

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**RESPUESTA AL DÉFICIT HÍDRICO EN CUATRO ESPECIES
NATIVAS DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO**

POR:

BERNARDO LÓPEZ LÓPEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

**RESPUESTA AL DÉFICIT HÍDRICO EN CUATRO ESPECIES
NATIVAS DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO**

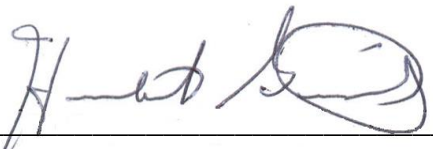
TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta

BERNARDO LÓPEZ LÓPEZ

Comité de Tesis




Dr. Humberto González Rodríguez
Director



Dr. Israel Cantú Silva
Asesor



Dra. Marisela Pando Moreno
Asesor



Dr. Roque G. Ramírez Lozano
Asesor Externo

Linares, Nuevo León, México

Noviembre de 2013

DEDICATORIA

A dios, por darme la oportunidad de vivir y la sabiduría para seguirme superando en día a día hasta alcanzar las metas y el valor a enfrentar los retos.

A mis padres, Ignacio Juan López Bautista y Elodia Olivia López Benítez, por dicha de la vida y su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de esta ardua tarea e inculcarme a superar.

Mis hermanas y sobrinos que han sido mi motor de superación: Estela, Crispina, Mayra y Brenda (†), que aunque no esté conmigo donde quiera que esté tenga la satisfacción de ver terminado lo que empecé. Sobrinos Alejandro, Azalia, Carlos y Ricardo esperando que yo pueda ser un gran ejemplo para ellos.

A todos mis familiares, abuelos, tíos, primas, primos y todas aquellas personas que vieron en mí una persona capaz de superar cualquier reto y alentarme con sus buenos consejos en los momentos más difíciles.

A la gente de mi comunidad Santiago Mitlatongo, por los momentos difíciles que les tocó vivir por los azares de la naturaleza y cambiaron la vida de todos sus habitantes.

A mis amigos, Avelardo, Alejandro, Gerardo, Everardo, Eddy, Isaías, Isabel, Salvador y Elena por su amistad incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), mediante la Facultad de Ciencias Forestales por brindarme las facilidades para realizar mis estudios de Maestría y formar parte importante en mi formación profesional.

Un sincero agradecimiento al Dr. Humberto González Rodríguez, por brindarme los medios necesarios para la realización de la siguiente investigación y aceptar dirigir esta investigación.

Al Dr. Israel Cantú Silva por sus valiosas aportaciones en el desarrollo del trabajo de laboratorio y la revisión del escrito.

A la Dra. Marisela Pando Moreno por sus acertados consejos durante la revisión y desarrollo del escrito.

Al Dr. Roque Gonzalo Ramírez Lozano por la revisión y corrección para la mejora del escrito.

De manera conjunta Al M.C. Juan Manuel López Hernández y Don Manuel Hernández Charles por su amistad y contribución en el arduo trabajo de campo.

A la Sra. Elsa Dolores González, Inés Yáñez y compañera Carla Bustamante por su colaboración y ayuda en los análisis de laboratorio que fueron fundamentales para la culminación de esta tesis.

A los compañeros del Laboratorio de química Ana Gabriela, Perla, Socorro, Joselyn, Tilo Gustavo, José Isabel y Santiago por su gran amistad y hacer de mi estancia más agradable.

A los compañeros de la maestría Carla, Mane, Mariana, Violeta, Marisela, Indira Juana María, Ángel, Carlos, Eduardo, Gabriel, Héctor, José Isabel, Josué, Juan Carlos, Noé (†), Santiago, Sergio Canul, Raúl y Ramiro por compartir esta etapa tan importante en mi superación personal.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma pudiera haber omitido en este apartado mis más sinceros agradecimientos.

ÍNDICE

Página

RESUMEN	I
SUMMARY	II
ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos.....	4
1.2. Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. El matorral espinoso tamaulipeco (MET)	5
2.2. El agua en el suelo	6
2.2.1. Contenido de agua en el suelo	7
2.2.2. Flujo del agua en el suelo.....	8
2.2.3. Implicaciones del agua en el desarrollo de las plantas	9
2.2.4. Las plantas frente al estrés.....	10
2.2.5. Estrategias de las plantas frente al déficit hídrico	11
2.3. Especies Nativas	14
2.4. Relaciones hídricas	15
2.4.1. Relaciones hídricas en el Noreste de México	16
2.4.2. Relaciones hídricas en otros ecosistemas	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1. Características del área de estudio	26
3.1.1. Ubicación	26
3.1.2. Suelo	26
3.1.3. Vegetación del área de estudio	28
3.1.4. Material vegetal	28
3.2. Descripción de las especies estudiadas	29

3.2.1.	<i>Amyris texana</i> (Buckl.) P. Wilson.....	29
3.2.2.	<i>Bumelia celastrina</i> H. B. K.	29
3.2.3.	<i>Cordia boissieri</i> A. DC.	30
3.2.4.	<i>Leucophyllum frutescens</i> (Berl.) I. M. Johnston	30
3.3.	Metodología	32
3.3.1.	Medición del potencial hídrico del xilema (Ψ).....	32
3.3.2.	Variables ambientales	32
3.3.3.	Caracterización física y química del sitio	33
3.3.4.	Análisis estadísticos	35
4.	RESULTADOS.....	37
4.1.	Ambiente físico.....	37
4.1.1.	Temperatura.....	37
4.1.2.	Humedad relativa	37
4.1.3.	Precipitación.....	38
4.1.4.	Contenido gravimétrico de humedad en el suelo	38
4.2.	Relaciones Hídricas	41
4.2.1.	Variación estacional del potencial hídrico xilemático	41
4.2.2.	Variación diurna del potencial hídrico xilemático	42
4.3.	Relaciones potencial hídrico - variables ambientales.....	47
4.3.1.	Relaciones estacionales.....	47
4.3.2.	Relaciones diurnas.....	48
5.	DISCUSIÓN	53
6.	CONCLUSIONES.....	58
7.	LITERATURA CITADA	60

RESUMEN

El déficit hídrico es uno de los factores abióticos más limitantes en la región noreste de México. El presente estudio tuvo como objetivo determinar el potencial hídrico (Ψ) de especies arbustivas nativas tales como *Amyris texana* (Rutaceae), *Bumelia celastrina* (Sapotaceae), *Cordia boissieri* (Boraginaceae) y *Leucophyllum frutescens* (Scrophulariaceae) y relacionarlo con el contenido de humedad en el suelo, a los componentes de demanda evaporativa atmosférica y a la precipitación. El estudio se llevó a cabo en la estación experimental de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, ubicada en el municipio de Linares, Nuevo León. Los Ψ fueron determinados a intervalos de 15 días del 17 de Enero al 31 de Octubre del 2011 a las 06:00 h (Ψ_{pd} ; preamanecer) y 14:00 h (Ψ_{md} ; mediodía). La precipitación acumulada registrada en el sitio fue de 502.40 mm. Durante el periodo más húmedo, el Ψ_{pd} varió de -0.40 MPa (*B. celastrina*) a -0.92 MPa (*L. frutescens*); en relación al periodo más seco, el Ψ_{pd} fluctuó de -1.86 MPa (*L. frutescens*) a -4.0 MPa (*A. texana*). Con respecto al Ψ_{md} durante el periodo más húmedo fluctuó de -1.08 MPa (*C. boissieri*) a -1.56 MPa (*A. texana*), mientras en el periodo más seco osciló de -2.0 MPa (*L. frutescens*) a -4.0 MPa (*A. texana*). Los Ψ diurnos mostraron valores máximos al preamanecer, disminuyendo gradualmente hasta alcanzar valores mínimos al mediodía y posteriormente recuperarse por la tarde. Sobre la base estacional, los Ψ_{pd} y Ψ_{md} se correlacionaron positivamente con el contenido de humedad del suelo y negativamente con la temperatura del aire; no obstante, no se detectó correlación con respecto a la humedad relativa y precipitación. En cuanto a los Ψ diurnos se correlacionaron negativamente con la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor, en cambio, la humedad relativa mostró una correlación positiva. El Ψ_{pd} explicó el 74% de la variabilidad total del Ψ_{md} . Dado que *B. celastrina*, *C. boissieri* y *L. frutescens* mantuvieron valores altos en condiciones de estrés para los Ψ_{pd} y Ψ_{md} con respecto a *A. texana*, estas especies se consideran tolerantes al déficit hídrico inducido por la sequía.

Palabras claves: Déficit hídrico, especies nativas, potenciales diurnos y estacionales, contenido de humedad en el suelo.

SUMMARY

Water deficit is one of the most limiting abiotic factors in the northeastern Mexico. The present study aimed to determine the water potential (Ψ) of native shrub species such as *Amyris texana* (Rutaceae), *Bumelia celastrina* (Sapotaceae), *Cordia boissieri* (Boraginaceae) and *Leucophyllum frutescens* (Scrophulariaceae) and related the moisture content in the soil, the atmospheric evaporative demand components and precipitation. The study was conducted at the Experimental Research Station of the Faculty of Forest Sciences, UANL, located in Linares county, state of Nuevo Leon. The Ψ were determined at intervals of 15 days from January 17 to October 31, 2011, at 06:00 h (Ψ_{pd} ; predawn) and 14:00 h (Ψ_{md} ; midday). Cumulative rainfall recorded at the site was 502.40 mm. During the wettest period, Ψ ranged from -0.40 MPa (*B. celastrina*) to -0.92 MPa (*L. frutescens*). With respect to Ψ_{pd} during the driest period, it varied from -1.86 MPa (*L. frutescens*) to -4.0 MPa (*A. texana*). In contrast, Ψ_{md} during the wettest period ranged from -1.08 MPa (*C. boissieri*) to -1.56 MPa (*A. texana*), while during the driest period ranged from -2.0 MPa (*L. frutescens*) to -4.0 MPa (*A. texana*). Diurnal Ψ showed maximum values at dawn, and then decreased gradually to minimum values at midday and in the afternoon it recovered. On a seasonal basis, Ψ_{pd} and Ψ_{md} was positively correlated with soil water content and negatively correlated with air temperature, however, no correlation was detected with relative humidity and precipitation. Diurnal Ψ was negatively correlated with air temperature and vapor pressure deficit, whereas, relative humidity showed a positive correlation. Ψ_{pd} explained 74% of the total variability Ψ_{md} . Since *B. celastrina*, *C. boissieri* and *L. frutescens* showed high Ψ_{pd} and Ψ_{md} during water stress conditions with respect to *A. texana*, these species are considered tolerant to water shortage induced by drought.

Key words: Water deficit, native species, potential diurnal and seasonal, moisture content in the soil.

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Mecanismos de respuesta al estrés hídrico. Leyenda: RWC, contenido hídrico relativo; SLW, peso específico foliar; Ψ , potencial hídrico.	13
Cuadro 2. Especies de plantas seleccionadas para la medición del potencial hídrico (Ψ).	29
Cuadro 3. Determinaciones analíticas y métodos utilizados en el análisis de suelo.	34
Cuadro 5. Propiedades físicas y químicas para el suelo del sitio.	35
Cuadro 6. Valores F y p de los resultados de análisis de varianza de una vía para el contenido de humedad en el suelo, χ^2 y valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para el potencial hídrico al preamanecer (Ψ_{pd}) y al mediodía (Ψ_{md}), para detectar diferencias significativas entre profundidades del suelo y las especies arbustivas, respectivamente en cada fecha de muestreo para el sitio. Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas.	45
Cuadro 7. Valores de P de la prueba de comparación de medias de Mann-Whitney U, con la corrección de Bonferroni, para detectar diferencias entre especie y horas del día para un muestreo dado. Valores en negritas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$).	46
Cuadro 8. Coeficiente de correlación de Spearman ($n=20$) para valores del potencial hídrico xilemático al preamanecer (Ψ_{pd}) y al mediodía (Ψ_{md}), en relación a la temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y contenido gravimétrico de humedad en el suelo en las cuatro especies nativas.	51
Cuadro 9. Coeficiente de correlación de Spearman para el potencial hídrico xilemático diurno en relación a variables del ambiente.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Principales instrumentos utilizados para medir el potencial hídrico, psicrómetros de termopares (a) y Bomba de presión tipo "Scholander" (b).....	15
Figura 2. Ubicación del sitio de estudio Linares, Nuevo León, México.	27
Figura 3. Características morfológicas de <i>Amyris texana</i> (a), <i>Bumelia celastrina</i> (b), <i>Cordia boissieri</i> (c) y <i>Leucophyllum frutescens</i> (d).....	31
Figura 4. Temperatura del aire, máxima extrema, media máxima, media mínima, mínima extrema y media mensual registrada en el sitio de estudio.....	39
Figura 5. Humedad relativa del aire, máxima extrema, media máxima, media mínima, mínima extrema y media mensual registrada en el sitio de estudio.	39
Figura 6 Precipitación mensual y precipitación máxima registrada en el sitio de estudio. Los valores que se ilustran corresponden a valores de precipitación máxima del mes.....	40
Figura 7. Contenido gravimétrico de humedad del suelo a cinco profundidades (cm) en las diferentes fechas de muestreo en el sitio de estudio. Los valores graficados representan la media \pm error estándar (n=4). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas entre profundidades para una fecha muestreo dado.	40
Figura 8. Potencial hídrico del xilema en cuatro especies nativas determinados al preamanecer (Ψ_{pd} ; 06:00 hrs) (a) y al mediodía (Ψ_{md} ; 14:00 hrs) (b) en diferentes fechas de muestreo en el sitio de estudio. Los valores graficados representan la media \pm error estándar (n=5). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas entre especies para un muestreo dado según la prueba de Kruskal-Wallis.	44
Figura 9. Curso diurno del potencial hídrico del xilema (Ψ) en cuatro especies y condiciones ambientales prevalecientes para la fecha de muestreo Jul-03 (a) y (b), Jul-14 (c) y (d), Jul-30 (e) y (f), respectivamente. Los valores graficados representan la media \pm error estándar (n=5). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas para una hora de muestreo dado.	49

- Figura 10. Curso diario del potencial hídrico del xilema (Ψ) en cuatro especies y condiciones ambientales prevalecientes para la fecha de muestreo Ago-15 (a) y (b), Ago-30 (c) y (d), respectivamente. Los valores graficados representan la media \pm error estándar (n=5). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas para una hora de muestreo dado.....50
- Figura 11. Relación entre el potencial hídrico del xilema al mediodía (Ψ_{md}) y al preamanecer (Ψ_{pd}) en cuatro especies nativas. La ecuación de regresión, el error estándar estimado para la pendiente y para el valor del intercepto del eje de la ordenada, el coeficiente de determinación ajustado (R^2). Valores de P, y el número de observaciones (n) se denotan dentro de la figura.52

1. INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico en las zonas áridas y semiáridas es uno de los principales factores del ambiente que afecta a las plantas durante los diferentes estadios de su crecimiento y desarrollo (Fischer y Turner, 1975). Por otra parte, la presión que ha venido ejerciendo la población sobre los recursos naturales en los últimos 200 años ha contribuido a la desertificación de millones de hectáreas en el mundo que conlleva a la erosión del suelo (Becerra, 1998).

En México, en un esfuerzo por revertir el deterioro de los diferentes ecosistemas, el gobierno federal creó en 1995 el programa nacional de reforestación (PRONARE) con el propósito de incrementar la cobertura vegetal del país (Niembro, 2001), de los cuales hasta el año 2000 de las 484 especies utilizadas en PRONARE para reforestación solo el 31.4% corresponde a árboles y arbustos nativos (9.7% coníferas y 21.7% correspondía a latifoliadas de clima templado y tropical), el resto 68.6% representaba palmas y cicadáceas especies exóticas que resultaban extraños a los lugares de reforestación (SEMARNAP, 1999). Las razones que limitan el uso de especies nativas en programas de reforestación y desarrollo agroforestal y restauración ecológica obedecen al desconocimiento de su biología y manejo.

El principal tipo de vegetación en el noreste de México, se conoce como matorral espinoso tamaulipeco y está constituida por una gran diversidad de arbustos y árboles espinosos. Este matorral cubre aproximadamente 200,000 km² incluyendo el sur de Texas y el noreste de México (Johnston, 1963; Udvardy, 1975). Las plantas del matorral son utilizadas por los habitantes de la

región en varias formas tales como forraje para el ganado, carbón, madera para construcción, estantería, alimentos, herbolaria, medicinas y semillas para reforestación con plantas nativas. Las plantas de esta región proveen de un hábitat a la fauna silvestre y una cubierta para prevenir la erosión del suelo (González y Cantú 2001).

Adicionalmente, las plantas han desarrollado diversas características morfológicas y fisiológicas apropiadas para la adaptación a factores ambientales adversos, particularmente al estrés por sequía y altas temperaturas. Tales características incluyen: dimensión y orientación foliar, morfología, dimensión y densidad de estomas, abscisión de folíolos, pubescencia foliar, cutícula gruesa y cerosa, disminución en el potencial osmótico en forma activa y pasiva y resistencia al flujo de agua (Kramer, 1983). Los arboles y arbustos de México pueden ser potencialmente valiosos para programas de reforestación, restauración ecológica y desarrollo agro-silvopastoril tolerando una variedad de manejos y cultivo (Niembro, 2001).

Se ha documentado en diversos estudios específicos el análisis de las diferentes respuestas al estrés mostradas por diferentes especies, clones o variedades en regiones con tipo de clima Mediterráneo. En México existe muy poca información sobre este tipo de estudios. El presente trabajo tuvo como finalidad el estudio de las especies en su ambiente natural y los patrones que determinan su estado hídrico. Así mismo, el entender los mecanismos de la resistencia al estrés permitirá comprender los procesos implicados en la adaptación y aclimatación de las especies en un ambiente adverso determinado. Entender el comportamiento de cuatro especies del Matorral

Espinoso Tamaulipeco (MET) y su relación con las condiciones prevalecientes en el sitio tales como el contenido de humedad del suelo, condiciones ambientales, propiedades texturales y composición de agregados, nos determinará la capacidad de adaptación de las especies en condiciones de recurso hídrico limitado y determinar cuales tienen más aptitud de prosperar en condiciones de escasas hídrica.

La información que se genere de este estudio servirá en gran medida para la toma de decisiones en el manejo de los recursos forestales ya sea para fines de reforestación de sitios degradados, proporcionar cobertura para la fauna silvestre o ganadería doméstica. El conocimiento de la especie mejor adaptada incrementa las posibilidades de éxito y sobrevivencia de las especies nativas y evitar la invasión de especies exóticas que pueden modificar y degradar el ecosistema.

Aunque se ha demostrado variación genética de los mecanismos fisiológicos para evitar la deshidratación del tejido vegetal en plantas cultivadas, a la fecha son limitados los estudios disponibles sobre las relaciones hídricas y adaptaciones a la sequía en plantas nativas del Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) de la región Noreste de México. Por tanto, esta región proporciona una oportunidad para investigar la fisiología de las especies arbustivas nativas y sus respuestas a las variaciones en la disponibilidad de recursos, específicamente, el contenido hídrico del suelo (González y Cantú, 2001).

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el potencial hídrico (Ψ) diurno y estacional de cuatro especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco de importancia agroforestal.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el potencial hídrico diurno y estacional en cuatro especies de plantas.
2. Explicar la relación del potencial hídrico con el contenido de humedad en el suelo y a los componentes de la demanda evaporativa atmosférica.

1.2. Hipótesis

1. Existe variación diurna y estacional en los potenciales hídricos (Ψ) entre las especies.
2. Los potenciales hídricos entre especies son influenciados por las variables ambientales tales como precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, y déficit de presión de vapor.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El matorral espinoso tamaulipeco (MET)

El matorral espinoso tamaulipeco (MET) comprende la planicie semiárida de la región Noreste de México (González y Cantú, 2001), este tipo de ecosistema cubre una superficie de 200,000 km² del noreste de México y sur de Texas, desde Llera de Canales y los límites de la Sierra Azul en Tamaulipas hasta el Altiplano Edwards (Edwards Plateau) en Texas (Diamond et al., 1987), y de la Sierra Madre Oriental hasta el Golfo de México (Jurado y Reid, 1989).

El clima predominante en la región es extremo, siendo muy caliente y seco. Según la clasificación de Köppen, el principal tipo de clima en la región noreste de México está asociado a los climas “B” secos. En relación a la temperatura, son muy extremos ya que se presentan temperaturas de más de 40°C en verano y 0°C durante el invierno. El promedio histórico de la precipitación en la planicie costera del golfo de México es de 350 a 500 mm. Los suelos son de origen aluvial y arcilloso, clasificados como castaños o chernozem (regosoles), estos suelos tienen una textura franco-arcillosos son característicos de la planicie Costera del Golfo (Merla, 1990).

Este ecosistema es bastante diverso respecto a las especies arbóreas, arbustivas y sub-arbustivas con relación a su densidad y altura (Alanís, 2006). La vegetación predominante es el mezquite (*Prosopis glandulosa*), chaparro prieto (*Acacia amentacea*), cenizo (*Leucophyllum frutescens*) y anacahuita (*Cordia boissieri*) (Merla, 1990). El matorral del noreste de México a sido

utilizado para la obtención de productos para la construcción de cercas (como estantería) y para la elaboración de aperos de labranza, además de la extracción de leña, la producción de carbón y sobre todo, la utilización de sus superficies para el establecimiento de áreas de cultivo y de pastoreo (Correa, 1996).

2.2. El agua en el suelo

Los principales factores intrínsecos de las plantas que afectan la absorción del agua desde el suelo es el potencial hídrico del tejido foliar, su tasa de transpiración y la extensión y eficiencia de su sistema radical. Por otra parte, influyen también los factores ambientales climáticos como temperatura, humedad del aire, velocidad y turbulencia del viento, y otros factores propios del suelo tales como textura, capacidad de retención hídrica, densidad aparente que tienen relación con el potencial hídrico del tejido foliar (Donoso, 1992).

En el suelo todos los procesos ecológicos son importantes, pero el agua que se encuentra en el suelo, específicamente aquella que las raíces de las plantas son capaces de utilizar, es la que tiene mayor importancia (Donoso 1992). Por su parte (Pizarro 1996) puntualiza que el agua es el principal componente de las plantas; en algunos casos, los órganos o estructuras vegetales representa más del 90% en peso. El agua actúa como disolvente y medio de transporte de gases, minerales y otras sustancias esenciales para la vida vegetal y es asimismo un reactivo de procesos fundamentales, como la fotosíntesis.

La capacidad del suelo para almacenar agua depende dentro de sus propiedades físicas básicamente de características como textura, estructura, densidad aparente, pedregosidad, porosidad, entre otras (Simpfendörfer, 2001). Parte de agua del suelo que puede ser absorbida a un ritmo adecuado para permitir el crecimiento normal de las plantas que viven sobre el suelo es el Intervalo de Humedad Disponible (IHD) (Artigao y Guardado 1984), la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{IHD} = \text{CC} - \text{PMP}$$

Dónde:

IHD = Intervalo de humedad disponible (%)

CC = Capacidad de campo

PMP = Punto de marchites permanente

2.2.1. Contenido de agua en el suelo

Desde el punto de vista agronómico, el contenido útil de agua en los suelos está determinado por los límites situados entre la capacidad de campo, límite superior, y el punto de marchitamiento permanente, límite inferior, que es lo que define la cantidad de agua disponible para las plantas. Estos límites corresponden normalmente a un potencial de agua de -0.03 MPa para la capacidad de campo y -1.5 MPa para el punto de marchitamiento permanente (Artigao y Guardado 1984).

La importancia del potencial hídrico desde el punto de vista teórico es que define el estado energético del agua en el suelo. Pero poco informativo como

valor absoluto para la cantidad de agua en un determinado perfil, ya que dependen otras características del suelo principalmente la textura (los suelos arenosos tienen una capacidad de almacenamiento de agua menor a los suelos arcillosos) por lo que un mismo valor de potencial hídrico supondría diferentes volúmenes de agua disponible para la planta en diferentes tipos de suelo. La importancia de determinar el contenido de agua en suelos, ya sea en términos de peso o volumen y el estado energético en que se encuentra el agua (potencial hídrico) lo cual condujo a la necesidad de generar métodos para cuantificar su disponibilidad para las plantas (Artigo y Guardado 1984).

2.2.2. Flujo del agua en el suelo

El flujo del agua en el suelo se da por diferencia de potenciales de un punto de mayor a otro de menor potencial (Artigo y Guardado 1984). Las fuerzas que originan este movimiento son por gravedad, osmosis y capilaridad. Los movimientos se dividen en flujo saturado cuando es por gravedad a succiones menores de 0.03 MPa y el flujo no saturado ocurre cuando el agua tiene succiones mayores a 0.03 MPa donde intervienen otras fuerzas a parte de la gravedad (Donahue et al. 1987).

La circulación del agua en el suelo depende de la velocidad de infiltración que se define como el volumen de agua que entra en el perfil por unidad de tiempo. El flujo no saturado en el suelo se da cuando la velocidad de aplicación del agua es menor a la velocidad de infiltración y el agua se desplaza a través

de los poros aumentando la profundidad de humedecimiento sin ocupar toda la porosidad disponible lo cual es condicionado por los potenciales matricial y gravitacional. Mientras que el flujo saturado resulta cuando la intensidad de la lluvia es superior a la velocidad de infiltración, induce la formación de una lámina de agua en la superficie que tiende a decrecer a medida que penetra en el perfil hasta llegar a la saturación. Este proceso está influenciado por los potenciales de presión y gravitacional, mientras que el potencial matricial es nulo en condiciones de saturación (Honorato, 1994).

2.2.3. Implicaciones del agua en el desarrollo de las plantas

El agua es la molécula esencial para la vida; en las plantas constituye típicamente del 80 al 95% de la masa de los tejidos en crecimiento y desempeña varias funciones únicas. Es el solvente más abundante y mejor conocido y, como tal, permite el movimiento de moléculas dentro y entre las células. Debido a sus propiedades polares, tiene gran influencia en la estructura y la estabilidad de moléculas tales como proteínas, polisacáridos y otras (Kirkham, 2005).

El ambiente semiárido impone condiciones o factores estresantes que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas. Dentro de estos factores se encuentran los abióticos como la sequía o estrés hídrico, llamado también estrés físico. El déficit hídrico es el principal factor limitante, además,

las altas temperaturas son importantes en zonas áridas y tropicales (Azcon y Talon, 2003).

2.2.4. Las plantas frente al estrés

Las plantas están continuamente expuestas a estímulos ambientales que influyen en su desarrollo, crecimiento y determinan su productividad. El déficit de agua es el factor ambiental más común que produce estrés, así como un factor limitante para la productividad en las plantas. Sin embargo, las plantas sufren estrés hídrico no sólo en la sequía y altas concentraciones de salinidad, sino también en condiciones de bajas temperaturas (Shinozaki et al. 1997).

El estudio de las respuestas de las plantas al estrés es un aspecto fundamental de la fisiología ambiental o ecofisiología vegetal, la cual tiene como objetivo conocer cómo las plantas funcionan en sus ambientes naturales y cuáles son los patrones que determinan su distribución, supervivencia y crecimiento (Kramer y Boyer 1995). Cuando una planta está sometida a unas condiciones significativamente diferentes de las óptimas para la vida se dice que está sometida a estrés o está bajo tensión; si bien las diferentes especies o variedades difieren en sus requerimientos óptimos y por tanto en su susceptibilidad a un determinado estrés (Hsiao 1973; Levitt 1980).

El conocimiento de los mecanismos de tolerancia y resistencia al estrés permite el entender los procesos evolutivos que han influenciado en las plantas sobrevivir en un ambiente adverso y seleccionar las mejores especies vegetales

adaptadas ante el inminente cambio climático global. Así mismo, el mejoramiento de las características de las plantas en su fase de cultivo como en la selección de variedades que se ajusten a requerimientos ambientales determinados o, simplemente, en mejorar la productividad de una especie (Kozlowski et al. 1991).

2.2.5. Estrategias de las plantas frente al déficit hídrico

La disponibilidad hídrica es considerada es uno de los factores que afecta la actividad de las plantas en los diferentes ecosistemas (Di Castri et al. 1981 y Blondel y Aronson, 1999). Como respuesta de las plantas frente al déficit hídrico, pueden seguir una ruta de evasión o mecanismos que permiten tolerarlo en las plantas; estas respuestas son conocidos como estrategias y son características para cada especie y ambas estrategias pueden coexistir en cualquier tipo de sistemas (Levitt, 1980).

La sobrevivencia de las plantas ante el estrés hídrico es de gran importancia para los diferentes ecosistemas en donde se desarrollan, lo que inducirá a las plantas a tres respuestas posibles: escapar, evitar o tolerarlo. La estrategia de evasión o escape a la sequía es aquella donde la planta completa su ciclo vital antes de la llegada del estrés hídrico y en los periodos desfavorables pasan en forma de semilla, aunque muchos autores no consideran esta estrategia como autentica resistencia al déficit hídrico.

En plantas anuales escapan de las temporadas secas como semillas, órganos muy tolerantes a la desecación. Una pequeña fenología asociada con la falta de sensibilidad al fotoperiodo y plasticidad del desarrollo facilita la floración en cualquier etapa de desarrollo de la planta, permitiendo al escape de la sequía (Levitt, 1980).

El grado de tolerancia varía de una planta a otra de un punto mínimo al más elevado, generalmente estas plantas pueden sobrevivir con el contenido mínimo de agua en sus tejidos. Además del ajuste osmótico, puede aumentar la tolerancia a la deshidratación, disminuyendo el potencial hídrico en las hojas, en el cual el contenido de agua crítico es alcanzado (Flower y Ludlow, 1986).

La estrategia evitadora del estrés hídrico de las plantas minimiza o previenen la penetración del estrés hídrico en sus tejidos ya que son muy sensibles a la deshidratación de tal forma que las especies maximizan la absorción de agua (sistemas radiculares profundos) o bien minimizar las pérdidas de agua (cierre de estomas rápido, sensibilidad a la baja disponibilidad hídrica, hojas pequeñas y bajas tasas de transpiración) por lo que dentro de las dos estrategias se encontrarían dos mecanismos evitadores; gasto excesivo del agua el cual permite mantener hidratado los tejidos en plena sequía y por otro lado, el ahorro del agua (Levitt 1980 y Kozlowski et al. 1991). El Cuadro 1 ilustra los diferentes mecanismos de respuesta al estrés hídrico en plantas (Valladares et al. 2004).

Cuadro 1. Mecanismos de respuesta al estrés hídrico. Leyenda: RWC, contenido hídrico relativo; SLW, peso específico foliar; Ψ , potencial hídrico.

	Rasgo	Estrategia
Hojas	– Mantenimiento de Ψ alto	Evitadora
	– Mantenimiento de Ψ bajo	Tolerante
	– Cierre de estomas a RWC alto	Evitadora
	– Cierre de estomas a RWC bajo	Tolerante
	– Fuerte cierre de estomas al mediodía	Evitadora
	– Baja absorción de la radiación	Evitadora
	– Alta capacitancia foliar	Evitadora
	– Baja conductancia cuticular	Evitadora
	– Alto SLW	Evitadora
	– Poca cantidad de hojas	Evitadora
	– Abscisión foliar durante el estrés	Evitadora
Raíces	– Raíces profundas	Evitadora
	– Gran densidad de raíces	Evitadora
	– Alta superficie de absorción en relación con baja superficie transpirante	Evitadora
	– Raíces suberificadas	Evitadora
	– Alta relación biomasa radical / biomasa aérea	Evitadora
	– Sistema radical dual	Evitadora
Anatomía / Metabolismo	– Alto peso específico radical	Evitadora
	– Alta conductividad hidráulica	Evitadora
	– Tejidos sensibles a deshidratación (RWC letal > 50%)	Evitadora
	– Tejidos resistentes a deshidratación (RWC letal < 25%)	Tolerante
	– Resistente a la cavitación del xilema	Tolerante
	– Pequeño tamaño celular	Tolerante
	– Ajuste osmótico	Tolerante
	– Alta elasticidad de pared celular	Tolerante
	– Capacidad de rebrote	Tolerante
	– Resistencia a la disfuncionalidad de membrana celular	Tolerante
	– Acumulación sustancias osmoprotectoras (prolina, betaína)	Tolerante
– Sistemas antioxidantes	Tolerante	
– Estabilidad pigmentos fotosintéticos	Tolerante	
– Alta foto-inhibición	Tolerante	

2.3. Especies Nativas

A través del PRONARE (Programa Nacional de Reforestación), desde su inicio hasta el año 2000, se han producido en el país más de 1,500 millones de plantas para reforestar una superficie de 571 mil hectáreas (SEMARNAT, 2001). Como consecuencia de lo anterior, las variadas especies de árboles y arbustos tanto nativos como exóticos también han aumentado considerablemente. Desafortunadamente, de las 484 especies de plantas utilizadas por el PRONARE a nivel nacional, sólo el 31.4% corresponde a árboles y arbustos nativos (9.7% son coníferas y 21.7% son latifoliadas de clima templado y tropical), el resto (68.6%) está representado por palmas y cícadas y por especies exóticas las cuales resultan extrañas a los hábitats que se están reforestando (SEMARNAP, 1999).

Muchos de los árboles y arbustos nativos de México pueden ser potencialmente valiosos para ser utilizados en programas de reforestación, restauración ecológica y desarrollo agrosilvopastoril, tolerando variadas formas de manejo y cultivo en uno o más sistemas de uso de la tierra en regiones cálido-húmedas, templado-frías, áridas y semiáridas (Niembro, 2001). El poco uso de las especies nativas obedece al desconocimiento de total o parcial de la biología y las adaptaciones al ambiente donde se desarrollan.

2.4. Relaciones hídricas

Las relaciones hídricas de las plantas tienen una base física química bien firme, en el sentido de que el estado hídrico se puede describir cuantitativamente mediante la medición del potencial hídrico. Entre más hidratado esté el tejido vegetal más alto es su valor y se acerca a cero. Entre más deshidratado esté el tejido vegetal, los valores se alejan de cero. Los valores del potencial hídrico son negativos y se reportan en unidades de presión (Megapascal, MPa). La instrumentación más importante (Figura 1) que se utiliza para la medida del potencial hídrico son: a) Psicrometría (psicrómetros de termopares) y b) Bomba de presión tipo "Scholander" (Valladares et al. 2004).

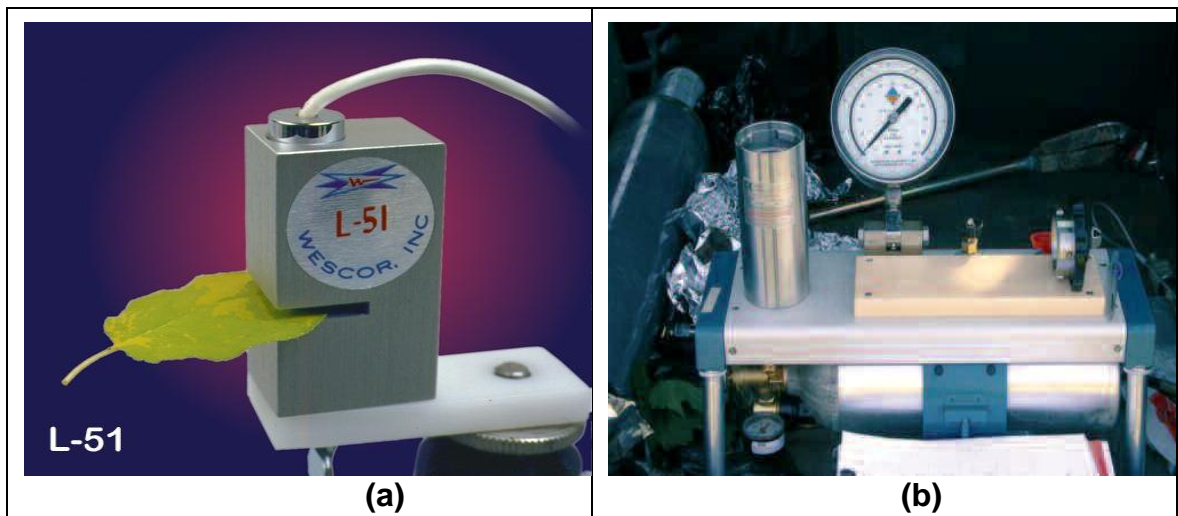


Figura 1. Principales instrumentos utilizados para medir el potencial hídrico, psicrómetros de termopares (a) y Bomba de presión tipo "Scholander" (b).

En el supuesto de que la planta se desarrolla en condiciones de muy baja transpiración, con el sistema radical en un medio bien aireado, húmedo y

caluroso, frecuentemente aparecerán gotitas de agua en los ápices y márgenes de las hojas. Estas gotitas, a las que se les denomina gotas de gutación, salen a través de los hidatodos, estructuras anatómicas que se encuentran en las hojas. La fuerza responsable de la gutación se denomina presión radical y surge de las raíces.

Han surgido controversias en las propuestas de acuerdo a numerosos estudios llevados a cabo con diferentes especies de plantas, en condiciones ambientales heterogéneas, estaciones de crecimiento y procesos fisiológicos determinados (Valladares et al. 2004). A medida que el contenido de humedad decrece, el déficit hídrico se incrementa a tal grado que afecta los procesos fisiológicos y la planta entra en un estrés hídrico. A nivel fisiológico y celular tal como lo plantearon Salisbury y Ross (1994), el crecimiento celular depende de la absorción del agua por las células, el cual es uno de los procesos que se ven afectados por el estrés hídrico, lo que conlleva a una reducción en el rendimiento vegetal, procesos como la fotosíntesis, síntesis de proteínas y paredes celulares.

2.4.1. Relaciones hídricas en el Noreste de México

Estudios realizados por González y Cantú (2001), en un estudio sobre las respuestas adaptativas de plantas arbustivas, encontraron que los valores del potencial hídrico al preamanecer entre los periodos más húmedos y secos fluctuaron entre -0.5 y -7.3 MPa de un total de diez especies evaluadas. La

capacidad de regular el agua (osmoregulación) fue observada en seis especies arbustivas. Este valor osciló entre -1.11 y -2.65 MPa. En ese mismo estudio, los autores indican que los patrones estacionales de los potenciales hídricos pueden ser explicados por la disponibilidad hídrica del suelo en un rango de 65 al 87%. Los resultados han señalado que las respuestas de las especies arbustivas para evitar el estrés por sequía están relacionadas con sus potenciales hídricos y osmóticos y con la respuesta de la interacción ante variables ambientales, específicamente la disponibilidad de agua en el suelo.

González et al. (2004), realizaron un estudio del comportamiento del potencial hídrico en seis especies arbustivas nativas del noreste de México, donde encontraron que todas las especies mostraron la típica forma de variación diurna para el potencial hídrico. Esto es que el potencial hídrico mantuvo valores máximos al preamanecer y alcanzar los valores mínimos al mediodía y posteriormente se recuperan por la tarde. Sobre una base diurna y con un adecuado contenido de humedad en el suelo ($>0.20 \text{ kg agua kg}^{-1}$ de suelo), los valores del potencial diurno difieren entre especies de arbustivas y fueron negativamente y significativamente correlacionados con la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor (determina la pérdida de agua de la planta). En cambio, para la humedad relativa se detectó una relación significativa y positiva. Con respecto a una base estacional, durante el periodo más húmedo (contenido de humedad en el suelo $>0.20 \text{ kg agua kg}^{-1}$ de suelo), los valores más altos en el potencial hídrico al preamanecer (-0.10 MPa) y al mediodía (-1.16 MPa) fueron observados en *Randia rhagocarpa*, mientras que los valores más bajos (-0.26 y -2.73 MPa, respectivamente) fueron

detectados en *Acacia amentacea*. Por otro lado, durante el periodo más seco (contenido de humedad en el suelo <0.15 0.20 kg agua kg^{-1} de suelo), los valores del potencial hídrico al preamanecer y al mediodía fueron muy bajos (-7.3 MPa) mostraron las especies arbustivas un severo déficit hídrico. El contenido de humedad del suelo a diferentes profundidades, la humedad relativa y la precipitación fueron significativamente correlacionadas para ambos tanto con el potencial hídrico al preamanecer como al potencial hídrico al mediodía. El promedio del contenido de humedad del suelo en el perfil de 0-50 cm explica entre un 70% y 80% de la variación del potencial hídrico al preamanecer. Adicionalmente, en dicho estudio se observó que un contenido gravimétrico de la humedad del suelo superior al 0.15 kg agua kg^{-1} de suelo, los valores del potencial hídrico al preamanecer son altos y constantes; por debajo de este umbral, los valores del potencial disminuyen gradualmente. Entre las seis especies de arbustos estudiadas, la especie *Acacia amentacea* es la más tolerante a la sequía, ya que durante el periodo de sequía dicha especie tiende a mantener valores del potencial hídrico al preamanecer significativamente más altos en relación a *Bernardia myricaefolia*. El resto de las especies mostraron un comportamiento intermedio. Se concluye que la habilidad de las especies arbustivas bajo estrés de sequía depende de absorción de agua y como se controla la pérdida de agua a través del flujo transpiracional.

González et al. (2008), estudiaron el comportamiento del potencial hídrico en especies arbustivas del noreste de México, encontrando durante el periodo más húmedo potenciales hídricos al preamanecer de -0.72 (*Cordia boissieri*) a -1.30 MPa (*Bumelia celastrina*). En cambio, durante el periodo seco, el potencial

hídrico fluctuó de -2.90 MPa (*B. celastrina*) a -6.10 MPa (*Diospyros texana*). Por el contrario, los potenciales hídricos al mediodía, en el periodo húmedo los valores registrados fluctuaron de -1.45 MPa (*C. boissieri*) a -1.8 MPa (*B. celastrina*) y para el periodo seco, los valores registrados oscilaron de -3.6 MPa a -6.0 MPa (*B. celastrina*). Los valores diurnos del potencial hídrico fueron correlacionados negativamente con la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor, en cambio, se relacionó positivamente con la humedad relativa. En dicho estudio, la capacidad de las especies para enfrentar el estrés por sequía depende de la forma en cómo se adquiere el agua y la manera de controlar en menor grado la pérdida de esta a través de la transpiración.

Uvalle (2008), en un estudio realizado con diez especies nativas del noreste de México, en épocas de sequía y de humedad en dos sitios de estudio con un patrón climático similar, encontró los valores más bajos en el potencial hídrico al mediodía para las especies *Zanthoxylum fagara* (-7.0 MPa), *Lantana macropoda* (-7.2 MPa) y *Karwinskia humboldtiana* (-7.0 MPa) bajo la condición de sequía. Los valores más altos fue detectado en *L. macropoda* (-0.35 MPa) bajo condiciones de humedad favorable. Adicionalmente, Uvalle (2008) observó valores altos en el potencial hídrico al preamanecer para las especies *K. humboldtiana* (-0.52 MPa), *Forestiera angustifolia* y *L. macropoda* ambas con -0.55 MPa. Por lo que concluyó que los valores de los potenciales hídricos al preamanecer y al mediodía están relacionados a las diferencias en los contenidos de humedad disponible en el suelo y probablemente a los componentes de la demanda evaporativa atmosférica.

En otro estudio, González et al. (2010), reportó que el comportamiento del potencial hídrico al preamanecer durante la época húmeda oscilaron de -0.29 MPa (*Celtis pallida* y *Castela texana*) a -0.37 MPa (*Forestiera angustifolia* y *Zanthosylum fagara*) y para el periodo seco, los valores fluctuaron de -3.28 MPa (*F. angustifolia*) a -4.50 MPa (*Z. fagara*). En lo que respecta a los potenciales al mediodía, *E. texana* registró los valores más altos (-1.14 MPa) y bajo (-4.20 MPa) tanto para el periodo húmedo como para el seco. Dichos autores señalan que la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor influyen negativamente con los valores del potencial hídrico en todas estas especies, contrariamente, el aumento de este se debe en gran término al incremento en la humedad relativa. En el mencionado estudio, se concluyó que las especies *F. angustifolia* y *C. pallida* fueron las que mantuvieron los valores más altos tanto para los potenciales hídricos al preamanecer como al mediodía bajo condiciones de estrés hídrico, siendo consideradas estas especies aptas para la sequía. En cambio, las especies *Z. fagara* y *E. texana* adquirieron los valores más bajo siendo las menos aptas para la sequía.

González et al. (2011) determinaron el potencial hídrico xilemático (Ψ) de especies arbustivas nativas tales como *Celtis pallida* (Ulmaceae), *Acacia amentacea* (Leguminosae) *Forestiera angustifolia* (Oleaceae) y *Parkinsonia texana* (Leguminosae) encontrando fluctuaciones para el periodo más húmedo del Ψ al preamanecer varió de -0.30 (*C. pallida*) a -0.90 MPa (*P. texana*); en cambio, en el periodo más seco, el Ψ al preamanecer fluctuó de -2.18 (*P. texana*) a -3.94 MPa (*F. angustifolia*). Al mediodía, *P. texana* y *F. angustifolia*

mostraron el mayor (-1.14 MPa) y menor (-3.38 MPa) valor, respectivamente. En dicho estudio se observó que el contenido promedio de humedad en el suelo en el perfil de profundidad de 0-50 cm explica entre 82 y 33% de la variación del Ψ al preamanecer. El Ψ del mediodía, los contenidos de humedad del suelo a diferentes profundidades y la humedad relativa se correlacionaron significativamente y positivamente con él Ψ al preamanecer; en cambio la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor se correlacionaron negativamente. Dado que *A. amentacea* y *P. texana* mantuvieron altos valores en el Ψ al preamanecer y al mediodía bajo condiciones de estrés hídrico, estas especies fueron consideradas como especies tolerantes a la sequía.

2.4.2. Relaciones hídricas en otros ecosistemas

Goldstein et al. (1986) estudiaron las relaciones hídricas y estacionales de cuatro especies arbóreas siempreverdes para las sabanas neotropicales las cuales fueron *Curatella americana*, *Byrsonima cressifolia*, *Bowdichia virgilioides* y *Casearia sylvestris*. Encontrando que los cambios estacionales del potencial hídrico en el suelo fueron más pronunciadas en los horizontes superficiales alcanzando valores de hasta -2.0 MPa durante el periodo seco. Las fluctuaciones fueron amortiguadas en los perfiles más profundos sugiriendo una adecuada disponibilidad del agua durante el periodo de sequía para las especies con sistemas radicales profundos. Por otro lado, el potencial de la mañana y mínimo para *C. americana* y *B. crassifolia* se mantuvieron constantes

durante todo el año de estudio, a diferencia de *B. virgilioides* y *C. sylvestris* que experimentaron una disminución durante la época seca. Las resistencias hidráulicas se mantuvieron constantes durante todo el periodo de observación para *C. americana* y *B. crassifolia*, mientras que las variaciones estacionales fueron muy marcadas en las otras dos especies y particularmente en *C. sylvestris*. *Bowdichia virgilioides* sería la especie más evasora del déficit hídrico, al experimentar el punto de pérdida de turgencia más positivo, resistencias hidráulicas menores y un control estomático severo aun a bajo déficits de presión de vapor. *C. sylvestris* sería la especie más tolerante a déficits hídricos debido a que posee los valores de pérdida de turgencia más negativos y experimenta los potenciales hídricos más bajos con un sistema radical relativamente superficial. Finalmente, *C. americana* y *B. crassifolia* tendrían estrategias intermedias de resistencia a la sequía.

Estudios realizados por Catalán (1988), en el continuo resistencia hidráulica suelo-planta-atmósfera y los mecanismos de regulación del balance hídrico en dos especies siempre verdes de sabana, matorral y dos del bosque de galería encontraron que las especies de sabana que poseen un sistema radicular profundo tienen altos valores de conductancia foliar y bajos valores de resistencia hidráulica. En cambio, las plantas del matorral obtuvieron valores altos a la resistencia hidráulica. Estas características sugieren que estas especies vegetales son relativamente tolerantes a déficits hídricos a pesar de que el agua disponible se encuentra a grandes profundidades durante gran parte del año. Por lo que las especies del matorral son más evasoras a períodos de déficit hídrico en el suelo, que las especies siempre verdes de

sabana. El análisis de los resultados indica que las especies estudiadas, frente a la combinación de ciertas características climáticas y edáficas poseen diferentes mecanismos morfo-funcionales que les permiten sobrevivir a épocas y sitios con distinta disponibilidad de agua en el suelo.

Ezcurra et al. (1992) en un estudio de potencial hídrico y apertura de folíolos han encontrado en *Larrea tridentata* bajo condiciones de estrés hídrico valores de -8.5 MPa. Esto implica que después de suspender el riego durante dos semanas, la cantidad de agua disponible en el suelo para plantas juveniles de gobernadora fue prácticamente nula. Por el contrario, después de regar a saturación el suelo se recargó de agua y el potencial hídrico adquirió un valor de 0 MPa, el cual, se mantuvo durante una semana. La apertura foliar varió significativamente con el estado hídrico de la planta, la hora del día y la edad de la hoja; sin diferencias entre las plantas individuales. Las plantas sometidas a estrés mostraron aperturas foliares menores a las que no fueron expuestas.

Por su parte Azóca et al. (1992) reportó en la relación hídrica e intercambio de gases en dos especies de mangles (*Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*), llevado a cabo tanto en época seca y húmeda de la costa norte de Venezuela, encontraron que los potenciales hídricos mínimos de las dos especies disminuyen progresivamente desde finales de la época húmeda (-4.7 MPa) hasta mediados de la época seca (-5.2 MPa). Ambas especies experimentaron grandes variaciones del potencial hídrico foliar mostrando pérdida de turgencia durante algunas horas del día, de una época a la otra, la cual pudo estar relacionado con el potencial hídrico del suelo, en donde se observaron las mismas tendencias.

Gyenge et al. (2005) realizaron un estudio con la especie *Austrocedrus chilensis* durante la sequía para conocer los posibles mecanismos relacionados con la resistencia a la sequía o la evasión de esta sobre la especie. Se concluyó que *A. chilensis* tiene un alto potencial osmótico en plena turgencia, un alto potencial hídrico en el punto de pérdida de turgencia, bajo módulo de elasticidad, y no presenta ajuste elástico u osmótica tras la sequía. Además de que esta especie tiene una alta vulnerabilidad a la cavitación, tampoco se encontraron diferencias entre las procedencias estudiadas en estas variables. Los resultados confirman que *A. chilensis* es una especie de evasión a la sequía y sugiere que la diferenciación fenotípica y morfológica entre las poblaciones permite la supervivencia de las especies a través de su amplia distribución.

Himmelsbach (2010), estudió la variación diurna y estacional de potenciales hídricos en cuatro especies de árboles nativos como indicadores de factores ambientales en la Sierra Madre Oriental, encontrando que los potenciales hídricos disminuyeron con el incremento en la sequía y la escasa disponibilidad de agua en el suelo. Se encontraron diferencias significativas comparando los potenciales de las cuatro especies, estaciones y horas del día. Se obtuvieron valores altos y relativamente similares para las cuatro especies en cuanto a los potenciales hídricos al preamanecer y bajos para el mediodía. Las correlaciones entre los potenciales y los factores ambientales dependieron de las especies y fue en general altamente significativa con el contenido de agua en el suelo por la mañana y con la demanda evaporativa de la atmósfera por la tarde. Las especies que mostraron un comportamiento mejor a las

condiciones ambientales medidas fueron *Arbutus xalapensis*, *Juniperus flaccida* y *Quercus canbyi* en comparación con *Pinus pseudostrobus*. Por lo que se encontraron diferencias entre las especies en su forma de adaptación a los periodos de sequía; *P. pseudostrobus* utiliza su sistema radicular profundo para evitar los efectos negativos de una escasez de agua, mientras que las otras especies poseen diversas capacidades fisiológicas para superar periodos de sequía.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características del área de estudio

3.1.1. Ubicación

El estudio se llevó a cabo en el Campus de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (24°47'N; 99°32'O) (Figura 2), con una elevación de 350 msnm, ubicada en el Municipio de Linares. El tipo de clima según Köppen (1938), modificado por García (1981) citado por González et al. (2004), que se encuentra en el área es subtropical y semiárido con verano cálido. La temperatura media anual del aire oscila entre los 14.7°C en Enero a 22.3°C en Agosto, aunque en verano son comunes temperaturas de 45°C. La precipitación media anual es de 805 mm con distribución bimodal.

3.1.2. Suelo

El suelo que comúnmente se encuentran en el sitio son vertisoles profundos con una coloración gris-oscuro; son arcillo-limosos con altos contenidos de montmorillonita, los cuales se expanden y contraen en relación a los cambios de contenido de humedad en el suelo. La vegetación predominante en el sitio de estudio es el Matorral Espinoso Tamaulipeco ó Matorral Subtropical Espinoso (COTECOCA-SARH 1973; SPP-INEGI 1986).

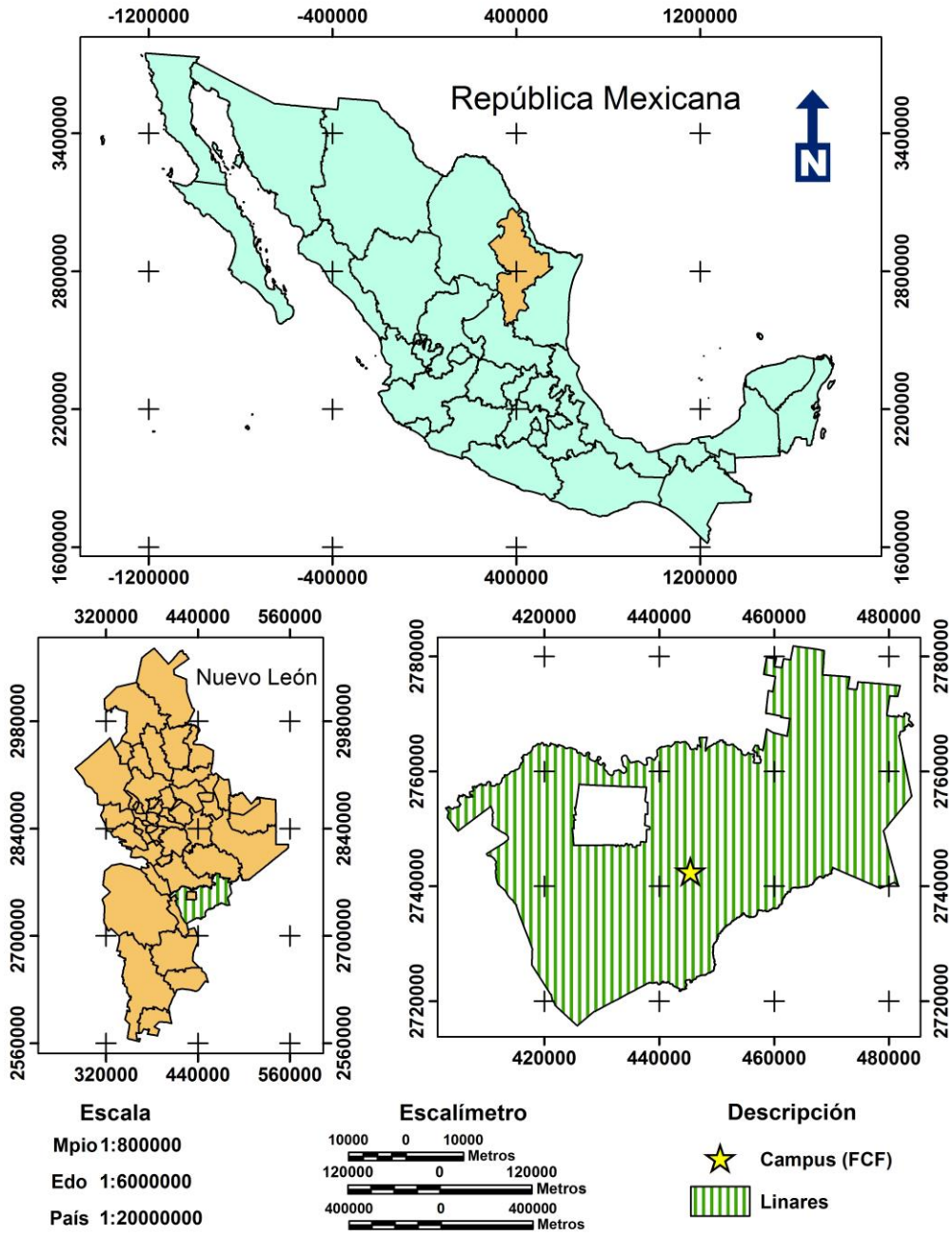


Figura 2. Ubicación del sitio de estudio Linares, Nuevo León, México.

3.1.3. Vegetación del área de estudio

El principal tipo de vegetación que se encuentra en el sitio de estudio, es conocida como Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET), el cual se compone de arbustos, zacatales y arboles diversos, densos y espinosos, los cuales se distinguen por tener un amplio rango taxonómico, presentando patrones de crecimiento diferente, diversidad en desarrollos fenológicos, dinámicas de crecimiento y longevidad foliar (Alanís et al. 1996).

3.1.4. Material vegetal

De acuerdo a su importancia ecológica y valor nutricional para el ganado doméstico y fauna silvestre (González et al. 2010) y usos múltiples de plantas arbustivas del noreste de México (Reid et al. 1990), en el sitio de estudio se seleccionaron cuatro especies de plantas arbóreas y arbustivas dentro de una parcela previamente delimitada de 50 x 50 m sin disturbio y representativa del MET (López, 2010). Cinco plantas de cada especie fueron seleccionadas aleatoriamente dentro de la parcela, siendo estas etiquetadas con la leyenda especie vegetal, repetición y sitio de estudio. Los nombres científicos, comunes y familia a la que pertenece cada especie se denota en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Especies de plantas seleccionadas para la medición del potencial hídrico (Ψ).

Nombre científico	Nombre común	Familia
<i>Amyris texana</i>	Chapotillo	Rutaceae
<i>Bumelia celastrina</i>	Coma	Sapotaceae
<i>Cordia boissieri</i>	Anacahuita	Boraginaceae
<i>Leucophyllum frutescens</i>	Cenizo	Scrophulariaceae

3.2. Descripción de las especies estudiadas

3.2.1. *Amyris texana* (Buckl.) P. Wilson

Conocido comúnmente como chapotillo, *Amyris texana* (Bluckl.) P. Wils. Arbusto aromático glabro, de 1 a 2 m de altura; hojas alternas trifoliadas, folíolos lustrosos con bordes ondulados; flores pequeñas y poco atractivas; se distribuye en Texas, Nuevo León, Tamaulipas y norte de Veracruz. La floración se presenta de primavera a otoño. Prospera en lugares preferentemente planos o de poca inclinación; tiene posibilidad de usarse en arriates arbustivos en combinación con otras especies de follaje no muy denso, ni cerrado (Alvarado et al. 2010).

3.2.2. *Bumelia celastrina* H. B. K.

Conocido como Coma. Es un arbusto o árbol pequeño de 2-9 m de altura y espinoso, las hojas con los pecíolos hasta de 1 cm de largo, generalmente fasciculadas, excepto en las ramas jóvenes; espatuladas, ápice redondeado y la base cuneada, hasta de 4 cm de longitud y 2.5 cm de ancho, generalmente más

pequeñas; firmes, las venas no muy prominentes, De tres a quince flores en grupos de tres a 10; corola de 3 a 4.5 mm de largo, ovario piloso en la base, el estilo de 2.5-4 mm de longitud, fruto elipsoidal a cilíndrico, de 7-13 mm de largo, azul-oscuro; presenta látex abundante en estado inmaduro (Martínez 1987).

3.2.3. *Cordia boissieri* A. DC.

Anacahuita, olivo mexicano u olivo texano, son arbustos o árboles pequeños de hasta 8 m, posee una corteza gruesa y gris, con hojas ovadas de 8 a 12 cm de largo y superficie pilosa-aterciopelada. Las flores en grupos de 5 a 8, blancas con el centro amarillento, de hasta de 45 mm de longitud; fruto ovoide de 2.5 a 3 cm, pardo-verdoso a púrpura, carnosos y dulces; con 1 a 4 semillas. Se distribuye en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí y Michoacán (Martínez 1987). El fruto es comestible y constituye una fuente de alimento para mamíferos silvestres, aves y ganado doméstico. Las hojas son consumidas como forraje y los tallos se usan como estantes para cercas o para construcción en zonas rurales, además de presentar un notable uso como planta ornamental (Alanís et al. 1996).

3.2.4. *Leucophyllum frutescens* (Berl.) I. M. Johnston

Arbusto de hasta 2.5 m de altura con ramaje denso y pubescente de tricomas estrellados. Hojas sésiles o casi sésiles, elíptico obovadas, hasta de 2.5 cm de longitud, redondeadas en el ápice y cuneadas en la base. Flores vistosas solitarias, en las axilas de las hojas; lóbulos del cáliz oblongo-

lanceolados; corola campanulada de color rosa púrpura, raramente blanca, de aproximadamente 2.5 cm de ancho con una suave velloidad en el interior. El fruto es una cápsula de color café con numerosas y pequeñas semillas (Rodríguez et al. 1988).

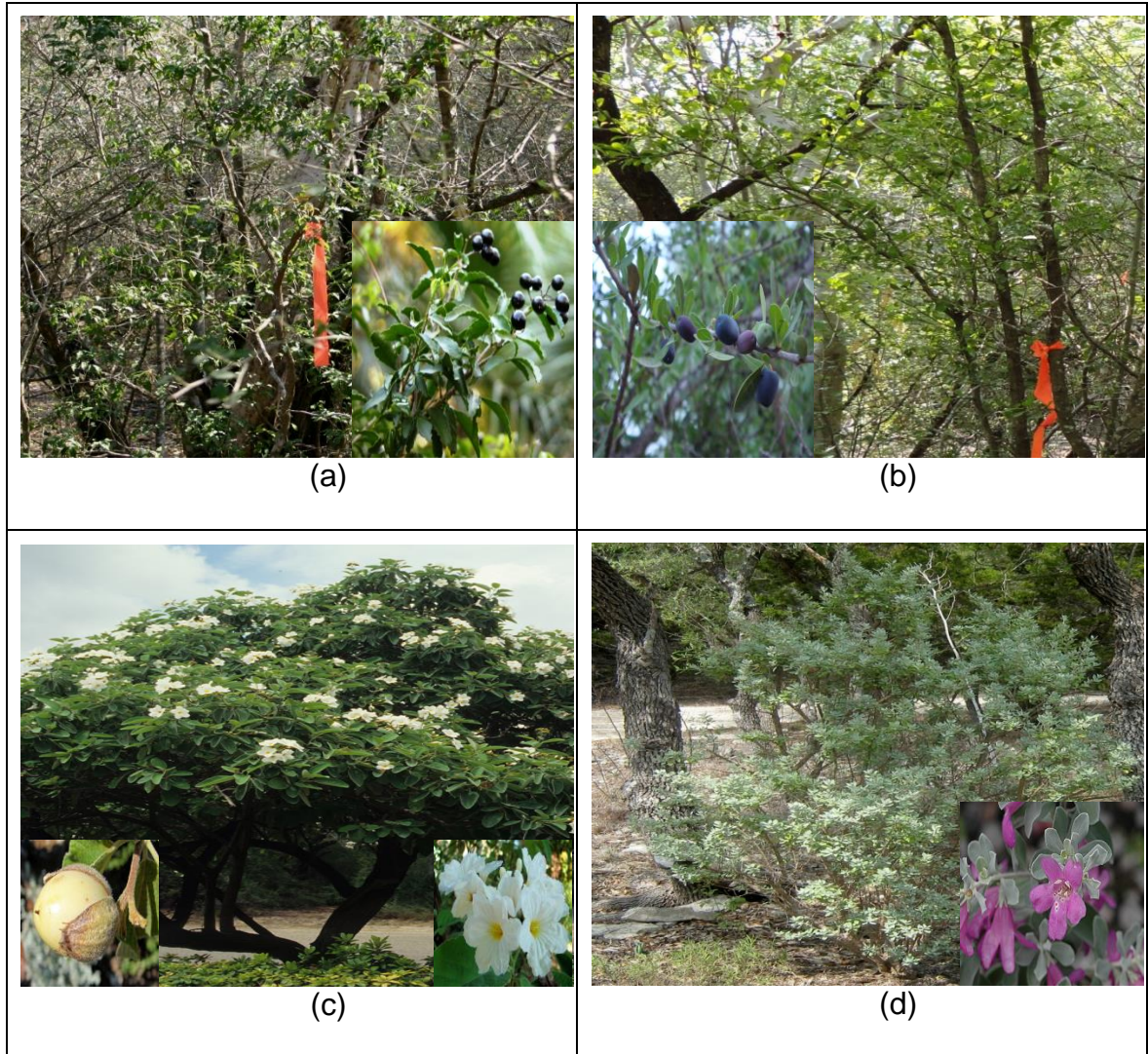


Figura 3. Características morfológicas de *Amyris texana* (a), *Bumelia celastrina* (b), *Cordia boissieri* (c) y *Leucophyllum frutescens* (d).

3.3. Metodología

3.3.1. Medición del potencial hídrico del xilema (Ψ)

La determinación de los potenciales hídricos del xilema (Ψ) para las cuatro especies, se realizó a intervalos de quince (15) días del 17 de Enero al 31 de Octubre; 2011. En cada fecha de muestreo, cinco individuos (repeticiones), representativos permanentemente etiquetados, de cada especie, elegidos aleatoriamente dentro de la parcela experimental; de estas, se tomaron ramillas terminales para realizar mediciones a las 06:00 h (preamanecer, Ψ_{pd}) y 14:00 h (mediodía, Ψ_{md}).

La condición hídrica de las especies se evaluó, midiendo la tensión del agua en el xilema (Taiz y Zeiger 1991), la cual es aproximadamente el potencial hídrico foliar (Ψ) usando la cámara de presión de Scholander (Modelo 3005, Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbará, CA, E.E.U.U.) con un umbral de medición de -6.5 MPa y usando gas nitrógeno (N_2) como fuente de presurización (Richie y Hinckley 1975).

3.3.2. Variables ambientales

Variables ambientales tales como temperatura del aire ($^{\circ}C$) y humedad relativa (%) fueron obtenidas en una base horaria durante el periodo de estudio de Enero a Octubre de 2011 utilizando sensores automatizadas tipo HOBO (Familia H8; Forestry Suppliers, Inc., Jackson, MS, E.E.U.U.). El déficit de presión de vapor atmosférico (DPV, kPa) fue derivado a partir de los datos de

temperatura y humedad relativa (Rosenberg et al. 1983). La precipitación pluvial diaria (mm) fue registrado durante el periodo experimental en el sitio de estudio a partir de un pluviómetro automatizado Marca HOBO. Adicionalmente en cada fecha de muestreo, se determinó el contenido gravimétrico de humedad del suelo (%; base seca) en muestras extraídas a diferentes perfiles de profundidad siendo estas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm, respectivamente, utilizando una barreta de diseño “Veihmeyer” (Modelo 215, Soilmoisture Equipment Corp.). Este contenido se determinó mediante el secado de la muestra del suelo en una estufa de aire forzado a 105°C por 72 horas hasta alcanzar peso constante (Taylor y Aschroft 1972) considerando cuatro repeticiones por profundidad.

3.3.3. Caracterización física y química del sitio

Para la caracterización de algunas propiedades físicas y químicas del suelo en el sitio de estudio, se realizó un muestreo en la fecha de Enero 14 de 2011, a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm). Para el muestreo de suelos se realizaron tres repeticiones por perfiles de profundidad ubicados al azar dentro de la parcela experimental. La determinación de la densidad aparente (DA; Mg m^{-3}) se extrajo mediante cilindros metálicos de 98.17 cm^{-3} , suelo a dos perfiles de profundidades (0-20 cm y 20-40 cm), en las tres paredes intactas del sitio donde se obtuvo la muestra del suelo. Las muestras se pesaron para registrar su peso húmedo para posteriormente colocarlas en una estufa a 105°C durante 72 horas hasta alcanzar peso constante, para registrar su peso seco y

realizar los cálculos pertinentes (Blake y Hartge 1986). Para el resto de los análisis físicos y químicos, las muestras de suelo fueron colocados en bolsas de polietileno previamente etiquetadas, posteriormente se llevaron al Laboratorio de Suelos y Nutrición Forestal (Facultad de Ciencias Forestales, UANL). Una vez las muestras fueron secadas al aire libre, se procedió a su molienda con mazo de madera y su tamizado a 2 mm. El suelo fino extraído fue utilizado para las determinaciones de pH, conductividad eléctrica (CE; $\mu\text{S cm}^{-1}$), materia orgánica (MO; %) y textura. Los análisis se realizaron de acuerdo al manual de suelos descritos por (Woerner, 1989) Cuadro 3.

Cuadro 3. Determinaciones analíticas y métodos utilizados en el análisis de suelo.

Determinación	Método
Muestra Orgánica	Método de combustión y titulación según Walkley-Back (Woerner 1989)
Reacción del suelo (pH)	Potenciómetro en suspensión suelo - agua. Relación 1:2.5 (p/v) (Woerner 1989)
Conductividad eléctrica	Determinación en suspensión suelo - agua. Relación 1:5 (p/v) (Woerner 1989)
Análisis granulométrico	Método del Hidrómetro de Bouyoucos (Gee y Bauder 1986)
Densidad aparente	Método del cilindro (Blake y Hartge 1986)

Los resultados obtenidos de la caracterización físico-química del suelo por profundidad para el sitio de estudio se presentan en el Cuadro 4. La clase textural determinada para la profundidad (0-20 cm) correspondió a Franco

Arcilloso Limoso, mientras que para la profundidad (20-40 cm) la clase textural fue Franco Arcilloso Limoso.

Cuadro 4. Propiedades físicas y químicas para el suelo del sitio.

Perfil de Profundidad del Suelo (cm)	Densidad Aparente (Mg m ⁻³)	g kg ⁻¹ suelo			pH	Conductividad Eléctrica (μS cm ⁻¹)	Materia Orgánica (%)
		Arena	Limo	Arcilla			
0-20	0.98	168.6	493.3	338.1	8	188.8	7.46
20-40	0.99	128.5	517.7	353.8	8	154.8	4.36

3.3.4. Análisis estadísticos

Los datos de Ψ_{pd} y Ψ_{md} y contenido de humedad del suelo fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza de acuerdo a los procedimientos de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk y Levene (Brown y Forsythe 1974; Steel y Torrie 1980). Dado que la mayoría de los muestreos el análisis de varianza no mostró los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para datos del Ψ_{pd} y Ψ_{md} , la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis fue utilizada (Ott 1993) para detectar diferencias significativas entre las especies arbóreas y arbustivas de cada fecha de muestreo. La prueba no paramétrica de Mann-Whitney U, con la corrección de Bonferroni a $P=0.05$, fue utilizada para realizar la comparación de medias para el Ψ_{pd} y Ψ_{md} entre las especies nativas en cada fecha de muestreo. La comparación de medias para

el contenido de humedad del suelo entre los perfiles de profundidad se utilizó la prueba de Tukey a un nivel de $P=0.05$ (Steel y Torrie 1980).

Para detectar diferencias en el curso diurno de los potenciales hídricos entre las especies a diferentes horas (06:00, 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 y 18:00 hrs) en las diferentes fechas de muestreo (Jul-03, Jul-14, Jul-30, Ago-15 y Ago-30) se utilizaron de igual manera la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis y la prueba de Mann-Whitney U (Ott, 1993). Sobre una base estacional, para evaluar la relación entre el potencial hídrico al preamanecer y el potencial hídrico al mediodía con respecto a las variables ambientales (temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y contenido de humedad en el suelo a diferentes profundidades) se determinaron los coeficientes de correlación de Spearman (r_s) (Ott, 1993).

Sobre una base diurna, se realizaron análisis de correlación de Spearman entre los potenciales hídricos diurnos y sus respectivas variables ambientales prevalecientes tales como temperatura del aire, humedad relativa, y déficit de presión de vapor. Todos los procedimientos estadísticos se llevaron a cabo de acuerdo al paquete estadístico SPSS (por sus siglas en inglés Statistical Package for the Social Sciences, versión 13.0 para Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

4. RESULTADOS

4.1. Ambiente físico

4.1.1. Temperatura

El comportamiento de la temperatura que se presentó durante el periodo experimental en el sitio de estudio se ilustra en la Figura 4. Las temperaturas máximas extremas fluctuaron de 31.1°C (Enero) a 43.9°C (Abril), las temperaturas mínimas extremas oscilaron de -0.6°C (Enero) a 20.6°C (Julio). La temperatura media mensual varió de 14.1°C (Enero) a 29.1°C (Agosto). Cabe destacar que en los primeros días del mes de Febrero (03, 04, 05, 11 y 12) se presentaron temperaturas cercanas a los 0°C; lo cual ocasionó la pérdida del follaje en *C. boissieri* para los muestreos correspondientes a Feb-13y Feb-26 respectivamente.

4.1.2. Humedad relativa

En relación a la humedad relativa registrada durante el periodo experimental, esta variable ambiental se denota en la (Figura 5). Los registros de humedad relativa máxima extrema fue de 100% durante todo el periodo de estudio, en relación a la humedad relativa mínima extrema se tiene 8.5% (Abril) a 32.8% (Julio) y para la humedad relativa media fluctuó de 58.4% (Abril) a 78.0% (Enero).

4.1.3. Precipitación

Con respecto a la precipitación (Figura 6), se registró una precipitación acumulada de 502.4 mm durante el periodo de estudio (Enero-Octubre). La mayor precipitación se observó en el mes de Julio (123.8 mm) representando el 24.6% del total de la precipitación registrada durante el periodo experimental. Por otro parte, la menor precipitación se registró durante el mes de Febrero 5.8 mm correspondiente al 1.15% del total de la precipitación registrada en el periodo experimental. La precipitación máxima osciló de 4.8 mm (Febrero) a 65.0 mm (Junio).

4.1.4. Contenido gravimétrico de humedad en el suelo

A partir del análisis de varianza para detectar diferencias en el contenido de humedad del suelo en cada fecha de muestreo a diferentes perfiles de profundidad se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 5); seis fechas (Ene-17, Ene-29, Feb-26, Jul-03, Ago-30 y Sep-15) de veinte muestreos realizados mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los perfiles de profundidad. El contenido gravimétrico de humedad en el suelo para los cinco perfiles de profundidad se ilustra en la (Figura 7). El mayor contenido de humedad del suelo se registró en Jul-03, donde el perfil 0-10 cm alcanzó un valor de 35.78 mm mientras que en el perfil de 40-50 cm se detectó un contenido de humedad del orden de 26.03%. Por el contrario, los valores más bajos del contenido de humedad del suelo se observaron en la fecha de Jun-15, con un promedio del 10.82 % para los perfiles 0-50 cm. A excepción de los

muestreos de Jul-03 y Jul-14, los contenidos gravimétricos de humedad del suelo fluctuaron para la mayoría de los muestreos del 12 al 16%.

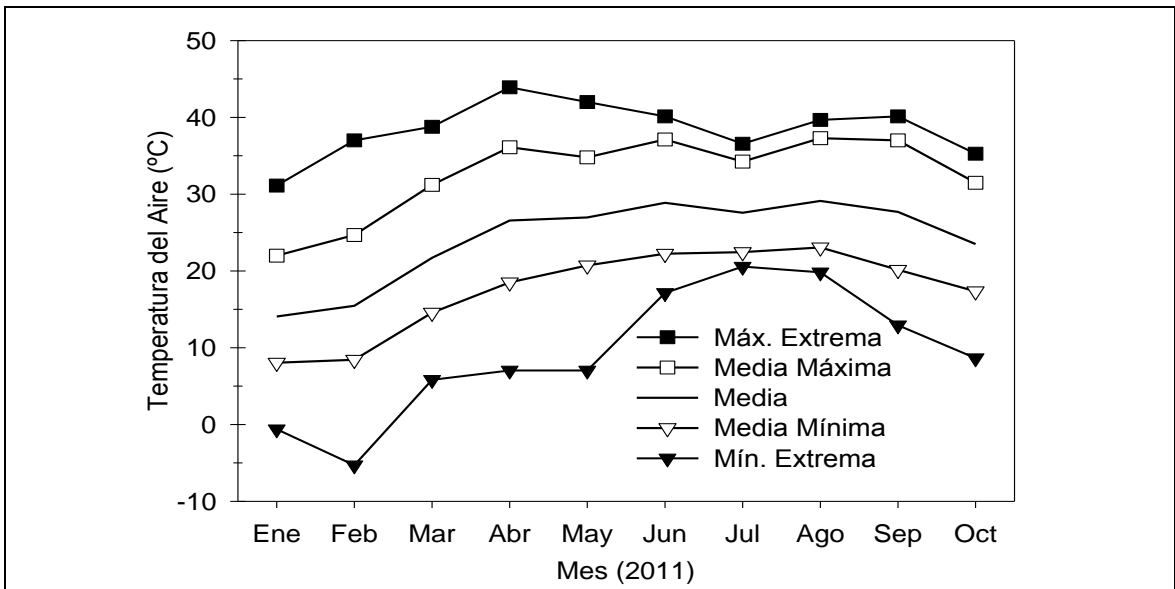


Figura 4. Temperatura del aire, máxima extrema, media máxima, media mínima, mínima extrema y media mensual registrada en el sitio de estudio.

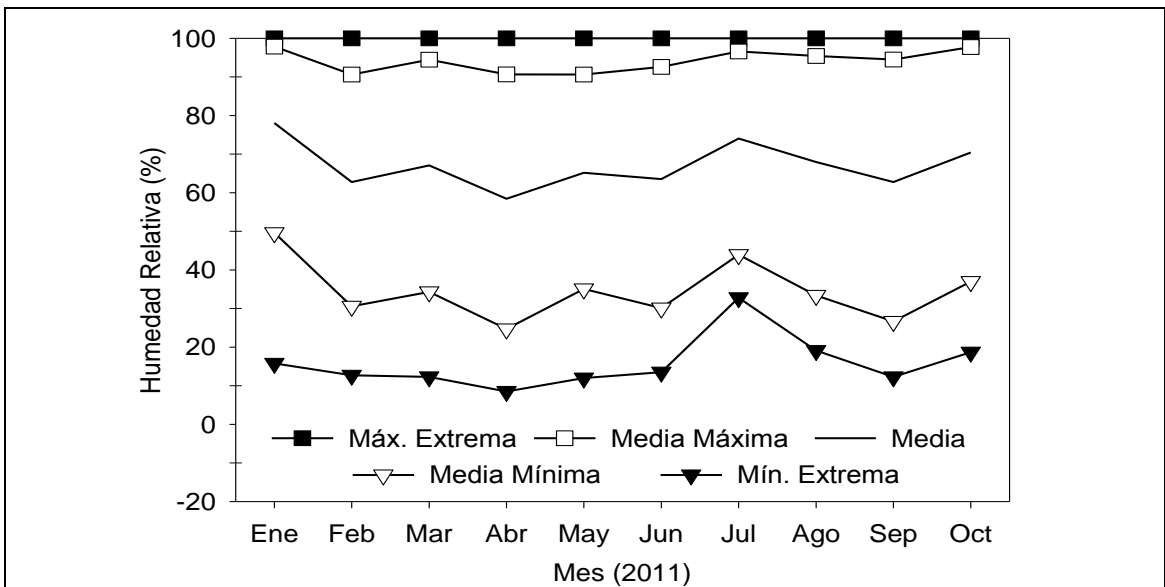


Figura 5. Humedad relativa del aire, máxima extrema, media máxima, media mínima, mínima extrema y media mensual registrada en el sitio de estudio.

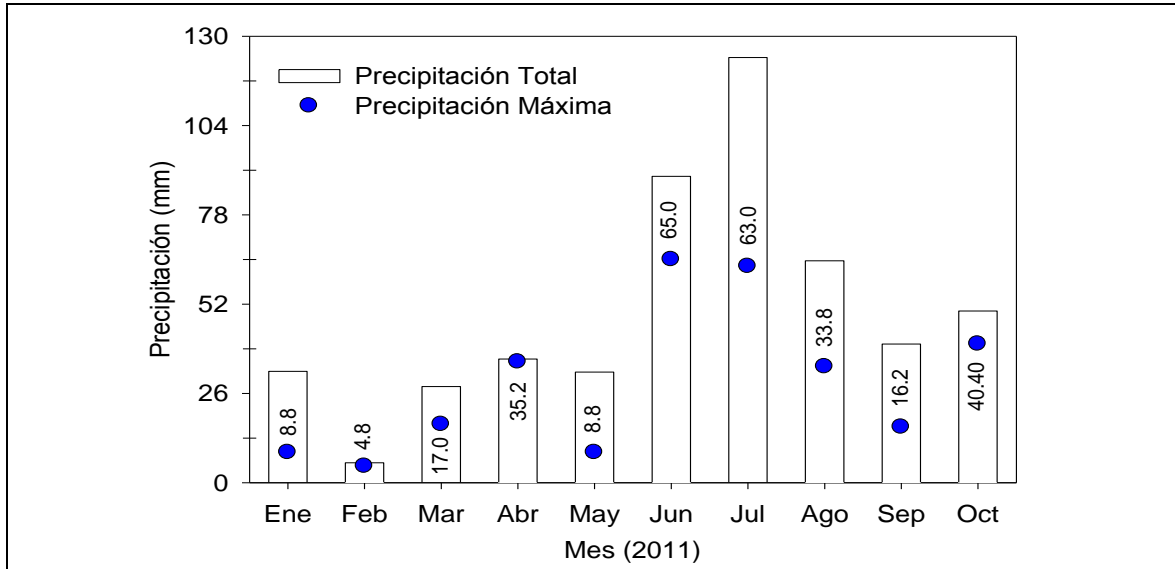


Figura 6 Precipitación mensual y precipitación máxima registrada en el sitio de estudio. Los valores que se ilustran corresponden a valores de precipitación máxima del mes.

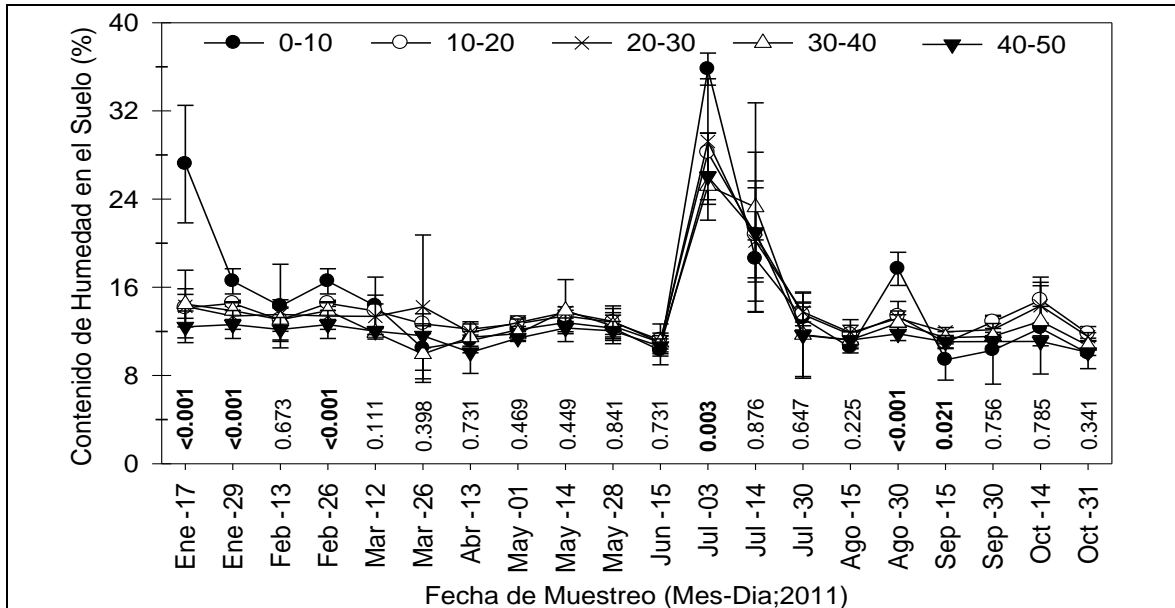


Figura 7. Contenido gravimétrico de humedad del suelo a cinco profundidades (cm) en las diferentes fechas de muestreo en el sitio de estudio. Los valores graficados representan la media \pm error estándar ($n=4$). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas entre profundidades para una fecha muestreo dado.

4.2. Relaciones Hídricas

4.2.1. Variación estacional del potencial hídrico xilemático

El curso estacional del potencial hídrico al preamanecer (Ψ_{pd} ; 06:00 hrs) y al mediodía (Ψ_{md} ; 14:00 hrs) en las cuatro especies se ilustra en la Figura 8. De acuerdo a los análisis estadísticos de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, los resultados indican que en 17 fechas (Ene-17, Feb-13, Feb-26, Mar-26, Abr-13, May-01, May-014, May-28, Jun-15, Jul-03, Jul-14, Jul-30, Ago-15, Ago-30, Sep-15 y Oct-31) y 15 fechas (Ene-29, Mar-12, Abr-13, May-01, May-14, May-28, Jun-15, Jul-03, Jul-14, Jul-30, Ago-15, Ago-30, Sep-15, Sep-30 y Oct-31) de un total de veinte fechas de muestreo mostraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre especies tanto para los Ψ_{pd} y Ψ_{md} ; mientras que el resto de las fechas no evidencio diferencias estadísticas entre (Cuadro 5 y Figura 8). En general durante todo el periodo experimental el Ψ_{pd} (Figura 8 (a)) oscilo de -0.4 (*C. boissieri*) a -4.0 MPa (*A. texana*). En el muestreo estacional más húmedo (Julio-03), el Ψ_{pd} máximo (-0.40 MPa) y mínimo (-0.92 MPa) se observó en *C. boissieri* y *B. celastrina*, respectivamente (Figura 8 (a)); en relación al muestreo más seco (Junio-15) el Ψ_{pd} más alto (-1.20 MPa) y más bajo (-4.0 MPa) fueron detectados en *B. celastrina* y *A. texana*, respectivamente (Figura 8 (a)). En relación al comportamiento estacional del Ψ_{md} (Figura 8 (b)) durante el periodo de estudio, los valores fluctuaron de -1.08 (*C. boissieri*) a -4.0 MPa (*A. texana*). Durante el muestreo más húmedo (Julio-03) el Ψ_{md} oscilo de

-1.08 (*A. texana*) a -1.9 MPa (*B. celastrina*) (Figura 8(b)); durante el muestreo más seco el máximo fue de -1.70 MPa y mínimo de -4.0 MPa para *B. celastrina* y *C. boissieri*, respectivamente (Figura 8 (b)).

4.2.2. Variación diaria del potencial hídrico xilemático

Para explicar las tendencias diurnas del potencial hídrico en las cuatro especies nativas y su relación con las variables ambientales; los análisis estadísticos, los valores del potencial hídrico en cada especie así como las condiciones ambientales prevalecientes durante el curso diurno (de 06:00 a 18:00 hrs a intervalos de dos horas) para cinco fechas de muestreo (Jul-03, Jul-14, Jul-30, Ago-15 y Ago-30) se ilustran en el (Cuadro 6; Figuras 9 y 10, respectivamente).

De acuerdo a las pruebas de Kruskal-Wallis para las especies *A. texana* vs *B. celastrina* para valores de $P \leq 0.05$ se detectaron diferencias correspondiente a (Jul-14; 08:00 hrs) y (Ago-15; 08:00 y 10:00 hrs); por consiguiente *A. texana* vs *C. boissieri* mostró diferencias en al menos una fecha (Jul-03; 06:00 y 08:00 hrs) y (Ago-30; 16:00 hrs) para valores de $P \leq 0.05$; siguiendo con *A. texana* vs *L. frutescens* se tiene que las fechas (Jul-30; 06:00, 08:00, 12:00, 14:00, 16:00 y 18:00 hrs), (Ago-15; 06:00, 08:00, 10:00, 14:00 y 16:00 hrs) y (Ago-30; 16:00 hrs) con diferencias significativas para valores de $P \leq 0.05$; la especie *B. celastrina* vs *C. boissieri* (Jul-14; 06:00, 08:00, 12:00 y 14:00 hrs) y (Ago-30; 18:00) mostro diferencias para valores de $P \leq 0.05$; respecto a *B. celastrina* vs *L. frutescens* se diferenciaron en valores de $P \leq 0.05$

(Jul-30; 18:00 hrs), (Ago-15; 12:00 y 18:00 hrs) y (Ago-30; 14:00, 16:00 y 18:00 hrs); por último *C. boissieri* vs *L. frutescens* se diferenciaron en (Jul-03; 06:00, 16:00 y 18:00 hrs), (Jul-30; 12:00 hrs) y (Ago-30; 06:00 y 12:00 hrs) los resultados sugieren una variación del potencial hídrico entre especies y horas de muestreo.

El curso diurno del potencial hídrico de cada especie nativa en las cinco fechas de muestreo se ilustra en la Figura 10(a), 10(c) y 10(e), Figura 11(a) y 11(c), respectivamente. En este sentido las cuatro especies estudiadas, el potencial hídrico muestra una tendencia diurna típica; registrándose el potencial hídrico máximo al preamanecer (06:00 hrs) y un decremento gradual hasta alcanzar valores mínimos al mediodía (14:00 hrs) para posteriormente recuperarse por las horas de la tarde a partir de las (16:00 hrs). Con respecto a las condiciones ambientales (Temperatura del aire, Humedad Relativa y Déficit de Presión de Vapor) se aprecian en las Figuras 10(b), 10(d) y 10(f) y Figuras 11(b) y 11(d). La temperatura mínima (18.66°C; 06:00 hrs) correspondió para Sep-30 y máxima (37.88; 16:00 hrs) registrado en Ago-15 durante el transcurso del muestreo diurno correspondiente a cinco fechas. Con relación a la humedad relativa se registró un valor máximo (100 %) a las 06:00 y 08:00 hrs (Jul-03) y un decremento hasta alcanzar el valor mínimo (26.10%) a las 16:00 hrs (Ago-15) y posteriormente recuperarse a las 18:00 hrs. En cambio el déficit de presión de vapor, los valores mínimos (0.0 kPa) se cuantificaron a las 06:00 y 08:00 hrs correspondiente a (Jul-03), hasta alcanzar sus valores máximos (4.86 kPa) a las 16:00 hrs (Ago-15), seguido de un decremento a las 18:00 hrs.

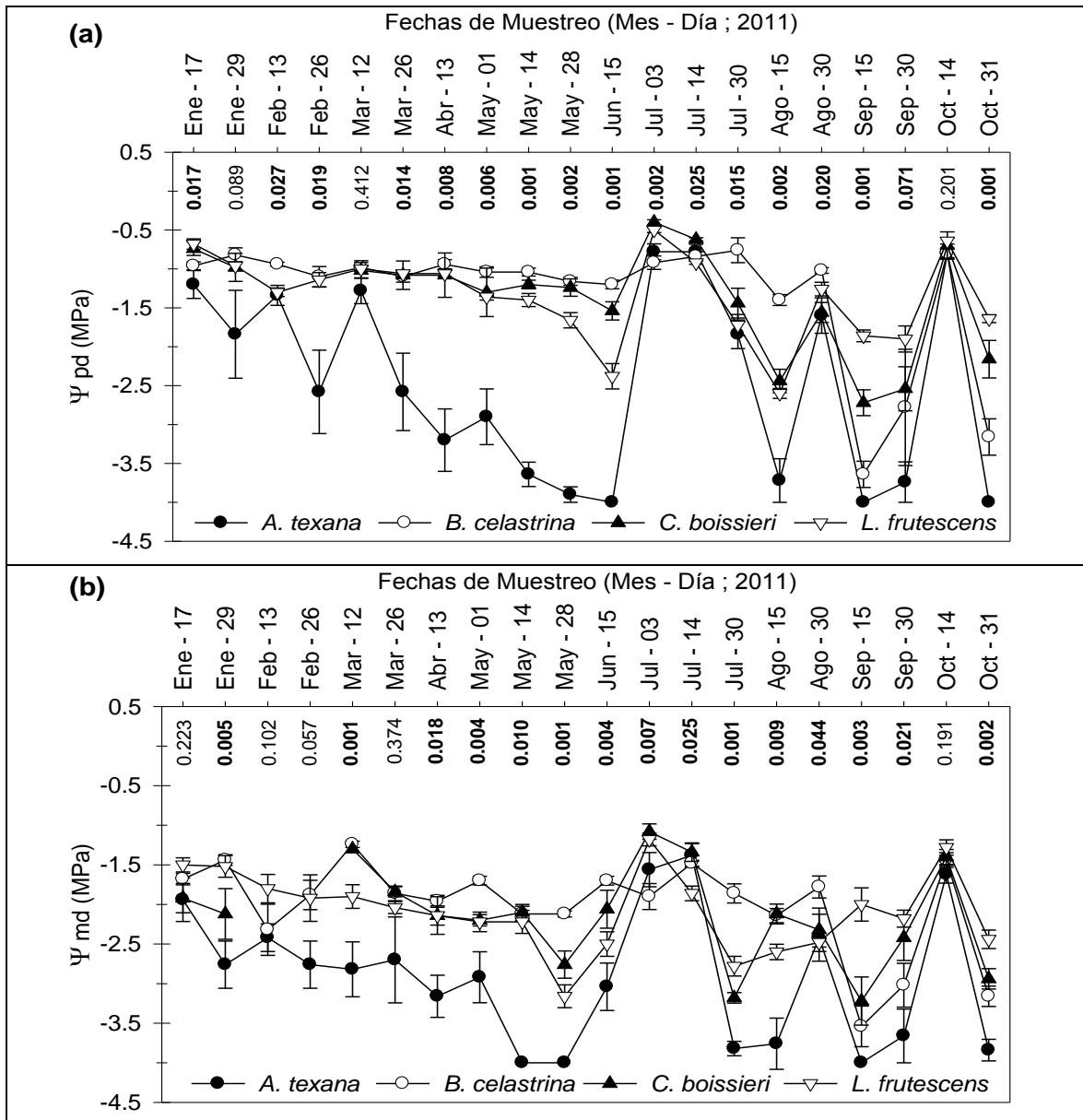


Figura 8. Potencial hídrico del xilema en cuatro especies nativas determinados al preamanecer (Ψ_{pd} ; 06:00 hrs) (a) y al mediodía (Ψ_{md} ; 14:00 hrs) (b) en diferentes fechas de muestreo en el sitio de estudio. Los valores graficados representan la media \pm error estándar ($n=5$). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas entre especies para un muestreo dado según la prueba de Kruskal-Wallis.

Cuadro 5. Valores F y p de los resultados de análisis de varianza de una vía para el contenido de humedad en el suelo, χ^2 y valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para el potencial hídrico al preamanecer (Ψ_{pd}) y al mediodía (Ψ_{md}), para detectar diferencias significativas entre profundidades del suelo y las especies arbustivas, respectivamente en cada fecha de muestreo para el sitio. Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas.

Fecha de Muestreo (Mes-Día; 2011)	Variable					
	Contenido de Humedad del Suelo		Ψ_{pd}		Ψ_{md}	
	Valor F	Valor P	χ^2	Valor P	χ^2	Valor P
Ene-17	16.489	<0.001	10.148	0.017	4.385	0.223
Ene-29	8.640	<0.001	6.506	0.089	12.688	0.005
Feb-13	0.592	0.673	7.214	0.027	4.565	0.102
Feb-26	8.640	<0.001	7.947	0.019	5.721	0.057
Mar-12	2.261	0.111	2.873	0.412	15.579	0.001
Mar-26	1.087	0.398	10.612	0.014	3.114	0.374
Abr-13	0.508	0.731	11.792	0.008	10.094	0.018
May-01	0.938	0.469	12.284	0.006	13.488	0.004
May-14	0.976	0.449	15.766	0.001	11.333	0.010
May-28	0.348	0.841	15.354	0.002	16.934	0.001
Jun-15	0.508	0.731	17.584	0.001	13.317	0.004
Jul-03	6.360	0.003	14.519	0.002	12.009	0.007
Jul-14	0.295	0.876	9.370	0.025	9.392	0.025
Jul-30	0.633	0.647	10.497	0.015	17.410	0.001
Ago-15	1.603	0.225	14.843	0.002	11.680	0.009
Ago-30	19.110	<0.001	9.813	0.020	8.120	0.044
Sep-15	4.027	0.021	17.116	0.001	14.065	0.003
Sep-30	0.471	0.756	7.039	0.071	9.685	0.021
Oct-14	0.429	0.785	4.629	0.201	4.756	0.191
Oct-31	1.226	0.341	16.009	0.001	15.382	0.002

Cuadro 6. Valores de P de la prueba de comparación de medias de Mann-Whitney U, con la corrección de Bonferroni, para detectar diferencias entre especie y horas del día para un muestreo dado. Valores en negritas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Fecha de Muestreo	Hora	Comparación de medias					
		E1			E2		E3
		vs			vs		Vs
		E2	E3	E4	E3	E4	E4
Jul-03	06:00	0.559	0.041	1.000	1.000	0.103	0.004
	08:00	0.222	0.007	1.000	1.000	1.000	0.110
	10:00	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
	12:00	1.000	0.353	1.000	1.000	0.161	0.030
	14:00	0.876	0.261	1.000	1.000	0.063	0.011
	16:00	1.000	0.870	1.000	1.000	0.353	0.030
	18:00	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
Jul-14	06:00	0.986	0.799	1.000	0.023	1.000	0.135
	08:00	0.041	1.000	1.000	0.003	0.140	1.000
	10:00	0.364	0.364	0.364	0.364	0.364	0.364
	12:00	1.000	0.062	1.000	0.010	0.331	1.000
	14:00	0.078	1.000	1.000	0.033	0.293	1.000
	16:00	0.646	0.646	0.646	0.646	0.646	0.646
	18:00	0.856	0.856	0.856	0.856	0.856	0.856
Jul-30	06:00	1.000	1.000	0.017	1.000	0.059	0.381
	08:00	1.000	1.000	0.019	1.000	0.360	0.190
	10:00	1.000	1.000	0.073	1.000	0.355	0.054
	12:00	0.260	1.000	0.017	0.379	1.000	0.028
	14:00	0.061	0.888	0.000	1.000	0.888	0.061
	16:00	0.276	1.000	0.030	1.000	1.000	0.873
	18:00	1.000	0.519	0.004	1.000	0.023	0.519
Ago-15	06:00	0.747	0.378	0.001	1.000	0.132	0.295
	08:00	0.049	0.534	0.001	1.000	1.000	0.241
	10:00	0.019	0.665	0.002	1.000	1.000	0.291
	12:00	1.000	1.000	0.064	0.678	0.011	0.755
	14:00	0.597	0.053	0.009	1.000	0.743	1.000
	16:00	0.837	0.013	0.008	0.678	0.513	1.000
	18:00	1.000	0.436	0.056	0.035	0.002	1.000
Ago-30	06:00	1.000	1.000	0.078	0.964	0.871	0.025
	08:00	0.784	1.000	0.084	0.668	1.000	0.067
	10:00	0.132	1.000	0.186	0.013	1.000	0.020
	12:00	0.515	1.000	0.070	0.094	1.000	0.008
	14:00	1.000	1.000	0.343	1.000	0.032	0.613
	16:00	1.000	0.837	0.031	0.715	0.024	1.000
	18:00	1.000	1.000	0.064	1.000	0.006	0.165

E1=*A. texana*; E2=*B. celastrina*; E3=*C. boissieri*; E4=*L. frutescens*

4.3. Relaciones potencial hídrico - variables ambientales

4.3.1. Relaciones estacionales

A partir del análisis de correlación de Spearman (r_s) ($n=20$), el curso estacional del potencial hídrico al preamanecer (Ψ_{pd}) y mediodía (Ψ_{md}) de cada especie nativa mostraron una relación positiva y estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) con el contenido de humedad de todos los perfiles de profundidad de suelo para *A. texana* y *B. celastrina* tanto para el potencial hídrico al preamanecer como al mediodía. En cuanto a las especies *C. boissieri* y *L. frutescens* solamente el potencial hídrico al preamanecer mostró una correlación positiva con el contenido de humedad del suelo en todos los perfiles de profundidad. Sin embargo, la correlación con el potencial hídrico al mediodía para ambas especies fue variable tanto en significancia como en orden de magnitud del valor de la correlación. Con respecto a la temperatura del aire, solamente la especie *B. celastrina* se detectó una correlación negativa y significativa para valores de ($P \leq 0.05$) con el potencial hídrico del mediodía. Por último, para ninguna especie nativa se observó una correlación tanto para el potencial hídrico al preamanecer como del mediodía respecto a la humedad relativa y la precipitación registrada (Cuadro 7).

Se encontró una correlación lineal ($P < 0.001$) y positiva entre el Ψ_{pd} y el Ψ_{md} (pendiente=0.649, Figura 11). Esto significa que un aumento en el Ψ_{pd} de -1.0 MPa inducirá un incremento de -0.649 MPa en el Ψ_{md} . De acuerdo a los

estadísticos de mínimos cuadrados, el Ψ_{pd} explicó alrededor del 74% de la variabilidad total en el Ψ_{md} .

4.3.2. Relaciones diurnas

Los resultados obtenidos del análisis de correlación de Spearman entre el potencial hídrico diurno determinado en las cuatro especies nativas con respecto a la temperatura del aire, humedad relativa y el déficit de presión de vapor para las cinco fechas de muestreo se ilustran en el Cuadro 8.

Los valores del potencial hídrico se correlacionaron negativa y significativamente ($P < 0.05$) con la temperatura del aire (r_s varió de -0.392 a -0.723 correspondientes a *C. boissieri* y *L. frutescens*, respectivamente). En relación al déficit de presión de vapor, se encontró una correlación negativa y significativa para las especies *B. celastrina* ($r_s = -0.556$) y *L. frutescens* ($r_s = -0.643$), en cambio, no detectó correlación para las especies *A. texana* y *C. boissieri*. En lo que respecta a la humedad relativa se observó una correlación positiva y significativa ($P < 0.01$) con valores de $r_s = 0.522$ y 0.623 para *B. celastrina* y *L. frutescens*, respectivamente. Para las especies *A. texana* y *C. boissieri* no se detectó ninguna correlación.

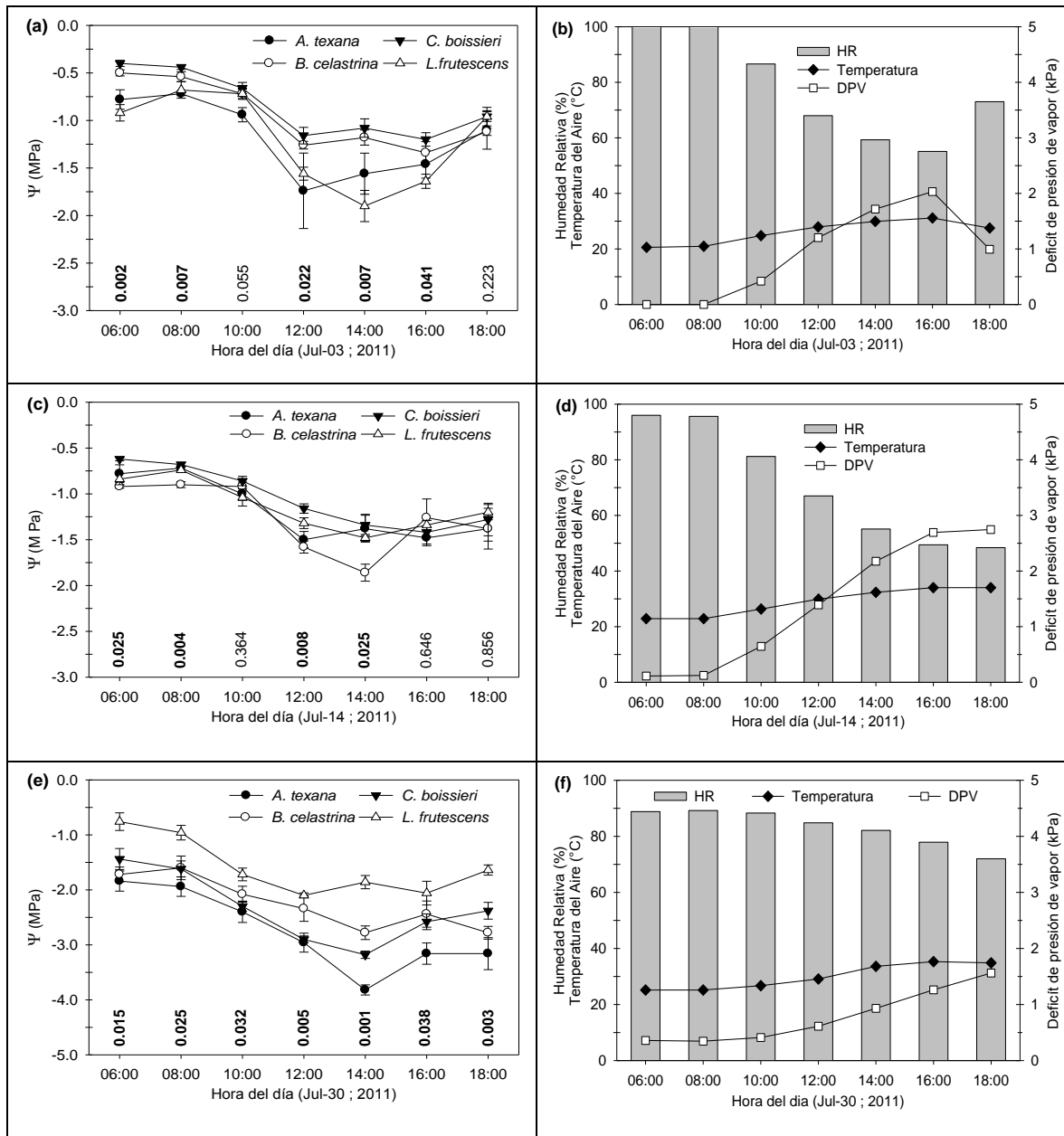


Figura 9. Curso diurno del potencial hídrico del xilema (Ψ) en cuatro especies y condiciones ambientales prevalecientes para la fecha de muestreo Jul-03 (a) y (b), Jul-14 (c) y (d), Jul-30 (e) y (f), respectivamente. Los valores graficados representan la media \pm error estándar ($n=5$). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas para una hora de muestreo dado.

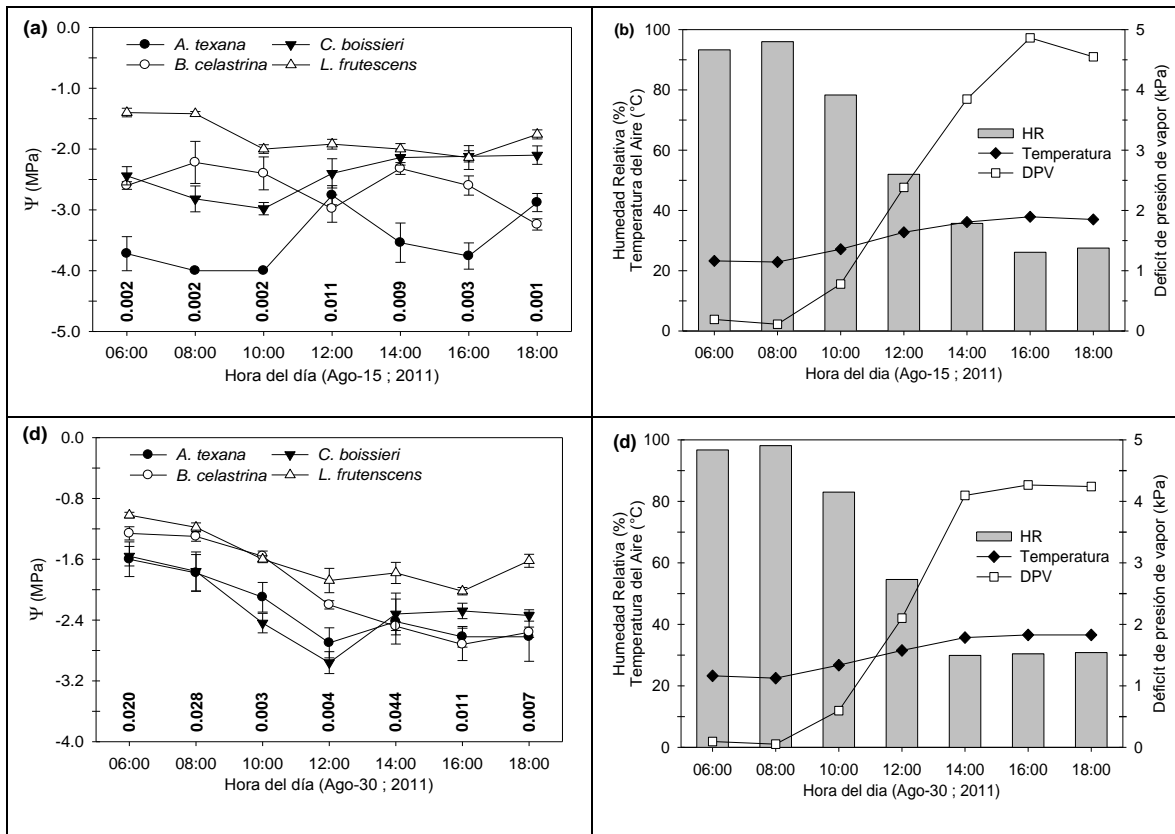


Figura 10. Curso diurno del potencial hídrico del xilema (Ψ) en cuatro especies y condiciones ambientales prevalencias para la fecha de muestreo Ago-15 (a) y (b), Ago-30 (c) y (d), respectivamente. Los valores graficados representan la media \pm error estándar ($n=5$). Valores en negritas ($P \leq 0.05$) indican diferencias significativas para una hora de muestreo dado.

Cuadro 7. Coeficiente de correlación de Spearman (n=20) para valores del potencial hídrico xilemático al preamanecer (Ψ_{pd}) y al mediodía (Ψ_{md}), en relación a la temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y contenido gravimétrico de humedad en el suelo en las cuatro especies nativas.

Variable ambiental	Especie Arbustiva			
	<i>A. texana</i>	<i>B. celastrina</i>	<i>C. boissieri</i>	<i>L. frutescens</i>
Potencial hídrico al Preamanecer (Ψ_{pd})				
Temperatura del Aire	-0.237 ^{NS}	-0.331 ^{NS}	-0.354 ^{NS}	-0.105 ^{NS}
Humedad Relativa	0.417 ^{NS}	0.383 ^{NS}	0.353 ^{NS}	0.241 ^{NS}
Precipitación	0.424 ^{NS}	0.368 ^{NS}	0.254 ^{NS}	-0.143 ^{NS}
Contenido de humedad del suelo				
Profundidad de 0-10 cm	0.840 ^{**}	0.769 ^{**}	0.745 ^{**}	0.681 ^{**}
Profundidad de 10-20 cm	0.850 ^{**}	0.782 ^{**}	0.797 ^{**}	0.732 ^{**}
Profundidad de 20-30 cm	0.842 ^{**}	0.754 ^{**}	0.792 ^{**}	0.707 ^{**}
Profundidad de 30-40 cm	0.711 ^{**}	0.673 ^{**}	0.702 ^{**}	0.596 ^{**}
Profundidad de 40-50 cm	0.657 ^{**}	0.609 ^{**}	0.662 ^{**}	0.468 ^{**}
Potencial hídrico al mediodía (Ψ_{md})				
Temperatura del Aire	-0.352 ^{NS}	-0.544 [*]	-0.267 ^{NS}	-0.189 ^{NS}
Humedad Relativa	0.299 ^{NS}	0.439 ^{NS}	0.217 ^{NS}	0.088 ^{NS}
Precipitación	0.285 ^{NS}	0.246 ^{NS}	0.248 ^{NS}	0.267 ^{NS}
Contenido de humedad del suelo				
Profundidad 0-10 cm	0.672 ^{**}	0.700 ^{**}	0.522 [*]	0.436 ^{NS}
Profundidad 10-20 cm	0.657 ^{**}	0.746 ^{**}	0.588 [*]	0.484 [*]
Profundidad 20-30 cm	0.657 ^{**}	0.720 ^{**}	0.595 ^{**}	0.380 ^{NS}
Profundidad 30-40 cm	0.541 [*]	0.669 ^{**}	0.466 ^{NS}	0.267 ^{NS}
Profundidad 40-50 cm	0.504 [*]	0.601 ^{**}	0.482 [*]	0.255 ^{NS}

NS= No Significativo, $P \geq 0.05$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

Cuadro 8. Coeficiente de correlación de Spearman para el potencial hídrico xilemático diurno en relación a variables del ambiente.

Especie Arbustiva	Variable Ambiental			Número de Observaciones
	Temperatura del Aire	Humedad Relativa	Déficit de Presión de Vapor	
<i>A. texana</i>	-0.461**	0.297 ^{NS}	-0.321 ^{NS}	35
<i>B. celastrina</i>	-0.675**	0.522**	-0.556**	35
<i>C. boissieri</i>	-0.392*	0.224 ^{NS}	-0.249 ^{NS}	35
<i>L. frutescens</i>	-0.723**	0.623**	-0.643**	35
Global	-0.555***	0.415***	-0.439***	140

NS=No Significativo, $P \geq 0.05$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

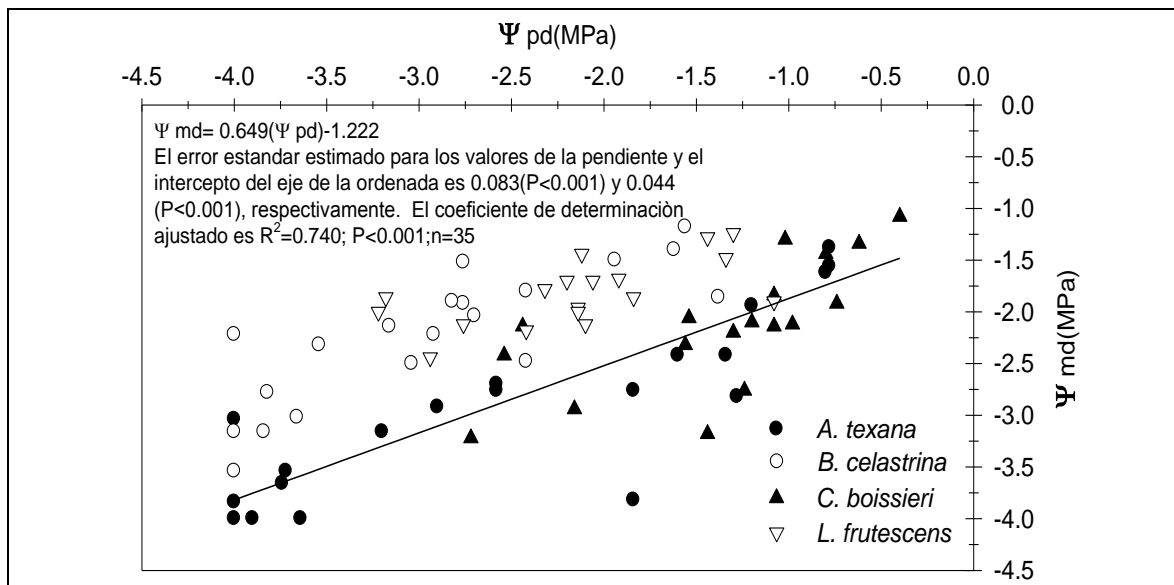


Figura 11. Relación entre el potencial hídrico del xilema al mediodía (Ψ_{md}) y al preamanecer (Ψ_{pd}) en cuatro especies nativas. La ecuación de regresión, el error estándar estimado para la pendiente y para el valor del intercepto del eje de la ordenada, el coeficiente de determinación ajustado (R^2). Valores de P, y el número de observaciones (n) se denotan dentro de la figura.

5. DISCUSIÓN

Los resultados observados sobre el comportamiento del potencial hídrico indican que las especies estuvieron sometidas a un fuerte estrés hídrico. Dicho estrés se evidenció en mayor parte del periodo de estudio en las fechas (Feb-26, Mar-26, Abr-13, May-01, May-14, May-28, Jun-15, Ago-15, Sep-15, Sep-30 y Oct-31). Además de las condiciones ambientales prevalecientes durante la investigación, los resultados pueden ser atribuidos en gran medida a la baja disponibilidad de agua en el suelo y al flujo hídrico dentro de la misma planta.

En general el perfil de profundidad 0-10 cm fue el más sensible a los eventos de precipitación con respecto a perfiles más profundos (Figura 8). A pesar de la amplia variabilidad de eventos de lluvia y temperaturas del aire, la humedad del suelo no pudo ser controlada y constante, lo que dificultó su disponibilidad para la absorción de las raíces más profundas debido a la escasa infiltración del agua en suelo, rápida escorrentía y altas tasas de evapotranspiración (González et al. 2000). Las respuestas y fluctuaciones del contenido de humedad del suelo mostraron un comportamiento similar a lo reportado en otros estudios para ecosistemas mediterráneos (Joffre y Rambal 1993 y Bussotti et al. 2002), trópico húmedo-seco (Montagu y Woo 1999), sabana (Hesla et al. 1985 y Anderson et al. 2001) y el matorral espinoso tamaulipeco (González et al. 2000; González et al. 2004 y González et al. 2011).

Las fluctuaciones del potencial hídrico estacionales y diurnos en las cuatro especies nativas difieren dentro de cada fecha de muestreo, dentro y entre horas del día. También se pudo evidenciar diferencias entre épocas secas y épocas húmedas, siendo más bajos en periodos de sequía y más altos en periodos de mayor precipitación. El contenido de humedad en el suelo durante todo el periodo de estudio promedió 13.8% (Figura 7). A partir del estado hídrico de las especies nativas se clasifica en dos grupos funcionales, el primero constituido por *B. celastrina*, *C. boissieri* y *L. frutescens* promediando los valores más altos en los Ψ_{pd} (-1.33 MPa, -1.15 MPa y -1.35 MPa, respectivamente) y para valores de Ψ_{md} (-2.02 MPa, -2.09 MPa y -2.09 MPa, respectivamente). El segundo grupo es representado por *A. texana* que promedió los valores más bajos para el Ψ_{pd} (-2.49 MPa) y Ψ_{md} (-2.90 MPa). Estos resultados son similares a lo reportado por Uvalle (2008) para *B. celastrina* y *L. frutescens*, especies que mostraron altos potenciales hídricos bajo condiciones de estrés, Molina (2009) para *B. celastrina* y *C. boissieri* por ultimo (González *et al.* 2010) para la especie *B. celastrina* esto confirma que las especies son adaptados al estrés por la sequía. Además de las propiedades texturales del suelo, la composición de agregados y la retención hídrica del suelo (no determinado), son elementos que no solamente alteran las variaciones en el contenido de humedad del suelo sino que también pueden influir en los valores de los potenciales hídricos de las especies nativas (Taylor y Aschroft 1972; Kramer 1983; González *et al.* 2000 y González *et al.* 2004). El tipo de suelo observado en el sitio de estudio corresponde a franco arcilloso

limoso y franco arcilloso caracterizado con un buen drenaje interno, permeabilidad moderadamente lenta y escurrimiento superficial moderado (Castro 2005).

Algunos procesos fisiológicos básicos pueden ser explicados en respuesta a los bajos potenciales hídricos en plantas: 1) las estructuras rígidas en las hojas pueden prevenir el colapso celular por la deshidratación inducida, lo que conlleva a pensar en un ajuste osmótico (activo o pasivo) que conduce a la planta a mantener la turgencia aun para bajos valores de potenciales hídricos y 2) el posible aumento en las propiedades elásticas de las paredes celulares de la hoja el cual pudo haber inducido al mantenimiento de la turgencia más que los cambios en el potencial de solutos, para el cual en algunos casos parece haber cambios muy grandes entre -3.0 MPa y -4.0 MPa. Dichas alteraciones han sugerido que los dos mecanismos tienen el mismo efecto para diferentes especies de plantas; evitar el estrés mecánico en la capa del protoplasto particularmente en la membrana plasmática (Monson y Smith 1982).

Bajo condiciones de contenido de humedad en el suelo óptimo fue evidente el contraste de los Ψ diurnos en las especies estudiadas, lo cual estuvo fuertemente influenciado por los componentes de demanda evaporativa durante el día (temperatura del aire, humedad relativa, déficit de presión de vapor atmosférico; Figuras 9 y 10). Se encontró una relación altamente significativa y negativa entre los potenciales hídricos para la temperatura del aire y déficit de presión de vapor a partir del análisis de correlación de

Spearman; estos resultados coinciden con los encontrados por (Kolb y Stone 2000 y López 2010).

Con respecto a la precipitación no se encontró ninguna relación ($P \geq 0.05$) tanto para el Ψ_{pd} y Ψ_{md} ; la precipitación promedio durante el periodo de estudio fue de 50.24 mm el cual fue relativamente bajo, sin embargo fue evidente que los potenciales hídricos respondieron y se recuperaron a valores altos de precipitación en las cuatro especies estudiadas. Resultados similares han sido documentado por González et al. (2011) para los Ψ_{pd} en especies tales como *C. padilla*, *A. amentacea*, *F. angustifolia* y *P. texana* para precipitaciones promedio de 25 mm en el sitio de estudio. López (2010) reporta para las cuatro especies anteriormente mencionadas una relación positiva entre la precipitación y el Ψ_{pd} al preamanecer, mientras que para el Ψ_{md} solamente *C. padilla* y *F. angustifolia* mantuvieron la asociación positiva con dicha variable ambiental. Los resultados de correlación de los potenciales estacionales con la precipitación en el presente estudio difieren a lo observado por Molina (2009), para las especies *C. boissieri* y *B. celastrina*, las cuales mostraron una fuerte correlación ($P < 0.001$), esto se explican ya que la precipitación promedió en dicho estudio fue (92.8 mm), correspondiente a un año más lluvioso.

En algunas fechas se encontró un comportamiento inusual donde los Ψ_{md} fueron mayores con respecto a los del Ψ_{pd} , particularmente para la especie *A. texana* para las fechas de Abr-13, Jun-15, Sep-30 y Oct-31, seguido de *B. celastrina* (Sep-15) y *C. boissieri* (Ago-15). Este comportamiento se puede deber un posible contenido de solutos en el xilema enriquecido al momento del

muestreo por la movilización de fluido dentro de las células como ruta alternativa para optimizar el agua en condiciones de sequía extrema. Estudios previos como lo realizado por Donovan et al. (2003) observó un desequilibrio entre el Ψ del suelo antes del amanecer y el tejido vegetal (hojas) en diversas especies mesófitas y xerófitas, concluyendo que el Ψ_{pd} y del xilema no puede ser similar con el potencial hídrico del suelo, en particular para las plantas leñosas y halófilas, incluso en condiciones con óptima humedad en el suelo (Liu et al. 2003).

Dentro de las cuatro especies evaluadas *C. boissieri*, *B. celastrina* y *L. frutescens* pueden ser ejemplos de especies adaptadas a la sequía ya que tienden a mantener el tejido hidratado en condiciones de disponibilidad hídrica baja, mientras que *A. texana* parece depender de estrategias que permiten hacer frente a la desecación interna y por tal motivo evidencian bajos valores en el potencial hídrico.

6. CONCLUSIONES

Los potenciales hídricos tanto diurnos como estacionales, en las cuatro especies nativas, varían entre fechas de muestreo, horas del día y entre especies. Las especies evidenciaron potenciales hídricos más bajos en épocas secas, que en épocas húmedas y algunas especies se comportaron de manera atípica siendo los potenciales hídricos más altos al mediodía que al preamanecer.

Los potenciales hídricos estacionales (Ψ_{pd} y Ψ_{md}) se relacionaron con los contenidos de humedad en el suelo, mientras que los potenciales hídricos diurnos se asociaron más a los componentes de demanda evaporativa atmosféricos tales como la temperatura del aire, humedad relativa y el déficit de presión de vapor.

El contenido de humedad promedio en el suelo durante el periodo de estudio fue de 13.85% relacionado en gran medida a la precipitación registrada de 502 mm. El contenido de humedad del suelo reflejó el estado hídrico de las especies nativas observándose que *B. celastrina*, *C. boissieri* y *L. frutescens* presentaron los valores más altos que *A. texana*, tanto para valores de Ψ_{pd} como Ψ_{md} .

Se concluye que de las cuatro especies estudiadas, *B. celastrina*, *C. boissieri* y *L. frutescens* se consideran especies más tolerantes al déficit hídrico edáfico, mientras que la especie *A. texana* resulta ser una especie más susceptible a la escasa precipitación y a la baja disponibilidad hídrica del suelo.

Cabe destacar que la especie *C. boissieri* es más susceptible a fenómenos extremos como heladas, ya que esto ocasionó la pérdida de follaje en las fechas Feb-13 y Feb-26 pero sin llegar a causar un daño irreversible a la planta; esto es explicado en gran medida por el tamaño mismo de las hojas.

7. LITERATURA CITADA

- Alvarado V MA, Rocha EA, Moreno LS (2010) De la lechuguilla a las biopelículas vegetales; Las plantas útiles de nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México. 657 p.
- Alanís RE. (2006) Diversidad de especies arbóreas y arbustivas en áreas con distinto historial antropogénicos en el matorral espinoso tamaulipeco. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL, México. 66-67 pp.
- Alanís G, Cano G, Cano RM (1996) Vegetación y Flora de Nuevo León. Una guía botánico-ecológica. CEMEX. México 251 pp.
- Anderson LJ, Brumbaugh MS, Jackson RB (2001) Water and tree-understory interactions: a natural experiment in a savanna with oak wilt. *Ecology* 82: 33-49.
- Artigao A, Guardado R (1984) Prácticas de Edafología. Edit. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad de Castilla- La Mancha. ISBN 84-600-5066-1
- Azcón BJ, Talón M (2003) Fundamentos de fisiología vegetal. 3ª reimpresión. McGraw-Hill Interamericana. 450 p
- Azóca A, Rada F, Orozco A (1992) Relaciones hídricas e intercambio de gases en dos especies de mangle, con mecanismos contrastantes de regulación de la salinidad interna. *Ecotropicos* 5: 11-19.
- Bussotti F, Bettini D, Grossoni P, Mansuino S, Nibbi R, Soda C, Tani C (2002) Structural and functional traits of *Quercus ilex* in response to water availability. *Environmental and Experimental Botany* 47: 11-23.

- Blake G, Hartge K (1986) Bulk density. In: Methods of soil analysis. Part 1. SSA Books Series. 59. Editor Klute. Am. Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 630 p.
- Blondel J, Aronson J (1999) Biology and wildlife of the Mediterranean region. Oxford University Press, New York.
- Brown MB, Forsythe AB (1974) Robust tests for the equality of variances. Journal of the American Statistical Association 69: 364-367.
- Castro C CP (2005). Impacto de la dispersión urbana de la ciudad de Santiago en la calidad del suelo en la periferia norte: Colina y Lampa. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales 9: 194 (37).
- Catalán AM (1998) Resistencia hidráulica y mecanismos de regulación del flujo de agua en árboles de sabana, mata y bosque de galería. Los Andes Univ., (Venezuela). Mérida Facultad de Ciencias. Postgrado de Ecología Tropical. Tesis (Mag Sc). Mérida (Venezuela). 157 p.
- Correa JB (1996) Evaluación y cuantificación de los cambios del uso del suelo mediante imágenes de satélite en los municipios de Linares y Hualahuises, N.L. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL, México. 47 pp.
- COTECOCA-SARH, (1973) Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana, Estado de Nuevo León. Secretaria de Agricultura y Ganadería, Comisión técnico consultiva para la determinación de coeficientes de Agostadero, México.
- Diamond D, Riskind D, Orzell S (1987) A framework for plant community classification and conservation in Texas. Texas Journal of Science 39: 202-221.
- Di Castri F, Goodall DW, Specht RL (1981) Mediterranean-type shrublands. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 643 p.

- Donahue R, Milles R, Schicklumo J (1987) Introducción a los suelos y crecimiento de las Plantas. Publicaciones: Englewood Cliffs, Prentice Hall 624 p.
- Donoso C (1992) Ecología Forestal: El bosque y su medio ambiente. Universidad Austral de Chile. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. 123 p.
- Donovan LA, Richards JH, Linton MJ (2003) Magnitude and mechanism of disequilibrium between predawn plant and soil water potentials. *Ecology* 84: 463-470.
- Ezcurra E, Arizaga S, Valverde PL, Mourelle C, Flores MA (1992) Foliole movement and canopy architecture of *Larrea tridentata* (DC.) Cov. in Mexican deserts. *Oecologia* 92: 83-89.
- Fischer RA, Turner N C (1975) Plant productivity in the arid and semi-arid zones. *Annual Review Plant Physiology* 29: 277-317.
- Flower DJ, Ludlow MM (1986) Contribution of osmotic adjustment to dehydration tolerance of water-stressed pigeonpea (*Cajanus cajan* (L) Mill sp.) leaves. *Plant Cell and Environment* 9: 33-40.
- Gee GW, Bauder JW (1986) Particle size analysis. pp. 383-409. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy* 9. 2nd ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Goldstein G, Sarmiento G, Meinzer F (1986) Patrones diarios y estacionales en las relaciones hídricas de árboles siempreverdes de la sabana tropical. *Acta Oecologica. Oecologia Plantarum* 7: 107-119.
- González RH, Cantú SI, Ramírez-Lozano RG, Gómez-Meza MV, Pando-Moreno M, López-Hernández JM (2011) Potencial hídrico xilemático en cuatro

especies arbustivas nativas del Noreste de México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. XVII Edición Especial: 97-109.

González RH, Ramírez L RG, Cantú SI, Gómez M MV, Uvalle S JI (2010) Composición y estructura de la vegetación en tres sitios del estado de Nuevo León, México. Polibotánica 29: 91-106.

González RH, Camarillo AI, Cantú SI, Ramírez-Lozano RG, Gómez-Meza MV (2008) Water relations in native trees, Northeastern México. Conference on International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development, University of Hohenheim, Tropetag October-2008, Germany.

González RH, Cantú SI, Gómez M MV, Ramírez L RG (2004) Plant water relations of thornscrub shrub species, northeastern México. Journal of Arid Environments 58: 483-503.

González RH, Cantú SI (2001) Adaptación a la sequía de plantas arbustivas de matorral espinoso tamaulipeco. Ciencia UANL 4: 454-461.

González RH, Cantú SI, Gómez M MV, Jordan WR (2000) Seasonal plant water relationships in *Acacia berlandieri*. Arid Soil Research and Rehabilitation 14: 343-357.

Gyenge EJ, Fernández ME, Dalla SG, Schlichter T (2004) Leaf and whole-plant water relations of the Patagonian conifer *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Ser. et Bizzarri: implications on its drought resistance capacity. Annals of Forest Science 62: 297-302.

Hesla BI, Tieszen LL, Boutton TW (1985) Seasonal water relations of savanna shrubs and grasses in Kenya, East Africa. Journal of Arid Environments 8: 15-31.

Himmelsbach W (2010). Caracterización de bosques mixtos de pino-encino en la Sierra Madre Oriental en México considerando el factor limitante hídrico,

Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, NL, México. 112 p.

Honorato R (1994) Manual de Edafología. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía, Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Hsiao TC (1973) Plant responses to water stress. Annual Review of Plant Physiology 24: 519-570.

Joffre R, Rambal S (1993) How tree cover influences the water balance of Mediterranean rangelands. Ecology 74: 570-582.

Johnston MC (1963) Past and present grasslands of southern Texas and northeastern Mexico. Ecology 44: 456-466

Jurado E, Reid N (1989) Influencia de factores edáfico- topográficos y perturbación sobre el matorral espinoso o tamaulipeco en linares, N.L. Reporte científico No. 10, Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, NL, México.

Kirkham M B (2005) Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press, Amsterdam, The Netherlands.

Kolb TE, Stone JE (2000) Differences in leaf gas exchange and water relations among species and tree sizes in an Arizona pine-oak forest. Tree Physiology 20: 1-12.

Kozlowski TT, Kramer PJ, Pallardy SG (1991) The physiological ecology of woody plants. Academic Press, Toronto.

Kramer PJ, Boyer JS (1995) Water relations of plants and soils, Academic Press. San Diego, CA. Chapter 12: 383-390.

- Kramer PJ (1983) Water relations of plants, Academic Press, New York. Pp 390-415
- Levitt J (1980) Responses of plants to environmental stresses. Academic Press, New York.
- Liu MZ, Jiang GM, Li YG, Niu SL, Gao LM, Ding L, Peng Y (2003) Leaf osmotic potentials of 104 plant species in relation to habitats and plant functional types in Hunshandak Sandland, Inner Mongolia, China. *Tree Physiology* 17: 554-560.
- López H JM (2010) Relaciones hídricas en cuatro especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco, Noreste de México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, NL, México. 82 p.
- Martínez M (1987) Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas. México D.F. pp. 58-271.
- Merla RG (1990) Geografía regional de Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León. Centro de Información de Historia Regional. Serie Bibliográfica de Nuevo León. 9
- Molina C IA (2009). Relaciones hídricas en cuatro especies arbóreas del matorral espinoso tamaulipeco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, NL, México. 50 p.
- Montagu KD, Woo KC (1999) Recovery of tree photosynthetic capacity from seasonal drought in the wet-dry tropics: the role of phyllode and canopy processes in *Acacia auriculiformis*. *Australian Journal of Plant Physiology* 26: 135-145.
- Moreno AB (1998) Conservación de suelos y desarrollo sustentable: ¿Utopía o posibilidad en México? *Terra* 16: 181-187.

- Monson RK, Smith SD (1982) Seasonal water potential components of Sonoran Desert plants. *Ecology* 63: 113-123.
- Niembro R A (2001) Las diásporas de los árboles y arbustos nativos de México: posibilidades y limitaciones de uso. *Madera y Bosques* 7: 3-11.
- Ott L (1993) An introduction to statistical methods and data analysis. 2nd edition. Duxbury Press, Boston, Massachusetts. 775-801 pp.
- Pizarro J (1996) Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Mundi-Prensa. España.
- Potvin C, Lechowicz MJ, Tardif S (1990) The statistical analysis of ecophysiological response curves obtained from experiments involving repeated measures. *Ecology* 71: 1389-1400.
- Reid N, Marroquín J, Beyer MP (1990) Utilization of shrubs and trees for browse, fuel-wood and timber in the Tamaulipan thornscrub, northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management* 36: 61-79.
- Ritchie GA, Hinckley TM (1975). The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Advances in Ecological Research* 9: 165-254.
- Rosenberg NJ, Blad BL, Verma SB (1983) Microclimate; the biological environment (2nd Edn) New York, NJ, John Wiley & Sons. Pp. 170-172.
- Rodríguez TS, González F MM (1988) Árboles y arbustos del municipio de Marín, Nuevo León; México. Temas didácticos No. 2. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de nuevo León. Marín, NL, México.
- Salisbury FB, Ross C (1994) Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F. 759 p.
- SEMARNAP (1999) Relación de especies que se utilizan en el PRONARE y su clave de identificación en el SIRECONABIO. Gaceta de la Red Mexicana

de Germoplasma Forestal. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca 2: 39-49.

SEMARNAT (2001) Plan estratégico forestal para México 2025. Comisión Nacional Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. 142 p.

Shinosaki K, Yamaguchi S K (1997) Gene expression and signal transduction in water-stress response. *Plant Physiology* 115: 327-334.

SIMPFENDORFER C (2001) Sistemas productivos bajo riego. Departamento de Proyectos. Comisión Nacional de Riego e Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA-Carillanca. Boletín Divulgativo. 84 p.

SPP-INEGI (1986) Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León, Secretaria de Programación y Presupuesto. Instituto Nacional de Geografía estadística e informática. México, D. F

Steel R GD, Torrie J H (1980) Principles and procedures of statistics. A biometrical approach, (2nd Edn). New York, NY, McGraw-Hill Book Company. 632 p.

Taiz L, Zeiger E (1991) *Plant Physiology*. The Benjamin/Cummings Public Company Inc. USA. 565 p.

Taylor SA, Ashcroft GL (1972) *Physical Edaphology*. The physics of irrigated and non irrigated soil. W.H. Freeman, San Francisco, USA.

Uvalle S JI (2008) Características fisiológicas y nutrimentales en especies arbustivas forrajeras nativas de la flora del noreste de México. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, NL, México. 112 p.

Udvardy MDF (1975) A classification of the biogeographical provinces of the world. Occas. Pap. No. 18, IUCN, Morges, Switzerland, 48pp.

Valladares F, Vilagrosa A, Peñuelas J, Ogaya R, Camarero JJ, Corchera L, Sisó S, Gil P E (2004) Estrés hídrico: Ecofisiología y escalas de la sequía. Capítulo 6. En: Valladares F (2004) Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 163-190. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8.

Woerner PM (1989) Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, NL, México. Pp. 46-48.