992; Zárate, 1994).

Esta especie requiere temperaturas cálidas para desarrollarse adecuadamente (Brewbaker *et al.*, 1985). Por otro lado presenta una amplia adaptación en cuanto a sus requerimientos hídricos. Puede tolerar de 650 a 3000 mm de precipitación, aunque se ha reportado su presencia en sitios hasta con solo 300 mm anuales. Sin embargo, en ambientes muy áridos su rendimiento es bajo (Brewbaker *et al.*, 1985). Así mismo, (Swasdiphanich, 1992) menciona que *L. leucocephala* presenta mayor resistencia a la sequía en comparación con otras leguminosas arbóreas.

Es una especie muy característica de bosques secundarios, presenta una raíz profunda y extendida que aprovecha bien el agua y los minerales en zonas donde otras plantas no tienen acceso (Brewbaker *et al.*, 1972). Sin embargo, *L. leucocephala* es poco tolerante a suelos con mal drenaje, en especial durante el periodo de establecimiento. Se adapta bien a suelos arcillosos y requiere niveles óptimos de fósforo y calcio para presentar un buen desarrollo.

Por otro lado, *L. leucocephala* es conocida por presentar un alto valor nutritivo, su principal uso y producción es como pastura o forraje animal. Esta especie puede plantarse de forma individual, como cerco vivo, en filas o callejones. La forma de siembra depende del uso que se le dé. Generalmente en sistemas silvopastoriles es sembrada a altas densidades en callejones para lograr un alto rendimiento por hectárea. Además, suelen sembrarse pastos en el centro de los callejones para aumentar la cantidad total de alimento para el ganado (Brewbaker et al., 1985; Hernández et al., 1998; Parrotta, 1992).

Algunos estudios han demostrado que *L. leucocephala* es buena competidora y presenta un rápido crecimiento. También se recupera rápidamente de las podas o el pastoreo regular. La recuperación después de la poda dependerá en gran medida de las proteínas y carbohidratos de reserva que se encuentren disponibles (Camacaro et al., 2004; Garcia et al., 2001; Lehmann et al., 1998). Por otro lado, se ha observado que presenta una distribución vertical de sus raíces en el suelo, una característica importante en los sistemas agroforestales, puesto que varios cultivos crecen en la misma unidad de suelo permitiendo así evitar la competencia por agua y nutrientes (Anguiano et al., 2012; Hernández et al., 1998; Schroth, 1995).

Los potreros en donde se utiliza *L. leucocephala* suelen ser de rotación, en estos sitios el ganado se traslada a nuevos campos de alimento al observar que eliminó hojas y tallos tiernos. Los intervalos de poda o pastoreo no se han estandarizado, pues el rendimiento depende en gran parte de factores ambientales, tamaño de la parcela y cantidad de ganado que entre a ella. En general se ha observado que el pastoreo promueve la ramificación y el engrosamiento de protección los tallos principales.

2. *Gliricidia sepium*. Esta especie pertenece a la familia Fabaceae, subfamilia Faboideae, puede crecer como árbol o arbusto caducifolio de 2 hasta 15 metros de altura, y presentar un DAP de hasta 30 cm. Su copa suele ser irregular con un amplio follaje, presenta hojas compuestas de tipo pinnada e impar, por lo general alternas. Las hojas son ovadas o elípticas, cada una está compuesta por folíolos que son de 2 a 7 cm de largo y de 1 a 3 cm de ancho. El fruto es una vaina linear de color marrón oscuro que puede medir entre 10 a 15 cm, las vainas son dehiscentes y presenta de 4 a 10 semillas de tipo ortodoxo. Sus inflorescencias se presentan en racimo, suelen ser color rosa o lila con tonos blancos y/o amarillos (Falvey, 1982).

G. sepium presenta una distribución tropical muy amplia, podemos encontrarla desde México hasta Centroamérica y Sudamérica. Esta especie se encuentra desde los 0 a los 1600 msnm, así mismo puede distribuirse en un amplio rango de precipitación que va desde los 650 a 3500 mm anuales (Camero, 1992; Hughes, 1987). En cuanto a la temperatura *G. sepium* no es muy exigente mientras la variación mensual se encuentre entre los 20 y 29°C, sin embargo no tolera bien las heladas. Presenta un sistema radicular fuerte y profundo, con una raíz pivotante y raíces laterales en ángulos agudos respecto a la raíz principal. Se sabe que presenta asociación con nódulos fijadores de nitrógeno en las raíces y su simbionte suelen ser bacterias de los géneros *Rhizobium* y/o *Bradyrhizobium* (Sarukhán y Pennington, 1998; Velázquez et al., 2009; Whiteman et al., 1986).

En zonas donde la humedad es suficiente puede no perder sus hojas. Su floración suele darse al inicio de la estación seca hasta finales de marzo (Hughes, 1987). En cuanto al tipo de suelo, *G. sepium* se encuentra en una gran

diversidad de sitios, desde suelos altamente erosionados, hasta arenas, piedra caliza calcárea y sitios arcillosos. Debido a su gran capacidad de establecimiento en suelos dañados, se ha sugerido su uso en restauración de suelos ácidos, infértiles y dañados (Hughes, 1987; Lok et al., 2006; Szott et al., 1991). Los árboles de *G. sepium* crecen rápidamente, presentando su madurez entre los 6 y 8 meses. Esta característica hace que sea una especie pionera para la colonización de bosques secundarios (Anoka et al., 1991; Simons y Dunsdon, 1992).

Por otro lado, se considera que después de *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* es el segundo árbol multipropósito más cultivado. Se ha documentado que en algunos casos *G. sepium* produce igual o más biomasa que *L. leucocephala* (Stewart et al., 1992). Su popularidad como cultivo forrajero ha aumentado debido a su resistencia al defoliador *Heteropsylla cubana*, el cual ha devastado grandes cultivos de *L. leucocephala* en diversas zonas (Simons y Dunsdon, 1992; Stewart et al., 1992).

En cuanto a su siembra, las semillas no requieren tratamientos pregerminativos y presenta tasas de germinación superiores al 90%. *G. sepium* presenta una gran calidad nutritiva y alta productividad por lo que el interés en esta especie ha incrementado notablemente.

Es una de las pocas especies que puede competir con *L. leucocephala* en cuanto a rendimiento y calidad nutritiva. Además, puede tolerar condiciones más diversas de suelos, por lo tanto se considera un importante cultivo de forraje en sistemas de corte y acarreo, tanto en Centroamérica como el Sureste de Asia y

Africa occidental (Camacaro et al., 2004; Chirwa et al., 2006; Simons y Dunsdon, 1992; Trung, 1989).

En cuanto a la poda de *G. sepium*, no existen intervalos claramente establecidos, pues su producción y recuperación tras una poda depende de las condiciones climáticas del sitio. Sin embargo algunos estudios mencionan que una poda cada tres meses puede permitir una recuperación y producción de biomasa eficaz (Hernández et al., 1998; Latt et al., 2000). Finalmente, podemos mencionar que *G. sepium* presenta grandes ventajas como especie forrajera, debido a su notable desarrollo y abundante producción de follaje. Además se considera un árbol multipropósito en el medio rural dentro de los huertos familiares (Chirwa et al., 2006; Sarukhán y Pennington, 1998; Velázquez et al., 2009).

3. *Guazuma ulmifolia*. Esta especie pertenece a la familia Sterculiaceae, se caracteriza por ser un árbol o arbusto mediano, de 7 hasta 12 metros de altura, con un DAP de 20 a 40 cm. Su tronco suele ser recto y su copa es abierta, redondeada y extendida, presenta hojas simples y alternas, de forma ovaladas a lanceoladas. Las flores son pequeñas de color amarillo, estas se agrupan en panículas en la base de las hojas. Los frutos son cápsulas verrugosas y elípticas de color marrón oscuro a negro cuando llegan a la madurez y presentan una gran cantidad de pequeñas semillas (Manríquez-Mendoza et al., 2011; Silvoenergía, 1986). *G. ulmifolia* es muy abundante en zonas con una marcada estacionalidad. Es una especie originaria de América tropical y se distribuye desde México hasta el noreste de Argentina. Presenta una gran adaptación en cuanto a condiciones climáticas, por lo que podemos encontrarla tanto en sitios húmedos como secos. Es una especie heliófila y pionera característica en sitios

de sucesión secundaria (Manríquez-Mendoza et al., 2011; Silvoenergía, 1986). *G. ulmifolia* crece bien en zonas cálidas con temperaturas promedio de 24 °C. Se distribuye en un rango de precipitación que va de 700 a 1500 mm al año y podemos encontrarla desde los 0 a los 1200 msnm. En cuanto al tipo de suelo, requiere sitios con texturas livianas, con buen drenaje y un pH por arriba de 5.5 (Manríquez-Mendoza et al., 2011; Ortega-Vargas et al., 2013; Silvoenergía, 1986).

G. ulmifolia se utiliza comúnmente en construcciones rurales como cerca o poste. Su madera es utilizada como leña y carbón, como cerca viva e incluso en carpintería. Su follaje y los frutos son utilizados también como forraje para ganado y presentan una importante fuente de proteínas (Manríquez-Mendoza et al., 2011; Ortega-Vargas et al., 2013). Datos del CATIE (1986), indican que es una especie que rebrota muy bien después de podarla y que produce buena cantidad de biomasa comestible para los animales.

En este contexto, *G. ulmifolia* ha sido considerada una de las especies más importantes dentro de los sistemas silvopastoriles. Destacan características de gran importancia como son: que el ganado las ramonea preferentemente, que presenta una gran capacidad de rebrote y recuperación tras el ramoneo, que resiste la sequía y que conserva las hojas durante la época de sequía. Se ha demostrado que sus hojas poseen cerca de un 17% de proteína bruta (Casanova-Lugo et al., 2013; Petit et al., 2010; Silvoenergía, 1986). En cuanto a su manejo se conoce poco, pero se ha demostrado que la producción de biomasa en los sistemas silvopastoriles está influenciada por varios factores, como la densidad de siembra, la frecuencia y altura del corte, así como otras prácticas agronómicas y culturales. Así mismo hay, estudios que demuestran

que las podas al final de la época seca son útiles para extender la producción de forraje verde durante la época seca. Otros estudios proponen realizar podas a *G. ulmifolia* cada tres meses, como estrategia de manejo que promueve el rendimiento de forraje sin presentar daños a las plantas (Casanova-Lugo et al., 2013; Manríquez-Mendoza et al., 2011; Ortega-Vargas et al., 2013).

4. *Moringa oleifera*. Es una especie que pertenece a la familia Moringaceae, este género cuenta con 13 especies, *M. oleifera* es la más conocida y estudiada. Puede llegar a medir hasta 12 metros de altura y ser perennifolio o caducifolio según las condiciones del sitio. Su raíz principal es tipo pivotante y puede alcanzar gran profundidad lo que le confiere esa gran resistencia a la sequía (Alfaro, 2006).

M. oleifera presenta hojas alternas tripinnadas de 30 a 60 cm, presenta una gran cantidad de pequeños foliolos. Sus flores son de color crema o blanquecino con estambres amarillos, su floración puede darse durante todo el año y su fruto es una vaina alargada y leñosa color marrón (Morton, 1991). Sus semillas, hojas, aceite, raíces y flores son utilizados en la medicina tradicional. Estudios han demostrado que *M. oleifera* contiene contenidos nutricionales muy importantes (Becker y Nair, 2004). Además, existen nuevas líneas de investigación pues se le atribuyen una gran cantidad de usos. Algunos de ellos son como floculante natural en tratamiento de aguas, fuente de materia prima de celulosa, biocombustible e incluso en nutrición y medicina humana (Anwar et al., 2007; Morton, 1991).

En cuanto a su distribución, *M. oleifera* es originaria del Noreste de la India, Afganistán y Pakistán, se encuentra distribuida en el Bosque Tropical

Caducifolio de estas zonas. Fue introducida en Centroamérica en los años 1920 como especie ornamental y para cercas vivas, sin embargo actualmente se ha distribuido en todo el trópico a nivel mundial (Foidl et al., 1995).

En su ambiente natural *M. oleifera*, se encuentra limitada por la temperatura ya que su crecimiento óptimo se reporta en sitios con temperaturas que van de los 18 a los 35°C; esta especie no es capaz de soportar muy bien las heladas. En cuanto a la precipitación podemos encontrarla en sitios que van desde 250 a 4300 mm anuales, sin embargo las condiciones óptimas de precipitación las encuentra entre los 500 a 2200 mm. Así mismo *M. oleifera* puede crecer en una amplia gama de suelos con pH que va desde 4.5 a 8.5, pero su desarrollo óptimo se presenta en suelos franco arcillosos y con buen drenaje (Jyothi et al., 1990; Morton, 1991; Sharma y Raina, 1982).

En sentido general se puede decir que es una especie de gran plasticidad ecológica, ya que se encuentra localizada en diferentes condiciones de suelo, precipitación y temperatura.

Como se menciona anteriormente, a esta especie se le atribuye una gran variedad de usos, desde ornamental, medicinal, flocculante y forrajera. Foidl et al, 1999 han recomendado a *M. oleifera* como forraje fresco para el ganado, así mismo es una importante fuente de alimento animal debido a sus altos contenidos proteicos y vitamínicos (Garavito, 2008). Se recomienda como parte de la dieta en rumiantes, aves, peces y cerdos.

Esta especie es recomendada en sistemas silvopastoriles, ya que presenta un crecimiento muy rápido y altos contenidos proteicos (Alfaro, 2006; Garavito, 2008). Así mismo una vez establecida requiere poca atención. *M.*

oleifera puede cultivarse a altas densidades para obtener un buen rendimiento (Davis, 2000). Por otro lado, algunos estudios mencionan que puede sobrevivir largos periodos sin agua, pero bajo condiciones de estrés hídrico el rendimiento de follaje puede disminuir considerablemente (Ramachandran et al., 1980; Reyes Sánchez, 2004).



Figura 2. Especies leñosas forrajeras seleccionadas para el estudio: **1** *Leucaena leucocephala*, **2** *Gliricidia sepium*, **3** *Guazuma ulmifolia*, **4** *Moringa oleifera*.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El presente estudio consistió en evaluar los efectos del riego (ya que la disponibilidad de agua es un factor limitante en esta zona) y la defoliación (como simulación del ramoneo ejercido por el ganado) sobre dos elementos de los sistemas silvopastoriles: i) las plantas utilizadas y ii) las propiedades del suelo. Para esto se utilizó un diseño experimental factorial en parcelas divididas en bloques al azar, con dos niveles de riego (Riego y Temporal) y tres niveles de defoliación (25%, 50% y 75% de hojas y ramas tiernas).

Antes de iniciar el experimento se preparó el terreno, mediante la eliminación de malezas, el arado y surcado del suelo. Posteriormente, se cercó todo el perímetro del terreno con una malla plástica para evitar la entrada de roedores que podrían remover las semillas. Se instaló un sistema de riego por goteo debido a las ventajas que presenta este sistema, como son la eliminación de la escorrentía superficial y mantener un nivel constante en la humedad del suelo (García-Casillas, 1997).

Cada unidad experimental estuvo constituida de tres surcos separados por 1.8 m en los que se sembró mediante siembra directa y se evaluó solamente en el experimento el surco central, para eliminar el efecto de borde. Después de la siembra se realizó un primer riego uniforme para promover la germinación y se utilizó una densidad de siembra de 40,000 plantas/hectárea. La distancia entre cada planta fue de 15 cm.

Cada unidad experimental constó de una especie, un nivel de riego y un nivel de defoliación. Teniendo un total de 30 tratamientos, cuatro repeticiones y 120 unidades experimentales (UE). Las especies que se utilizaron fueron:

Leucaena leucocephala (Guaje), *Gliricidia sepium* (cacahuananche), *Guazuma ulmifolia* (Guazimo) y *Moringa oleifera* (Moringa), *Megathyrsus maximus* (Pasto Guinea) (Figura 3). Se utilizó un diseño en parcelas divididas en bloques al azar con el fin de reducir los efectos de borde.

Las semillas de *L. leucocephala* fueron sometidas a escarificación, un día antes de la siembra. El método utilizado fue sumergirlas en agua a 80°C durante cinco minutos y posteriormente sumergirlas en agua fría (Anguiano et al., 2012). De igual forma las semillas de *G. ulmifolia*, recibieron tratamientos pre germinativos. Se sumergieron en agua tibia por un minuto, se separaron y limpiaron de una sustancia mucilaginosa.

Antes de realizar la siembra y con los tratamientos ubicados, se tomaron muestras de suelo para cada una de las unidades experimentales. Estas se tomaron por medio de nucleadores, los cuales fueron enterrados a 10 cm de profundidad con ayuda de un marro en el centro de cada unidad experimental. El punto de muestreo se dejó marcado para volver a tomar las muestras cerca de este punto posteriormente y poder evaluar los cambios inducidos por el tratamiento. Las muestras de suelo se guardaron en bolsas herméticas y se refrigeraron a 4°C para su conservación mientras se procesaban en el laboratorio.

Para evaluar los efectos de la sequía, se utilizaron dos niveles de riego: temporal (**T**- solo el agua de lluvia) y riego (**R**- el agua de lluvia más cuatro horas de riego por semana). Durante el experimento se tomaron datos de humedad del suelo con un sensor de la marca ProCheck, para registrar el contenido volumétrico de agua en cada tratamiento. Esto se realizó una vez por mes a partir

de que se comenzaron los tratamientos de riego y se tomaron tres medidas a lo largo del surco útil cada vez, por lo que se obtuvo un total de 12 meses de datos.

En el caso de la defoliación, se aplicaron tres tratamientos de poda manual, los cuales fueron remover el 25%, 50% y 75% de la biomasa forrajera a cada una de las plantas. Este porcentaje se consiguió mediante la medición de cada individuo y en base a su altura y cobertura de copa se cortaron las proporciones de cada tratamiento. Es importante mencionar que se eligieron ramas tanto de la base, como del centro y la copa para tratar de homogenizar la poda. La defoliación se realizó de forma manual removiendo hojas y tallos tiernos simulando el ramoneo del ganado.

Se realizaron un total de tres defoliaciones, la primera fue en Febrero del año 2015, la segunda y tercera en Agosto y Noviembre del mismo año. Las mediciones en un inicio se tomaron de forma mensual y posteriormente de forma trimestral.

Después de cada poda se pesó el material obtenido en fresco, posteriormente se secó en horno de convección a 80°C por 48 horas para obtener el peso seco y de esta forma, se obtuvo la cantidad de biomasa removida por especie para cada tratamiento.

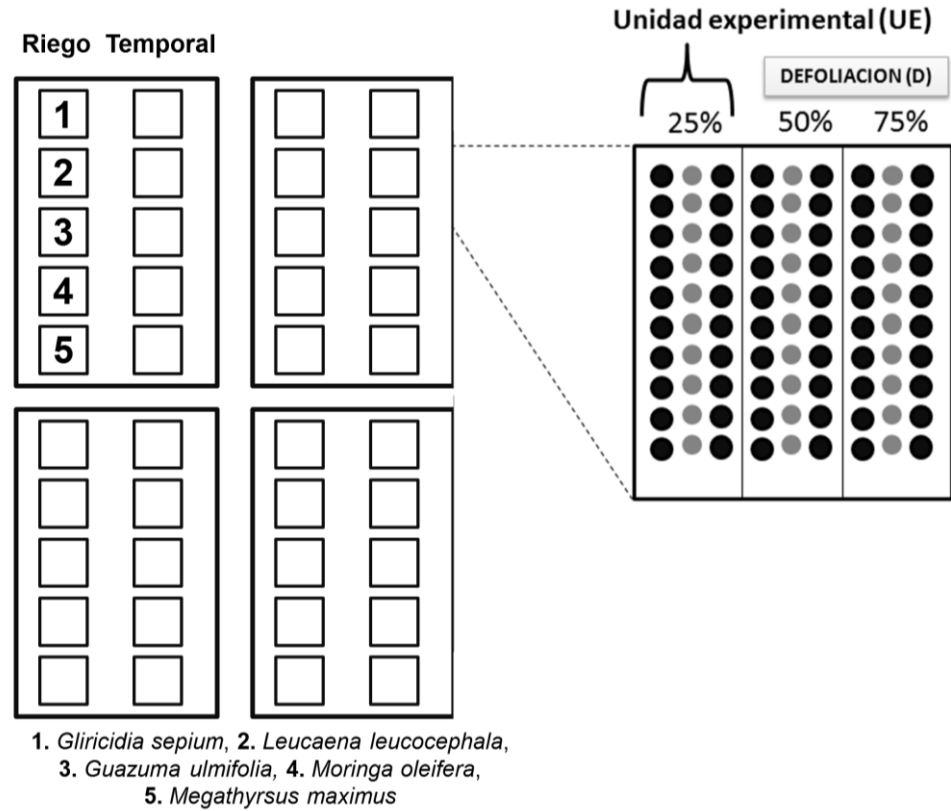


Figura 3. Representación gráfica del diseño experimental en bloques divididos al azar. Riego (R y T), Defoliación (25, 50 y 75%). Dentro de cada unidad experimental (UE) se tuvo la interacción de un nivel de riego, un nivel de defoliación y una especie.

4. RESPUESTAS AL RIEGO Y LA DEFOLIACIÓN DE ESPECIES LEÑOSAS DEL TRÓPICO SECO.



Respuestas al riego y la defoliación de especies leñosas del trópico seco.

Paloma García Vargas^{1*}, Carlos E. González Esquivel², Leonel López Toledo³,

1 Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
paloma.gv@hotmail.com Telephone: +52 443376889

2 Laboratorio de Agroecología, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM Campus Morelia

3 Laboratorio de Ecología Vegetal, INIRENA, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Resumen: Gran parte de los estudios en sistemas silvopastoriles de trópicos secos se han realizado con *Leucaena leucocephala*. Sin embargo, existen otras especies de árboles forrajeros menos estudiadas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el establecimiento y el crecimiento en altura, diámetro, copa y producción de biomasa sobre cuatro especies de árboles forrajeros (*Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleífera*) bajo los efectos de dos niveles de riego (Riego y Temporal) y tres niveles de defoliación (25%, 50% y 75%), con el fin de obtener información para su manejo agronómico en el trópico seco michoacano en México. El experimento se realizó en el Campo Experimental INIFAP-Valle de Apatzingán, con un diseño experimental factorial en bloques divididos al azar. Los resultados fueron analizados mediante modelos lineales mixtos. Se obtuvo que durante el establecimiento *L. leucocephala* alcanzó una altura promedio 3.0, 4.4 y 11.5 veces mayor que *M. oleífera*, *G. sepium* y *G. Ulmifolia*, respectivamente. Después de un periodo de 12 meses de seguimiento bajo los tratamientos de riego y defoliación se encontró que *L. leucocephala* fue la especie con mayor crecimiento pero solo *G. sepium* presentó diferencias significativas entre los tratamientos de riego para altura y diámetro. En la producción de biomasa *L. leucocephala* presentó el mayor rendimiento en 75% de defoliación con 103.03 ± 16.52 kg MS/ha, seguida por *G. sepium* también en el 75% de defoliación con 79.62 ± 19.77 kg MS/ha. Así mismo se observó que con tres podas y tiempos de recuperación de tres y seis meses las especies no se vieron afectadas e incluso con cada defoliación aumentaron su producción de biomasa. Por lo que consideramos que *L. leucocephala* y *G. sepium* son las especies más adecuadas en este sitio, debido a su crecimiento y producción de biomasa aun en condición de temporal.

Abstract: Many studies on silvopastoral systems in the dry tropics have been carried out with *Leucaena leucocephala*. However, there are other foraging tree species much less studied. The objective of this study was to evaluate the establishment and growth of four species of foraging trees (*Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* and *Moringa oleifera*) under two levels of irrigation (Temporal and Irrigated) and three levels of defoliation (25%, 50% and 75%), in order to obtain information for their agronomic management in the dry tropics of Michoacán, Mexico. The experiment was carried out in the INIFAP-Apatzingan Valley Experimental Field, with a factorial experimental design in randomized blocks. The results were analyzed using mixed linear models. During the establishment *L. leucocephala* reached an average height 3.0, 4.4 and 11.5 times greater than *M. oleifera*, *G. sepium* and *G. ulmifolia*, respectively. After a period of 12 months under irrigation and defoliation treatments, *L. leucocephala* was the species with the highest growth and only *G. sepium* presented significant irrigation effects with differences between treatments for height and diameter. *L. leucocephala* presented the highest yield in biomass production under 75% defoliation with 103.03 ± 16.52 kg DM/ha, followed by *G. sepium* also under 75% defoliation with 79.62 ± 19.77 kg DM/ha. It was also observed that with three pruning times and recovery periods of three and six months the species were not affected and even increased their production of biomass with each defoliation. Therefore, *L. leucocephala* and *G. sepium* are the most suitable species in this site, due to their growth and production of biomass even in temporary conditions.

INTRODUCCIÓN

El Bosque Tropical Seco (BTS) es uno de los ecosistemas más extensos e importantes en México y Centro América (Murphy et al, 1995). En las últimas décadas, el BTS se ha visto seriamente afectado, principalmente por su conversión a campos de cultivo o pastizales utilizados para la ganadería extensiva, por lo que quedan pequeños remanentes de la vegetación original (Maass et al., 2002).

En América Latina, y principalmente en zonas con periodos largos de sequía, la ganadería es una de las principales fuentes de ingreso, ya que la agricultura no suele ser redituable (Villa-Méndez et al., 2008). El modelo que comúnmente se trabaja es la ganadería extensiva, que ocupa y afecta grandes extensiones de tierra (Jiménez, 2000). La ganadería extensiva se caracteriza por convertir grandes extensiones de bosque en pastizales. Suelen removerse todos los árboles y/o arbustos de la vegetación original, ya que se consideran negativos, pues proveen sombra y limitan el crecimiento de los pastos (Barahona y Sánchez, 2005; Cancino et al., 2016; Ruiz et al., 2010). Esto da como resultado un sistema ganadero con un solo estrato vegetativo y poca eficiencia de uso del suelo.

Aunado a esto, sabemos que la población humana se ha incrementado exponencialmente en las últimas décadas, aumentando así su demanda de alimento, en gran parte de origen animal (Murgueitio, 2009). Debido a lo anterior, surge la necesidad de buscar e implementar nuevas alternativas que detengan o disminuyan el deterioro ambiental ocasionado por la ganadería extensiva, sin perder el desarrollo económico tan importante en estas zonas.

En las últimas décadas, varios estudios en Centroamérica han enfatizado la importancia de los sistemas silvopastoriles para la producción ganadera. Los sistemas silvopastoriles y en general la incorporación de árboles y arbustos en los pastizales han demostrado ser una importante alternativa en el mejoramiento y la recuperación de las pasturas dañadas por el sobrepastoreo (Murgueitio et al., 2006)

Se ha demostrado que la implementación de prácticas silvopastoriles, ayuda al desarrollo de una producción pecuaria sustentable y promueve un equilibrio ecológico y ambiental, sin comprometer el progreso económico y social (Murgueitio e Ibrahim, 2008; Murgueitio et al., 2006; Pinto, 2002; Schroth y Fonseca, 2004). Esto debido a la incorporación de distintos estratos y especies que hacen el sistema más complejo y diverso, propiciando más interacciones y una mayor resiliencia. Así mismo se trata de integrar especies multipropósito que puedan ser útiles para alimento, construcción e incluso medicina y no solo consumo animal.

Una gran cantidad de estudios sobre sistemas silvopastoriles y árboles forrajeros en México, se han basado en el uso de *Leucaena leucocephala*, debido a su gran capacidad de adaptación y alta producción de biomasa (Petit et al., 2010; Shelton y Brewbaker, 1998). Sin embargo, se considera de gran importancia la diversificación del sistema mediante el uso de varias especies que brinden distintos beneficios y resiliencia a las zonas ganaderas.

Por ello, el presente estudio exploró el potencial forrajero de cuatro especies de árboles en el trópico seco michoacano, bajo distintos niveles de riego (R) y defoliación (D). Ya que el agua es el principal factor limitante en esta zona con

marcada estacionalidad y la defoliación simula el ramoneo al cual están expuestas las especies forrajeras. Los objetivos fueron identificar las especies forrajeras más adecuadas para esta zona, así como evaluar los efectos del riego y la defoliación sobre el crecimiento y la producción de biomasa. Finalmente, se buscó determinar los efectos acumulativos de ambos factores e identificar los tratamientos óptimos para el manejo de cada especie.

Se esperaba un gradiente de respuestas en función de la combinación (R) y (D), además de un componente temporal y acumulativo, dado que una planta sometida a riego y baja defoliación tendrá mejores oportunidades de responder al estrés en comparación a otra expuesta a una gran defoliación y sin riego, dentro de estos dos extremos existen distintas posibles combinaciones. Así mismo conforme aumenten las defoliaciones se irán reduciendo las reservas presentes en las plantas.

Además se espera que las leguminosas *L. leucocephala* y *G. sepium* presenten un mayor crecimiento y mayor productividad de biomasa, debido a que ambas pueden tolerar bajos niveles de precipitación (Anoka et al., 1991; Brewbaker et al., 1972; Latt et al., 2000), ya que presentan raíces profundas y extendidas que suelen estar asociadas con bacterias fijadoras de Nitrógeno (Camacaro et al., 2004). Finalmente, se esperaba que un tratamiento con riego, una poda moderada y un tiempo de recuperación de tres a seis meses, produciría mayor biomasa ya que permitiría mayor recuperación de las especies. Esto, ya que al realizar una poda moderada, dejamos suficiente área foliar fotosintética en el individuo que le ayudara a recuperarse y al no presentar estrés hídrico o deficiencia de agua, se encontrará en condiciones óptimas para un rápido crecimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

SITIO DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en el INIFAP-Campo experimental Valle de Apatzingán, ubicado en el kilómetro 17.5 Carretera Apatzingán-Cuatro Caminos, con coordenadas 19° 24'23.59" N y 102° 0'47.91" W, municipio de Parácuaro, Michoacán. Este sitio presenta una altitud de 300 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido semiárido todo el año, clasificado como tropical con lluvias en verano (Aw). La temperatura media anual es de 28°C y la precipitación media anual es de 700 mm. El suelo es de textura arcillosa. La vegetación nativa se encuentra dominada por Bosque Tropical Caducifolio y Bosque Tropical Espinoso. Gran parte del terreno ha sido modificada para la siembra de cítricos y otros árboles frutales que se cultivan en la zona.

ESPECIES DE ESTUDIO

Las especies seleccionadas fueron: *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia*, *Moringa oleifera* y un pasto tropical asociado. Estas representan plantas leñosas de rápido crecimiento, nativas de zonas tropicales, con un alto contenido proteico y de alto interés para los productores. Estas son utilizadas localmente, sin embargo, existe poca información sobre su manejo agronómico.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño experimental factorial en parcelas divididas en bloques al azar para evaluar los factores 1) Riego y 2) Defoliación sobre las especies seleccionadas, el riego tuvo dos niveles (Riego y Temporal) mientras que la defoliación se aplicó a tres niveles (25, 50 y 75% de hojas y tallos tiernos).

Antes de iniciar el experimento se preparó el terreno mediante arado y surcado. Para *Leucaena leucocephala* se realizó tratamiento de escarificación (Anguiano et al., 2012). Posteriormente, se cercó el terreno con una malla plástica para evitar la entrada de roedores y se instaló un sistema de riego por goteo (García-Casillas, 1997). Se utilizó una densidad de siembra de 40,000 plantas/hectárea, con surcos de 1.8 metros y una distancia entre plantas de 15 cm. Al mismo tiempo se asoció pasto guinea (*Megathyrsus maximum*) mediante siembra por voleo a una densidad de 25 kg de semilla por hectárea en toda la superficie del experimento, como se acostumbra en los sistemas silvopastoriles.

El experimento se dividió en dos tiempos fundamentales. 1) Periodo de establecimiento, que fueron los primeros 180 días, donde todas las plantas se mantuvieron con riego uniforme para promover su establecimiento y crecimiento. 2) Periodo de aplicación de tratamientos, de los 180 a los 540 días, en el cual se aplicaron los tratamientos de riego y se realizaron tres defoliaciones (a los 180, 360 y 450 días). En este segundo periodo *Guazuma ulmifolia* se eliminó del experimento, debido a que presentó muy bajo crecimiento inicial.

Durante el periodo de establecimiento se tomaron mediciones mensuales, esto fue de septiembre 2014 a febrero de 2015. A partir de febrero se comenzaron a aplicar los tratamientos de riego y defoliación. Se continuó midiendo de forma mensual de marzo de 2015 a Agosto del mismo año. Posteriormente solo se realizaron mediciones en los meses de Noviembre de 2015 y Febrero de 2016.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Periodo de establecimiento. Para identificar a la mejor especie en términos de crecimiento se compararon los datos obtenidos a lo largo del periodo de establecimiento. Esta comparación se hizo mediante un análisis de modelos lineales mixtos (MLM), en el que las variables de respuesta fueron el crecimiento en: i) altura y ii) diámetro.

Como variables fijas se tuvieron el tiempo (T), como variable continua, y la especie (Esp) como variable categórica con cuatro niveles (*Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleífera*). También se evaluó la interacción entre estos dos factores (T:E).

Como factor aleatorio se incluyeron los bloques al azar. Con base en este análisis se obtuvo una ecuación lineal de la forma $y = a + bx$, en donde y representa las variables de respuesta. La variable altura fue convertida a logaritmo, mientras que el diámetro fue convertido a raíz cuadrada, para cumplir con los criterios de normalidad y homocedasticidad (Crawley, 2012).

Aplicación de tratamientos: Este análisis se utilizó para identificar dentro de cada especie el mejor tratamiento en la combinación con riego y defoliación. Se utilizaron los datos obtenidos entre los 180 y 540 días de edad de las plantas. Esta comparación, al igual que la anterior se realizó mediante un MLM, y se utilizaron cuatro variables respuesta, las cuales fueron crecimiento en: i) altura, ii) diámetro, iii) cobertura de copa y iv) producción de biomasa.

Las variables fijas fueron riego (R), defoliación (D), tiempo (T) y periodo (P), así como la interacción entre ellas, y los bloques al azar como un factor aleatorio. Para este análisis las cuatro variables respuesta fueron transformadas a

logaritmo para cumplir con los criterios de normalidad y homocedasticidad (Crawley, 2012).

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el uso del paquete *lme4* versión 1.0-4 (José Pinheiro y Bates, 2000) en el Programa R ver. 3.1.1, Development Core Team (Pinheiro et al., 2015). Para esto, primero se realizaron los modelos saturados, incluyendo el conteniendo de todos los términos e interacciones de los factores fijos. La simplificación del modelo estuvo basada en remover secuencialmente los términos fijos (factores/interacciones) no significativos (Crawley, 2012; Pinheiro y Bates., 2000). El modelo presentado para cada análisis consiste únicamente de términos significativos. Para probar el efecto de la remoción de factores/interacciones y evaluar la significancia de los términos en el modelo se utilizó la función *anova()* que realiza una prueba de máxima verosimilitud (*maximum likelihood ratio test*) en la que se compara el ajuste de un *modelo 1* que contiene el término de interés, respecto a un *modelo 2* (Crawley, 2012; Faraway, 2005; Pinheiro y Bates, 2000; West et al., 2014).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos indican que existen diferencias entre las especies de estudio y algunas respondieron mejor en las variables analizadas. En primer lugar se describen los resultados de la identificación de la mejor especie forrajera en términos de crecimiento, en ausencia de los tratamientos experimentales. Posteriormente se describen los resultados de los efectos de los tratamientos de riego, defoliación y su interacción para cada especie.

PERIODO DE ESTABLECIMIENTO

El crecimiento en altura durante el periodo de establecimiento fue muy distinto entre especies (Esp: $F_{3,664} = 54.2$, $p < 0.001$) y varió a lo largo del tiempo (T: $F_{1,664} = 6.7$ $p < 0.01$). Después de 180 días de seguimiento, la especie con mayor crecimiento fue *Leucaena leucocephala* que alcanzó una altura promedio de 92.5 ± 2.5 cm, la cual fue 3.0, 4.4 y 11.5 veces mayor que las de *Moringa oleífera*, *Gliricidia sepium* y *Guazuma ulmifolia*, respectivamente. La tasa de crecimiento en altura varió entre las especies (T-E: $F_{3,664} = 38.34$, $p < 0.001$) y fue *L. leucocephala* la que presentó la mayor tasa, 0.06 cm/día, mientras que *G. sepium* disminuyó su tasa de crecimiento a lo largo del tiempo (Fig. 1a). Para el caso del crecimiento en diámetro también se encontraron diferencias significativas entre especies (E: $F_{3,664} = 21.4$ $p < 0.001$) y la que presentó mayor crecimiento a lo largo del tiempo fue *L. leucocephala* (0.22 ± 0.02 cm), seguida por *G. sepium*, *M. oleífera*, y finalmente *G. ulmifolia* (T:E; $F_{3,663} = 14.9$, $p < 0.001$; Fig. 1b).

Cuadro 1. Resultados de los modelos lineales mixtos (LMM) utilizados para evaluar el crecimiento en altura y diámetro de cuatro especies leñosas forrajeras bajo las mismas condiciones ambientales, durante el periodo de establecimiento. Los factores a evaluar fueron tiempo (T), Especie (E), y la interacción de ambos (T: E). *ns* indica no significativo. Los parámetros del modelo están indicados en la Figura 1.

| COMPARACIÓN ENTRE ESPECIES | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------|-----------|----------|-------------------------|-----------|----------|
| FACTORES | VARIABLES RESPUESTA | | | | | |
| | Crecimiento en Altura | | | Crecimiento en Diámetro | | |
| | <i>F</i> | <i>gl</i> | <i>p</i> | <i>F</i> | <i>gl</i> | <i>p</i> |
| TIEMPO (T) | 6.7 | 1, 664 | <0.01 | 1.1 | 1, 663 | ns |
| ESPECIE (E) | 54.2 | 3, 664 | <0.001 | 21.4 | 3, 664 | <0.001 |
| T:E | 38.3 | 3, 664 | <0.001 | 14.9 | 3, 663 | <0.001 |

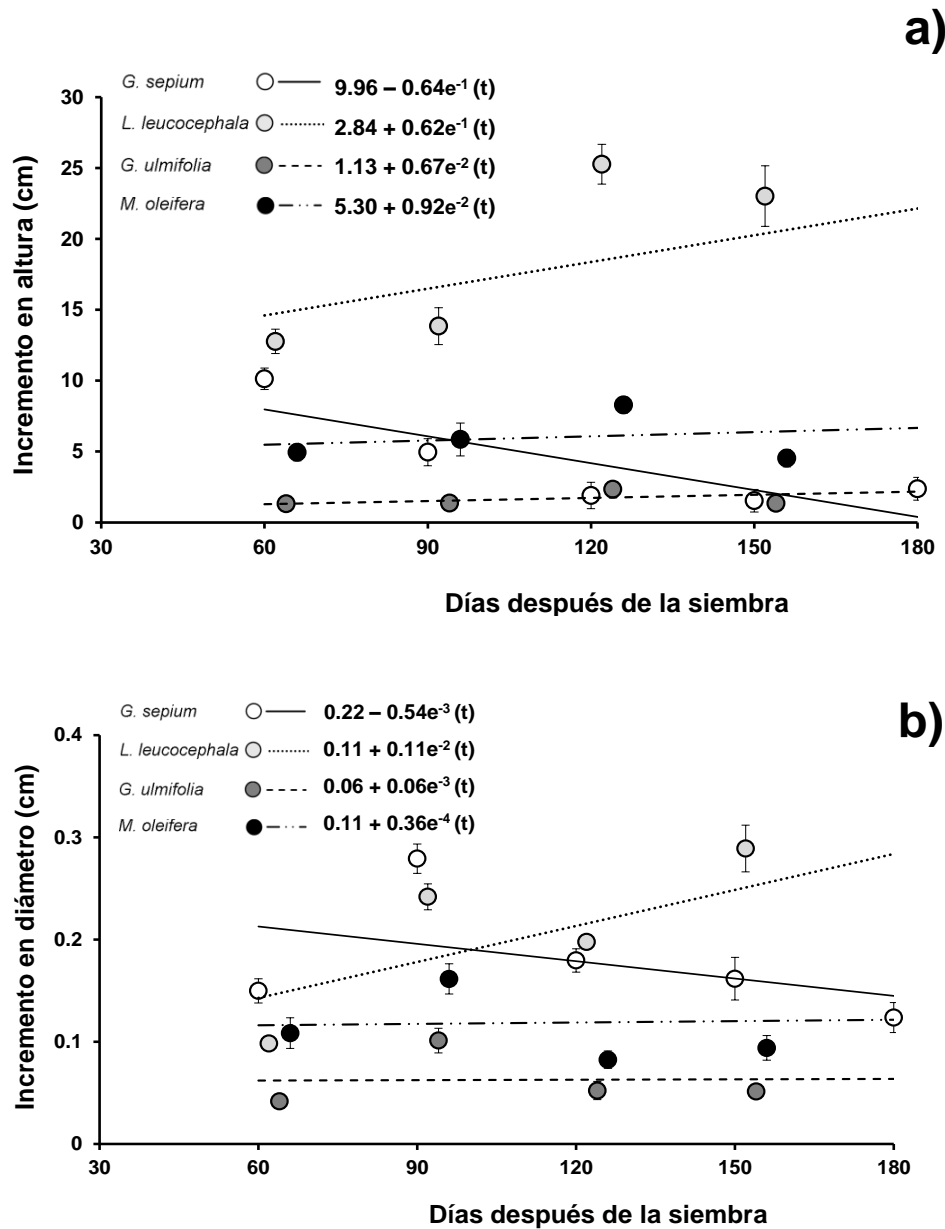


Figura 1. Crecimiento de cuatro especies leñosas forrajeras (*G. sepium*, *L. leucocephala*, *G. ulmifolia*, *M. oleífera*) durante el periodo de establecimiento. **a)** Altura (cm) y **b)** Diámetro (cm).

EFFECTOS ACUMULATIVOS

Crecimiento. Después de un periodo de 12 meses de seguimiento bajo los tratamientos de riego y defoliación, en general se encontró que las tres especies estudiadas fueron resistentes a la sequía y a la defoliación (Cuadro 2; Fig. 2 y

3). Aunque existieron diferencias entre especies, estas fueron mínimas. Especialmente, el crecimiento en altura y el diámetro para *L. leucocephala* y *M. oleifera* fueron similares entre tratamientos de riego y defoliación. En cambio las plantas de *G. sepium*, sometidas a riego alcanzaron 1.5 veces mayor crecimiento (promedio \pm EE: 41.5 ± 11.9) que las plantas sin riego (Fig. 2). La tasa de crecimiento también fue similar entre especies ($m= 1.0064$), pero *L. leucocephala* fue la que alcanzó las mayores alturas desde el inicio.

En cuanto al crecimiento en cobertura de copa en ninguna especie fueron significativos los tratamientos de riego y defoliación. *L. leucocephala* fue la especie con mayor cobertura (Cuadro 2; Fig. 4).

Biomasa: De forma general, para *L. leucocephala* y *G. sepium*, la biomasa no presentó diferencias entre los niveles de riego mientras que la defoliación y el tiempo si presentaron diferencias significativas. *M. oleifera* solo presentó cambios con el tiempo. Por otro lado, la mayor producción de biomasa la obtuvo *L. leucocephala* (D75 103.03 ± 16.52 , D50 68.56 ± 14.97 y D25 54.70 ± 11.57) seguida por *G. sepium* (D75 79.62 ± 19.77 , D50 74.95 ± 19.53 y D25 53.47 ± 18.75) y finalmente *M. oleifera* (D75 18.45 ± 3.10 , D50 12.71 ± 4.85 y D25 15.35 ± 5.56) muy por debajo de las anteriores (Cuadro 2; Fig. 5).

Es importante mencionar que durante el experimento no se presentó una marcada época de sequía, debido a fuertes lluvias atípicas en marzo de 2015 causadas por el frente frío número 42 en dicha temporada, así como la presencia del huracán Patricia en octubre del mismo año, catalogado como el más fuerte a nivel global en términos de viento máximo sostenido (Fig. 6).

1 **Cuadro 2.** Resultados de los modelos lineales mixtos (MLM) utilizados para evaluar los efectos del Riego y la Defoliación sobre el
2 crecimiento en altura, diámetro y cobertura de copa, así como la producción de biomasa para tres especies leñosas forrajeras.
3 Factores de variación: Riego (R), Defoliación (D), Tiempo (T), Precipitación (Pp) y sus interacciones. (ns: no significativo) y (“-” indica
4 que el termino fue removido del modelo debido a que no fue significativo).

5

| Especies | Factores | <u>Crecimiento en Altura</u> | | | <u>Crecimiento en Diámetro</u> | | | <u>Crecimiento en Copa</u> | | | <u>Producción de Biomasa</u> | | |
|------------------------|----------|------------------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|----------------------------|-------|--------|------------------------------|-------|--------|
| | | gl | F | P | gl | F | P | gl | F | P | gl | F | P |
| <i>G. sepium</i> | R | 1 | 13.32 | <0.05 | 1 | 6.95 | <0.001 | - | - | - | - | - | - |
| | D | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 4.26 | <0.05 |
| | T | 1 | 330.56 | <0.001 | 1 | 46.62 | <0.001 | 1 | 18.22 | <0.001 | 1 | 49.65 | <0.001 |
| | Pp | 1 | 66.53 | <0.001 | - | - | - | 1 | 5.56 | <0.05 | - | - | - |
| <i>L. leucocephala</i> | R | 1 | 0.33 | ns | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | D | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 14.97 | <0.001 |
| | T | 1 | 124.43 | <0.001 | 1 | 121.68 | <0.001 | 1 | 17.12 | <0.001 | 1 | 45.42 | <0.001 |
| | Pp | 1 | 0.03 | ns | 1 | 14.57 | <0.001 | 1 | 19.26 | <0.001 | - | - | - |
| | R:Pp | 1 | 5.19 | <0.05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | R:T:Pp | 2 | 4.64 | <0.05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | T:Pp | - | - | - | - | - | - | 1 | 18.69 | <0.001 | - | - | - |
| <i>M. olefiera</i> | R | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | D | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | <0.05 |
| | T | 1 | 113.15 | <0.001 | 1 | 82.1 | <0.001 | 1 | 11.15 | <0.001 | 1 | 3.46 | <0.05 |
| | Pp | 1 | 2.38 | ns | 1 | 5.47 | <0.05 | - | - | - | - | - | - |
| | T:Pp | 1 | 4.52 | <0.05 | 1 | 6.91 | <0.01 | - | - | - | - | - | - |

6

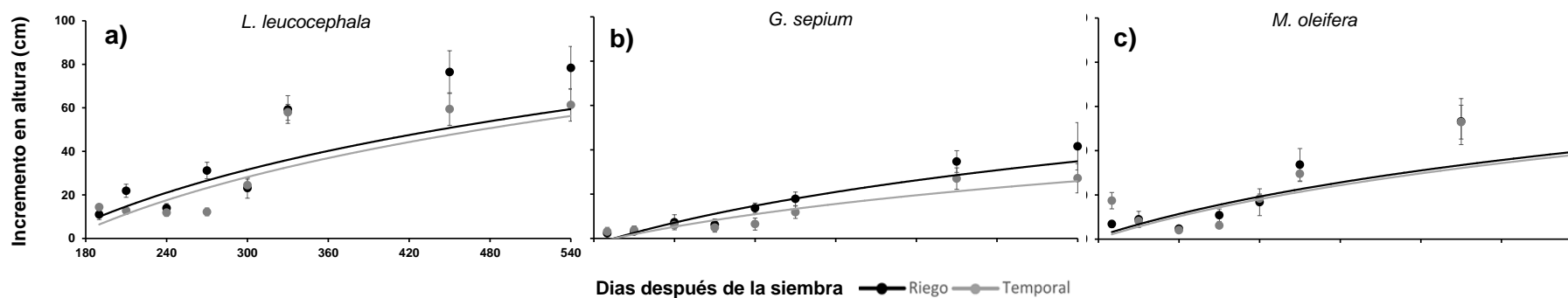


Figura 2. Incremento en altura (cm) para **a)** *G. sepium*, **b)** *L. leucocephala* y **c)** *M. oleifera* durante el periodo de aplicación de tratamientos. La línea de tendencia indica la predicción obtenida con base en el modelo lineal mixto.

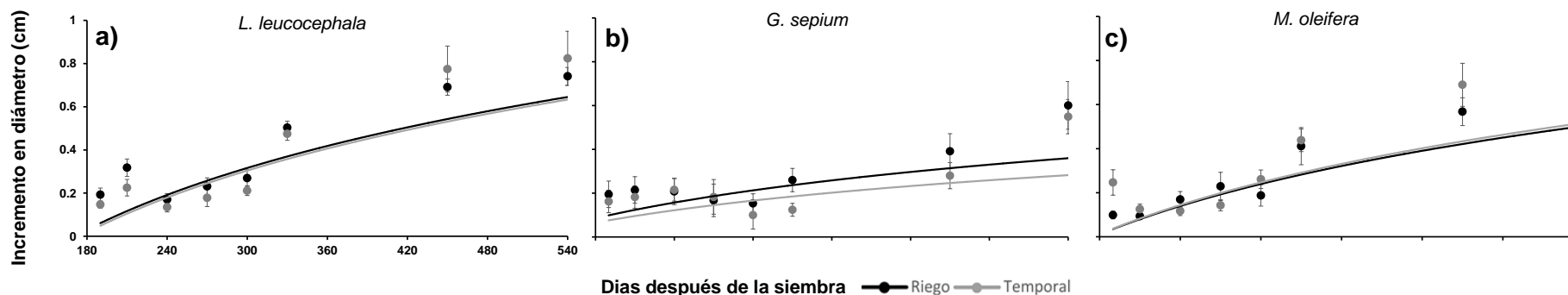


Figura 3. Incremento en diámetro (cm) para **a)** *G. sepium*, **b)** *L. leucocephala* y **c)** *M. oleifera* durante el periodo de aplicación de tratamientos. La línea de tendencia indica la predicción obtenida con base en el modelo lineal mixto.

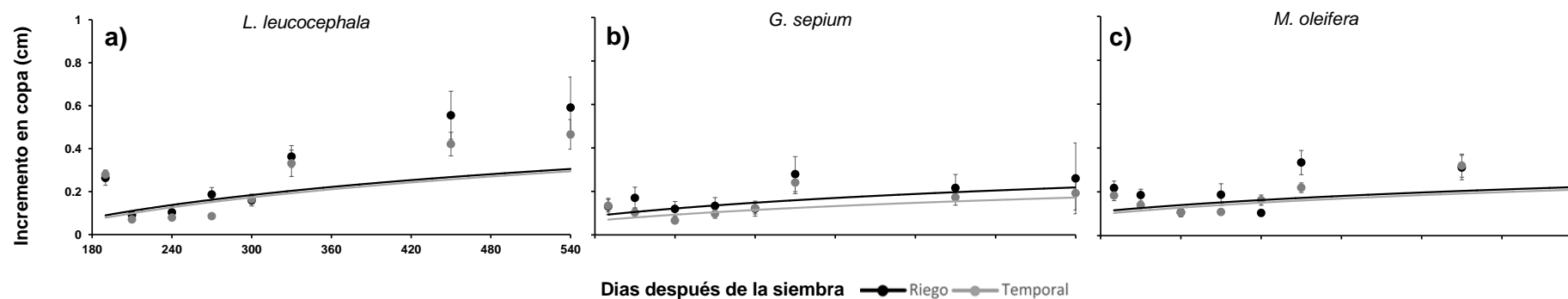


Figura 4. Incremento en copa (cm) para **a)** *G. sepium*, **b)** *L. leucocephala* y **c)** *M. oleifera* durante el periodo de aplicación de tratamientos. La línea de tendencia indica la predicción obtenida con base en el modelo lineal mixto.

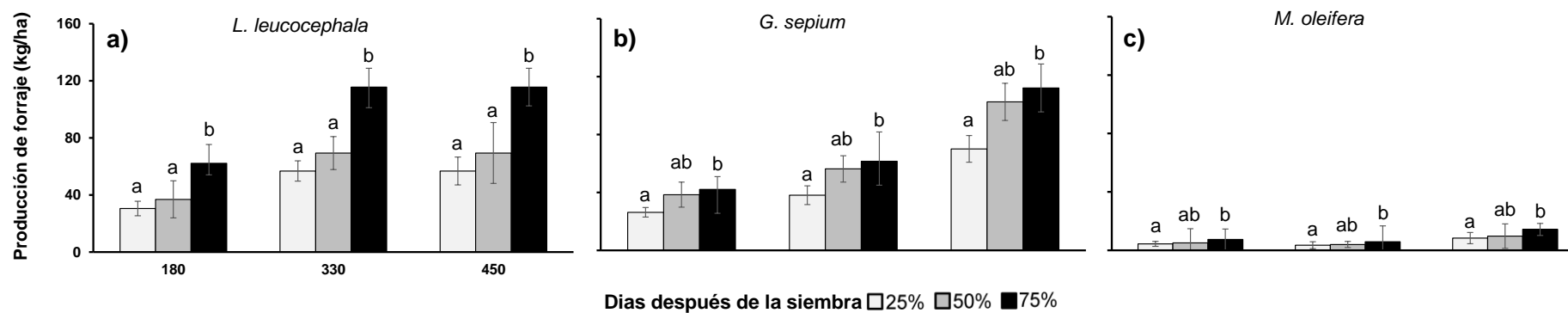


Figura 5. Producción de biomasa cosechada (kg/ha) para **a)** *G. sepium*, **b)** *L. leucocephala* y **c)** *M. oleifera* durante el periodo de aplicación de los tratamientos de defoliación.

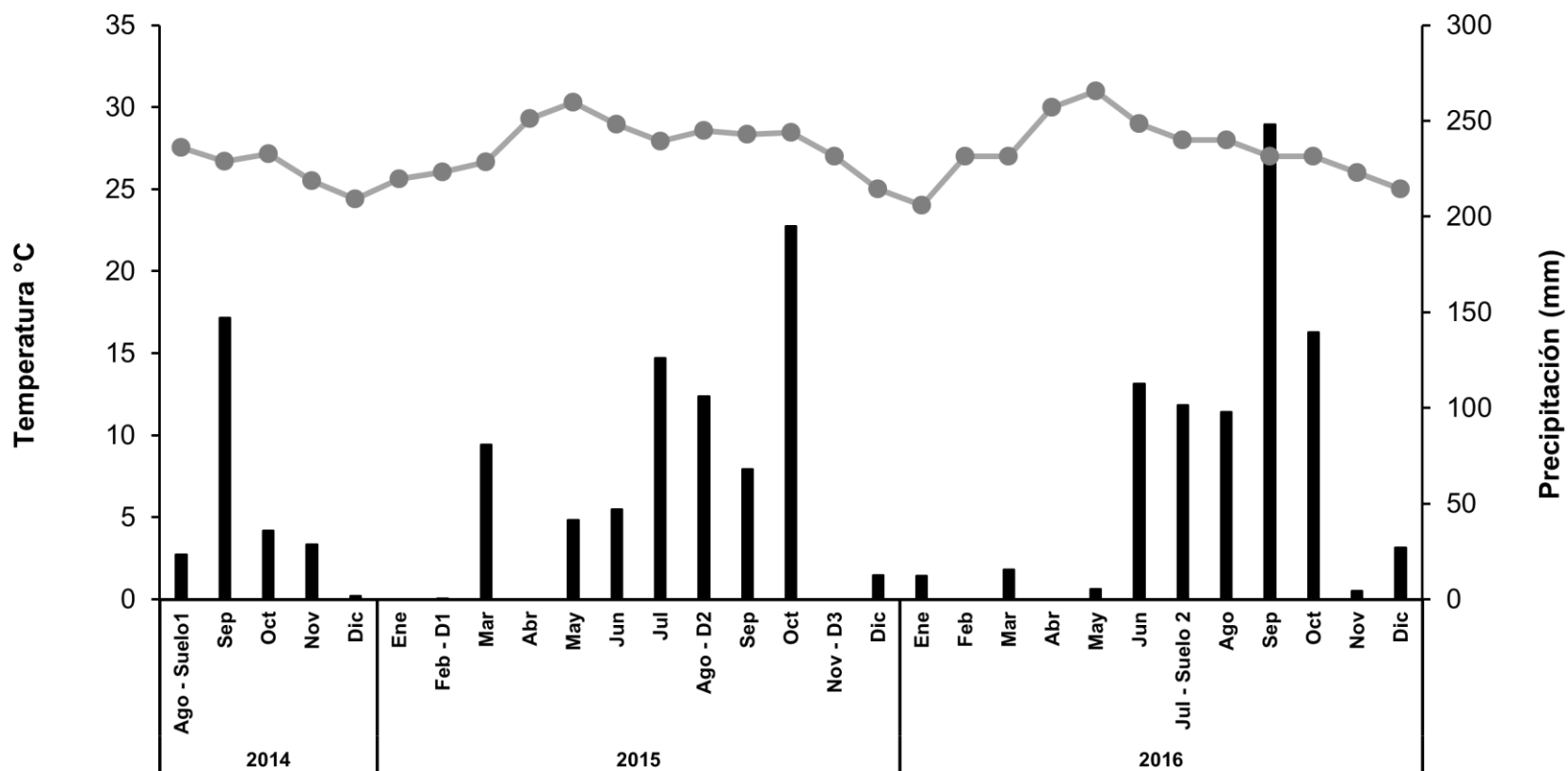


Figura 6. Climograma de la zona de estudio durante el experimento, se muestran los meses en que se realizaron las tres defoliaciones mediante las letras D1, D2 y D3, así como los dos muestreos de suelo.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican diferencias importantes entre las especies y fue *Leucaena leucocephala* la que presentó un mayor crecimiento durante el periodo de establecimiento. Esto es importante, ya que el tiempo de establecimiento es un parámetro indispensable al elegir e identificar las mejores especies para sistemas silvopastoriles, pues los productores prefieren especies de fácil establecimiento y rápido crecimiento para poder iniciar con su manejo agronómico (Anguiano et al., 2012; Hernández et al., 1998; Pérez Guerrero, 1979). Aunque *Moringa oleifera* presentó una tasa de crecimiento menor y *Gliricidia sepium* incluso disminuyó su tasa a lo largo de este periodo, pueden considerarse buenas especies ya que al finalizar la etapa de establecimiento, ambas especies alcanzaron alturas de 0.5-1.0 m, que según estudios previos representan una altura mínima para iniciar un manejo silvopastoril (López et al., 2006; Murgueitio et al., 2006; Reyes-Sánchez, 2004).

De las cuatro especies de estudio *Guazuma ulmifolia*, presentó crecimiento y germinación muy bajos, por lo que se considera que no es una especie adecuada para sistemas silvopastoriles bajo siembra directa y a altas densidades de siembra. Esta especie ha sido probada en otros estudios utilizando tratamientos pregerminativos y cuidados en vivero durante los primeros meses de vida (López et al., 2006; Manríquez-Mendoza et al., 2011). Sin embargo, *G. ulmifolia* es muy apreciada por los productores, ya que se desarrolla bien en sitios con limitaciones de nutrientes y agua. Además el ganado la consume muy bien, contiene buenos contenidos proteicos, presenta altos rendimientos en biomasa y responde bien a podas intensas y frecuentes (Barrance et al., 2003; Manríquez-

Mendoza et al., 2011). Finalmente, también es una especie multipropósito ya que puede usarse para postes, cercas vivo, e incluso en la construcción (Medina, 1991; Ortega-Vargas et al., 2013; Palma, 2006). Es probable que el mejor manejo sea en vegetación natural, pues es abundante en sitios de vegetación secundaria y estos parches podrían ser manejados para el pastoreo (Bautista-Tolentino et al., 2011; Lizarraga-Sánchez, 2000).

RIEGO Y DEFOLIACIÓN

En ambientes secos la escasez de agua representa un factor limitante para el crecimiento de las plantas (Medrano et al., 2007). Se sabe que especies del trópico seco, presentan adaptaciones como raíces profundas o reasignación de recursos bajo condiciones de estrés (Reynolds et al., 2004; Schwinning et al., 2004). Por otro lado, la poda o defoliación afecta a las plantas, ya que pierden área foliar que es de donde obtienen recursos y energía. Sin embargo, hay algunas plantas que pueden soportar altos niveles de defoliación mediante procesos fisiológicos de compensación, como aumentar la fotosíntesis, mover reservas y reasignar recursos (Anten et al., 2003; Lopez-Toledo et al., 2012; Martínez-Ramos et al., 2009).

La resistencia de algunas especies a ambos factores depende de las adaptaciones que presenten y de la intensidad con que se apliquen.

Para el caso de las tres especies estudiadas bajo estos dos factores, se encontró que soportan altos niveles de poda en condiciones de temporal y con tiempos de recuperación de seis y tres meses entre podas. El tiempo de espera entre cada poda es de gran importancia, algunos estudios en trópico húmedo mencionan

que la frecuencia de poda tiene mayor efecto sobre el rendimiento de biomasa que la altura (Benavides, 1995).

Benavides (1995) recomienda para *Morus alba* intervalos de poda cada tres meses en zonas húmedas y cada cuatro meses en zonas secas. Sin embargo, otros estudios donde se evaluó el tiempo de recuperación para *L. leucocephala* y *G. sepium*, mencionan que la primera necesita al menos cinco meses de recuperación, mientras que la segunda solo tres. Así mismo menciona que es ideal realizar la poda durante la época seca ya que las concentraciones de carbohidratos son más altas (Latt et al., 2000).

Para *M. oleifera* Pérez (2010) sugiere podas cada tres meses cortando desde el tallo principal a unos 80 cm de altura, esto evita el crecimiento inapropiado y lignificación. Por otro lado en el presente estudio se permitió una recuperación de seis y tres meses, en ambos lapsos de tiempo *M. oleifera* no presentó buena producción de biomasa, probablemente por la sequía o alguna deficiencia nutricional.

Otros autores mencionan que ampliar mucho el tiempo de poda puede llegar a formar mucho tejido leñoso y dar más crecimiento en altura que producción de forraje (Hernández et al, 1998). Por lo tanto, es importante determinar el momento preciso para dicho manejo. De igual forma, algunos estudios en trópico húmedo incluso han identificado que al podar los árboles al final de la época lluviosa, aumenta la producción de biomasa comestible en los meses secos (Hernández, 1988), evitando así que destinen sus recursos a floración y reproducción, concentrándose solo en producción de follaje o biomasa comestible para el ganado.

En cuanto a la intensidad de la poda, en nuestro estudio no se encontraron diferencias entre los tratamientos de defoliación. Sin embargo, otros estudios en *L. leucocephala*, han evaluado podas a distintas alturas, en las que se corta todo el follaje disponible y que por lo tanto podría ser un indicador del porcentaje de pérdida de área foliar. Estos estudios indican una relación negativa entre la pérdida de follaje y la recuperación, medida como producción de rebrotes (Bacab et al., 2012).

Por otra parte, en la presente tesis, únicamente se encontraron diferencias en crecimiento en altura y diámetro para *G. sepium*. Un estudio en el trópico seco en Zulia, Venezuela, evaluó cuatro frecuencias de riego sobre la producción de materia seca total en *L. leucocephala*. En ese estudio, se encontró, respecto al control que el riego aumentó la producción de forraje en 51.8% y 43.6% para frecuencias de 7 y 14 días, respectivamente (González et al., 2003). Sin embargo, como ya se mencionó, durante el presente experimento no se tuvo una época típica de sequía. Se cree que esto pudo influir sobre las diferencias esperadas en la aplicación de riego.

En cuanto a la producción de biomasa se observó que el aumento en el número de podas se refleja en una mayor producción de biomasa de forma general para las tres especies, al menos hasta en tres ocasiones en que se realizó.

Así, *L. leucocephala* presentó la mayor producción de biomasa, seguida muy cerca por *G. sepium*. Obteniendo un total de 226.29 y 208.05 KgMS/ha al año respectivamente, esto como suma total de las tres cosechas realizadas y los distintos niveles de poda.

Los rendimientos obtenidos parecen ser bajos al comparar con un estudio en *L. leucocephala*, en la que se obtuvieron entre 510 y 1360 kg MS/ha para distintas intensidades de poda (Bacab et al., 2012). Esto se podría deberse a la edad de las plantas, el manejo e incluso la temporada de cosecha y condiciones ambientales. De igual forma un estudio con *G. sepium* en densidad de siembra igual a la utilizada en nuestro experimento reportó una producción de biomasa de 521 ± 68 kg MS /Ha (Palma, 1997). Sin embargo esto se realizó en Colima, donde las condiciones de humedad y precipitación son mayores a nuestro sitio de estudio.

M. oleifera estuvo muy por debajo en este aspecto con tan solo 46.51 kg MS/año. Siendo este el factor más importante en los sistemas silvopastoriles, bajo las condiciones experimentadas, descartaríamos el uso de dicha especie.

Sin embargo *M. oleifera* es una importante fuente de alimento animal debido a sus altos contenidos proteicos y vitamínicos (Foild et al., 1999; Garavito, 2008). Incluso ha sido recomendada en sistemas silvopastoriles por su rápido crecimiento y alto contenido proteico (Garavito, 2008). Es importante destacar que *M. oleifera* es resistente a la sequía, pero en condiciones de estrés hídrico, es poco productiva e incluso pierde su follaje (Perez et al., 2010; Ramachandran et al., 1980; Reyes-Sánchez, 2004). En Sinaloa, con sistema de riego ha reportado una producción de hasta 210 t MF/ha al año con una densidad de siembra de un millón de plantas por hectárea. (Pérez et al, 2010).

CONCLUSIONES

Durante el periodo de establecimiento *Leucaena leucocephala* fue la especie que creció más rápido tanto en altura como en diámetro, por lo que sigue siendo la especie líder para esta zona. *Guazuma ulmifolia* no presentó buena germinación y tuvo poco crecimiento bajo el sistema de siembra directa, por lo que se descartó de la segunda parte del experimento.

Posteriormente al aplicar los tratamientos de riego y defoliación, se observó que solo *Gliricidia sepium* presentó diferencias entre los niveles de riego, para el crecimiento en altura y diámetro.

L. leucocephala creció más que las otras especies en todas las variables de crecimiento y finalmente *M. oleífera* en general presentó buenas tasas de crecimiento en cuanto a diámetro y altura.

En cuanto a la producción de biomasa se observó que, conforme aumentaron las podas, los árboles respondieron produciendo mayor forraje y *L. leucocephala* dio la mayor producción de biomasa, seguida por *G. sepium* y finalmente *M. oleífera*.

Es importante mencionar que no se tuvo un marcado periodo de sequía durante el experimento y que con tres podas consecutivas y con tiempos de recuperación de seis y tres meses, las especies no se vieron afectadas ni disminuyeron su producción de forraje.

De forma general se puede decir que las especies más adecuadas para implementar sistemas silvopastoriles en el trópico seco michoacano y más

específicamente en la zona de Apatzingán, son *L. leucocephala* y *G. sepium*. Debido q su buen establecimiento, rápido crecimiento y producción de biomasa.

En cuanto a la aplicación de riego, las plantas presentaron buen crecimiento y producción de forraje bajo temporal, por lo que se recomendaría la aplicación de riego solo durante el establecimiento y algunos riegos durante los meses más áridos. Sin embargo es muy importante resaltar que durante el periodo del presente trabajo, hubo presencia de grandes lluvias atípicas en la zona e incluso el paso del huracán patricia.

Finalmente los intervalos de poda o pastoreo no se han estandarizado, pero se necesitan periodos de descanso de mínimo tres meses para permitir que las especies se recuperen, así mismo el aplicar riego mejora la producción. También es importante el podar desde el tronco evitando así la lignificación y mejorar la calidad de forraje y la ramificación. En cuanto a la productividad, se menciona que el rendimiento depende en gran parte de los factores ambientales, la fertilidad del suelo, la precipitación y el manejo agronómico.

El Sistema silvopastoril es un sistema de producción pecuaria sustentable de gran importancia en la actualidad, ya que no es un sistema de alto consumo de agroquímicos, minimiza los costos de cultivo y ofrece el reducir el impacto de la ganadería sobre los ecosistemas (González, 2013; Mahecha, 2016). Por ello se debe seguir investigando a largo plazo la respuesta de estas especies, bajo las condiciones deseadas, a fin de poder definir más claramente los periodos ideales de corte y recuperación, así como la productividad y los costos asociados.

5. EFECTO DE LAS ESPECIES LEÑOSAS FORRAJERAS EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO



INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el cambio de uso de suelo en México se ha dado principalmente al convertir grandes áreas de bosque en pastizales y cultivos, ocasionando pérdida y fragmentación (Trejo y Dirzo, 2000). Velázquez et al. (2002) estimaron que el BTS pierde aproximadamente el 9% de su superficie para ser transformado a potrero y un 7% para cultivos, así mismo Trejo y Dirzo (2002) estimaron una tasa de deforestación anual del 1.4%, para su conversión a zonas agropecuarias. La intensificación de la ganadería ha contribuido significativamente al progreso económico y social, pero a expensas de un marcado deterioro de las condiciones ambientales.

De forma general, la disminución del componente arbóreo en las zonas ganaderas trae como consecuencia la reducción del reciclaje de los nutrientes y la disminución del área de sombra para el ganado, lo que produce condiciones ambientales adversas para el comportamiento animal y la fertilidad de los suelos, erosión, pérdida de biodiversidad, pérdida de materia orgánica, compactación, entre otros, provocando así el posterior abandono de tierras (Iriondo et al., 1998; Murguía-Flores et al., 2012; Nodari et al., 2001; Rendón-Carmona et al., 2013).

El suelo es una comunidad biológica muy compleja, alberga una gran biodiversidad, sobre todo de especies esenciales en procesos como descomposición de materia orgánica, ciclaje de nutrientes, formación de la estructura del suelo y regulación de plagas (Pulleman et al., 2012). El suelo ofrece una gran cantidad de servicios ecosistémicos, como el mantenimiento de la fertilidad, la filtración y el depósito de agua como parte del ciclo hidrológico,

regulación del clima, fuente de materiales, estructura y hábitat para la biodiversidad, entre otros (Dominati et al., 2010).

Los sistemas silvopastoriles y en general la incorporación de árboles y arbustos en los potreros, han surgido como una alternativa para la producción sustentable de ganado y han demostrado ser una herramienta efectiva en el mejoramiento y la recuperación de suelos dañados (Botero y Russo., 1996; Murguía-Flores., 2012; Nodari et al., 2001). Esto se debe principalmente a la incorporación de nutrientes mediante la biomasa de los árboles y la hojarasca. Así mismo, la incorporación de árboles tiene como objetivo generar sombra y alimento para el ganado, así como un sistema radicular más profundo, mejorando la capacidad de infiltración del suelo (Gutiérrez et al., 2012).

Además, los arboles tienen la capacidad de aprovechar los nutrientes de las capas más profundas del suelo y por efecto del reciclaje los hacen disponibles para los pastos (Alfaro, 2006; Rey Obando, 2006; Ruiz et al., 2010). También se ha demostrado que la presencia de árboles en pastizales, mejora el microclima, lo cual favorece la actividad biológica de micro y macro fauna (Sánchez et al., 2013). Especialmente se ha apreciado mayor actividad en bacterias y hongos micorrizógenos, lo cual se traduce en mayor movilización, mineralización y disponibilidad de algunos nutrientes en el suelo como el P y K (Mahecha, 2016; Sadeghian et al., 1998).

Por otro lado, en suelos semiáridos el establecimiento de cobertura vegetal es muy importante para evitar desertificación y degradación. Se demostró que algunas especies pueden aumentar el contenido total de carbono orgánico hasta en un 200%, y cerca de un 40% la biomasa microbiana y la

respiración respecto al testigo, a seis años del establecimiento (Garcia et al., 2005).

Estos efectos han sido documentados sobre todo en especies con sistemas radiculares profundos y en gran parte en especies leguminosas se han demostrado cambios significativos, al tener la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (Ovalle y Avedaño, 1984; Rey Obando, 2006).

Así mismo, se han comprobado los efectos benéficos propiciados por esta interacción, principalmente en aumentos en materia orgánica, N, C, P, K, Ca, Mg y pH, en donde los sistemas silvopastoriles mejoran notablemente, con respecto a los monocultivos de gramíneas (Bugarín et al., 2010; Cairo et al., 2008; Crespo, 2008).

Además, algunos autores mencionan que el flujo de nutrientes de un ecosistema y la energía pueden ser afectados por las especies presentes, es decir, en un mismo bosque o agroecosistema gran parte de la variabilidad espacial y las propiedades físicas y químicas del suelo, pueden ser atribuidas a la distribución de las especies (Vitousek y Hooper 1993; Hobbie et al. 1999; Van de krift et al. 2001; Franke et al., 2011).

Debido a lo anterior consideramos de gran importancia estudiar los efectos de la introducción de árboles forrajeros, así como otros factores asociados al manejo, como riego, defoliación, fertilización, carga animal, entre otros, sobre el suelo.

OBJETIVOS

GENERAL

- Determinar el efecto de la introducción de especies leñosas forrajeras en combinación con dos prácticas de manejo, el riego y la defoliación, en las propiedades del suelo con el fin de contribuir con información básica en la búsqueda de sistemas silvopastoriles sustentables para los trópicos secos de México.

ESPECÍFICO

- Evaluar el efecto de diferentes especies leñosas forrajeras y de los tratamientos de riego y defoliación en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo después de dos años de establecimiento de las especies.

HIPÓTESIS

Los factores riego, defoliación y especie (en especial las leguminosas *G. sepium* y *L. leucocephala*), afectarán las propiedades del suelo. Se espera que la integración de un sistema arbustivo diversifique los estratos de la parcela, produciendo sombra y recirculación de nutrientes a través de sus raíces. Por otro lado el riego dará la humedad y el medio necesario para movilización de nutrientes. Así mismo la defoliación dará pie a procesos fisiológicos en las plantas como almacenamiento de reservas en raíces.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en el INIFAP-Campo experimental Valle de Apatzingán, ubicado en el kilómetro 17.5 Carretera Apatzingán-Cuatro Caminos, con coordenadas 19° 24'23.59" N y 102° 0'47.91" W, municipio de Parácuaro, Michoacán. Este sitio presenta una altitud de 300 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido semiárido todo el año, clasificado como tropical con lluvias en verano (Aw). La temperatura media anual es de 28°C y la precipitación media anual es de 700 mm (INAFED, 2010).

El suelo está clasificado por la FAO como vertisol, se caracteriza por tener color negro y presentar alto contenido de arcilla expansiva conocida como montmorillonita, su textura es arcillosa. La vegetación nativa se encuentra dominada por Bosque Tropical Caducifolio y Bosque Tropical Espinoso. Gran parte del terreno ha sido modificada para la siembra de cítricos y otros árboles frutales que se cultivan en la zona (Mellado-Vázquez et al., 2005).

DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño experimental factorial en cuatro parcelas divididas en bloques al azar con tres factores 1) Especies (4), 2) Riego (2) y 3), Defoliación (3) con el fin de evaluar sus efectos sobre las propiedades del suelo. Esto dio un total de 24 tratamientos con 4 repeticiones (una en cada bloque), para un total de 96 unidades experimentales cada una de 3 metros por 5 metros dando como total 15 m².

Antes de iniciar el experimento se preparó el terreno mediante arado y surcado. Para *Leucaena leucocephala* se realizó tratamiento de escarificación (Anguiano et al., 2012). Posteriormente, se cercó el terreno con una malla plástica para evitar la entrada de roedores y se instaló un sistema de riego por goteo (García-Casillas, 1997). Se utilizó una densidad de siembra de 40,000 plantas/hectárea, con surcos de 1.8 metros y una distancia entre plantas de 15 cm. Al mismo tiempo se asoció pasto guinea (*Megathyrsus maximum*) mediante siembra por voleo a una densidad de 25 kg de semilla por hectárea en toda la superficie del experimento, como se acostumbra en los sistemas silvopastoriles.

El experimento se estableció en el INIFAP, campo experimental valle de Apatzingán, en una parcela de 90 por 30 metros la cual anteriormente había sido utilizada para la siembra de sorgo y maíz. Antes de iniciar el experimento se preparó el terreno mediante arado y surcado, esto en agosto de 2014. Posteriormente se realizó la siembra y se cercó el terreno con una malla plástica para evitar la entrada de roedores, finalmente se instaló un sistema de riego por goteo.

Antes de realizar la siembra, ya con las unidades experimentales ubicadas se tomó la primera muestra de suelo en el tiempo cero (Agosto 2014). Se tomó una muestra por cada unidad experimental en cada periodo de muestreo.

Las muestras se tomaron con cilindros metálicos, los cuales fueron enterrados (con ayuda de un marro) a 10 cm de profundidad en el suelo para obtener un pequeño perfil. Se colocó un tubo de PVC en cada UE el punto exacto de muestreo como marca, con el fin de realizar el segundo muestreo en el mismo punto para reducir la variación espacial. Las muestras se guardaron en bolsas herméticas y se refrigeraron inmediatamente para su conservación.

Posteriormente se realizó la separación y procesamiento de cada una de ellas según el análisis deseado. Las muestras fueron procesadas en los Laboratorios de Agroecología, Suelos Sustentables y Química Analítica y Metabólica del IIES-UNAM, Campus Morelia.

ESPECIES DE ESTUDIO

Las especies seleccionadas fueron *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Moringa oleífera* y *Megathyrsus maximus*. Las primeras tres representan plantas leñosas de rápido crecimiento, nativas de zonas tropicales, con un alto contenido proteico y de alto interés para los productores, mientras que la última es un pasto rizomatoso perenne, muy utilizado en ganadería, el cual se utilizó como testigo, para evaluar las diferencias entre monocultivos de pasturas y la combinación del pasto con cada especie de árbol forrajero. Estas especies son utilizadas localmente, sin embargo existe poca información sobre su impacto en las propiedades del suelo.

RIEGO

Se evaluaron dos niveles de riego 1) Riego (el agua de lluvia más cuatro horas de riego por semana) y 2) Temporal (Solo el agua de lluvia). Los riegos se comenzaron a aplicar a partir del viernes seis de febrero del 2015 y se continuaron de forma semanal hasta el 26 de febrero de 2016, excepto en marzo de 2015 y de julio a octubre de 2016, pues la precipitación fue muy alta en la zona de estudio. La diferencia de humedad entre los tratamientos de riego y temporal fue de 20% en promedio. Así mismo es importante mencionar que el suelo presento una capacidad de campo del 50% por su alto contenido en arcillas.

DEFOLIACIÓN

Se utilizaron tres niveles de defoliación que correspondieron al 25, 50 y 75% de hojas y tallos tiernos. Este porcentaje se consiguió mediante la medición de cada individuo y en base a su altura y cobertura de copa se cortaron las proporciones de cada tratamiento, eligiendo ramas tanto de la base, como del centro y la copa para tratar de homogenizar la poda. Las defoliaciones se realizaron en los meses de febrero, agosto y noviembre de 2016.

DETERMINACIONES DE LABORATORIO

Se determinaron las propiedades:

- **FÍSICAS:** Agregados estables en agua con dos tamaños; Macroagregados (0.25-1mm), macroagregados (>1mm) y capacidad de campo.
- **QUÍMICAS:** pH y nutrientes disponibles (Ortofosfatos, nitratos, amonio)
- **BIOLÓGICAS:** Materia orgánica

PROPIEDADES FÍSICAS

Agregados estables en agua, sin arena: Se utilizó el método de Angers (2006) modificado por Hallet et al., (2009) para cuantificar las fracciones de macroagregados estables del suelo.

Capacidad de campo: Se utilizaron tubos de ensayo plásticos, cortando la parte inferior, se puso una malla en la parte baja para no perder el suelo. Los tubos se llenaron de suelo y se agregó agua destilada hasta saturar la muestra, posteriormente se dejó drenar por 24 horas. Se sacó el suelo de la parte superior

de la columna y se tomó la muestra en la porción del centro. Se registró su peso húmedo y posteriormente se secó en horno a 80°C por 24 horas. La capacidad de campo se calculó mediante una relación entre el peso húmedo y el seco.

PROPIEDADES QUÍMICAS

pH: Para la medición de pH se colocaron 5 gramos de suelo y 50 mililitros de agua desionizada en un recipiente con tapa de rosca. Los recipientes se agitaron por 30 minutos a 200 rpm, se dejaron reposar por una hora y finalmente se midió el pH de la solución con un potenciómetro Accumet AB15 pH Meter Fisher Scientific.

Nitratos, Amonio: Se pesaron 10 g de suelo en un vial, se agregaron 50 ml de KCL 2N y se agitaron los viales por 30 minutos. El contenido se filtró a través de un papel Whatman No. 1 y se recuperó en viales de plástico que se congelaron hasta realizar las lecturas en un autoanalizador Bran-Luebbe Auto Analyzer III, siguiendo el método No. 696-82W; (Technicon Industrial System, 1997). El N disponible total se obtuvo sumando los valores de los nitratos y el amonio.

Ortofosfatos: Se pesaron 3 gr de suelo en un vial, se les agregó 30 ml de la solución extractora de Mehlich III (Mehlich, 1984) y se agitaron los viales por 30 minutos. El extracto obtenido se filtró a través de un papel Whatman No. 42. Los extractos obtenidos de las muestras se guardaron en tubos de ensayo con tapa rosca, se congelaron hasta su lectura en un autoanalizador Bran-Luebbe Auto Analyzer III, por el método colorimétrico de molibdato después de una reducción con ácido ascórbico (Technicon Industrial System, 1997).

PROPIEDADES BIOLÓGICAS

Materia orgánica: Para la determinación del porcentaje de materia orgánica se molió el suelo hasta convertirlo en un polvo fino y se utilizó el método de combustión húmeda de Walkley y Black (1946), el cual se basa en la oxidación de las formas activas de carbono orgánico en el suelo.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Este análisis se utilizó para identificar diferencias en las propiedades del suelo entre los tratamientos de riego, defoliación y la interacción con las especies. Se utilizó el delta de los datos obtenidos entre el tiempo cero y los 24 meses en cada unidad experimental, de modo que correspondieran a la misma zona de muestreo, para realizar los análisis. Esto se realizó mediante modelos lineales mixtos (MLM). Se analizaron nueve variables respuesta: macroagregados pequeños, macroagregados grandes, Capacidad de campo, Amonio, Nitratos, N disponible total, Ortofosfatos, pH y MO. Las variables fijas fueron riego (R), defoliación (D), y especie (Sp), así como la interacción entre ellas. Además se agregaron como covariables la cobertura de leñosas y de herbáceas de cada unidad experimental. Se incluyó el diseño en bloques al azar como un factor aleatorio.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el paquete *lme4* versión 1.0-4 (Pinheiro y Bates, 2000) en el Programa R ver. 3.1.1, Development Core Team (J. Pinheiro et al., 2015). Para esto, primeramente se realizaron los modelos saturados, incluyendo todos los términos e interacciones de los factores fijos. La simplificación del modelo estuvo basada en remover secuencialmente los términos fijos (factores/interacciones) no significativos (Crawley, 2012;

Pinheiro y Bates., 2000). El modelo presentado para cada análisis consiste únicamente de términos significativos. Para probar el efecto de la remoción de factores/interacciones y evaluar la significancia de los términos en el modelo se utilizó la función *anova* () que realiza una prueba de máxima verosimilitud (*maximum likelihood ratio test*) en la que se compara el ajuste de un *modelo1* que contiene el término de interés, respecto a un *modelo2* (Crawley, 2012; Faraway, 2005; Pinheiro y Bates, 2000; West et al., 2014)

Análisis de componentes principales: Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para sintetizar la variación en los atributos del suelo y explorar su asociación con los factores puestos a prueba en el estudio: riego, defoliación y especies en los dos años de medición. Previo al análisis se estandarizaron todas las variables (media 0 y varianza 1). El análisis se realizó empleando la función “rda” de la librería “vegan” para R (Oksanen et al., 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La mayoría de las variables no presentó diferencias estadísticamente significativas al cabo de dos años, excepto N disponible, ortofosfatos y MO (cuadro 1). Solo se presentan las gráficas de las interacciones significativas.

Esto pudo deberse a que en el periodo evaluado no se presentó una típica época de sequía (ver capítulo 2, figura 6). Además, algunos procesos del suelo pueden tomar más tiempo en reflejar cambios (Astier-Calderón et al., 2002). Así mismo, el sitio de estudio presentó de inicio valores bajos en los nutrientes disponibles y una gran heterogeneidad, lo que podría estar enmascarando los efectos de las especies y los tratamientos.

Cuadro 1. Resultados de los modelos lineales mixtos (MLM) utilizados para evaluar el cambio en el tiempo ($\Delta 2014-2016$) sobre las variables del suelo evaluadas por los efectos del riego (R), la defoliación (D), y las especies vegetales introducidas (Sp). Se presenta el nivel de significancia obtenido en el modelo mixto: $P < 0.05$; ns – no significativo.

| | Factores | | | | | | |
|--------------------|----------|---------------------------------|----|---------------------------------|------|------|--------|
| | Sp | R | D | R:D | Sp:R | Sp:D | Sp:R:D |
| Agregados >1mm | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Agregados 0.25-1mm | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Capacidad de campo | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Amonio | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Nitratos | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| N total | ns | ns | ns | $p < 0.05$ | ns | ns | ns |
| Ortofosfatos | ns | $p < 0.05$ | ns | ns | ns | ns | ns |
| pH | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Materia orgánica | ns | ns | ns | $p < 0.05$ | ns | ns | ns |

Cuadro 2. Promedio de la proporción de cambio (%) de las propiedades del suelo entre los años evaluados y su error estándar (\pm), $n = 96$

| $\Delta 2014-2016$ | | |
|--------------------------------------|----------------------|-----------|
| variables | Proporción de cambio | Error std |
| Agregados >1mm | 0.16 | 0.8 |
| Agregados 0.25-1mm | 0.22 | 4.8 |
| Capacidad de campo | -0.10 | 2.4 |
| Amonio | 0.43 | 1.1 |
| Nitratos | -0.66 | 1.4 |
| N total | -0.26 | 1.5 |
| Ortofosfatos | -0.32 | 1.2 |
| pH | -0.08 | 0.2 |
| Materia orgánica | 0.48 | 0.2 |

PROPIEDADES FÍSICAS

Los macroagregados grandes presentaron una proporción de cambio del $16\% \pm 0.8$ (Cuadro 2) Sin embargo ninguno de los predictores explicó de manera significativa el cambio en estos (Cuadro 1). Por otro lado, el resumen del modelo indicó que el riego explicó el 21% de la variación de los datos y fue posible observar que en muchos de los tratamientos con presencia de riego aumentó la cantidad de macroagregados grandes.

En cuanto a los macroagregados pequeños, se observó un incremento del $21\% \pm 4.8$ (Cuadro 2) y los valores más altos se presentaron en los tratamientos de riego. Sin embargo el análisis indicó que ninguno de los predictores explicó de manera significativa el cambio (Cuadro 1). El resumen del modelo indicó que el bloque tuvo un efecto importante en la variación de los datos. De hecho explicó el 44% de la variación. Se cree que esto fue debido a que el bloque superior derecho o bloque número tres, presentó una acumulación mayor de agua en comparación con los otros, debido a un canal de riego subterráneo que pasaba cerca de él, y presento fuga constante de agua.

Aun cuando no se presentó una diferencia significativa entre los factores evaluados, el cambio promedio general en los agregados fue positivo. Esto indica que la cobertura vegetal establecida y la ausencia de labranza favorecieron la agregación del suelo. Un estudio similar encontró que los agregados estables en agua y la permeabilidad del suelo fueron mayores en los sistemas silvopastoriles que en un pastizal nativo en la profundidad de 0-20 cm (Cairo et al., 2008)

En cuanto a la capacidad de campo, los valores mostraron una tendencia a la disminución $-10.1 \pm 2.4\%$ (Cuadro 2), pero el análisis indicó que ninguno de

los predictores explicó de manera significativa el cambio (Cuadro 1). La variación en esta variable fue muy alta y cabe mencionar que, por la textura muy arcillosa del suelo, se forman terrones grandes y compactos lo que hace muy difícil empacar homogéneamente una columna. Esto pudo afectar el drenaje en las columnas y por ende algunas diferencias no estar relacionadas con los tratamientos.

PROPIEDADES QUÍMICAS

El amonio presentó de manera un incremento del $43 \pm 1.1\%$ (Cuadro 2). Se pudo observar una tendencia de mayor incremento en los tratamientos con riego pero el análisis estadístico mostró que ninguno de los predictores explicó de manera significativa el cambio (Cuadro 1). Por otro lado, el resumen del modelo indicó que el bloque tuvo un efecto importante en la variación de los datos, explicando el 22% de la variación residual del modelo. Nuevamente esto puede estar relacionado con las diferencias en la humedad del suelo entre los bloques.

En contraste, los nitratos presentaron tendencia a la disminución en todos los tratamientos, con una reducción promedio del $66.1\% \pm 1.4$ (Cuadro 2) Sin embargo, ninguno de los predictores explicó de forma significativa el cambio en esta variable (Cuadro 1). El resumen del modelo indicó que el bloque tuvo un efecto muy importante, al explicar el 43% de la variación residual del modelo.

El Nitrógeno disponible total (amonio+nitrato) presentó una reducción del $-26.1\% \pm 1.5$ (Cuadro 2). El análisis mostró una interacción riego x defoliación significativa para esta variable, las diferencias más marcadas fueron entre las defoliaciones D25 y D75 dentro del tratamiento de riego (Cuadro 1; Figura 1).

Esto es contrario a lo reportado en otros estudios. Machecha et al., 1999. Encontraron que el contenido de N disponible total fue mayor en sistemas silvopastoriles respecto al monocultivo de pastos. Así mismo Villanueva e Ibrahim en 2002, evaluaron propiedades del suelo como N total, secuestro de Carbono y densidad aparente entre SSP con distintas edades (0, 2, 3 y 4 años) y encontraron una relación positiva entre la edad de los árboles y el aumento en las variables evaluadas. Sin embargo cabe hacer notar que los niveles de nutrientes disponibles en la parcela fueron muy bajos desde un inicio (ver Anexo 1), a pesar de haber sido una parcela en uso agrícola, y el experimento no recibió ningún tipo de fertilización adicional. Por lo tanto, las especies se establecieron en condiciones de muy baja fertilidad y seguramente minaron los nutrientes existentes. El incremento en amonio podría indicar alguna incorporación de nitrógeno vía fijación libre, y/o fijación simbiótica en el caso de *Leucaena* y *Gliricidia*.

Los Ortofosfatos presentaron una reducción del $32.2 \pm 1.2\%$ (Cuadro 2) y un efecto significativo del riego que indica una reducción mayor en la cantidad de Ortofosfatos en temporal (Cuadro 1; Figura 2). Esto es contrario a lo observado un estudio realizado en Panamá con suelos de tipo ultisol que mostró un incremento en la concentración de P en el suelo, al comparar un monocultivo de *Brachiaria humidicola*, contra otro donde se incorporó *Acacia mangium*, y una mayor concentración de P en las pasturas con árboles. (Velasco et al., 1999). Nuevamente esto parece relacionado con el bajo contenido de P disponible desde el inicio. Dado que el P no ingresa prácticamente por vía atmosférica, en ausencia de fertilización su disponibilidad depende casi por completo del reciclaje del P orgánico. Este es un proceso lento que puede tomar varios años,

sobre todo si también está asociado a una baja disponibilidad de N que limita la actividad de los microbios involucrados en el reciclaje. Si esta limitación nutrimental se une a la baja disponibilidad de agua para la actividad microbiana, como es el caso del tratamiento de temporal, es previsible una reducción aún mayor, como la que se observó en este tratamiento.

Los resultados indicaron que el pH tuvo una tendencia a la reducción con cambio promedio de $-8.5 \pm 0.2\%$ (Cuadro 2). Sin embargo el análisis estadístico mostro que ninguno de los predictores explica de manera significativa el cambio (Cuadro 1). Es importante mencionar que la reducción observada, hace que el pH tienda hacia valores más neutros (bajo de 9.0 a 8.3 en promedio), seguramente relacionado con la ausencia de fertilización química y la acción de las especies introducidas. En un estudio en Brasil en suelos de tipo oxisol, posterior a la introducción de la leguminosa *Acacia mangium* en un pastizal de *Brachiaria decumbens* el pH tendió a la neutralidad pero en sentido contrario, al tratarse de suelos muy ácidos (Xavier et al., 2003). De igual forma , en Nayarit se evaluaron distintas combinaciones de especies para SSP y se encontró que el pH muestra una tendencia hacia la neutralidad, sin embargo este presenta cambios en el tiempo, valores más altos en secas y más bajos en lluvias (Bugarín et al., 2010). Por lo tanto, es importante en estudios posteriores tomar en cuenta la temporada de muestreo como factor.

PROPIEDADES BIOLÓGICAS

La materia orgánica presentó un incremento promedio del $48.1 \pm 0.2\%$ (Cuadro 2). Asimismo, el análisis estadístico mostró una interacción significativa Riego x Defoliación por las diferencias más marcadas entre D25 y D50 en

condición de temporal (Cuadro 1; Figura 3). Este aumento podría deberse a la incorporación gradual de nutrientes en el sistema suelo-pastizal, por medio de la hojarasca del estrato arbóreo o herbáceo (Crespo, 2008; Ovalle y Avedaño, 1984; Rey Obando, 2006). Esto coincide con lo encontrado en Brasil en un clima CWa y suelo oxisol, en donde la MO aumentó al introducir la especie *Acacia mangium* en un pastizal de *Brachiaria decumbens* (Xavier et al., 2003). Un estudio similar evaluó en Nayarit distintas combinaciones de especies para SSP y demostró que la MO disminuye durante los primeros seis meses, pero posteriormente tiende a incrementar (Bugarín et al., 2010). En Cuba la presencia de *L. leucocephala* en un pastizal de *Cynodon nlemfuensis*, tuvo como efecto incrementos notables y significativos en los contenidos de M.O y algunos nutrientes, esto tras 15 años de evaluación (Ruiz y Febles, 2001). De igual forma, en Cuba también se encontró que el contenido de MO aumentó en las asociaciones silvopastoriles al compararlas con el monocultivo después de más de diez años de manejo. Los mejores resultados los presentó el sistema que integra *L. leucocephala* y *M. maximum* (Hernández et al., 2008).

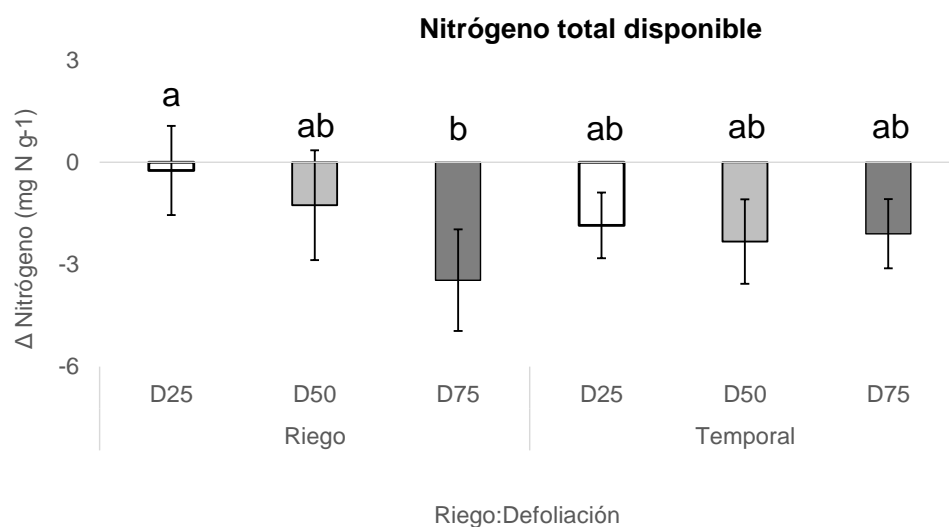


Figura 1. Efecto de la interacción riego: defoliación en el cambio del nitrógeno total disponible en suelo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

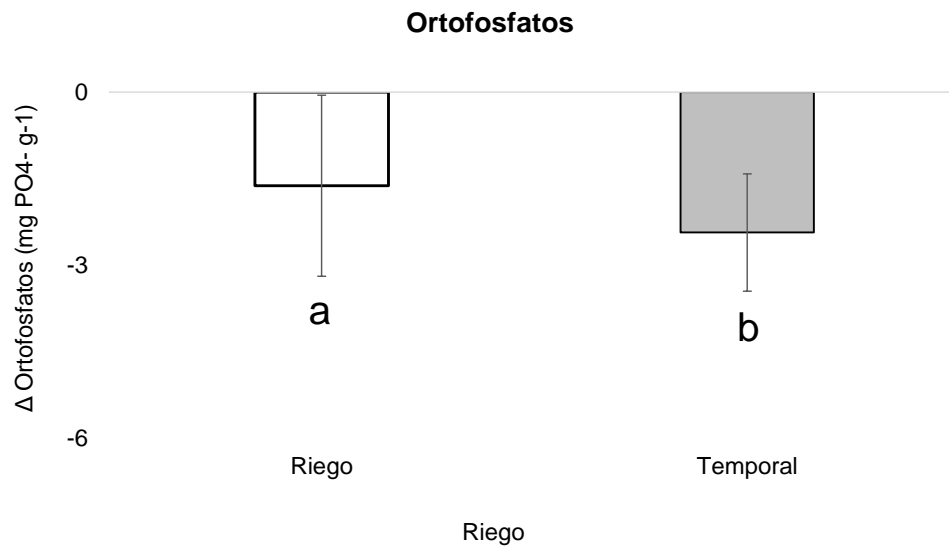


Figura 2. Efecto del riego en el cambio del contenido de ortofosfatos en suelo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

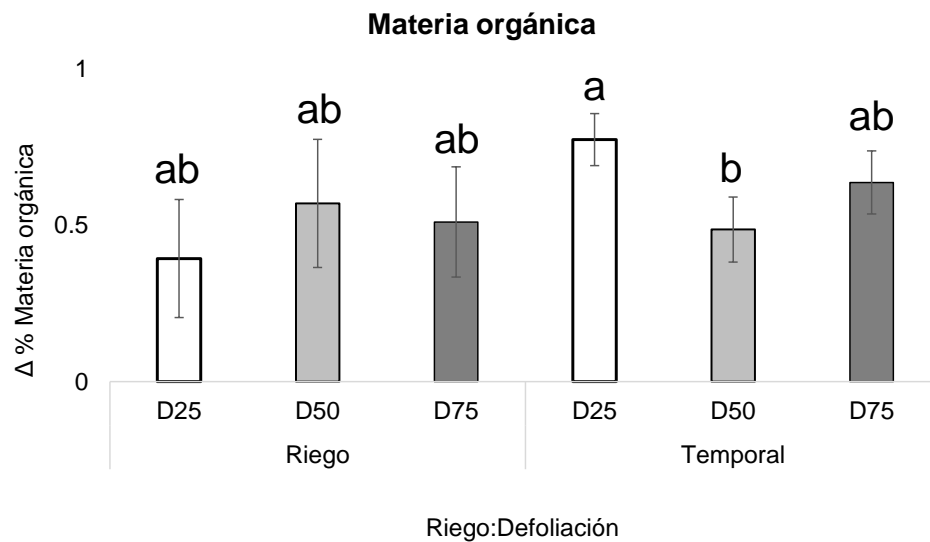


Figura 3. Efecto del riego y defoliación sobre el cambio en la materia orgánica del suelo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Los resultados del ACP no mostraron ningún patrón de diferenciación para los tratamientos de riego o de defoliación. Por lo tanto, se presenta un solo gráfico que integra a las especies y los valores iniciales y finales.

El análisis de componentes principales incluyendo las propiedades del suelo y la cobertura vegetal tanto leñosa como herbácea no mostró una relación importante de las variables medidas con los tratamientos aplicados pero sí mostró una separación muy clara entre los datos del 2014 y los del 2016 (Figura 4). Se requirieron cinco componentes para obtener un porcentaje de varianza explicada del 73.2%, sin embargo, sólo se han expresado gráficamente los primeros dos, que explican el 43.1% de la variación (Cuadro 3).

En el componente uno, en donde se separan de manera evidente los dos años de muestreo, las variables más importantes son los nitratos, el pH, la materia orgánica y los Ortofosfatos. La materia orgánica aumentó mientras que el pH, los ortofosfatos y nitratos disminuyeron entre 2014 y 2016. En el componente dos sobresalieron el amonio y el Nitrógeno disponible. Sin embargo en este componente no hubo separación evidente de grupos ni por especies, tratamientos de riego o defoliación (figura 4). Únicamente se aprecia que en la parte inferior predominan los puntos de *L. leucocephala*, pues este tratamiento se asoció con una mayor cobertura leñosa y valores más bajos de amonio y nitrógeno total, mientras que en la parte superior hay más abundancia de puntos de *M. maximus* (Figura 4).

De igual forma es importante mencionar que en los componentes 3 al 5 toman importancia los macroagregados grandes y chicos y la capacidad de campo del suelo (cuadro 3).

En otros estudio se menciona que la energía y el flujo de nutrientes de un pueden ser afectados por las especies presentes, es decir en un mismo bosque o agroecosistema gran parte de la variabilidad espacial y las propiedades del suelo, pueden ser atribuidas a la distribución de las especies (Vitousek y Hooper 1993; Hobbie et al. 1999; Van de krift et al. 2001; Franke et al., 2011). Hasta el momento, con las especies evaluadas y en el sitio de estudio no se pudo observar esta diferencia

Así mismo, algunos estudios (Cairo et al., 2008; Hernández et al., 2008; Oelbermann et al., 2006; Ruiz y Febles., 2001) comparan suelos de cinco, diez o más años que han estado bajo manejo silvopastoril y claramente se observa una mejora, respecto al tiempo inicial y entre las distintas especies, por lo que sería importante continuar con el manejo de este sitio y evaluarlo en un futuro. Es muy probable que los pocos cambios se deban a la baja fertilidad del suelo en el sitio de estudio porque en carencia de nutrientes todos los procesos se retardan. Otro punto a considerar en suelos tan pobres como el de este estudio es incluir un tratamiento de fertilización, idealmente con compostas que proveen liberación lenta de nutrientes, para ayudar al establecimiento de las especies

Cuadro 3. Varianza explicada por los primeros cinco componentes principales y valores de importancia para cada una de las variables de suelo evaluadas.

| Componentes principales | | | | | |
|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
| Variación explicada | 26.9% | 16.1% | 12.0% | 10.5% | 7.70% |
| Variación acumulada | 26.9% | 43.1% | 55.0% | 65.5% | 73.2% |
| Variables | | | | | |
| Agregados >1mm | -0.53 | -0.39 | 0.55 | 1.63 | -0.48 |
| Agregados 0.25-1mm | -0.79 | -0.13 | 1.29 | 0.91 | 0.24 |
| Capacidad de campo | 1.11 | -0.38 | 0.24 | -0.38 | -1.32 |
| Amonio | -0.61 | 1.49 | -0.84 | 0.72 | -0.91 |
| Nitratos | 1.79 | 0.64 | 0.08 | 0.21 | 0.93 |
| N total | 1.21 | 1.64 | -0.51 | 0.71 | 0.31 |
| Ortofosfatos | 1.34 | -0.39 | -0.6 | -0.04 | -0.38 |
| pH | 1.76 | -0.49 | 0.37 | 0.54 | -0.12 |
| Materia orgánica | -1.71 | 0.64 | -0.41 | -0.31 | 0.15 |

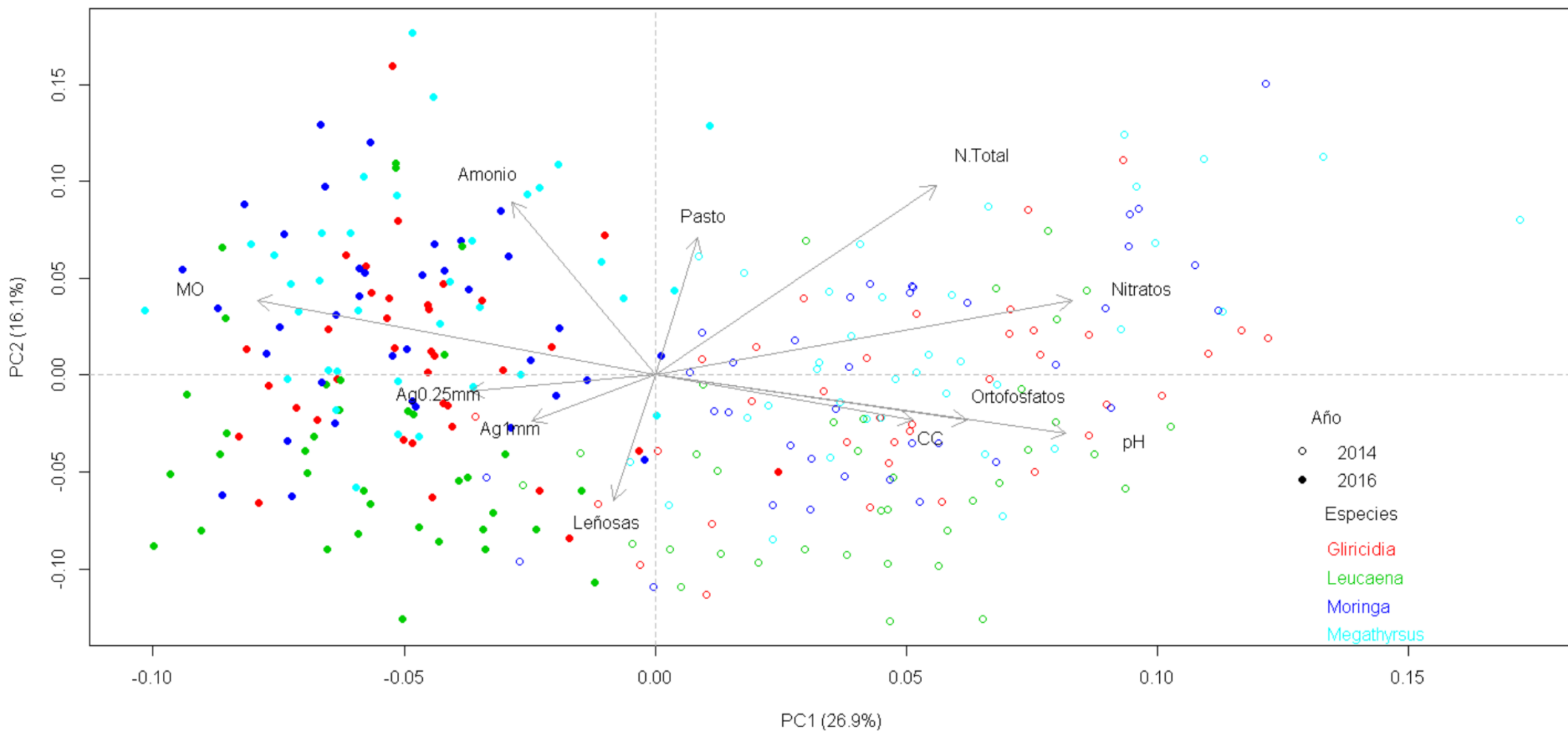


Figura 4. Análisis de componentes principales para las variables del suelo y las coberturas de leñosas y pasto

CONCLUSIONES

Solo se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para tres variables del suelo, las cuales son Ortofosfatos, Nitrógeno total disponible y Materia orgánica.

La única variable que presento cambios positivos y significativos fue la materia orgánica. El Nitrógeno total y los Ortofosfatos presentaron tendencia a la disminución.

Los agregados, el amonio y el pH aún al no presentar cambios significativos tendieron a mejorar notablemente. Mientras tanto, la capacidad de campo, los nitratos, el N total disponible y los ortofosfatos, presentaron tendencia a la disminución.

Es posible que algunos factores como el hecho de que se inició el experimento con un suelo pobre y no se aplicó ningún tipo de fertilización, pudo contribuir con los resultados obtenidos, diferentes a los esperados. Esto puede atribuirse a que las plantas tomaron nutrientes del sistema para iniciar su establecimiento y producción de forraje tendiendo a empobrecer el suelo y no se ha dado una reincorporación de nutrientes al suelo. Por lo tanto, es complicado definir de forma general la dirección de cambio en el suelo.

A diferencia de lo que mencionan varios autores como: Machecha et al., 1999; Oelbermann et al., 2006; Ovalle y Avedaño., 1984 y Ruiz y Febles., 2001 quienes han reportado aumentos en contenido de MO, C, N, P y K, en este estudio no fue posible observar mejoras en la mayoría de las variables evaluadas, probablemente se requiera más tiempo para que los nutrientes y la

hojarasca presente se reintegren al sistema y poder observar aumentos en algunas variables.

Una recomendación sería, realizar una previa evaluación de la calidad del suelo antes de introducir los árboles en potreros, y aplicar fertilización inicial en caso de ser requerida, Sin embargo, esto no se ha comprobado.

Finalmente, en este estudio no fue posible observar una mejora general en la mayoría de las propiedades del suelo, como se menciona en muchos estudios. Sin embargo, se considera importante realizar evaluaciones posteriores, pues varios procesos del suelo toman mucho tiempo en verse reflejados.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

L. leucocephala fue la especie con mayor crecimiento y producción de biomasa, seguida por *G. sepium*.

G. ulmifolia tuvo un crecimiento muy lento comparado con las otras especies y presentó bajas tasas de germinación, por lo que no se recomienda su uso bajo siembra directa. *M. oleifera* presentó un buen crecimiento, pero baja producción de biomasa.

Las especies no se vieron afectadas ni disminuyeron su producción de forraje con tres podas consecutivas de hasta un 75% de biomasa y con tiempos de recuperación de seis y tres meses, Incluso conforme aumentaron las podas, los árboles respondieron con mayor producción de forraje. Sin embargo, no se tuvo un marcado periodo de sequía durante el experimento, lo cual pudo estar relacionado con los resultados obtenidos.

En cuanto al suelo, sólo se encontraron diferencias significativas para tres variables: Ortofosfatos, Nitrógeno total disponible y MO. Los dos nutrientes disminuyeron y la MO aumentó en general pero en función del riego y la defoliación.

Cinco de nueve variables evaluadas presentaron una tendencia a la disminución, contrario a lo esperado (excepto en el caso del pH, en el que la disminución hacia la neutralidad se considera un efecto positivo). Las otras se relacionan con la baja fertilidad del suelo.

Es posible que algunos factores como el hecho de que se inició el experimento con un suelo pobre y no se aplicó ningún tipo de fertilización, pudo contribuir con los resultados obtenidos.

Por lo tanto, se recomienda evaluar la calidad del suelo antes de introducir los árboles en potreros, así como realizar una fertilización inicial en caso de ser requerida, al menos en el periodo de establecimiento.

Finalmente, varios estudios señalan la importancia de introducir árboles a los pastizales ganaderos, como una alternativa en la restauración, el mantenimiento y la sostenibilidad de los recursos naturales. Sin embargo en este estudio no fue posible observar esta mejora en la mayoría de las variables observadas. Se considera importante realizar evaluaciones posteriores, pues varios procesos del suelo toman mucho tiempo en verse reflejados.

LITERATURA CITADA

Alfaro, N.C. (2006). Rendimiento y uso potencial de Paraíso Blanco, *Moringa oleífera* Lam, en la producción de alimentos de alto valor nutritivo para su utilización en comunidades de alta vulnerabilidad alimenticia-nutricional de Guatemala. Presentado en Informe final, proyecto FODECYT, n° 26, Guatemala.

Almario, N. P., Ibrahim, M., Villanueva, C., Skarpe, C., & Guerin, H. (2013a). Diversidad forrajera tropical. Rasgos funcionales que determinan la calidad nutricional y preferencia de leñosas forrajeras para su inclusión en sistemas de alimentación ganadera en zonas secas. *Agroforestería en las Américas*, 1(50). Recuperado a partir de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RAFA/article/view/51>

Almario, N. P., Ibrahim, M., Villanueva, C., Skarpe, C., & Guerin, H. (2013b). Diversidad forrajera tropical. Selección y uso de leñosas forrajeras en sistemas de alimentación ganadera para zonas secas de Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 1(50). Recuperado a partir de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RAFA/article/view/50>

Altieri, M. (2002). *Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentável*. Ed. Agropecuária Guaíba^ eRS RS.

Amézquita, M. C., Ibrahim, M., Llanderal, T., Buurman, P., & Amézquita, E. (2004). Carbon Sequestration in Pastures, Silvo-Pastoral Systems and Forests in Four Regions of the Latin American Tropics. *Journal of Sustainable Forestry*, 21(1), 31-49. https://doi.org/10.1300/J091v21n01_02

- Anguiano, J. M., Aguirre, J., & Palma, J. M. (2012). Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*). *Revista cubana de ciencia agrícola*, 46(1), 103-107.
- Anoka, U. A., Akobundu, I. O., & Okonkwo, S. N. C. (1991). Effects of *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud and *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit on growth and development of *Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel. *Agroforestry Systems*, 16(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/BF00053193>
- Anten, N. P. R., & Ackerly, D. D. (2001). A new method of growth analysis for plants that experience periodic losses of leaf mass. *Functional Ecology*, 15(6), 804-811. <https://doi.org/10.1046/j.0269-8463.2001.00582.x>
- Anten, N. P. R., Martínez-Ramos, M., & Ackerly, D. D. (2003). Defoliation and Growth in an Understory Palm: Quantifying the Contributions of Compensatory Responses. *Ecology*, 84(11), 2905-2918. <https://doi.org/10.1890/02-0454>
- Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., & Gilani, A. H. (2007). *Moringa oleifera*: a food plant with multiple medicinal uses. *Phytotherapy Research*, 21(1), 17-25. <https://doi.org/10.1002/ptr.2023>
- Astier Calderón, M., Maass Moreno, M., & Etchevers Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5).
- Bacab, H. M., Solorio F. J., & Solorio, S. B. (2012). Efecto de la altura de poda en *Leucaena leucocephala* y su influencia en el rebrote y rendimiento de *Panicum maximum*. *AVANCES EN INVESTIGACION AGROPECUARIA*, 16(1), 65-77.

- Barahona, R. R., & Sánchez, P. S. (2005). Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 69-82.
- Barrance, A., Cordero, J., & Boshier, D. (2003). *Arboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas*. Bib. Orton IICA/CATIE.
- Bautista-Tolentino, M., López-Ortíz, S., Pérez-Hernández, P., Vargas-Mendoza, M., Gallardo-López, F., & Gómez-Merino, F. C. (2011). Sistemas Agro Y Silvopastoriles En La Comunidad El Limón, Municipio De Paso De Ovejas, Veracruz, México. Recuperado 16 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93915703005>
- Becker, J.M., & Nair, P.K.R., P. K. R. (2004). Cultivation of medicinal plants in an alley cropping system with *Moringa oleifera* in the United States Virgin Islands. *1st World Congress of Agroforestry*, 60-76.
- Benavides, J. (1995). MANEJO Y UTILIZACION DE LA MORERA (*Morus alba*) COMO FORRAJE. *Agroforestería en las Américas*, 2(7). Recuperado a partir de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RAFA/article/view/188>
- Benavides, J.E., J. E. (1993). Árboles forrajeros en América Central (pp. 1-33). Presentado en II seminario Centro Americano y del Caribe sobre Agroforestería con rumiantes menores, San José, Costa Rica.
- Benavides, J.E., J. E. (1998). Árboles y arbustos para las montañas americanas. Presentado en Conferencia electrónica. FAO. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/ag/aga/AGAP/FRG/Agrofor1/bnvdes.pdf>
- Botero, R., & Russo, O. R. (1996). Utilización de arboles y arbustos fijadores de nitrógeno en sistemas sostenibles de producción animal en suelos ácidos

- tropicales. Recuperado 25 de octubre de 2016, a partir de <http://www.fao.org/ag/Aga/agap/FRG/AGROFOR1/Botero8.htm>
- Brewbaker, J.L., Hegde, N., Hutton, E.M., Jones, R.J., Lowry, J.B., Moog, F., & Beldt, R. (1985). *Leucaena - Forage Production and Use* (p. 39). Hawaii: NFTA.
- Brewbaker, J.L., Pluckett, D., & González, V. (1972). Varietal variation and yield trials of *Leucaena leucocephala* (Koa haole) in Hawaii, 166, 26.
- Briske, D.D., & Richards, J.H. (1996). Strategies of plant survival in Grazed Systems: A Functional Interpretation. En *The ecology and Management of Grazing Systems* (CAB INTERNATIONAL, pp. 37-67). Denver, Colorado.
- Recuperado a partir de http://agrilifecdn.tamu.edu/briske/files/2013/01/Briske-StrategiesPlantSurvival-1996_9.pdf
- Bugarín, J., Bojórquez, J. I., Lemus, C., Murray, R. M., Hernández, A., Ontiveros, H., & Aguirre, J. (2010). Comportamiento De Algunas Propiedades Físicoquímicas Del Suelo Con Diferente Sistema Silvopastoril En La Llanura Norte De Nayarit. Recuperado 16 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215930007>
- Cairo, P., Vargas, S., Díaz, B., Nodal, E., Torres, P., Jiménez, R., ... Rodríguez, A. (2008). Influencia del manejo de los suelos Pardos Sialíticos sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas bajo condiciones de producción ganadera y agrícola. *Memorias II Taller Nacional de fertilidad de los suelos de la ganadería. Departamento de Pastos y Forrajes. Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba.*

- Camacaro, S., Garrido, J. C., & Machado, W. (2004). Fijación de nitrógeno por *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* y *Albizia lebbeck* y su transferencia a las gramíneas asociadas. *Zootecnia Tropical*, 22(1), 49-70.
- Camero R. A. (1992). Experiencias desarrolladas por el CATIE en el uso del forraje de *Erythnia* sp y *Gliricidia sepium* en la producción de carne y leche de bovinos, 2(8), 9-13.
- Cancino, R. M. Z., Zebadúa, M. E. V., Toral, J. N., Garay, A. H., & Tinajero, J. J. M. (2016). Adopción de sistemas silvopastoriles y contexto sociocultural de los productores: apoyos y limitantes. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 7(4), 471-488.
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., Solorio-Sánchez, F. J., Parsons, D., & Ramírez-Avilés, L. (2013). Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in mixed and pure fodder banks systems in Yucatan, Mexico. *Agroforestry Systems*, 88(1), 29-39. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9652-7>
- Chirwa, P. W., Ong, C. K., Maghembe, J., & Black, C. R. (2006). Soil water dynamics in cropping systems containing *Gliricidia sepium*, pigeonpea and maize in southern Malawi. *Agroforestry Systems*, 69(1), 29-43. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9016-7>
- Crawley, M. J. (2012). *The R Book*. John Wiley & Sons.
- Crespo, G. (2008). Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista cubana de ciencia agrícola*, 42(4), 329-355.

- Crespo, G., & Fraga, S. (2006). Avances en el conocimiento del reciclaje de los nutrientes en sistemas silvopastoriles. Memorias. IV Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la producción pecuaria sostenible. En *III Simposio sobre sistemas silvopastoriles para la producción ganadera sostenible. Centro de Convenciones «Plaza América», Varadero, Cuba* (p. 104).
- Davis, K. (2000). The Moringa Tree, (Revised edition). *ECHO, Durrance Rd., North Ft. Myers FL 33917, USA.*(7391).
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858-1868.
- Enríquez, Q. J., Bolaños, A. E., & Meléndez, N. F. (1999). *Tecnología para la producción y manejo de forrajes tropicales en México*. Papaloapan, Veracruz: INIFAP.
- FALVEY, J. L. (1982). Gliricidia Maculata—a Review. *International Tree Crops Journal*, 2(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/01435698.1982.9752735>
- FAO. (2008). Nota conceptual, Intensificación sostenible de la producción como una respuesta al cambio climático en ecosistemas invertidos. Hacia una estrategia agropecuaria, forestal y acuícola en el contexto de seguridad alimentaria en América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Faraway, J. J. (2005). Extending the linear model with r (texts in statistical science).
- Foidl, N., Siles, & Sánchez. (1995). MARANGO, Moringa Oleifera Lam. Moringaceae. Especies para reforestación en Nicaragua.

- Foidl, N., Mayorga, L., & Vásquez, W. (1999). Utilización del marango (*Moringa oleifera*) como forraje fresco para ganado. Presentado en Agroforestería para la alimentación animal en Latinoamérica, Nicaragua. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/AG/Aga/AGAP/FRG/AGROFOR1/Foidl16.htm>
- Fulkerson, W. J., & Donaghy, D. J. (2001). Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence - key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(2), 261. <https://doi.org/10.1071/EA00062>
- Funes-Monzote, F., Hernández, A., Bello, R., & Álvarez, A. (2008). Fertilidad del suelo a largo plazo en sistemas biointensivos. *LEISA. Revista de Agroecología*, 24(2), 9-12.
- Garavito, U. (2008). *Moringa Oleífera*, alimento ecológico para ganado vacuno, porcino, equino, aves y peces, para alimentación humana, también para producción de etanol y biodiesel - engormix. Recuperado 31 de octubre de 2016, a partir de <https://es.scribd.com/doc/97088582/Moringa-Oleifera-alimento-ecologico-para-ganado-vacuno-porcino-equino-aves-y-peces-para-alimentacion-humana-tambien-para-produccion-de-etanol-y>
- Garcia, C., Roldan, A., & Hernandez, T. (2005). Ability of different plant species to promote microbiological processes in semiarid soil. *Geoderma*, 124(1), 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.04.013>
- García, D. E., Medina, M. G., Domínguez, C., Baldizán, A., & Humbría, J. (2006). Evaluación química de especies no leguminosas con potencial forrajero en el estado Trujillo, Venezuela. *Zootecnia tropical*, 24(4), 401-415.

- Garcia, H., Nygren, P., & Desfontaines, L. (2001). Dynamics of nonstructural carbohydrates and biomass yield in a fodder legume tree at different harvest intensities. *Tree Physiology*, 21(8), 523-531. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.8.523>
- Garcia-Casillas, I. (1997). *SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSION Y GOTEIO*. México: Trillas. Recuperado a partir de <http://cedisalibros.com/tienda-2/agricultura/sistema-de-riego-por-aspersion-y-goteio/>
- García-Oliva, F., & Jaramillo, V. (2011). Impact of Anthropogenic Transformation of Seasonally Dry Tropical Forests. En *Ecosystem Biogeochemical Processes* (pp. 159-172).
- González Gomez, J., Madrigal Sánchez, X., Ayala Burgos, A., Juárez Caratachea, A., & Gutiérrez Vásquez, E. (2006). Especies arbóreas de uso múltiple para la ganadería en la Región de Tierra Caliente del Estado de Michoacán, México. *Livestock Reseach for Rural Development*.
- González, I., Mármol, J. F., Morillo, D., Mavarez, O., Noguera, N., & Fuenmayor, E. (2003). Efecto de frecuencias de riego y corte sobre el rendimiento de materia seca en) *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 20(3). Recuperado a partir de <http://www.produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/12029>
- González, J. M. (2013). Costos y beneficios de un sistema silvopastoril intensivo (sspi), con base en *Leucaena leucocephala* (Estudio de caso en el municipio de Tepalcatepec, Michoacán, México). Recuperado 17 de enero de 2017, a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83728497004>

Gutiérrez, J. G. G., Gómez, L. I. A., Esquivel, C. E. G., & Pérez, J. I. J. (2012).

Evaluación de la sustentabilidad posterior a una intervención agroecológica en el subtrópico del Altiplano Central de México.

Gutiérrez, V., Rojas-Sandoval, L., Villalba-Sánchez, C., Hernández-Maldonado,

G., & Juárez-Caratachea, A. (2009). *Especies arbóreas forrajeras (EAF) para alimento y confort de los rumiantes en el municipio de Carácuaro, Mich., México.*

Hernández Chávez, M., Sánchez Cárdenas, S., & Simón Guelmes, L. (2008).

Efecto de los sistemas silvopastoriles en la fertilidad edáfica. *Zootecnia Tropical*, 26(3), 319-321.

Hernández, I., Benavides, J. E., & Simón, L. (1998). Manejo de las defoliaciones

de *Leucaena leucocephala* para la producción de forraje en el período seco en Cuba. I. Efecto de podas únicas en el rendimiento, la tasa de crecimiento y las variables dasométricas. *Pastos y Forrajes*, 21(3).

Recuperado a partir de
<http://payfo.ihatuey.cu/index.php/pasto/article/view/1054>

Hernández, N.M. (1988). *Efecto de las podas al final de la época lluviosa en*

cercos vivos de piñón Cubano (Gliricidia sepium) sobre la producción y calidad nutritiva de la biomasa en la época seca. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Recuperado a partir de
<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1542e/A1542e.pdf>

Hodgson, J., & Illius, A.W. (1996). *The ecology and management of grazing*

systems. Wallingford, UK: CAB INTERNATIONAL. Recuperado a partir de
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19960710588>

- Hughes, C. E. (1987). Biological considerations in designing a seed collections strategy for *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. (Leguminosae). *The Commonwealth Forestry Review*, 66(1 (206)), 31-48.
- INAFED. (2010). Michoacán de Ocampo - Parícut. Recuperado 3 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16064a.html>
- Iriondo, E., Alvarez, E., China, A., & Borroto, D. (1998). Experiencias campesinas sobre utilización de árboles y arbustos en huertos casero (p. 258). Presentado en . IV Taller Internacional Silvopastoril «Los árboles y arbustos en la ganadería, Estación Experimental «Indio Hatuey». Matanzas, Cuba.
- Jaramillo, C. A., & Quintero, N. C. (2006). *Soya (glycine Max (L.) Merrill" Alternativa Para Los Sistemas de Produccion de la Orinoquia Colombiana*. Corpoica.
- Jiménez, F. G. (2000). *Árboles y arbustos forrajeros de la Región Maya - Tzotzil del Norte de Chiapas, México* (Tesis Doctoral). Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia- Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán.
- Jyothi, P. V., Atluri, J. B., & Reddi, C. S. (1990). Pollination ecology of *Moringa oleifera* (Moringaceae). *Proceedings: Plant Sciences*, 100(1), 33-42. <https://doi.org/10.1007/BF03053466>
- Latt, C. R., Nair, P. K. R., & Kang, B. T. (2000). Interactions among cutting frequency, reserve carbohydrates, and post-cutting biomass production in *Gliricidia sepium* and *Leucaena leucocephala*. *Agroforestry Systems*, 50(1), 27-46. <https://doi.org/10.1023/A:1006427221557>

- Lehmann, J., Peter, I., Steglich, C., Gebauer, G., Huwe, B., & Zech, W. (1998). Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest Ecology and Management*, 111(2–3), 157-169. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00322-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00322-3)
- Lizarraga-Sánchez, H. L. (2000). *Evaluación forrajera de cinco árboles nativos durante las lluvias en Yucatán*. MSc. Thesis. FMVZ-University of Yucatán, México.
- Lok, S., Crespo, G., Frómeta, E., & Fraga, S. (2006). Estudio de indicadores de estabilidad del pasto y el suelo en un sistema silvopastoril con novillas lecheras. Recuperado 21 de octubre de 2016, a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017714014>
- López, O.S., Villarruel, F.M., Ortega, J.E., & Ruiz, E. (2006). Crecimiento y producción de *Guazuma ulmifolia* Lam. en bancos de forraje bajo condiciones de clima cálido subhúmedo. Presentado en Memoria de la III Reunión Nacional sobre Sistemas Agro y Silvopastoriles, Mexico, D.F.,.
- Lopez-Toledo, L., Anten, N. P. R., Endress, B. A., Ackerly, D. D., & Martínez-Ramos, M. (2012). Resilience to chronic defoliation in a dioecious understorey tropical rain forest palm. *Journal of Ecology*, 100(5), 1245-1256. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.01992.x>
- Maass, J. M., Jaramillo, V., Martínez-Yrizar, A., García-Oliva, F., Pérez-Jiménez, A., & Sarukhán, J. (2002). Aspectos funcionales del ecosistema de selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. *Historia natural de Chamela*, 525-542.

- Machecha, L., Rosales, M., Hernando, M.C., & Molina, E.J. (1999). Experiencias en un sistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala*-*Cynodon plectostachyus*-*Prosopis juliflora* en el Valle del Cauca, Colombia (p. 407). Presentado en Agroforestería para la producción animal en América Latina. Estudio FAO sobre Producción y Sanidad Animal, Roma: M. Sánchez y M. Rosale. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/agrofor1/Mahech20.htm>
- Mahecha, L. (2016). El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 226-231.
- Manriquez-Mendoza, L. Y., Lopez-Ortiz, S., Olguín-Palacios, C., Pérez-Hernandez, P., Díaz-Rivera, P., & Lopez-Tecpoyotl, Z. G. (2011). Productivity of a silvopastoral system under intensive mixed species grazing by cattle and sheep. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3). Recuperado a partir de <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/1418>
- Manríquez-Mendoza, L. Y., López-Ortíz, S., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E., López-Tecpoyotl, Z. G., & Villarruel-Fuentes, M. (2011). Características agronómicas y forrajeras de *Guazuma ulmifolia* Lam. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 453-463.
- Martínez-Ramos, M., Anten, N. P. R., & Ackerly, D. D. (2009). Defoliation and ENSO effects on vital rates of an understorey tropical rain forest palm. *Journal of Ecology*, 97(5), 1050-1061. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01531.x>

- McNaughton, S. J. (1983). Compensatory Plant Growth as a Response to Herbivory. *Oikos*, 40(3), 329-336. <https://doi.org/10.2307/3544305>
- Medina, J. M. (1991). Evaluación preliminar de producción de biomasa, de nueve especies de árboles en plantaciones naturales.
- Medrano Gil, H., Bota Salort, J., Cifre Llompart, J., Flexas Sans, J., Ribas Carbó, M., & Gulías León, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(12), 1409-1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Mellado-Vázquez, A., Volke-Haller, V., Tapia-Vargas, M., Sánchez-García, P., & Quevedo-Nolasco, A. (2005). Respuesta del papayo al riego ya la fertilización NPK en un vertisol. *Terra latinoamericana*, 23(1), 137-144.
- Montagnini, F. (2011). Restoration of degraded pastures using agrosilvopastoral systems with native trees in the Neotropics. En *Agroforestry as a tool for landscape restoration* (pp. 55-68). New York: Nova Science Publishers.
- Morton, J. F. (1991). The horseradish tree, *Moringa pterygosperma* (Moringaceae)—A boon to Arid Lands? *Economic Botany*, 45(3), 318-333. <https://doi.org/10.1007/BF02887070>
- Murgueitio, E. (2003). Investigación participativa en sistemas silvopastoriles integrados: La experiencia de CIPAV en Colombia.
- Murgueitio, E. (2009). Incentivos para los sistemas silvopastoriles en América Latina. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 13(1), 3-19.

- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B. (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1654-1663.
- Murgueitio, E., Cuellar, P., Ibrahim, M., Gobbi, J., Cuartas, C. A., Naranjo, J. F., ... Casasola, F. (2006). Adopción de sistemas agroforestales pecuarios. *Pastos y Forrajes*, 29(4).
- Murgueitio, E., & Ibrahim, M. (2001). Agroforestería pecuaria para la reconversión de la ganadería en Latinoamérica. *Livestock Research for Rural Development*, 13(3), 1-12.
- Murgueitio, E., & Ibrahim, M. (2008). Ganadería y medio ambiente en América Latina. *Ganadería del futuro: investigación para el desarrollo*. Cali, Colombia, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria.
- Murgueitio, E., & Solorio, B. (2008). El Sistema Silvopastoril Intensivo, un modelo exitoso para la competitividad ganadera en Colombia y México. En V Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible (proceedings). Universidad Rómulo Gallegos, Universidad Central de Venezuela, Universidad de Zulia. Maracay, Venezuela (electronic publication).
- Murguía-Flores, F. (2012). *El efecto de las especies leñosas en la recuperación natural de los suelos posterior al uso ganadero, en la región de Chamela, Jalisco*. (Tesis Maestría). Mexico.
- Murphy, P. G., Lugo, A. E., Mooney, H. A., & Medina, E. (1995). *Dry forests of Central America and the Caribbean. Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press.

- Nodari, R.O., Vidar, M. A., & Guerra, M.P. (2001). Pastures species diversity in the South Brazil (p. 451). Presentado en Foro Iberoamericano de Pastos, Alicante, España.
- Nowak, R. S., & Caldwell, M. M. (1984). A test of compensatory photosynthesis in the field: implications for herbivory tolerance. *Oecologia*, 61(3), 311-318.
- Oelbermann, M., Voroney, R. P., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Kass, D. C. L., & Schlönvoigt, A. M. (2006). Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 68(1), 27-36.
<https://doi.org/10.1007/s10457-005-5963-7>
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'hara, R. B., ... Wagner, H. (2017). Package 'vegan'. *Community ecology package, version*, 2(9).
- Olivares-Pérez, J., Avilés-Nova, F., Albarrán-Portillo, B., Rojas-Hernández, S., & Castelán-Ortega, O. A. (2011). Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del estado de México. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 739-748.
- Ortega-Vargas, E., López-Ortiz, S., Burgueño-Ferreira, J. A., Campbell, W. B., & Jarillo-Rodríguez, J. (2013). Date of pruning of *Guazuma ulmifolia* during the rainy season affects the availability, productivity and nutritional quality of forage during the dry season. *Agroforestry Systems*, 87(4), 917-927.
<https://doi.org/10.1007/s10457-013-9608-y>
- Ovalle, C., & Avedaño, J. (1984). Utilización silvopastoral del espinal. 2. Influencia del espinol (*Acacia caven* (red) Hook et Am .) sobre algunos elementos del medio, 44-353.

- Palma, J. M. (1997). PF 02. Establishment of *Gliricidia sepium* in the dry tropic with high density. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 5(3), 28.
- Palma, J. M. (2006). Los sistemas silvopastoriles en el trópico seco mexicano. *Arch. Latinoam. Prod. Anim*, 14(3), 95-104.
- Parrotta, J. A. (1992). *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: *leucaena, tantan*. Res. Note SO-ITFSM-52. New Orleans, LA. USDA Forest Service. Southern Forest Experiment Station.
- Pennington, R. T., Prado, D. E., & Pendry, C. A. (2000). Neotropical seasonally dry forests and Quaternary vegetation changes. *Journal of Biogeography*, 27, 261-273.
- Perez, A.R., De la Cruz, B.J.O., Vásquez, G.E., & Obregón, J.F. (2010). *Moringa oleifera*, una nueva alternativa forrajera para sinaloa. Fundacion produce. Recuperado a partir de http://www.academia.edu/5902138/Moringa_oleifera_una_alternativa_forrajera_para_Sinaloa
- Pérez Guerrero, J. (1979). *Leucaena: leguminosa tropical mexicana, usos y potencial*. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo (México).
- Petit, A. J., Casanova, L.F., & Solorio, S. F. (2010). Rendimiento de forraje de *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* asociadas y en monocultivo en un banco de forraje. *REVISTA FORESTAL VENEZOLANA*, 54(2), 161-167.
- Pezo, D., & Ibrahim, M. (1998). Sistemas Silvopastoriles. Colección de Módulos Agroforestales No. 2. CATIE. *Turrialba, Costa Rica*, 15.

- Pinheiro, J., & Bates, D. (2000). *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer Science & Business Media.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2015). *R Development Core Team. 2014. nlme: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-117*.
- Pinto, R. R. (2002). *Árboles y arbustos con potencial forrajero del Valle Central de Chiapas*. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Yucatán, Fac. de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Mérida, Yucatán.
- Pinto-Ruiz, R., Gómez, H., Martínez, B., Hernández, A., Medina, F. J., Gutiérrez, R., & Escobar, E. (2005). Árboles y arbustos forrajeros del sur de México. *Pastos y Forrajes*, 28(2).
- Pizarro, E. A. (2002). *Forages for the Tropical Zones of Latin America: Review*.
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., & Rutgers, M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services - an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
- Quiñones V. J., Sánchez O. T., Valencia, C. M., Castellanos, P. E., & Macias, G. Y. (2006). Especies vegetales seleccionadas por caprinos en pastoreo en agostaderos áridos del noreste de Durango, México. (pp. 82-88). Presentado en Memoria de la III Reunión Nacional Sobre Sistemas Agro y Silvopastoriles, México.
- Ramachandran, C., Peter, K. V., & Gopalakrishnan, P. K. (1980). Drumstick (Moringa oleifera): A Multipurpose Indian Vegetable. *Economic Botany*, 34(3), 276-283.

- Rendón-Carmona, H., Martínez-Yrizar, A., Maass, J. M., Pérez-Salicrup, D. R., & Búrquez, A. (2013). La extracción selectiva de vara para uso hortícola en México: Implicaciones para la conservación del bosque tropical caducifolio y sus recursos. *Botanical Sciences*, 91(4), 493-503.
- Rey Obando, A. M. (2006). Utilización estratégica de biofertilizantes en la producción y calidad de árboles (p. 16). Presentado en II Curso Intensivo de Silvopastoreo, Colombia-Cuba.
- Reyes Sánchez, N. (2004). *Marango: cultivo y utilización en la alimentación animal*. Managua, NI: Universidad Nacional Agraria. Recuperado a partir de <http://repositorio.una.edu.ni/2410/>
- Reynolds, J. F., Kemp, P. R., Ogle, K., & Fernández, R. J. (2004). Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 141(2), 194-210. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1524-4>
- Roothaert, R. L. (2000). *The potential of indigenous and naturalized fodder trees and shrubs for intensive use in central Kenya*. Landbouwniversiteit Wageningen (Wageningen Agricultural University), Wageningen.
- Ruiz, T. E., Febles, G., Jordán, H., & Díaz, H. (2010). El árbol y su efecto en la estabilidad productiva del pasto en un sistema silvopastoril. Recuperado 16 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193015664014>
- Ruiz, T.E., & Febles, G. (2001). Factores que influyen en la producción de biomasa durante el manejo del sistema silvopastoril (p. 62). Presentado en Sistema silvopastoriles, una opción sustentable, Curso de Tantakín, México.

- Rusch, G., & Skarpe, C. (2016). Procesos ecológicos asociados con el pastoreo y su aplicación en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*, 0(47). Recuperado a partir de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RAFA/article/view/91>
- Sadeghian, J., Rivera, J. M., & Gómez, M. E. (1998). *Importancia de sistemas de ganadería sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos en los Andes de Colombia*. Extraído el.
- Sánchez, D., Rusch, G. M., Villanueva, C., Barton, D., & Salazar, Á. (2013). ¿Cómo incrementar la multifuncionalidad en potreros? *Agroforestería en las Américas*, 1(50). Recuperado a partir de <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RAFA/article/view/45>
- Sarukhán, J., & Pennington, T. D. (1998). Árboles tropicales de México. *Universidad Autonoma de Mexico Fondo de Cultura Economica, Mexico*.
- Schroth, G. (1995). Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. En *Agroforestry: Science, Policy and Practice* (pp. 125-143). Springer.
- Schroth, G., & Fonseca, G. A. (2004). Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. *Island Press. Washintong, DC*.
- Schwinning, S., Sala, O. E., Loik, M. E., & Ehleringer, J. R. (2004). Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 141(2), 191-193. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1683-3>
- Sharma, G. K., & Raina, V. (1982). Propagation techniques of *Moringa oleifera* Lam. En *Improvement of forest biomass: symposium proceedings/edited by PK Khosla*. Solan, India: Indian Society of Tree Scientists, c1982.

- Shelton, H. M., & Brewbaker, J. L. (1998). *Leucaena leucocephala*-the Most Widely Used Forage Tree Legume. Forage Tree Legumes in Tropical Agriculture. *The Tropical Grassland Society of Australia*.
- Silvoenergía. (1986). (CATIE) Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña en América Central. *Serie Técnica. Informe Técnico No 86. Turrialba. Costa Rica*.
- Simms, E. L., & Fritz, R. S. (1992). Costs of plant resistance to herbivory. *Plant resistance to herbivores and pathogens: ecology, evolution, and genetics.*, 392-425.
- Simons, A. J., & Dunsdon, A. J. (1992). *Evaluation of the potential for genetic improvement of Gliricidia sepium. ODA Forestry Research Project R4525, Final Report*. Oxford Forestry Institute, UK.
- Solano, A. R. (1994). La ganadería: ¿ actividad destructora del medio ambiente. *Agroforestería en las Américas*, 1(3), 4-5.
- Stewart, J. L., Dundson, A. J., Hellin, J. J., & Hughes, C. E. (1992). Wood biomass estimation of Central American dry zone species.
- Swasdiphanich, S. (1992). *Environmental influences on forage yields of shrub legumes* (Tesis Doctoral). The University of Queensland, Australia.
- Szott, L. T., Palm, C. A., & Sanchez, P. A. (1991). Agroforestry in acid soils of the humid tropics. *Advances in Agronomy*, 45, 275-301.
- Trejo, I., & Dirzo, R. (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological conservation*, 94(2), 133-142.
- Trejo Vázquez, I. (1999). El clima de la selva baja caducifolia en México. *Investigaciones geográficas*, (39), 40-52.

- Trung, L. T. (1989). Availability and use of shrubs and tree fodders in the Philippines. En *Devendra, C. ed. Shrubs and Tree Fodders for Farm Animals (1989, Denpasar, Indonesia). Proceedings of a workshop.*
- Velasco, A., Ibrahim, M., Kass, D., Jiménez Otárola, F., Platero, R., & Galileo, G. (1999). Concentraciones de fósforo en suelos bajo sistema silvopastoril de Acacia mangium con Brachiaria humidicola. Recuperado a partir de <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:8080/handle/11554/5933>
- Velázquez, J. R., Colín, P. S., & García, G. J. (2009). *Frutos y semillas de árboles tropicales de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México DF, México.
- Villa-Méndez, C. I., Tena, M. J., Tzintzun, R., & Val, D. (2008). Caracterización de los sistemas ganaderos en dos comunidades del municipio de Tuzantla de la región de Tierra Caliente, Michoacán. *Revista de investigación y difusión científica agropecuaria*, 12(2), 45-58.
- West, B. T., Welch, K. B., & Galecki, A. T. (2014). *Linear Mixed Models: A Practical Guide Using Statistical Software, Second Edition*. CRC Press.
- Whiteman, P. C., Oka, G. M., Marmin, S., Chand, S., & Gutteridge, R. C. (1986). Studies on the germination, growth and winter survival of *Gliricidia maculata* in south-eastern Queensland. *International Tree Crops Journal*, 3(4), 245-255.
- Wilkins, R. J., Givens, D. I., Owen, E., Axford, R. F. E., & Omed, H. M. (2000). Forages and their role in animal systems. *Forage evaluation in ruminant nutrition.*, 1-14.
- Xavier, D. F., Carvalho, M. M., Alvim, M. J., & Botrel, M. de A. (2003). Melhoramento da fertilidade do solo em pastagem de Brachiaria

decumbens associada com leguminosas arbóreas. *Pasturas Tropicales*, 25(1), 23-26.

Young, K. R., Ewel, J. J., & Brown, B. J. (1987). Seed dynamics during forest succession in Costa Rica. *Vegetatio*, 71(3), 157-173.

Zárate Pedroche, S. (1994). Revisión del género *Leucaena* en México. *Anales del Instituto de Biología serie Botánica*, 65(002).

ANEXO

Anexo 1. Valores promedio de la interacción de cada especie, tratamiento de riego y defoliación en las variables evaluadas del suelo. Agregados (%), Capacidad de campo (%), Amonio ($\text{mg NH}_4^+ \text{g}^{-1}$), Nitratos ($\text{mg NO}_3^- \text{g}^{-1}$), N total (mg N g^{-1}), Ortofosfatos ($\text{mg PO}_4^- \text{g}^{-1}$), pH y Materia orgánica (%).

| <i>G. ulmifolia</i> | RIEGO | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | D25% | | D50% | | D75% | |
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Agregados >1mm | 0.91 | 2.13 | 1.22 | 1.44 | 0.55 | 1.41 |
| Agregados 0.25-1mm | 16.38 | 21.53 | 15.32 | 21.66 | 17.44 | 23.21 |
| Capacidad de campo | 36.48 | 34.80 | 37.32 | 29.91 | 37.07 | 31.78 |
| Amonio | 3.47 | 4.68 | 3.99 | 4.30 | 2.86 | 2.77 |
| Nitratos | 5.98 | 3.55 | 4.31 | 0.93 | 6.28 | 1.95 |
| N total | 9.45 | 8.23 | 8.29 | 5.23 | 9.14 | 4.72 |
| Ortofosfatos | 5.20 | 5.32 | 5.41 | 4.14 | 8.39 | 4.19 |
| pH | 8.92 | 8.27 | 9.08 | 8.40 | 8.99 | 8.40 |
| Materia orgánica | 1.33 | 1.82 | 1.09 | 1.57 | 1.16 | 1.76 |
| <i>L. leucocephala</i> | | | | | | |
| Agregados >1mm | 0.73 | 1.23 | 2.83 | 2.72 | 0.47 | 3.43 |
| Agregados 0.25-1mm | 14.43 | 22.66 | 19.39 | 21.14 | 18.61 | 25.15 |
| Capacidad de campo | 38.15 | 32.16 | 37.64 | 35.33 | 36.35 | 32.33 |
| Amonio | 2.72 | 5.88 | 3.21 | 4.31 | 3.35 | 2.01 |
| Nitratos | 3.66 | 0.68 | 4.11 | 2.12 | 6.20 | 1.66 |
| N total | 6.38 | 6.56 | 7.33 | 6.42 | 9.55 | 3.67 |
| Ortofosfatos | 8.71 | 4.36 | 5.79 | 6.05 | 4.45 | 4.49 |
| pH | 9.02 | 8.46 | 9.08 | 8.25 | 8.96 | 8.43 |
| Materia orgánica | 1.37 | 1.63 | 1.10 | 1.92 | 1.09 | 1.63 |
| <i>M. oleifera</i> | | | | | | |
| Agregados >1mm | 0.94 | 1.15 | 0.63 | 2.38 | 0.74 | 2.38 |
| Agregados 0.25-1mm | 15.63 | 23.43 | 17.43 | 27.46 | 22.32 | 20.22 |
| Capacidad de campo | 37.96 | 33.07 | 36.33 | 35.41 | 37.01 | 29.90 |
| Amonio | 3.27 | 4.41 | 3.65 | 7.25 | 3.19 | 5.68 |
| Nitratos | 4.34 | 1.84 | 4.48 | 1.67 | 5.13 | 1.94 |
| N total | 7.61 | 6.25 | 8.13 | 8.92 | 8.32 | 7.62 |
| Ortofosfatos | 7.16 | 3.66 | 5.09 | 4.11 | 5.27 | 4.90 |
| pH | 8.99 | 7.94 | 9.01 | 8.31 | 9.02 | 8.29 |
| Materia orgánica | 1.30 | 1.82 | 1.33 | 1.76 | 1.06 | 1.66 |
| <i>M. maximus</i> | | | | | | |
| Agregados >1mm | 0.81 | 1.37 | 0.73 | 2.24 | 1.07 | 1.15 |
| Agregados 0.25-1mm | 17.64 | 26.42 | 19.44 | 22.10 | 23.97 | 22.83 |
| Capacidad de campo | 37.27 | 33.75 | 38.79 | 34.78 | 38.10 | 35.79 |
| Amonio | 1.82 | 6.21 | 4.13 | 5.27 | 3.67 | 3.18 |
| Nitratos | 4.34 | 1.36 | 4.71 | 1.70 | 4.07 | 1.72 |
| N total | 6.16 | 7.58 | 8.84 | 6.97 | 7.74 | 4.89 |
| Ortofosfatos | 7.36 | 3.17 | 5.72 | 4.89 | 4.27 | 4.05 |
| pH | 9.09 | 8.26 | 9.01 | 8.30 | 9.04 | 8.25 |
| Materia orgánica | 1.44 | 1.73 | 1.23 | 1.79 | 1.33 | 1.63 |

| <i>G. ulmifolia</i> | TEMPORAL | | | | | |
|------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | D25% | | D50% | | D75% | |
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Agregados >1mm | 2.45 | 1.61 | 1.52 | 1.70 | 1.25 | 2.04 |
| Agregados 0.25-1mm | 17.91 | 18.11 | 20.29 | 23.19 | 17.05 | 22.83 |
| Capacidad de campo | 37.25 | 33.77 | 36.82 | 32.42 | 37.86 | 30.72 |
| Amonio | 2.54 | 3.47 | 2.12 | 2.45 | 2.42 | 3.91 |
| Nitratos | 4.25 | 1.52 | 3.65 | 1.94 | 5.28 | 2.15 |
| N total | 6.79 | 4.98 | 5.77 | 4.39 | 7.70 | 6.06 |
| Ortofosfatos | 7.58 | 4.77 | 7.56 | 5.04 | 7.49 | 4.19 |
| pH | 9.03 | 8.24 | 9.05 | 8.43 | 9.07 | 8.32 |
| Materia orgánica | 1.18 | 1.92 | 1.30 | 1.76 | 1.32 | 1.82 |
| <i>L. leucocephala</i> | | | | | | |
| Agregados >1mm | 2.71 | 1.88 | 1.39 | 1.98 | 1.16 | 1.52 |
| Agregados 0.25-1mm | 18.96 | 20.71 | 19.87 | 20.68 | 18.94 | 21.98 |
| Capacidad de campo | 36.26 | 33.57 | 37.30 | 35.78 | 34.91 | 33.92 |
| Amonio | 3.01 | 2.80 | 2.07 | 3.82 | 1.99 | 2.12 |
| Nitratos | 4.04 | 0.72 | 4.38 | 0.73 | 3.83 | 1.21 |
| N total | 7.05 | 3.52 | 6.45 | 4.55 | 5.82 | 3.32 |
| Ortofosfatos | 8.32 | 4.54 | 6.52 | 4.61 | 7.73 | 3.38 |
| pH | 9.06 | 8.20 | 9.06 | 8.27 | 9.11 | 8.27 |
| Materia orgánica | 1.16 | 1.90 | 1.38 | 1.76 | 1.08 | 1.74 |
| <i>M. oleífera</i> | | | | | | |
| Agregados >1mm | 1.48 | 1.34 | 1.77 | 1.96 | 1.96 | 1.18 |
| Agregados 0.25-1mm | 17.86 | 22.52 | 21.01 | 21.35 | 14.06 | 23.83 |
| Capacidad de campo | 36.41 | 32.72 | 36.09 | 35.10 | 36.47 | 32.66 |
| Amonio | 2.64 | 3.56 | 3.14 | 3.36 | 2.52 | 3.79 |
| Nitratos | 4.23 | 1.62 | 4.98 | 2.22 | 4.38 | 1.36 |
| N total | 6.87 | 5.18 | 8.13 | 5.58 | 6.90 | 5.15 |
| Ortofosfatos | 6.42 | 4.92 | 6.36 | 4.73 | 6.69 | 4.84 |
| pH | 9.12 | 8.25 | 9.04 | 8.29 | 9.07 | 8.26 |
| Materia orgánica | 1.16 | 1.98 | 1.26 | 1.86 | 1.18 | 1.86 |
| <i>M. maximus</i> | | | | | | |
| Agregados >1mm | 2.10 | 1.22 | 1.49 | 1.14 | 1.03 | 1.20 |
| Agregados 0.25-1mm | 17.25 | 21.69 | 20.97 | 21.68 | 17.34 | 25.41 |
| Capacidad de campo | 37.18 | 33.59 | 37.98 | 31.92 | 36.81 | 32.88 |
| Amonio | 2.60 | 4.98 | 2.38 | 4.26 | 2.13 | 3.89 |
| Nitratos | 4.58 | 1.83 | 7.05 | 1.67 | 5.58 | 1.33 |
| N total | 7.19 | 6.81 | 9.43 | 5.94 | 7.71 | 5.22 |
| Ortofosfatos | 6.83 | 5.54 | 6.19 | 4.62 | 7.14 | 4.40 |
| pH | 9.06 | 8.22 | 9.08 | 8.22 | 8.99 | 8.33 |
| Materia orgánica | 1.09 | 1.89 | 1.18 | 1.70 | 1.15 | 1.84 |