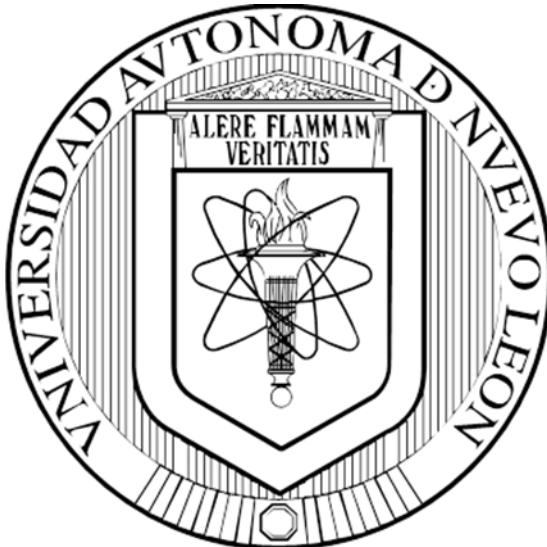


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



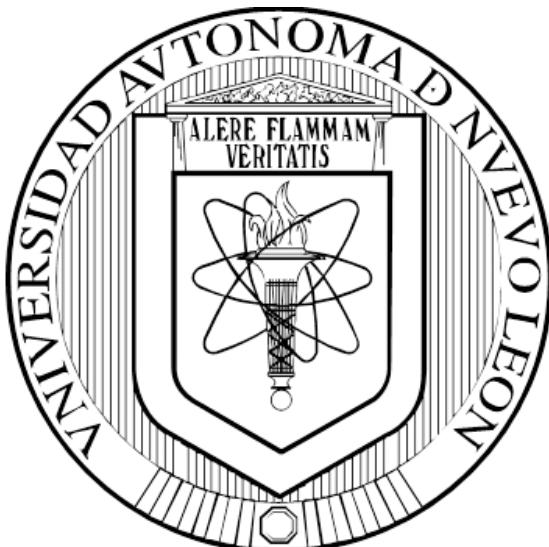
**POTENCIAL FORESTAL, FORRAJERO Y BIOENERGÉTICO DE
ESPECIES MADERABLES DEL MATORRAL ESPINOSO
TAMAULIPECO EN EL NORESTE DE MÉXICO**

**POR
MAGINOT NGANGYO HEYA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ACENTUACIÓN EN MANEJO Y
ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS VEGETALES**

FEBRERO, 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS
POTENCIAL FORESTAL, FORRAJERO Y BIOENERGÉTICO DE
ESPECIES MADERABLES DEL MATORRAL ESPINOSO
TAMAULIPECO EN EL NORESTE DE MÉXICO**

**POR
MAGINOT NGANGYO HEYA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ACENTUACIÓN EN MANEJO Y
ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS VEGETALES**

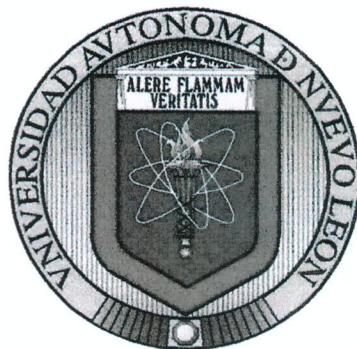
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

FEBRERO, 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

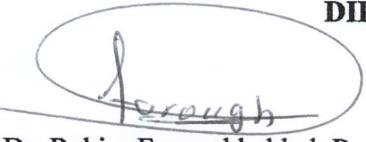


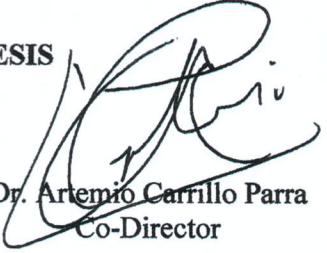
**POTENCIAL FORESTAL, FORRAJERO Y BIOENERGÉTICO DE ESPECIES
MADERABLES DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO EN EL
NORESTE DE MÉXICO**

MAGINOT NGANGYO HEYA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS
CON ACENTUACIÓN EN MANEJO Y ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS
VEGETALES

DIRECTORES DE TESIS


Dr. Rahim Foroughbakhch Pournavab
Director


Dr. Artemio Carrillo Parra
Co-Director

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**POTENCIAL FORESTAL, FORRAJERO Y BIOENERGÉTICO DE ESPECIES
MADERABLES DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO EN EL
NORESTE DE MÉXICO**

Tesis

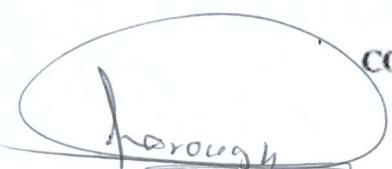
Como requisito parcial para obtener el Grado de

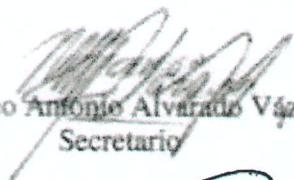
**DOCTOR EN CIENCIAS
CON ACENTUACIÓN EN MANEJO Y ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS
VEGETALES**

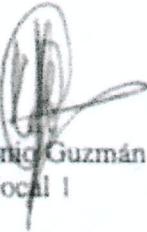
Presenta

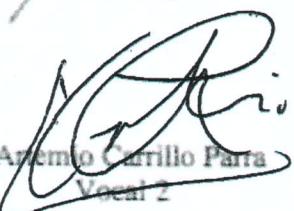
MAGINOT NGANGYO HEYA

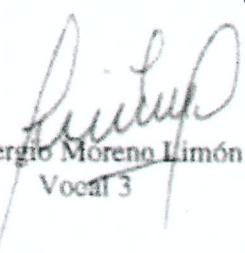
COMITÉ DE TESIS


Dr. Rahim Foroughbakhch Pournavab
Presidente


Dr. Marco Antonio Alvarado Vázquez
Secretario


Dr. Marco Antonio Guzmán Lucio
Vocal 1


Dr. Artemio Carrillo Parra
Vocal 2


Dr. Sergio Moreno Limón
Vocal 3

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral es el resultado de un trabajo arduo y lleno de dificultades. En este final feliz, me es muy grato, detenerme con la más profunda humildad y alto reconocimiento, para decirles unas palabras amables y bien merecidas a todos aquellos, tanto instituciones como personas, que han contribuido de manera significativa a llevar a cabo este largo proceso, y decirles de este modo, el respetuoso y admirable lugar que ocupan dentro de mi corazón.

Son varias, las instituciones que me dieron la oportunidad de fortalecer mi establecimiento como investigador y como persona cumplida. Principalmente, la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) a través de la Facultad de Ciencias Biológicas y particularmente la subdirección de Posgrado, por haberme permitido el acceso a este programa doctoral y por todas las facilidades en mi favor. La Facultad de Ciencias Forestales (UANL), por haberme abierto sus puertas para todo lo que ocupaba, principalmente el campo de experimentación y los laboratorios: el laboratorio de Tecnología de la Madera, que fue mi base, el laboratorio de química y laboratorio de suelos.

Debo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por haber financiado gran parte de mis estudios doctorales a través de la beca condonable otorgada durante los 3 años de este programa (Nº de registro 516252), y el financiamiento de las dos estancias realizadas tanto en el extranjero como en territorio mexicano.

El *Laboratory for fuel, soil and environmental analytics* de la *Faculty of ressource management, University of Applied Sciences and Arts (HAWK)* de Gotinga en Alemania, por la extremenda experiencia adquirida durante mi estancia y los momentos maravillosos compartidos.

El Laboratorio de Investigación en Química y Tecnología química de la madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, por la sólida experiencia adquirida durante mi estancia y los momentos inolvidables pasados.

Desde el punto de vista individual, son numerosas, las personas que han participado en la ejecución de este trabajo.

Quiero expresar un sincero y profundo agradecimiento a la Dra. Diana, subdirectora de posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas UANL, quien fue la primera persona que me recibió cuando llegue en la Universidad para buscar informes. Con su gran estilo y apreciable persona, me dio a realizar a través de sus buenas orientaciones, que estaba en el lugar apropiado y al momento indicado, y me vinculó personalmente con todas las personas indicadas para los trámites relativos a mi ingreso. Durante los años de mis estudios doctorales, siempre me ha atendido con consideración, mostrando toda su preocupación por mis dificultades, y sus disposiciones en brindarme el apoyo necesario.

Con la más distinguida consideración, agradezco a mi Director de Tesis, Dr. Rahim Foroughbakhch Pournavab, por haberme aceptado para realizar esta tesis bajo su valiosa dirección. Con la confianza que depositó en mí y su manera de trabajar, me ha inculcado un gran sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico, valores imprescindibles para tener una formación completa como investigador. En sus iluminadas orientaciones y oportuna participación, siempre ha enmarcado las ideas propias, siendo la clave del alto rendimiento orgullosamente alcanzado con este trabajo, por lo que se ganó mi lealtad e inmensa admiración. Siempre me ha facilitado los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis. De acuerdo con mis aspiraciones, me vinculó con la persona la más indicada, para la realización práctica y el desarrollo eficiente de mis trabajos.

De manera especial, mi más sincero agradecimiento al Dr. Artemio Carrillo Parra, Co-Director de esta Tesis, por su valiosa y activa participación en el desarrollo de esta obra. Sus conocimientos y capacidades para guiar mis ideas han sido un aporte invaluable en todo el proceso de este trabajo, desde su concepción, su elaboración y su finalización, al igual que en mi formación académica. Debo destacar que su gran disponibilidad, comprensión, paciencia y persistencia, tanto como su generosidad, sus valiosos consejos y apoyos han sido fundamentales en la adquisición de una sólida experiencia como cátedra y/o investigador de alto nivel. Siempre me ha apoyado con personal para trabajo de campo

y de laboratorio, todo el material necesario y las indicaciones apropiadas para llevar a cabo todas las actividades del proceso. Mil gracias por los buenos contactos que me buscó, para las diferentes estancias que realice.

Quiero dirigir unas palabras especiales al Dr. Volker Zelinski, jefe del Laboratorio de combustibles, suelos y análisis ambientales de la Facultad de manejo de Recursos - HAWK, por haberme aceptado para una estancia internacional en su laboratorio. Su colaboración fue de gran ayuda en los resultados obtenidos para esta Tesis. Gracias por los conocimientos que compartió conmigo, por el personal de apoyo, el material, las metodologías y tecnologías para la determinación del poder calorífico y los elementos químicos, según las normas internacionales. Fue una excelente experiencia para mí, con momentos y personas extraordinarios.

Mi profunda gratitud al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, actual Director de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y jefe del Laboratorio del Laboratorio de Investigación en Química y Tecnología química de la madera, por haberme aceptado también para mi estancia nacional. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado, lo cual se ha visto reflejado en los buenos resultados obtenidos. Le agradezco mucho por el material, la metodología y el personal de apoyo para la determinación de los componentes químicos de la madera, sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante la elaboración de esta Tesis. Fue una muy rica experiencia, con momentos y personas maravillosos.

A todos los profesores miembros del comité de esta Tesis, que sin pensar, aceptaron amablemente y con entusiasmo, formar parte de mi comité tutorial, pero sobre todo, por su amabilidad y apoyo que me brindaron cada vez que se ocupaba. Dr. Marco Antonio Alvarado Vázquez, por sus revisiones críticas y sus consejos, y particularmente, el apoyo para el estudio fenológico de este trabajo; Dr. Marco Antonio Guzmán Lucio, por sus revisiones, sus amables comentarios y principalmente por la identificación botánica de las especies herbáceas colectadas en el desarrollo de este trabajo; Dr. Sergio Moreno Limón, por el material y el apoyo para la determinación de los extractos, por sus revisiones

objetivas, sus consejos y brillantes observaciones. Me han mostraron siempre, una atenta y efectiva colaboración, que se vio reflejada en muchos de los resultados obtenidos, al igual que en la calidad del documento elaborado. He tenido una excelente relación con todos, de manera a que se creó cierta confianza con cada uno.

Al extraordinario equipo que contribuyó con mucha dedicación a la realización de los trabajos de campo y de laboratorio: El técnico Arturo Alejandro Chávez de la Facultad de Ciencias Forestales UANL, por su franca colaboración y sus valiosos aportes realizados durante las innumerables salidas en campo y sesiones prácticas de laboratorio. Los técnicos Nils Wolf, Mr. Ben, Mrs. Silca de la HAWK, por su apreciable contribución en mi formación para los análisis químicos relacionados a esta Tesis; la M.C. Fabiola Eugenia Pedraza Bucio de la UMSNH, por su rigurosa manera de trabajar al laboratorio, y por haberme considerado como su “hijo adoptivo”; el Ing. Francisco Solorio González, técnico en el Laboratorio de microscopio electrónico de barrido del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH, por su eficacia y sus maneras relajadas de trabajar. Tuve momentos muy convivales pero cordiales también con cada uno de ustedes, que creó mucha confianza y cierta familiarización. Gracias por todo!

A los Profesores del Departamento de Botánica (FCB-UANL), gracias por el cariño y la afición que siempre me mostraron; sus conocimientos y experiencias compartidos conmigo fueron por mucho, una gran fuente de motivación y ánimo para seguirle adelante. Quiero nombrar personalmente al Dr. Jorge Piñero, Dr. Sergio Salcedo, Dra. Alejandra Rocha, Dra. Hilda, M.C. Jorge, Dra. Marcela, Dra. María Luisa y Dra. Deyanira. También, a la Dra. María Porfiaría Barrón González y el Dr. Ramón Rodríguez.

Aprovecho también de este espacio para dirigir mis agradecimientos a todo el personal de posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas, por todas las atenciones y afecciones que siempre me han dedicado. De manera personal, al Dr. Pablo Zapata, Secretario de posgrado, por su amabilidad; M.C. Edgar Manilla por sus extremas disposiciones en siempre ayudar, Lic. Mirthala por sus buenas vibras, Julia Zavala, Jenny, Myriam Zavala.

Mi gratitud va también dirigida a los profesores de la Facultad de Ciencias Forestales, que siempre me apoyaron cuando los ocupaba. Dr. Luis Rocha Domínguez, por sus acertadas

observaciones, sus valiosos consejos y por su amistad; Dr. Fernando González Zaldívar, que siempre me ha prestado material para mis numerosas salidas en campo; Dr. Humberto González Rodríguez, por su amabilidad, y que siempre me permitió trabajar en su laboratorio cuando lo ocupaba, y usar su material en algunos de mis ensayos; Dr. Horacio Villalón Mendoza, por sus comentarios y críticas; Dr. Fortunato Garza Ocaña, Dr. Enrique Jurado Ybarra y Dr. Eduardo Alanís Rodríguez, por sus buenas ondas conmigo.

Gracias al Dr. Ernst por su generosidad, su grandeza y su maravillosa manera de ser. Me ha recibido con mucha consideración en Alemania, y me ayudó a conseguir un local donde quedarme durante mi estancia en Gotinga. Además, me recibió por varios días en su casa en Hannover, donde podía dormir y comer, y me llevó a participar a una de las más grandes ferias internacionales de los productos forestales y toda la tecnología actualizada relativa a eso. Fue una experiencia extraordinaria para mí, y un honor conocer a alguien con tanto valor y tan humilde.

Para mis amigos y compañeros doctorand@s y posdocs, tengo sólo palabras de agradecimiento, por aquellos momentos que hemos pasado y todas las actividades que hicimos juntos. Quiero expresar mi agradecimiento especial al Dr. Serafin Urieta Collín, quien además de brindarme sus conocimientos y experiencias profesionales desde el primer momento, me ha permitido considerarlo un buen amigo con el que, a pesar de las más álgidas discusiones científicas y personales, siempre se puede contar. Al M.C. Luis Fernando Pintor quien fue un compañero siempre generoso y dispuesto, que compartió conocimientos y experiencias de tipo profesional y personal que fueron de gran valor. Al Ing. Oswaldo A. Carreón, Jeff González Díaz y Jonathan Dorantes quienes me ayudaron en campo y/o en laboratorio, de manera muy destacada. Para el resto de mis compañeros y amigos: M.C. Verónica Bustamante, David, Carmen, Felipe, Marisol González, Alma, Arthuro, Álvaro Sánchez, Omar, Rodrigo, Mayra Sánchez, Denis Perales, mil y mil gracias por sus diferentes maneras de animarme.

Sea más que propicia la ocasión para dedicarle de manera muy atenta, unas cortas pero muy sentidas líneas, a una verdadera compañera, líneas en las que quiero expresarle mi profunda gratitud y distinguida consideración por haber participado activamente en casi

todas las etapas de desarrollo esta Tesis y sobre todo, por su siempre incondicional asistencia en tantos momentos de días nublados, y donde muchas veces el camino se me hizo árido, pero mi compañera querida Dra. Lidia Salas Cruz, estuviste allí, para tomarme de la mano y prestarme todo el apoyo cuando más lo necesite. Después de este largo y laborioso caminar, es gracias a tu aporte incansable que por fin vivo este hermoso momento, donde todos los honores se quedan pequeño ante lo que realmente mereces. Gracias por ser mi sustento, por ser mi compañía y por siempre estar, deseándome continuamente lo mejor, gracias por cada alegrar y cada momento, que te interesaste a quizás cómo me sentía, haciéndome sentir importante, y que se puede.

Y, por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia. En primer lugar, mi mamá Yango Augustine, quien por su lucha, tenacidad y honestidad, siempre ha sido el principal impulsor de mis sueños. A mi hermano Wangi Marcel por ser un ejemplo de valentía, capacidad y superación, siempre me ha inspirado, animado y apoyado de todas formas. A mis hermanas Tchoheu Marguerite, Biassi Jacqueline, Tebang Heya Yvette, Futngwo Solange Biatrice, Koukong Heya Rosalie, que siempre creyeron en mí, y me brindaron motivación, afección y ayuda de todo tipo, para siempre salir adelante. Mi hermano Mboumy Pierre ha sido para mí, un motivo para no fallar. Mis sobrinos Ngantchou Sandrine Édith Yolande, Manbun Yamokouo Zouliatou y Heya Michel Stéphane, por su afección, atención y apoyo, han contribuido de una manera u otra, que logre a alcanzar esta importante meta de mi vida.

Dedicatoria

Con muy sincera gratitud al Diosito,

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud
para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

Con profunda admiración a mi madre Yango Augustine,

*Por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del
tiempo, por todos sus valientes esfuerzos para mi educación tanto
académica como de la vida.*

Tabla de Contenido

Sección	Página
1. RESUMEN Y ABSTRACT.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	5
3. OBJETIVOS.....	9
3.1.Objetivo general.....	9
3.2.Objetivos particulares.....	9
4. JUSTIFICACIÓN.....	10
5. HIPÓTESIS.....	14
6. ANTECEDENTES.....	15
6.1.Aspectos generales de los matorrales.....	15
6.2.Descripción botánica de las especies seleccionadas.....	18
6.2.1. <i>Helietta parvifolia</i> (Gray) Benth. (Rutaceae). "Barreta"....	18
6.2.2. <i>Ebenopsis ebano</i> (Benth.) Coulter (Fabaceae). "Ebano"...	19
6.2.3. <i>Havardia pallens</i> (Benth.) Standl. (Fabaceae)."Tenaza"...	20
6.2.4. <i>Acacia wrightii</i> Benth. (Fabaceae). "Uña de gato".....	21
6.2.5. <i>Acacia berlandieri</i> (Fabaceae). "Huajillo".....	22
6.3.Fenología vegetal.....	23
6.4.La biomasa.....	26
6.5.La hojarasca.....	28
6.6.Plantaciones forestales.....	29
6.6.1. Silvicultura y procesos de tala.....	30
6.6.2. La madera como materia prima.....	31

6.6.2.1.Componentes de la madera.....	32
6.7.Bioenergía y biocombustibles en México.....	35
6.8.Factores que influyen en la calidad de un biocombustible.....	36
6.8.1. Contenido de humedad.....	36
6.8.2. Materias volátiles.....	37
6.8.3. Cenizas.....	37
6.8.4. Carbón fijo.....	38
6.8.5. Poder calorífico.....	38
6.9.Clasificación de los biocombustibles.....	38
6.9.1. Normas de calidad del carbón vegetal.....	40
6.9.2. Impacto ambiental del sector forestal.....	42
6.9.2.1.Cloruro (Cl^-).....	42
6.9.2.2.Sulfatos (SO_4^{2-}).....	43
6.10. Cromatografía.....	43
6.10.1. Historia e importancia de la cromatografía iónica.....	44
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
7.1.Descripción del área de estudio.....	47
7.1.1. Localización.....	47
7.1.2. Topografía.....	47
7.1.3. Clima.....	48
7.1.4. Suelo.....	49
7.1.5. Vegetación.....	49
7.2.Descripción de los tratamientos, métodos de muestreo y análisis estadístico.....	49
7.2.1. Diseño experimental y selección de las especies.....	49
7.2.2. Métodos de muestreo.....	51
7.2.2.1.Desarrollo fenológico de especies maderables del MET.....	51

7.2.2.2.Estimación de la producción forestal del MET.....	52
7.2.2.2.1. Diámetro.....	52
7.2.2.2.2. Altura total.....	53
7.2.2.2.3. Volumen de madera.....	53
7.2.2.2.4. Cobertura.....	53
7.2.2.3.Cuantificación directa del potencial productivo de plantaciones experimentales del MET.....	55
7.2.2.4.Cuantificación de la biomasa forrajera del MET.....	55
7.2.2.4.1. Biomasa foliar del estrato arbustivo-arbóreo...	55
7.2.2.4.2. Producción de hojarasca del estrato arbustivo- arbóreo.....	56
7.2.2.4.3. Biomasa de la vegetación herbácea.....	57
7.2.2.5.Caracterización energética y composición química....	58
7.2.2.5.1. Preparación de muestras.....	58
7.2.2.5.2. Proceso de carbonización.....	59
7.2.2.5.3. Determinación del rendimiento en carbón.....	60
7.2.2.5.4. Análisis inmediatos.....	61
7.2.2.5.4.1.Contenido de humedad.....	61
7.2.2.5.4.2.Materia volátil.....	62
7.2.2.5.4.3.Contenido de cenizas.....	63
7.2.2.5.4.4.Carbono fijo.....	63
7.2.2.5.4.5.Poder calorífico.....	63
7.2.2.5.5. Análisis elemental.....	64
7.2.2.5.6. Análisis composicional.....	65
7.2.2.5.6.1.Sustancias inorgánicas.....	65
7.2.2.5.6.2.Microanálisis de cenizas.....	66
7.2.2.5.6.3.Sustancias extraíbles.....	68
7.2.2.5.6.4.Lignina.....	69

7.2.2.5.6.5.Holocelulosa.....	70
7.2.2.5.7. Propiedades físicas.....	70
7.2.2.5.7.1.pH.....	70
7.2.2.5.7.2.Poder calorífico experimental.....	71
7.2.2.6.Caracterización de los biocombustibles con el medioambiente.....	72
7.2.3. Análisis estadístico.....	76
8. RESULTADOS	78
8.1.Desarrollo fenológico de las especies estudiadas.....	78
8.1.1. Foliación.....	78
8.1.2. Floración.....	80
8.1.3. Fructificación.....	82
8.2.Producción forestal.....	83
8.2.1. Numero de rebrotos.....	84
8.2.2. Altura total.....	85
8.2.3. Diámetro basal (DB) y diámetro a la altura de pecho (DAP)	85
8.2.4. Volumen de madera.....	86
8.3.Producción forrajera.....	87
8.3.1. Cobertura de especies nativas del MET.....	87
8.3.2. Biomasa foliar.....	88
8.3.3. Producción de hojarasca.....	90
8.3.4. Producción de herbáceas.....	91
8.3.5. Caracterización de herbáceas.....	93
8.4.Características energéticas y composición química.....	94
8.4.1. Producción de carbón vegetal.....	94
8.4.2. Calidad de biocombustibles.....	95
8.4.2.1.Contenido de humedad.....	95

8.4.2.2.Materias volátiles.....	97
8.4.2.3.Contenido de cenizas.....	97
8.4.2.4.Carbón fijo.....	99
8.4.2.5.Poder calorífico.....	99
8.4.2.6.Correlaciones entre las características de biocombustibles ensayados.....	101
8.4.3. Sustancias inorgánicas obtenidas del micro análisis de cenizas.....	102
8.4.4. Elementos químicos (Contenido de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno) en madera y carbón.....	105
8.4.5. Componentes químicos de la madera.....	107
8.4.5.1.Sustancias extraíbles.....	107
8.4.5.2.Lignina Runkel.....	108
8.4.5.3.Holocelulosa.....	109
8.5.Características físicas.....	109
8.5.1. pH.....	109
8.6.Correlación entre poder calorífico y componentes físico-químicos de la madera.....	110
8.7.Grado de contaminación de biocombustibles.....	111
9. DISCUSIÓN.....	113
9.1.Desarrollo fenológico de las especies estudiadas.....	113
9.1.1. Foliación.....	113
9.1.2. Floración.....	113
9.1.3. Fructificación.....	114
9.2.Producción forestal.....	115
9.2.1. Numero de rebrotos.....	115
9.2.2. Altura total.....	116
9.2.3. Diámetro basal (DB) y diámetro a altura de pecho (DAP).	116
9.2.4. Volumen de madera.....	117

9.3.Producción forrajera.....	117
9.3.1. Cobertura de especies nativas del MET.....	117
9.3.2. Biomasa foliar.....	118
9.3.3. Producción de hojarasca.....	118
9.3.4. Producción de herbáceas.....	120
9.4.Características energéticas y composición química.....	121
9.4.1. Producción de carbón vegetal.....	121
9.4.2. Calidad de biocombustibles.....	122
9.4.2.1.Contenido de humedad.....	122
9.4.2.2.Materias volátiles.....	123
9.4.2.3.Contenido de cenizas.....	123
9.4.2.4.Carbón fijo.....	125
9.4.2.5.Poder calorífico.....	125
9.4.2.6.Correlaciones entre las características de biocombustibles ensayados.....	126
9.4.3. Sustancias inorgánicas obtenidas del micro análisis de cenizas.....	127
9.4.4. Elementos químicos (C, H, N) en madera y carbón.....	129
9.4.5. Componentes químicos de la madera.....	130
9.4.5.1.Sustancias extraíbles.....	130
9.4.5.2.Lignina Runkel.....	131
9.4.5.3.Holocelulosa.....	132
9.5.Características físicas.....	133
9.5.1. pH.....	133
9.6.Correlación entre poder calorífico y componentes físico-químicos de la madera.....	133
9.7.Grado de contaminación de biocombustibles.....	134
10. CONCLUSIONES.....	136
11. LITERATURA CITADA.....	139

Lista de Figuras

Figura	Página
1. Características morfológicas de <i>Helietta parvifolia</i> “barreta”.....	18
2. Características morfológicas de <i>Ebenopsis ébano</i> , “ebano”	19
3. Características morfológicas de <i>Havardia pallens</i> , “Tenaza”.....	20
4. Características morfológicas de <i>Acacia wrightii</i> , “Uña de gato”.....	21
5. Características morfológicas de <i>Acacia berlandieri</i> , “Huajillo”.....	22
6. Principales componentes de la madera.....	32
7. Estructura química de la celulosa.....	33
8. Esquema de separación de la fracción celulósica de la madera.....	33
9. Diagrama esquemático de los procesos en cromatografía iónica.....	46
10. Localización del área de estudio.....	47
11. Climograma del periodo de estudio.....	48
12. Delimitación de las parcelas de muestreo en el Matorral nativo.....	51
13. Selección y marcado de árboles muestras para las observaciones fenológicas.....	51
14. Fases fenológicas estudiadas: Foliación, Floración y Fructificación...	52
15. Mediciones de Diámetro basal, Diámetro a altura de pecho y Altura total.....	53
16. Medición de la proyección de copas de árboles y arbustos.....	54
17. Medición del peso verde de cada parte de los árboles derivados.....	55
18. Muestreo para biomasa foliar mediante el método de Adelaide y su separación en diferentes componentes de la biomasa.....	56
19. Recolección de hojarasca mediante trampas.....	56

20. Registro de datos del estrato herbáceo.....	57
21. Derribo de árboles muestras para los análisis químicos y energéticos	58
22. Preparación de muestras: acondicionamiento de probetas y secado de astillas.....	59
23. Carbonización de probetas.....	59
24. Preparación de muestras mediante molinado y tamizaje del carbón vegetal, astillas y hojas secas.....	60
25. Muestras de tamaño 425 µm, carbón vegetal y harina de madera.....	61
26. Determinación del contenido de humedad.....	62
27. Proceso de determinación de los volátiles.....	62
28. Preparación de muestras para análisis elemental.....	64
29. Proceso de determinación de elementos orgánicos C, H, N por combustión y reducción de los gases obtenidos.....	65
30. Determinación del contenido de cenizas.....	66
31. Microanálisis de cenizas: montaje de muestras y observación microscópica.....	66
32. Microanálisis de cenizas: distribución granulométrica y espectrogramas.....	67
33. Determinación de los extraíbles en equipo soxhlet y separación en rotavapor.....	68
34. Determinación del contenido de lignina.....	69
35. Determinación del pH mediante potenciómetro.....	70
36. Determinación del poder calorífico en bomba calorimétrica.....	71
37. Análisis de los residuos post-combustión.....	73
38. Cromatograma de los aniones Cl ⁻ y SO ₄ ²⁻ en soluciones estándares....	74
39. Curvas de calibración de los aniones SO ₄ ²⁻ y Cl ⁻ en solución estandar a diferentes concentraciones.....	77

40. Desarrollo vegetativo de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco de mayo 2013 a abril 2014.....	79
41. Producción de Flores en cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco de mayo 2013 a abril 2014.....	81
42. Fenograma de fructificación en especies del matorral espinoso tamaulipeco de mayo 2013 a abril 2014.....	83
43. Cobertura vegetal de especies arbustivas y arbóreas del MET en plantaciones experimentales y en área nativa.....	88
44. Producción promedio anual de biomasa foliar de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco.....	89
45. Biomasa foliar de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en plantaciones experimentales, por estaciones del año.....	89
46. Tasa estacional de producción de hojarasca (Kg ha^{-1}) y su desviación estándar en plantaciones experimentales de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco.....	90
47. Deposición anual de hojarasca en plantaciones experimentales de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco.....	91
48. Biomasa anual de herbáceas bajo cinco especies del Matorral espinoso tamaulipeco.....	92
49. Rendimiento en producción de carbón vegetal de cinco especies del Matorral espinoso tamaulipeco.....	95
50. Propiedades fisicoquímicas de madera y carbón vegetal de especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco en diferentes componentes.	96
51. Contenido de cenizas obtenido de acuerdo a la norma ISO 17 225 -2..	98
52. Poder calorífico estimado, de madera y carbón vegetal de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco, de sus diferentes componentes.....	100
53. Poder calorífico experimental de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en diferentes componentes.....	101
54. Contenido de elementos inorgánicos (%) y desviación estándar en cenizas obtenidas a partir de madera y carbón vegetal de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en sus diferentes componentes.....	103

55. Elementos químicos en diferentes componentes de cinco especies arbustivas y arbóreas del MET.....	106
56. Solubilidad de diferentes secciones de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en solventes de diferente polaridad.....	108
57. pH de cinco especies arbustivas y arbóreas del MET en diferentes componentes.....	109
58. Regresión lineal simple entre poder calorífico y componentes químicos (pH, Inorgánicos, Extraíbles y Lignina) de la madera.....	110
59. Concentraciones de cloruros y sulfatos en diferentes componentes de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco.....	112
60. Concentraciones de cloruros y sulfatos en el carbón vegetal de troncos y ramas de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco.....	112

Lista de Tablas

Tabla	Página
1. Biocombustibles sólidos derivados de la biomasa forestal.....	39
2. Composición de los principales elementos de los tipos de biomasa....	39
3. Estándares de calidad del carbón vegetal de acuerdo a las características fisicoquímicas por mercado.....	40
4. Estándares de calidad del carbón vegetal, de acuerdo a la granulometría, por mercado.....	49
5. Características de cinco especies maderables seleccionadas para el estudio.....	50
6. Concentraciones de SO_4^{2-} y Cl^- en las soluciones estándares.....	75
7. Valores dasométricos (\pm desviación estándar) de cinco especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México	84
8. Análisis de varianza del número de rebrotes/árbol en los dos sitios....	84
9. Análisis de varianza de la altura total.....	85
10. Análisis de varianza del diámetro basal (Db) de las especies.....	86
11. Análisis de varianza del diámetro a altura de pecho (DAP) de las especies.....	86
12. Análisis de varianza del volumen de madera aprovechable.....	87
13. Análisis de varianza de la cobertura de especies por sitio.....	87
14. Análisis de Varianza para Biomasa foliar.....	88
15. Análisis de varianza para hojarasca en función de especies y estación del año.....	90
16. Análisis de varianza de la biomasa de herbáceas bajo arbustos por sitio	91

17. Valor de importancia de la vegetación herbácea bajo cinco especies arbustivas y arbóreas del MET en plantaciones experimentales y Matorral nativo.....	93
18. Análisis de varianza del rendimiento en carbón vegetal en función de especies y componentes de la planta.....	94
19. Análisis de varianza del parámetro contenido de humedad en función de especies y sus componentes vegetales.....	95
20. Análisis de varianza para el contenido de materias volátiles en tronco, ramas, ramillas y hojas de cinco especies forestales en Linares, N.L.....	97
21. Análisis of varianza para cenizas en función de especies y sus componentes (tronco, ramas, ramillas y hojas).....	97
22. Análisis de varianza para carbón fijo en función de especies y sus componentes.....	99
23. Análisis de varianza para poder calorífico en función de especies y sus componentes.....	99
24. Matriz de correlaciones entre variables determinantes de la calidad de biocombustible.....	102
25. Componentes químicos y desviación estándar de cinco especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco en diferentes componentes vegetales.....	107
26. Ecuaciones de regresión simple y correlación múltiple entre poder calorífico (PC) y componentes químicos de la madera.....	111

1. RESUMEN

La actual crisis energética mundial ha generado el interés siempre creciente de buscar alternativas al uso de combustibles fósiles, presentándose los materiales lignocelulósicos y particularmente la madera, como un recurso prometedor para la producción sustentable de energía. Los matorrales del noreste de México constituyen una importante fuente de recursos forestales para la satisfacción de las necesidades de las poblaciones de estas zonas. En esta formación vegetal, se determinó el potencial forrajero para establecer estrategias factibles de un aprovechamiento óptimo de la vegetación por el ganado y la fauna silvestre; el potencial forestal para evaluar la productividad de biomasa en diferentes estructuras, clave de un manejo sustentable exitoso; y el potencial bioenergético para incentivar un uso nuevo y prometedor de este recurso, y promover un aprovechamiento integral de dicho recurso. Para ello se seleccionaron dos localidades: la primera localidad correspondió a plantaciones experimentales, establecidas con especies nativas del matorral de 30 años de edad, y la segunda abarcó áreas con una vegetación nativa que colinda con la primera. En ambas localidades, se cuantificó la cobertura vegetal del estrato arbustivo-arbóreo, y la producción de biomasa se determinó en términos de: a) volumen de biomasa foliar y hojarasca, b) volumen de leña y madera. Para el potencial bioenergético, se determinó la composición química (pH, extraíbles, lignina y elementos inorgánicos), de acuerdo a estándares internacionales. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente con el programa SPSS v. 21, y se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey. Los valores de cobertura mayor ($19.68 \text{ m}^2/\text{individuo}$) y menor ($2.73 \text{ m}^2/\text{individuo}$) los presentó la vegetación nativa de *E. ebano* y *A. berlandieri*, respectivamente. La biomasa foliar alcanzó el máximo de su productividad en verano, con un valor muy alto ($9029.322 \text{ kg ha}^{-1}$) en *E. ebano*, mientras que el valor menor ($103.0817 \text{ kg ha}^{-1}$) se registró con *A. wrightii* en invierno. El mayor aporte de hojarasca ocurrió en primavera para *A. berlandieri* ($273.73 \text{ kg ha}^{-1}$) y *A. wrightii* ($296.45 \text{ kg ha}^{-1}$). La producción de hojarasca depende de la fracción área, en relación con las condiciones

ambientales y/o climáticas. El volumen de madera aprovechable fue mayor en las plantaciones experimentales que en la vegetación nativa, siendo *H. parvifolia* (0.8287 m³/ha/año) y *E. ebano* (0.2740 m³/ha/año) las especies de mayor producción en comparación con *H. pallens* (0.1468 m³/ha/año), *A. wrightii* (0.1225 m³/ha/año) y *A. berlandieri* (0.1200 m³/ha/año). El matorral nativo presentó un potencial de 2.45 m³/ha. El pH mostró una tendencia ácida (3.95 - 5.64). El contenido de los elementos inorgánicos varió en troncos (1.09 - 2.29%), ramas (0.86 - 2.75%), ramillas (4.26 - 6.76%) y hojas (5.77 - 11.79%), y la mayor proporción se presentó en Ca (57.03 - 95.53%), seguido por K (0.95 - 19.21%) y Mg (0.88 - 13.47%), siendo potasio, calcio, sodio, silicio, fósforo y magnesio, los principales constituyentes de las cenizas. Se obtuvo mayor porcentaje de extraíbles en el solvente metanólico, con valores de 3.96 a 17.03%. La lignina registró valores de 28.78 a 35.84% para troncos, 17.14 a 31.39% para ramas y 20.61 a 29.92% para ramillas. El poder calorífico osciló entre 17.56 y 18.61 MJ kg⁻¹ en troncos, 17.15 y 18.45 MJ kg⁻¹ en ramas, 17.29 y 17.92 MJ kg⁻¹ en ramillas, 17.35 y 19.36 MJ kg⁻¹ en hojas. La lignina presentó correlación moderadamente fuerte ($r=0.66$) con el poder calorífico, pero el mejor modelo matemático se registró con el poder calorífico en función del pH y lignina ($R^2=58.86\%$).

Abstract

The current global energy crisis has generated growing interest always looking for alternatives to fossil fuels, presenting lignocellulosic materials, particularly wood, as a promising resource for sustainable energy production. The scrub of northeastern Mexico represent an important source of forest resources to satisfy the needs of the populations of these areas. In that vegetation, was determined the forage potential, to establish workable strategies for optimal use of vegetation by livestock and wildlife; the potential forest, to assess biomass productivity in different structures, key to a successful sustainable management; and the bioenergy potential, to encourage a new and promising use of this resource, and promote an integral use of this resource. To do this, two locations were selected: the first location corresponded to experimental plantations established with native species of scrub 30 years old, and the second covered areas with native vegetation adjacent to the first. In both locations the vegetation cover of shrub-tree layer was quantified, and biomass production was determined in terms of: a) volume of leaf biomass and litter, b) volume of firewood and timber. For bioenergy potential, the chemical composition (pH, extractable, lignin and inorganic elements), was determined according to international standards. The obtained data were statistically analyzed using SPSS program v. 21, and the comparison test of Tukey was applied. The greater value of coverage ($19.68 \text{ m}^2/\text{person}$) and lower value ($2.73 \text{ m}^2/\text{individual}$) were presented by the native vegetation of *E. ebano* and *A. berlandieri*, respectively. The foliar biomass reached the maximum productivity in the summer, with a very high value ($9029.322 \text{ kg ha}^{-1}$) in *E. ebano*, while the lowest value ($103.0817 \text{ kg ha}^{-1}$) was recorded with *A. wrightii* in winter. The biggest litterfall production occurred in the spring with *A. berlandieri* ($273.73 \text{ kg ha}^{-1}$) and *A. wrightii* ($296.45 \text{ kg ha}^{-1}$). Litter production depends on the area fraction in relation to environmental and/or weather conditions. The volume of harvestable timber was greater in the experimental plantations than in native vegetation, being *H. parvifolia* ($0.8287 \text{ m}^3/\text{ha/year}$) and *E. ebano* ($0.2740 \text{ m}^3/\text{ha/year}$) the species with higher production

compared to *H. pallens* (0.1468 m³/ha/year), *A. wrightii* (0.1225 m³/ha/year) and *A. berlandieri* (0.1200 m³/ha/year). The native scrub presented a potential of 2.45 m³/ha. The pH showed an acid trend (3.95 - 5.64). The content of inorganic elements varied in trunks (1.09 - 2.29%), branches (0.86 - 2.75%), twigs (4.26 - 6.76%) and leaves (5.77 - 11.79%) and the highest proportion occurred in Ca (57.03 - 95.53%), followed by K (0.95 - 19.21%) and Mg (0.88 - 13.47%), being potassium, calcium, sodium, silicon, phosphorus and magnesium, the main constituents of ash. The higher percentage of extractables was obtained in the methanolic solvent, with values of 3.96 to 17.03%. Lignin recorded values of 28.78 to 35.84% for trunks, 17.14 to 31.39% for branches and 20.61 to 29.92% for twigs. The calorific value ranged between 17.56 and 18.61 MJ kg⁻¹ in trunks, 17.15 and 18.45 MJ kg⁻¹ in branches, 17.29 and 17.92 MJ kg⁻¹ in twigs, 17.35 and 19.36 MJ kg⁻¹ in leaves. Lignin showed moderately strong correlation ($r = 0.66$) with the calorific value, but the best mathematical model was registered with the calorific value depending on the pH and lignin ($R^2 = 58.86\%$).

2. INTRODUCCIÓN

México es un país con un importante acervo de recursos forestales (Cruz-Contreras, 2012), ocupando el decimo-primer lugar mundial en superficie forestal con aproximadamente 70% del territorio nacional y el 26° lugar en producción forestal (SEMARNAT, 2012). Se estima en 126.6 millones de hectáreas su superficie forestal, de los cuales 25.8 mill. has de Bosque, 8.8 mill. has de Bosque con vegetación secundaria, 13.1 mill. has de Selvas, 21.2 mill. has de Selvas con vegetación secundaria y 57.6 mill. has de vegetación de zonas áridas (SEMARNAT, 2010). En las zonas áridas y semiáridas que representan más del 50% de la superficie total del país (Rzedowski, 1991; INEGI, 1997; González, 2012), existen grandes variaciones en las condiciones climáticas y edáficas, que propician diferentes tipos de comunidades vegetales extremadamente diversos en términos de composición, altura, cobertura, densidad y asociaciones de plantas (Battey, 2000; Eviner, 2003). De estas comunidades, el matorral es el recurso más abundante e históricamente el más utilizado (García-Hernández y Jurado, 2008), cubriendo una extensión de 125,000 km² de la Planicie Costera del Golfo en el noreste de México y al extremo sur de Texas, EE.UU. (Ruiz, 2005).

Las comunidades del matorral de México han sido clasificadas desde un punto de vista práctico como matorral xerófilo por Rzedowski (1978), atendiendo esencialmente al origen de las mismas, por ser de estructura y composición similares. Este ecosistema bastante diverso en especies tanto arbóreas, arbustivas y sub-arbustivas, como en densidad y altura (Heiseke et al., 1985; Alanís, 2006), ha sido proveedor de importantes productos vegetales (Rojas, 2013), que son utilizados para una gran diversidad de fines tales como la producción de forraje, leña, estantería, uso maderable, materiales para construcción, alimento humano y medicina tradicional; así como la extracción selectiva de especies (Foroughbakhch y Heiseke, 1990). Además, este recurso es utilizado para la producción de carbón y sobre todo, el establecimiento de áreas de cultivo y de pastoreo (Correa, 1996).

A pesar de estos beneficios que generan los matorrales del noreste de México, la actividad antrópica ha provocado gran pérdida de extensiones de vegetación, que resultó en la erosión del suelo y disminución de su productividad. Siendo el suelo el componente básico de un ecosistema por su influencia en la productividad, cualquier atributo de la vegetación relacionado con la reducción de la erosión y estabilidad de las características de la superficie del suelo debe ser medido prioritariamente. En este sentido, la cobertura vegetal que ofrece protección a la intercepción y absorción del impacto de las gotas de lluvia, favorece la infiltración, reduce el escurrimiento superficial de agua y disminuye el arrastre del suelo, aparece como el atributo de la vegetación que está estrechamente relacionado con la estabilidad del suelo (Branson *et al.*, 1981; Gaither y Buckhouse, 1983; Thurow, 1988; Simanton *et al.*, 1991).

Por lo anterior y frente a la creciente demanda social de productos y servicios, se recurre al establecimiento de plantaciones forestales, para abastecer los mercados locales y globales de madera, contribuyendo de manera significativa al desarrollo rural e industrial (FAO, 2013). Desde la perspectiva técnica, combinado al conocimiento silvícola, económico, social y ecológico, existen argumentos suficientes para hipotetizar que en México, las plantaciones forestales son una opción viable con posibilidades de contribuir, en su medida, al desarrollo económico del país (Zamudio *et al.*, 2010). Ademas, las plantaciones favorecen la productividad en el sector forestal y coadyuvan a disminuir la presión y uso de los bosques naturales y también, para el aprovechamiento de áreas que han sido alteradas por actividades agrícolas o pecuarias (INE, 2007).

Esta productividad tiene relación directa con la biomasa, que según Ledesma *et al.* (2010), es una variable fundamental de la estructura arbórea. Su estimación es un importante parámetro para la aplicación de modelos basados en el crecimiento de los árboles (West, 1987; McMurtie *et al.*, 1989; Bassow *et al.*, 1990; Korol *et al.*, 1991) y es necesario para estudios de producción de la vegetación, ciclo de nutrientes, hidrología, hábitat de fauna silvestre y comportamiento del fuego (Waring, 1985; Long y Smith, 1988). La mayoría de los análisis cuantitativos del potencial de biomasa en zonas arboladas, solo se han referido al estrato arbóreo, dejando a un lado el arbustivo y por lo tanto, excluyendo de su cuantificación, una importante cantidad de biomasa, presente por

igual, tanto bajo el arbolado como en terrenos forestales abiertos (Sánchez *et al.*, 2008). Mittelbach *et al.* (2001) recomiendan hacer estudios en especies arbustivas, las cuales son las menos estudiadas a nivel mundial. A pesar de que la proporción de la vegetación no leñosa en la biomasa total de un bosque puede ser muy pequeña, esto no quiere decir que no sea importante en su estructura (Álvarez, 1993). Por lo tanto, la cuantificación de las herbáceas es de suma importancia desde el punto de vista forrajero, ya que se considera hasta un 40%, la superficie que ocupa el estrato herbáceo (Benavides, 1993). Para mayor precisión en la estimación de la biomasa, se debe de considerar tanto la biomasa área como la necromasa, ya que según McDicken (1997) y Marquéz y Roy (2000), la necromasa es uno de los compartimientos de la biomasa.

Por otra parte, se calcula que en la producción forestal maderable de un árbol, solo se aprovecha el 20%, y que el 40% es dejado en campo en las ramas, puntas y raíces, el restante 40% se desperdicia en la manufactura del proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín (Enciso, 2007). Estos residuos son una fuente potencial de materia prima para la generación de energía, ya sea bajo esquemas de manejo silvícola o subproductos de la industria de transformación (PNUMA, 2010). Por lo tanto, se considera que el manejo correcto de los bosques, de las plantaciones forestales y la utilización de los materiales provenientes de la industria maderera es una alternativa para producir materia prima que desarrolle biocombustibles (Goche-Télles *et al.*, 2015). Según datos proporcionados por Wu *et al.* (2011), 50% de la población del planeta emplea biocombustibles para obtener calor, debido a las políticas ambientales que buscan reducir los contaminantes que produce el uso de combustibles fósiles. En México, la leña y el carbón representan el tercer lugar en volumen de extracción, con el 9.9% (SEMARNAT, 2007).

Para determinar las principales características energéticas de estos materiales, se deben considerar las variables físicas y químicas que los definen. Las características químicas de la madera que más influyen en su comportamiento como biocombustible son la composición química elemental, la composición química por compuestos y el poder calorífico (Camps y Marcos, 2008). Bajo estas premisas y en búsqueda del mejoramiento de la eficiencia bioenergética, es de suma importancia determinar los rendimientos y evaluar la calidad de biocombustibles a partir de diferentes componentes de especies

maderables del matorral espinoso tamaulipeco, incluyendo ramillas y hojas que son considerados como residuos, troncos y ramas que son las partes generalmente más aprovechadas. De igual manera, contar con conocimientos de las características de los matorrales proporcionaría una visión integral de las oportunidades silvícolas a aplicar adecuadamente en cada área, considerando proyecciones del crecimiento y rendimiento confiables, para una buena planificación del manejo, mejoramiento y aprovechamiento de estos recursos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Analizar y determinar el potencial forestal, forrajero y bioenergético de cinco especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco que permitan evidenciar las ventajas ambientales y económicas derivadas del aprovechamiento como fuente de energía renovable en el noreste de México.

3.2. Objetivos particulares

- Estudiar las variaciones fenológicas de especies maderables del Matorral espinoso tamaulipeco, en relación a las condiciones climáticas;
- Cuantificar la necromasa (hojarasca) del estrato arbóreo-arbustivo, como una variable para caracterizar la variabilidad del sistema suelo-planta como indicador que permita dar seguimiento a su sostenibilidad;
- Cuantificar y caracterizar la biomasa herbácea, para el establecimiento de un sistema integral y de mayor precisión en el potencial forrajero del matorral espinoso tamaulipeco;
- Determinar la biomasa foliar de la vegetación leñosa, como una herramienta sencilla de monitoreo y seguimiento;
- Evaluar el crecimiento y la producción volumétrica de especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco;
- Evaluar la calidad como biocombustibles de diferentes componentes de las especies maderables seleccionadas, tanto para la biomasa sin tratamiento como para carbón vegetal;
- Determinar las correlaciones entre los parámetros ecológicos con las condiciones climáticas, los datos dendrológicos y los parámetros bioenergéticos.

4. JUSTIFICACIÓN

El consumo mundial de energía ha ido aumentando de manera constante con los procesos de crecimiento e industrialización de las poblaciones, siendo los derivados de los combustibles fósiles, las fuentes de energía actualmente predominantes. Sin embargo, el petróleo y el gas natural son recursos limitados que se agotarán en algún momento en el futuro cercano. Aunque hay debates sobre el año exacto de la producción pico del petróleo, en general se cree que ocurrirá antes del 2025, a lo que le seguirá el comienzo de una caída en la producción de petróleo en todo el mundo (Campbell, 2013). Este carácter agotable de los recursos actuales, unido a una mayor demanda energética, conduce inexorablemente a la exploración de fuentes alternativas de energía que sean capaces de cubrir las necesidades energéticas de la sociedad, de una manera sostenible y no contaminante. Dicho escenario ha despertado un interés en el uso de combustibles no fósiles, renovables y menos contaminantes. La motivación para ese cambio de postura no solamente es la necesidad de buscar alternativas al petróleo, debido a su carácter finito, lo que contrasta con un aumento de la demanda energética, sino también una mayor concientización del cuidado medioambiental, que comienza con la necesidad de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (Wackett, 2008).

Otros aspectos destacables de las energías renovables son, además del componente medioambiental, el efecto vertebrador y social que éstas tecnologías pueden tener. Así, se consideran tecnologías claves por varias razones más allá de la seguridad energética o las preocupaciones ambientales, como son el aumento de divisas y cuestiones socio-económicas relacionadas al sector rural (Demirbas, 2008), debido a la creación de empleo local y a la activación económica de estas regiones.

La mayoría de los grandes países consumidores de energía están adoptando políticas muy activas encaminadas a una utilización mucho mayor de biocombustibles para las próximas décadas (Kojima y Johnson, 2005). En México, se está buscando la manera de

introducir los biocombustibles en la matriz energética, de una forma sustentable con productores nacionales y así poder impulsar el desarrollo rural (Valle y Ortega, 2012).

A los sistemas de producción de energías renovables se les otorga un beneficio claro, como es la disminución de la carga contaminante provocada por los combustibles fósiles. En el caso de la biomasa, existen otros beneficios tales como propiciar el desarrollo rural y proporcionar el tratamiento adecuado de residuos, en algunos casos contaminantes, o gestionar los residuos procedentes de podas, aclareos y residuos del aprovechamiento, limitando la propagación de incendios (Rincón y Silva, 2014). El aprovechamiento de la masa forestal residual como combustible para calderas de biomasa es una de las soluciones para facilitar el saneamiento de los bosques (IDAE, 2007).

Las fuentes más importantes de biomasa son los áreas forestales y agrícolas; pues en ellos se producen residuos que normalmente son dejados en el campo (Camps y Martín, 2008). La industria forestal genera grandes volúmenes de residuos durante el proceso de aprovechamiento hasta la obtención del producto final. Se calcula que los residuos son el 28 % del volumen de la madera de los aprovechamientos forestales medidos en metros cúbicos con corteza (Martín, 2001). Los residuos forestales, procedentes de actividades silvícolas y/o industrias forestales lo constituyen las ramas, tocones (cuando no son utilizados debido a razones económicas), corteza, astillas y aserrín.

El aprovechamiento energético de estos residuos forestales, derivados de actividades silvícolas como podas y aclareos, a veces no rentables económicamente, supone un manejo integral de las masas forestales (Borja, 2006). La alta disponibilidad y el bajo precio de los subproductos forestales como el aserrín, viruta, despuntes, entre otros, incentiva la búsqueda de nuevas alternativas productivas. La producción de bioenergía es una opción económica y ecológicamente viable (Garcia *et al.*, 2012). Sin embargo, es necesario determinar si esos subproductos cumplen con los estándares internacionales de calidad. Para ello, se requiere evaluar el contenido de humedad (CH) y algunas características físico-químicas como porcentaje de cenizas, tipo y porcentaje de elementos inorgánicos (García *et al.*, 2012; Vassilev *et al.*, 2012). Conocer la composición química de las diferentes estructuras que conforman las especies maderables es un aspecto importante y necesario para encontrar alternativas de aprovechamiento de los beneficios

económicos que dichos recursos proporcionan para las diferentes industrias (García *et al.*, 2004).

Más allá del aspecto cualitativo antes mencionado, hay que tener en cuenta la dimensión cuantitativa de la producción forestal para su mejor manejo, que resultaría en la optimización del aprovechamiento. La relevancia de aplicarlo al matorral espinoso tamaulipeco radica en el interés de conocer la diversidad de especies que forman parte de la estructura de esta comunidad vegetal, y evaluar su productividad para poder estar en condiciones de tomar las mejores decisiones de manejo, buscando aprovechar de forma sustentable el forraje para la fauna silvestre.

El manejo de estos recursos debe sustentarse en la observación e interpretación de distintas características, que permiten estimar en la forma más precisa posible la disponibilidad de forraje, entendida como la cantidad de materia seca entregada diariamente a cada animal. Eso es el punto de partida para una serie de decisiones de alto impacto sobre los resultados productivos en sistemas ganaderos de base forrajera, con objetivo fundamental de establecer estrategias factibles de adaptarse mediante modificaciones según el lugar y lograr así un manejo y un aprovechamiento óptimos de la vegetación y la fauna silvestres. Por lo anterior el estudio y análisis de las coberturas vegetales, debe ser el primer paso a seguir. Según Wilson y Tupper (1982), la pertinencia de seleccionar la cobertura vegetal como indicador de impacto de alguna práctica de mejoramiento, se debe a que cualquier cambio en ella es el primer síntoma de cambios en procesos ambientales como erosión, cantidad de mantillo sobre el suelo y composición botánica. Además el parámetro cobertura indica, mejor que cualquier otro parámetro, como la abundancia o dominancia, el volumen ocupado o superficie de suelo cubierto por una especie (Huss *et al.*, 1986).

Se considera también la caída de hojarasca, como algo de gran importancia, especialmente donde la vegetación depende del reciclado de nutrientes provenientes de su deposición (Bernhard *et al.*, 2001). De igual manera, los cambios fenológicos (que se ven en la aparición de nuevas hojas, flores y frutos), representan adaptaciones a factores bióticos y/o abióticos (Van Schaik *et al.*, 1993), en relación con las condiciones climáticas. Estos parámetros pueden erigirse en herramientas confiables para la evaluación y monitoreo de

las poblaciones silvestres de especies del matorral espinoso tamaulipeco y sus recursos asociados, y servir como base para la elaboración de planes adecuados de manejo o bien para modificar las actuales prácticas de aprovechamiento, tendientes a la conservación, mejoramiento y uso sostenible de estos ecosistemas de importancia en las zonas áridas y semiáridas (Meza, 2002).

5. HIPÓTESIS

1. La producción forrajera, forestal y bioenergética de las plantaciones forestales con especies nativas es similar a la producción en sitios con vegetación natural en el Noreste de México.
2. Los factores climáticos y edáficos de la región no son determinantes en la producción de biomasa y bio-energéticos.

6. ANTECEDENTES

6.1. Aspectos generales de los matorrales

En el noreste de México, una amplia extensión del área se encuentra ocupada por matorrales (aproximadamente 200,000 km²), que es una asociación de 60 a 80 especies vegetales, reconocidas por su altura baja, distribuidos en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas (Udvary, 1975). Existe una gran cantidad de matorrales con diversa composición y estructura. Entre los nombres que se han utilizado están: matorral xerófilo (seco), cardonales, tetecheras, izotales, nopaleras, matorral espinoso, matorral inerme (sin espinas), parvifolio (hojas pequeñas), magueyales, lechuguillales, guapillales y chaparrales (INEGI, 2005). Para aportar conocimientos más precisos de esta vegetación, García (1999) evaluó ecológicamente las áreas de matorral submontano con vegetación prístina en el municipio de Linares, a través de la caracterización de los sitios, basada en su composición y estructura.

El matorral espinoso tamaulipeco es la comunidad dominante en la Planicie Costera del Golfo, y está presente en la porción Norte de México, en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, así como en el Sur de Texas. De acuerdo a Müeller (1947), el matorral espinoso tamaulipeco es un sistema ecológico de gran diversidad florística, con especies espinosas de porte alto. Según Heiseke (1984), este ecosistema constituye una fuente forrajera donde el pastoreo se ha practicado en forma extensiva desde hace 350 años.

Jurado y Reid (1989) describieron la composición y estructura de una porción de matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México y evaluaron la importancia de los factores edáficos, topográficos y antropogénicos en la distribución de las especies vegetales; registraron la presencia de 51 especies, principalmente arbustivas y suculentas; la vegetación tiene una altura promedio de 4 m, distinguiéndose tres estratos en la misma.

El análisis de asociación mostró que la distribución de 37 % de las especies se asocia con uno o más de los factores ambientales considerados.

Foroughbakhch y Heiseke (1990) mencionan que desde el punto de vista de la productividad y bajo los esquemas de aprovechamientos actuales, el matorral presenta un rendimiento muy bajo, lo cual constituye la causa principal de su degradación y destrucción en favor de terrenos agrícolas y praderas artificiales. Ellos realizaron un estudio acerca de la aplicación de métodos y técnicas de manejo silvícola del matorral con el fin de aumentar la producción forestal y pecuaria, manejando técnicas como el raleo, el enriquecimiento y regeneración controlada en una zona de matorral tamaulipeco en Linares, N. L.

Reíd *et al.* (1990) estudiaron la variación estructural y florística presente en el matorral espinoso tamaulipeco en el Noreste de México, llegando a la conclusión de que las variaciones regionales en clima, sustrato y topografía son las responsables de las principales diferencias en la vegetación, además encontraron evidencia de cambio en la vegetación a causa del sobrepastoreo, y no siendo así para el corte selectivo de especies maderables o combustibles.

Carrillo-Parra (1991) realizó un estudio en un área de matorral espinoso tamaulipeco de Linares, Nuevo León, con el fin de determinar y comparar el efecto de algunos tratamientos silvícolas y de factores abióticos sobre la regeneración del matorral, a fin de obtener antecedentes que permitiesen implementar un programa de manejo para incrementar la productividad del matorral. Las prácticas silvícolas utilizadas fueron: 1.- corte raso, 2.- corte raso con plantación (especies introducidas), 3.- raleo del 20% más plantación, 4.- raleo del 40% más plantación y 5.- raleo del 60% más plantación. Se encontró que las heladas afectan por igual al matorral independientemente del tratamiento de raleo efectuado, pero la práctica de raleo efectuada si afecta la velocidad de recuperación de las plantas, siendo el raleo del 60% el que presenta una mejor recuperación.

Rodríguez (1994) realizó un estudio sobre la fitodiversidad de dos comunidades (perturbada y no perturbada) de matorral espinoso tamaulipeco en el municipio de Linares,

Nuevo León, reportando que la comunidad no perturbada (matorral alto) presenta características relativamente prístinas, con mayor diversidad, mayor dominancia a nivel específico y mayor complejidad estructural que la comunidad perturbada (matorral bajo), el cual se encuentra en un estadio sucesional anterior y con menor complejidad estructural.

Medina (1995) evaluó el efecto de la fragmentación de la vegetación natural sobre la biodiversidad del matorral espinoso tamaulipeco en el municipio de Linares, N.L. No se detectó ningún efecto del tamaño de los fragmentos con relación a la fitodiversidad; sin embargo, la autora plantea que la similitud en la fitodiversidad se debe a lo reciente de la fragmentación, además de que el muestreo se realizó en el centro de los fragmentos y es posible que las condiciones de merma en la diversidad aún no se presentan en esa zona.

Rocha-Domínguez (1995) realizó una investigación en una comunidad de matorral espinoso tamaulipeco a fin de determinar la presencia de nodricismo para *Astrophytum asterias*. El autor determinó algunos parámetros ecológicos (abundancia, dominancia, valor de importancia, etc.) para esta comunidad, reportando a *Opuntia leptocaulis* como la especie más abundante (46.9%), *Prosopis laevigata* como la de mayor dominancia (24.1%) y de mayor frecuencia (66.7%). En cuanto al valor de importancia, indica que *O. leptocaulis* presentó un valor del 32.5%, seguido de *P. laevigata* con 24.2% y *Acacia rigidula* con 20.7%. Por otra parte, reporta para este matorral una cobertura global del 80%, siendo el estrato medio (1.5-3 m), el de mayor cobertura individual, con 57.5%. Se determinó un 30% de suelo con cobertura de materia orgánica y un 70% de suelo sin cobertura de materia orgánica.

A pesar de toda esta información, Yerena-Yamallel *et al.*, (2011) indican la necesidad de realizar estudios de especies del Matorral Espinoso Tamaulipeco, para sentar las bases metodológicas para la medición e inventarización de variables como el contenido de carbono en estas especies, con el fin de proveer de alternativas futuras de generación de recursos económicos para los pobladores del Noreste de México.

6.2. Descripción botánica de las especies seleccionadas

De acuerdo a investigaciones realizadas en el matorral espinoso tamaulipeco, para la presente investigación se seleccionaron cinco especies leñosas con mayor valor de importancia ecológica (Alanís *et al.*, 2008; Jiménez *et al.*, 2009). A continuación se enlistan las cinco especies en cuestión, con una descripción de estas, basada en la literatura de Vines (1984) y Everitt y Lynn (1993).

6.2.1. *Helietta parvifolia* (Gray) Benth. (Rutaceae). "Barreta"

Arbusto o árbol de 3 a 5 m de altura, con ramas delgadas y sin espinas. Hojas opuestas y trifoliadas, las hojillas usualmente de forma oblango-obovada, con el margen entero. Flores pequeñas, blancas, de color blanco-verdosas. El fruto es una sámarra, con 3 a 4 carpelos, que se separan en la madurez, trialado. Crece en suelos secos, se distribuye en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila hasta Querétaro. La madera en la región es utilizada para leña, postes, orcones en casas, techos y en barreras de habitaciones rurales y corrales (Fig. 1).

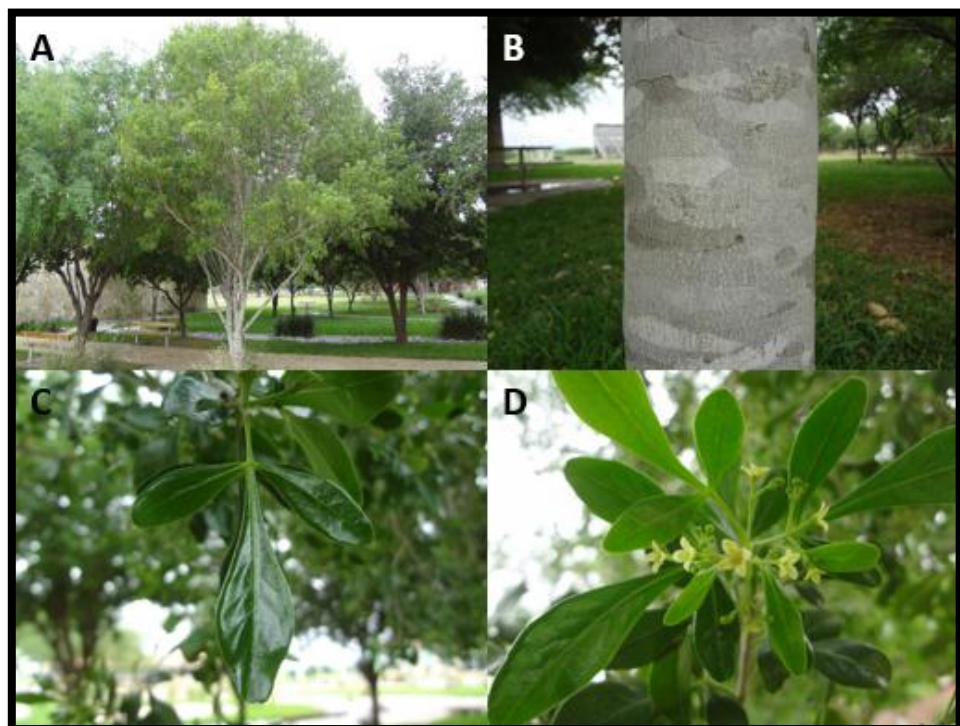


Figura 1. Características morfológicas de *Helietta parvifolia* “barreta”. A) Copa, B) Tronco, C) Hoja, D) Inflorescencia

6.2.2. *Ebenopsis ebano* (Benth.) Coulter (Fabaceae). "Ebano"

Árbol de hasta 15 m de altura, con el fuste recto. Hojas alternas, bipinnadas, con 1 a 3 pares de pinnas y 3 a 6 pares de folíolos por pinna, de forma elíptica, oval u obovada. Flor amarilla o crema. El fruto es una legumbre larga, de color café oscuro o negro, con numerosas semillas. Se encuentra en suelos con material calcáreo, con una capa de arcilla. Se distribuye en los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Baja California. La madera en la región es utilizada para leña, postes, en orcones de casas y en la elaboración de carretas (Fig. 2).

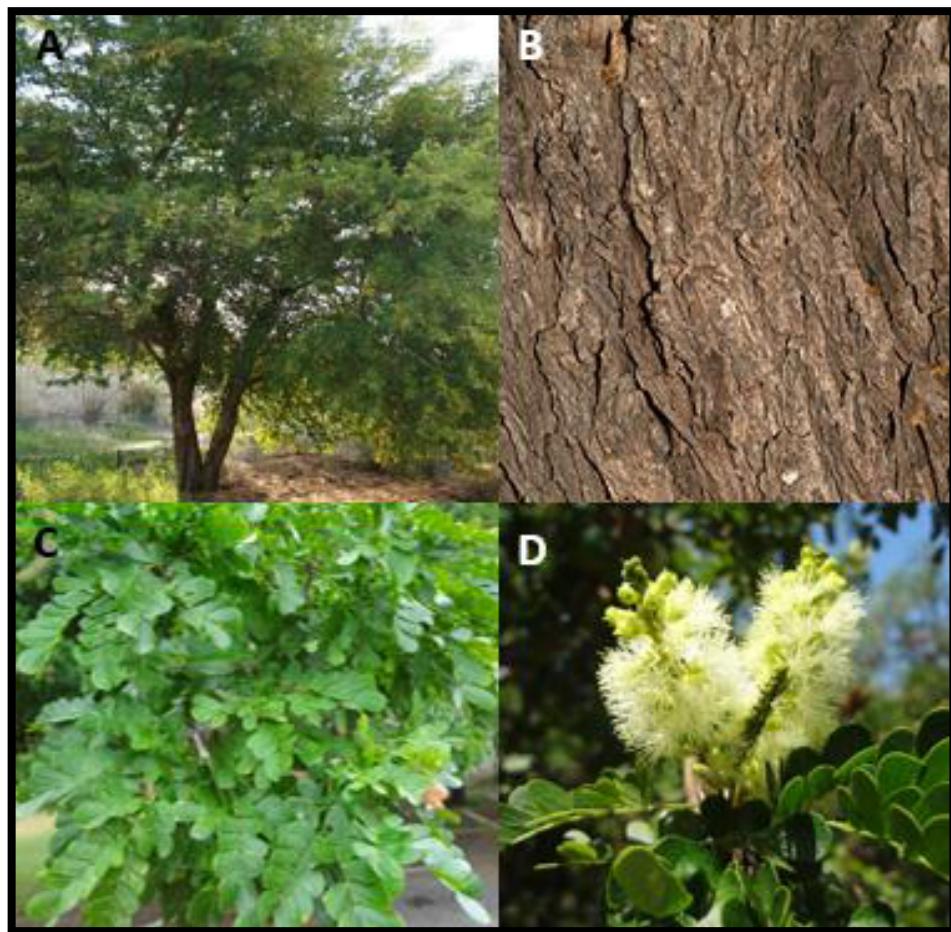


Figura 2. Características morfológicas de *Ebenopsis ebano*, “Ebano”. A) Copa, B) Corteza, C) Hoja, D) Inflorescencia

6.2.3. *Havardia pallens* (Benth.) Standl. (Fabaceae). "Tenaza"

Arbusto espinoso usualmente de 1 a 2 m de altura, rara vez alcanza los 6 m. Hojas bipinnadas, con 3 a 6 pares de pinnas y de 7 a 20 pares de hojillas por pinna, de forma oblongo-lineal. Flores blancas. De fruto, una legumbre de color café rojiza, con numerosas semillas. Usualmente, se localiza en suelos aluviales, distribuido en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila y San Luis Potosí. La madera en la región es utilizada para leña, en techos, elaboración de juguetes, muebles y escaleras (Fig. 3).

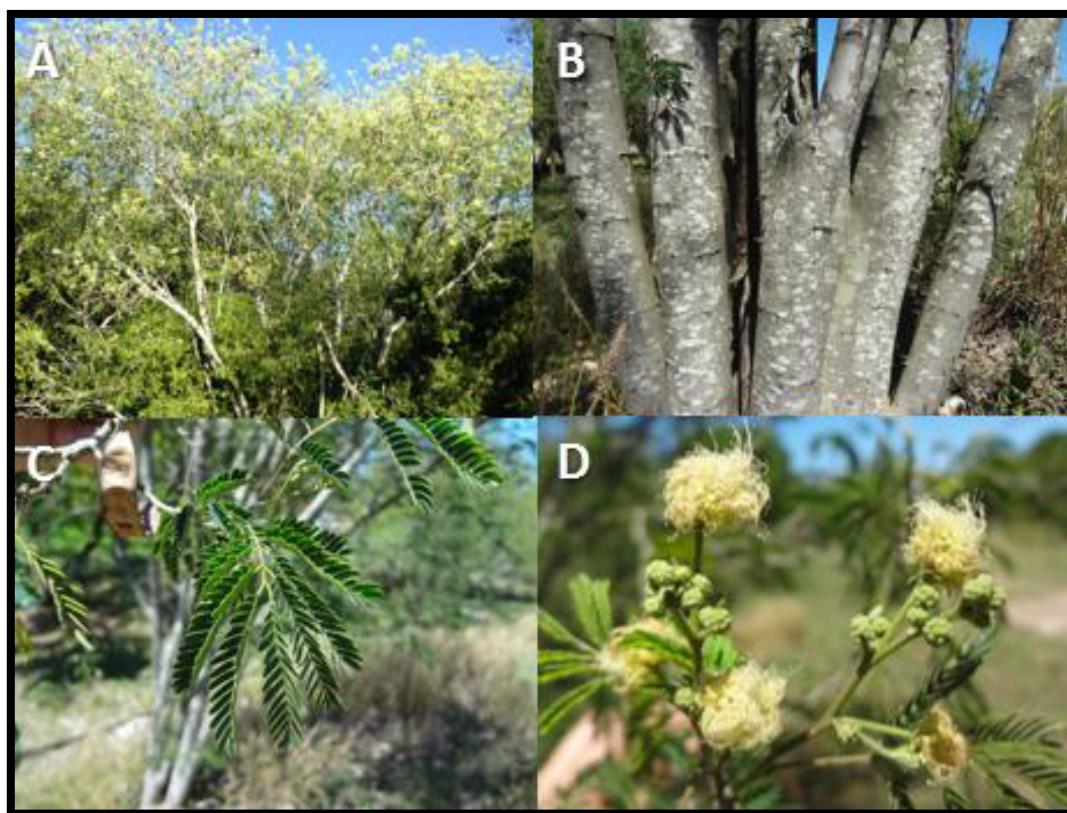


Figura 3. Características morfológicas de *Havardia pallens*, “Tenaza”. A) Copia, B) Tronco, C) Hoja, D) Inflorescencia

6.2.4. *Acacia wrightii* Benth. (Fabaceae). "Uña de gato"

Arbusto espinoso o árbol pequeño de 2 a 3 m de altura, con ramas extendiéndose a lo ancho en forma irregular a la copa. Hojas solitarias o en fasículos, bipinnadas, con 1 a 3 pares de pinnas y de 2 a 6 pares de hojillas por pinna, de forma obovada o angostamente oblongo. Flores de color crema amarillentas. El fruto es una legumbre ancha, de color café claro. Se desarrolla en suelos secos y pedregosos; localizado en los estados de Sonora, Tamaulipas y Nuevo León. Las espigas son utilizadas por las abejas para la producción de miel; la madera en la región es empleada para leña, postes, orcones en casas rurales, en la fabricación de carretas (Fig. 4).



Figura 4. Características morfológicas de *Acacia wrightii*, “Uña de gato”. A) Copia, B) Espinas en ramas, C) Hojas, D) Inflorescencia

6.2.5. *Acacia berlandieri* Benth. (Fabaceae). "Huajillo"

Arbusto originario del sudoeste de Estados Unidos y nordeste de México. Alcanza un tamaño de 1 a 5 m de altura, con flores que son esféricas y de color blanco, que se producen entre febrero y abril (Fig. 5). Contiene una amplia variedad de alcaloides y puede causar efectos tóxicos en los animales domésticos tales como cabras (Clement *et al.*, 1997). Contiene derivados de la dimetiltriptamina y glucósidos cianogénicos en las hojas, las semillas y la corteza, cuya ingestión puede suponer un riesgo para la salud (EFSA, 2012). Es tóxica para el ganado y por lo tanto, no debe usarse como forraje.

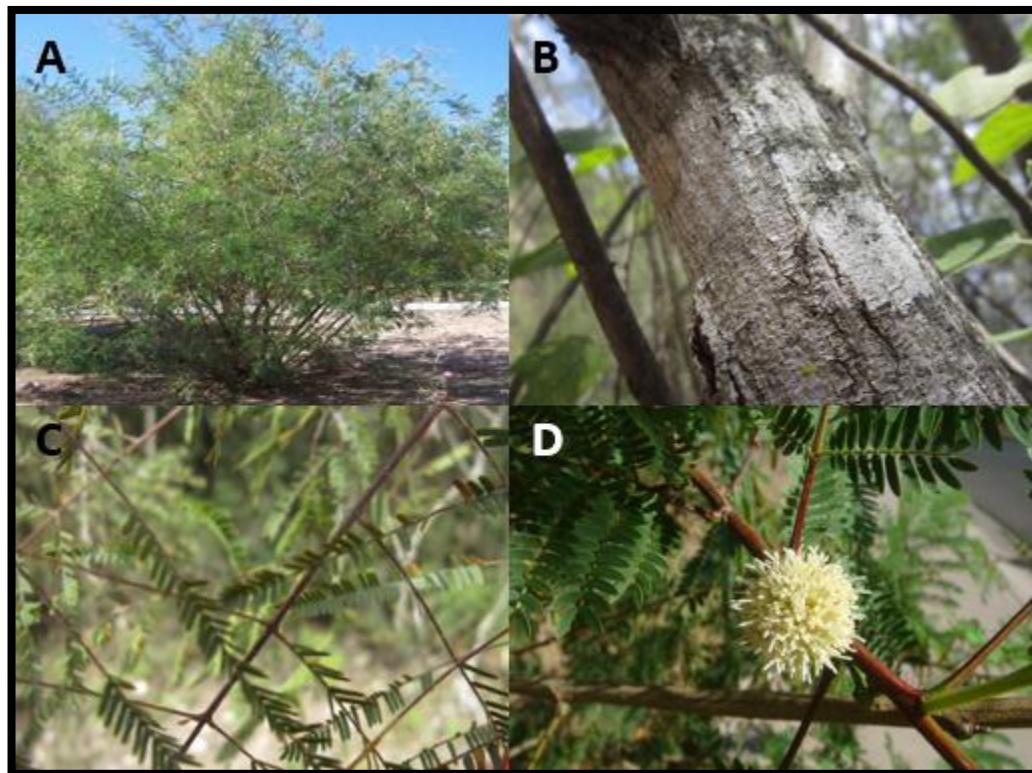


Figura 5. Características morfológicas de *Acacia berlandieri*, “Huajillo”. A) Copo, B) Tronco, C) Hoja, D) Inflorescencia

6.3. Fenología vegetal

El estudio de los eventos periódicos naturales involucrados en la vida de las plantas se denomina fenología (Volpe, 1992; Villalpando y Ruiz, 1993; Schwartz, 1999), palabra que deriva del griego *phaino* que significa manifestar, y *logos*, tratado. Fournier y Charpentier (1978) señalan que es el estudio de los fenómenos biológicos acomodados a cierto ritmo periódico como la brotación, la maduración de los frutos y otros. Como son naturales, estos fenómenos se relacionan con el clima de la localidad en que ocurre; y viceversa, de la fenología se puede sacar secuencias relativas al clima y sobre todo al microclima cuando ni uno, ni otro se conocen debidamente.

Este término tuvo su primer uso por el botánico belga Charles Morren en 1958; sin embargo, la observación de eventos fenológicos data de varios siglos atrás en la antigua China, donde se desarrollaron los calendarios fenológicos, siglos antes de Jesucristo (Basaure, 2009).

Desde hace más de 200 años, algunos agricultores de los E.E.U.U. iniciaron sus registros de las fechas de siembra, emergencia, foliación, caída de hojas, y otros, de muchas especies de plantas. Luego del desarrollo del termómetro, se hizo posible correlacionar estas etapas del desarrollo con el clima, especialmente con la temperatura y humedad.

En 1918, Andrew Hopkins estableció la ley bioclimática, ampliada en 1938, donde se recomienda el uso de observaciones fenológicas en lugar de observaciones meteorológicas ya que las primeras integran los efectos del microclima y los factores edáficos en la vida de las plantas, de tal forma que otro instrumento no lo puede hacer.

En la actualidad, se dispone de suficiente información sobre los factores climáticos, edáficos y biológicos involucrados en la duración del ciclo biológico y producción de los cultivos. Sin embargo, es bastante frecuente encontrar que para referirse a un momento determinado de su ciclo biológico, esto se haga en términos de una escala de tiempo (Días Despues de la Siembra, DDS) relacionándola con las observaciones y prácticas que se

llevan a cabo en ellos sin tomar en cuenta el efecto de tales factores sobre la morfología de las plantas (Volpe, 1992).

El ciclo biológico cambia con el genotipo y con los factores del clima, esto quiere decir que las plantas del mismo genotipo sembradas bajo diferentes condiciones climáticas pueden presentar diferentes estados de desarrollo después de transcurrido el mismo tiempo cronológico. Por lo que cada vez cobra mayor importancia, el uso de escalas fenológicas que permiten a la vez, referirse a las observaciones y prácticas de manejo del cultivo en una etapa de desarrollo determinado (Hopkins, 1918).

Los estudios de fenología vegetal son muy importantes para el análisis y manejo de sistemas ecológicos. Estos estudios pueden ser útiles para desarrollar programas de manejo, recuperación de plantas y para explicar la adaptación de las especies al ambiente (Fresnillo-Fedorenko *et al.*, 1996). Por ejemplo, Yan y Wallace (1998) elaboraron un modelo sobre la fenología vegetal, basado en la interacción genotipo-temperatura y fotoperiodo, mostrándose ser exitoso para simular y predecir datos fenológicos de cinco especies cultivadas: chícharo, avena, trigo, frijol y maíz, las tres primeras de fotoperiodo largo y las dos restantes de fotoperiodo corto. Por su parte, Baumgàrtner y Hartmann (2000) reportan el uso exitoso de modelos fenológicos en programas de conservación vegetal; estos autores elaboraron un modelo fenológico para adecuar la fecha de corte del narciso (*Narcissus radiiflorus*), con lo cual se pretende conservar esta especie en la zona alpina Europea, ya que hasta la fecha, el corte de esta especie se realizaba sobre bases empíricas; con el desarrollo de este modelo, se pudo calcular una fecha confiable para el corte de la planta, asegurando la madurez de las semillas.

Los eventos fenológicos en las plantas del desierto son disparados principalmente por la precipitación y temperaturas adecuadas (Beatley, 1974 citado en Rossi *et al.*, 1999). Por su parte, Fournier y Salas (1966, citado en Rondon, 1992) sugieren que la baja precipitación y la alta radiación solar son los factores ambientales más importantes para la floración en el bosque tropical húmedo. La mayoría de las plantas leñosas tropicales producen nuevas hojas y flores en períodos específicos más que continuamente, y la mayoría de los bosques tropicales presentan variación estacional en la aparición de nuevas hojas, flores y frutos; este padrón sugiere que los cambios fenológicos representan

adaptaciones a factores bióticos y/o abióticos, de estos últimos el clima es el factor principal (Van Schaik *et al.*, 1993).

Cantú y Reíd (1991) realizaron una de las primeras aproximaciones al conocimiento de la fenología en el matorral tamaulipeco al estudiar 59 especies del matorral tamaulipeco en Linares, N.L, reportando que la pérdida de follaje fue altamente variable entre las especies. La floración se concentró en la parte más cálida del año, particularmente en primavera y verano. Respecto al tipo de frutos, se encontró que la legumbre es el tipo más común (31%), drupas (28%), cápsulas (15%) y el resto presentó bayas, aquenios, folículos, sámaras, etc. En cuanto a la dispersión, 30 especies son dispersadas por agentes bióticos y 23 por factores abióticos y el resto son no asistidas. Las aves representan el principal agente dispersor (43%).

El conocimiento de la fenología en especies de cultivo bajo condiciones de estrés puede llevar a un mejor entendimiento del desarrollo de los componentes de la cosecha bajo tales condiciones. Por ejemplo, Desclaux y Roumet (1996) mencionan que el estrés de sequía modifica la fenología de las plantas y afecta los componentes de la cosecha en plantas de cultivo. Para probar esto, realizaron un estudio en cultivares de soya (*Glycine max*), los cuales se sometieron al estrés hídrico durante diferentes etapas de desarrollo. De acuerdo a sus resultados, aparentemente el estrés de sequía disparó una señal que cambió el desarrollo vegetal de vegetativo a reproductivo. Así, la formación de nudos vegetativos que se estaba llevando a cabo, previo a la aplicación del estrés, fue retrasada para dar paso a la floración y fructificación. Las fases reproductivas fueron en general más cortas durante el estrés, con la lógica consecuencia de menor producción de materia seca en los frutos.

La fenología reproductiva, descrita en su forma más general como la época de floración y fructificación, es un factor relevante que determina el rendimiento reproductivo de las especies, ya que puede poner restricciones en el uso de los recursos estacionales, tales como luz, agua y polinizadores por parte de las plantas. El tiempo de floración y fructificación puede también ser importante para evitar la predación de flores y semillas (Marco *et al.*, 2000). La fenología reproductiva de los bosques tropicales se caracteriza por presentar una alta diversidad dentro y entre los bosques, este rango de variación

sugiere el gran potencial de los estudios fenológicos tropicales para explorar las presiones selectivas que ejercen los factores bióticos y abióticos sobre las plantas (Sakai, 2001).

Para estudios fenológicos de comunidades, Hernández y Carreon-Abud (1987) describen los eventos reproductivos de los principales elementos arbóreos y algunas arbustivas y herbáceas de un bosque mesófilo de montaña; encontrando que la floración de los árboles es de carácter fuertemente estacional, con un marcado pico en la interfase sequía-lluvia y lluvias-sequía, mientras que las herbáceas y arbustivas florecieron básicamente durante la estación húmeda.

La gran mayoría de las especies arbóreas poseen niveles altos de autocompatibilidad, lo cual se considera un mecanismo adaptativo que aumenta las posibilidades de éxito reproductivo en ausencia de polinizadores eficiente. Bertiller *et al.* (1991, citado en Fríedel *et al.*, 1994) encontraron que la aparición de los eventos fenológicos en los arbustos de zonas áridas dependían principalmente de la profundidad de los sistemas radiculares y el acceso a la humedad del suelo y nutrientes.

6.4. La biomasa

De acuerdo con Odum (1965), la biomasa puede definirse como la producción de materia seca por unidad de superficie. Aproximadamente el 90% de la biomasa acumulada en la tierra se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Raev *et al.*, 1996; Leith and Whithacker, 1975).

La biomasa (sobre peso seco) de los árboles puede ser medida cortando el árbol, dividiéndolo dentro de sus componentes (madera de diferentes tamaño, hojas, frutos, etc.), pesándolas en fresco y secando cada muestra de cada componente para determinar el contenido de humedad de la cual el peso seco puede ser calculado (Stewart, 1989). Esta cuantificación de la producción por medición del peso, es una forma directa y más adecuada para expresar el rendimiento de una especie (Salazar *et al.*, 1987). Pero generalmente, la biomasa se mide en diferentes componentes y por consiguiente, existen procedimientos aditivos (Cunia y Briggs, 1984; Parresol, 1999). La aditividad consiste en que la suma de cada uno de los componentes resulta en la biomasa total.

La biomasa tiene otros aspectos a destacar, como su incidencia positiva en la prevención de los incendios forestales, la mejora del estado de los bosques, y el mantenimiento de la población y empleo en el ámbito rural (Alvares-Vergel *et al.*, 2011).

Los métodos para la estimación del potencial de biomasa forestal son variados, pero su precisión disminuye a medida que aumenta la extensión de terreno a evaluar, haciendo muy difícil su réplica en otras zonas en las que las características climáticas, edáficas y fenológicas, hacen de su corología un factor altamente variable. Los cambios que se presenten en la producción de biomasa y diversidad en gradientes de productividad son controversiales, donde se han realizado estudios para determinar dichas relaciones en ecosistemas terrestres.

La capacidad de producción de biomasa a gran escala es de 40 millones de toneladas al año, de la cual la participación de biomasa sólida es del 40 al 50% (Wu *et al.*, 2011). Según PNUMA (2010), la biomasa en sus diferentes formas, es una importante fuente de energía para más de dos mil millones de personas a nivel mundial.

En las plantas, durante el proceso de fotosíntesis, se almacena la energía solar en la clorofila al transformar el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en carbohidratos (Enciso, 2007). Esta energía se puede utilizar de varias formas, y la biomasa se convierte entonces en combustible. El uso de la biomasa como combustible data desde tiempos en que el hombre aprendió a manejar el fuego, quizás el uso más antiguo fue en las primeras hogueras en las cuevas donde vivían nuestros antepasados (Antal y Gronli, 2003). Con el paso del tiempo en Egipto, se perfeccionó el sistema de producción de biomasa leñosa y el uso progresivo del carbón vegetal constituyó la base energética de las antiguas civilizaciones (Patiño y Smith, 2008). Posteriormente, con el desarrollo industrial, la fundición de metales y el uso de motores de combustión interna disminuyeron al ser sustituidos por el carbón mineral y el petróleo (Martín, 1989). Actualmente, en algunos países, la biomasa es la principal fuente de energía y a nivel mundial, se considera una forma moderna y limpia de obtener energía (Patiño y Smith, 2008).

Algunos beneficios atribuidos del uso de la biomasa como fuente de energía son: la seguridad energética, al provenir de diferentes fuentes descentralizadas, podría ayudar a las naciones a reducir la dependencia de los combustibles fósiles; propicia un crecimiento económico rural al estimular el crecimiento de la agricultura, forestería y la industria rural y de desechos; favorece la protección del medio ambiente por compensación de uso de combustibles fósiles y las menores emisiones relacionadas a los óxidos de nitrógeno, dióxidos de azufre y otros contaminantes (Carrillo *et al.*, 2015).

No obstante, de los beneficios del uso de la biomasa como fuente de energía, la biomasa en su forma original presenta algunos inconvenientes como es un alto contenido de humedad (>50%), gran diversidad en forma e irregular tamaño (< 0.2 mm a 30mm), baja densidad (40-400 kg m⁻³), lo que reduce su calidad energética y dificulta su manejo, transporte y almacenaje (Kaliyan y Morey, 2009).

6.5. La hojarasca

Desde que Bray y Gorham (1964) evidenciaron la importancia de la “caída de hojarasca”, investigadores en varias partes del mundo han enfocado sus estudios en este tema. Sin embargo, este término ha tomado diferentes enfoques; por ejemplo, Proctor *et al.* (1983) en Inglaterra denominan “Litter-fall” al conjunto de material como hojas, ramas, frutos, inflorescencias y estructuras no identificadas, depositado por árboles y/o arbustos al piso forestal. Pérez *et al.* (2006) en Argentina utilizan el término “caída de mantillo” y se refieren a la caída de acículas, ramas < 1 cm y miscelánea. En México, Návar y Jurado (2009) definen el término “productividad foliar” a la materia orgánica depositada sobre el suelo (follaje, ramas, fustes, etc.). En China (Liu *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2004), Grecia (Kavvadias *et al.*, 2001), Japón (Xu y Hirata, 2002), Colombia (Zapata *et al.*, 2007) y México (Pavón *et al.*, 2005; González *et al.*, 2008; Nájera y Hernández, 2009) adoptaron la propuesta de los anglosajones “Litter-fall”, por lo que en este estudio se consideró el término “caída o acumulación de hojarasca” (por su traducción al español), debido a su amplio uso en México y en diferentes partes del mundo. Por lo anterior, la caída de hojarasca se consideró como el conjunto de todos los residuos orgánicos de las plantas que caen al suelo, como hojas, ramas < 2 cm, frutos e inflorescencias y misceláneas

(Proctor *et al.*, 1983; González *et al.*, 2008). La caída de hojarasca es de suma importancia, especialmente donde la vegetación depende del reciclado de nutrientes provenientes de la deposición de ésta (Bernhard *et al.*, 2001).

Spain (1984) enuncia que la caída de hojarasca, en los bosques, se asocia con la transferencia de energía y de nutrientes a partir de sus componentes biológicos hacia la superficie del suelo, y es el punto de inicio para el ciclado de nutrientes. La acumulación de materia orgánica, producida por la caída de hojarasca y su descomposición, es un factor importante tanto en la formación del suelo como en los procesos de ciclado de nutrientes (Van Wesemael, 1993). La hojarasca foliar es la principal fuente de nutrientes del suelo forestal (Vitousek y Sanford, 1986; Landsberg y Gower, 1997) y representa ~80% del total de nutrientes retornados al suelo por los detritos del árbol (Santa Regina *et al.*, 2001). La cantidad y naturaleza de la hojarasca tienen una importante relación con la formación del suelo y el mantenimiento de su fertilidad, de ahí que la cuantificación de su producción y naturaleza sea una importante aproximación para la comprensión de los bosques y del ciclaje de nutrientes (Rai y Proctor, 1986). La caída de hojarasca se relaciona con la productividad del bosque, su fenología y sus tasas de renovación de biomasa y de nutrientes (Williams y Tolome, 1996).

6.6. Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales se definen como aquellas formaciones forestales establecidas en el contexto de un proceso de forestación o reforestación (García-Mosqueda *et al.*, 2014). La creciente demanda social de productos y servicios, requiere enormes esfuerzos para el establecimiento de nuevos bosques, donde el apropiado manejo forestal intensivo de plantaciones puede abastecer los mercados locales y globales de madera, contribuyendo de manera significativa al desarrollo rural e industrial. De acuerdo al Informe de Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 (FAO, 2013), entre 2000 y 2010, el área de bosques plantados aumentó en unos cinco millones de hectáreas al año: son bosques establecidos en su mayoría mediante forestación, (es decir, la plantación de árboles en tierras que hasta ese momento no estaban clasificadas como bosque), especialmente en China.

Por otra parte, las plantaciones favorecen la productividad en el sector forestal y coadyuvan a disminuir la presión y uso de los bosques naturales y también, para el aprovechamiento de áreas que han sido alteradas por actividades agrícolas o pecuarias (INE, 2007). Desde la perspectiva técnica, combinando al conocimiento silvícola, económico, social, ecológico y financiero, existen argumentos suficientes para hipotetizar que en México las plantaciones forestales son una opción viable con posibilidades de contribuir, en su medida, al desarrollo económico del país (Zamudio *et al.*, 2010). Por tal motivo, es conveniente contar con herramientas confiables para la evaluación y monitoreo de las poblaciones silvestres y sus recursos asociados, en la que su caracterización sirva como base para la elaboración de planes adecuados de manejo o bien para modificar las actuales prácticas de aprovechamiento, tendientes a la conservación, mejoramiento y uso sostenible de estos ecosistemas de importancia en las zonas áridas y semiáridas (Meza, 2002), de tal forma que la evaluación de plantaciones pueda aportar información para el desarrollo de dichas herramientas.

6.6.1. Silvicultura y procesos de tala

Etimológicamente la palabra silvicultura significa “cultivo del bosque”. Aunque en sus orígenes la silvicultura se consideró como un arte, hoy es considerada también como una ciencia que estudia las técnicas mediante las cuales se crean y conservan no solo los bosques, sino cualquier masa forestal, aprovechándola de un modo continuo con la mayor utilidad posible y teniendo especial cuidado en su regeneración, ya sea esta natural o artificial (Santillán, 1986). Desde un punto de vista práctico, aplicar la silvicultura implica la manipulación de las masas forestales con el propósito de obtener los productos forestales deseados (como maderas, leñas, frutos, cortezas, etc) y beneficios indirectos (tales como evitar o corregir la erosión del suelo, regular el caudal de los manantiales, impedir la formación de aludes, fijar las arenas en movimiento, atenuar el efecto de los vientos, regular el microclima, acondicionar lugares de esparcimiento y mejorar la calidad de los suelos), y al mismo tiempo, lograr su permanencia y renovabilidad, considerando obviamente criterios biológicos, ecológicos, dasonómicos, económicos y sociales (Santillán, 1986).

De esta forma, la silvicultura se entiende como el cuidado de los bosques orientado a obtener el máximo rendimiento sostenido de sus recursos y beneficios. Por lo que, Campos (2009) indica que los diferentes métodos empleados en la tala de los árboles para la obtención de madera, buscan un desarrollo sostenible. Se recomienda llevarla a cabo en otoño o principios de invierno, ya que en esta época la savia ha cesado de circular y se encuentra en menor cantidad que en otras épocas del año. Si la madera se tala con un exceso de savia, se puede favorecer la proliferación de insectos que atacan a la madera.

Además de la gestión silvícola, se debe mantener la masa arbórea en buenas condiciones para que los árboles no sufran deformaciones en sus troncos, las cuales repercutirían en las propiedades de la madera. Para tal fin, hay dos operaciones principales que se llevan a cabo: poda de las ramas, que tiene por finalidad que toda la energía del árbol se destine a generar madera en el tronco o en ramas gruesas, y la tala de árboles de gran tamaño por los motivos expuestos anteriormente en la descripción de la tala por árboles sembrados (Campos, 2009).

6.6.2. La madera como materia prima

Una vez cortado, el árbol proporciona la madera, que se aplica en las industrias de la construcción, embalajes, objetos varios (Ortuño, 1999). Siempre ha sido uno de los principales recursos naturales para el hombre y gracias a los progresos tecnológicos, sirve para muchísimos más usos. La industria química utiliza extensamente la madera como tal, a causa de sus propiedades físicas y mecánicas, para obtener muchos productos de gran valor (Campos Cisneros, 2007). A diferencia de la mayor parte de las materias primas, la madera es un recurso renovable, si se administra bien; pero mal administrado, puede convertirse en un desastre ecológico. De este modo, se propuso la biomasa forestal como fuente de energía. Biomasa puede ser: virutas o aserrín de madera, producto de la limpieza de bosques o incluso de su explotación racional. Para usar la madera en la industria química del modo más eficaz, es preciso conocer las diferentes sustancias que la constituyen.

6.6.2.1. Componentes de la madera

Todos los vegetales y especialmente los leñosos están constituidos por los componentes mayoritarios: C, H, O y N; y contienen también pequeñas cantidades de Ca, K y Mg. Los elementos C, H y O se combinan entre sí para formar los componentes orgánicos de la madera: celulosa, hemicelulosa y lignina, así como pectinas (Ortuño, 1998).

Al describir los componentes químicos de la madera, suele distinguirse entre componentes de la pared celular y materia extraña. Los componentes de la pared celular son la lignina y los polisacáridos totales, constituidos por celulosa y hemicelulosa (Fig. 6).

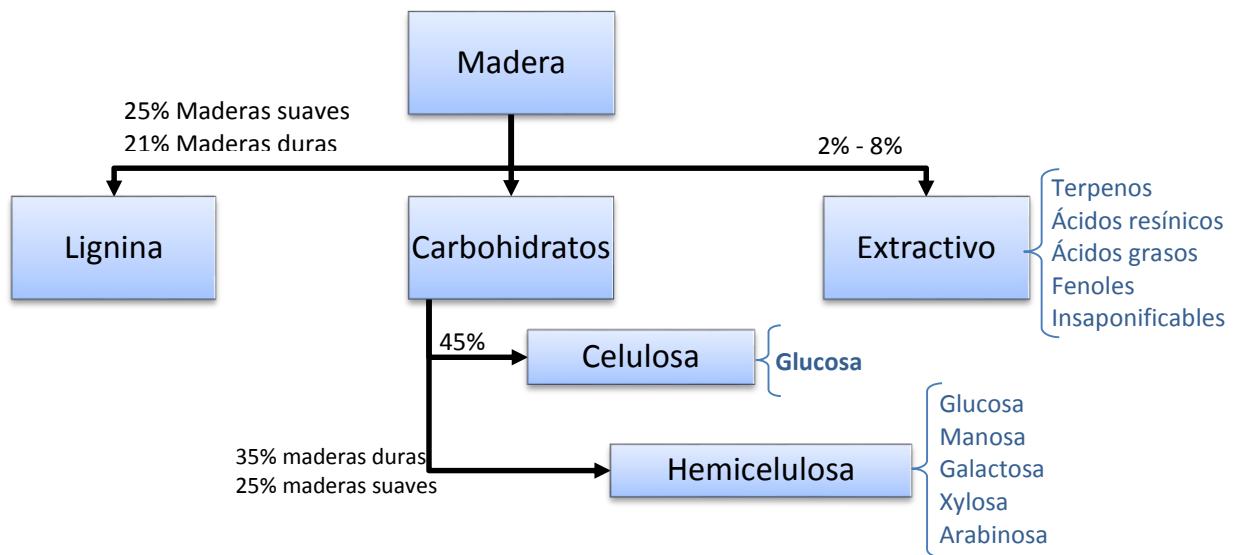


Figura 6. Principales componentes de la madera (Modificado de Campos, 2007)

La celulosa (Fig. 7) es el principal constituyente de la pared celular de todas las plantas superiores y el componente mayoritario de todas las fibras de madera (40-45%). Está constituida por B-D-glucosa en forma de piranosa, unidas entre sí por enlaces 1---4 glicosídicos con formación de restos de celobiosa.

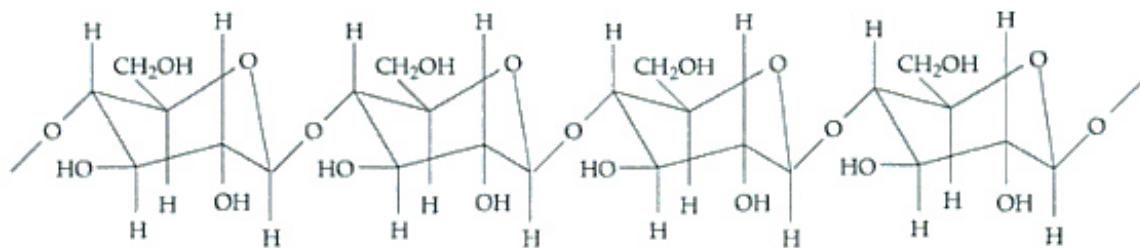


Figura 7. Estructura química de la celulosa (Ortuño, 1998)

La hemicelulosa se encuentra en la pared celular asociada con la celulosa. Está formada por pentosas y hexosas distintas de la glucosa (manosa, xilosa, glucosa, galactosa y arabinosa), unidas entre sí con un grado de polimerización de 100 a 200. La estructura química y la composición varían según la especie. Así, casi todas las hemicelulosas son insolubles en H_2O , pero pueden disolverse en álcalis fuertes y son fácilmente hidrolizadas por ácidos. Su estructura amorfa y su bajo peso molecular le confieren una mayor solubilidad y susceptibilidad a la hidrólisis que la celulosa (Ortuño, 1998).

La fracción celulósica –celulosa y hemicelulosa- de la madera se puede separar en sus componentes en función de su solubilidad en NaOH al 17.5%, según su grado de polimerización (Fig. 8).

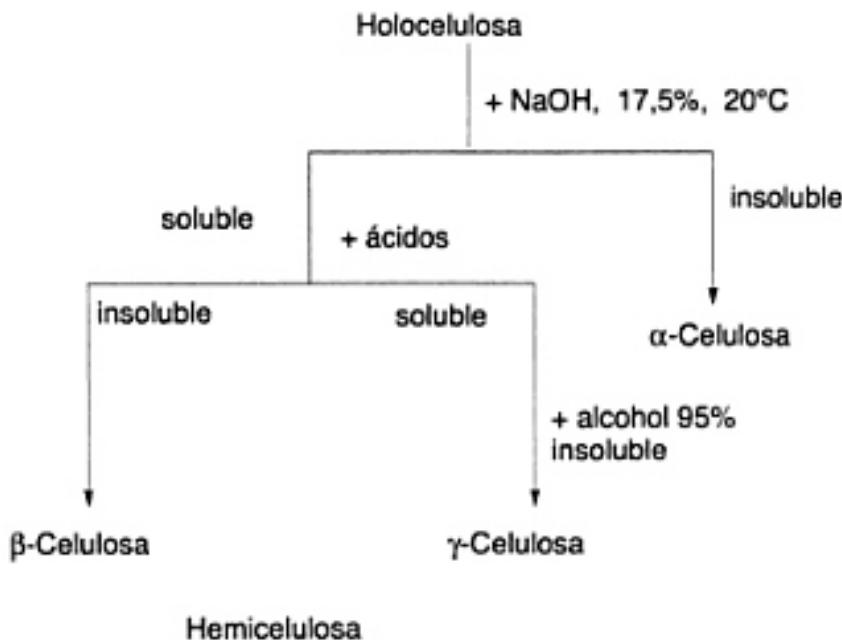


Figura 8. Esquema de separación de la fracción celulósica de la madera (Ortuño, 1998)

Las pectinas o sustancias pécticas son también hidratos de carbono. Forman las paredes de las células jóvenes, producidas por el cambium, pero su contenido disminuye en los árboles viejos.

La lignina es el tercer componente en orden de importancia de la pared celular (20-30%). Su misión es cementar las fibras de madera, proporcionar rigidez a las mismas y actuar como barrera contra la degradación enzimática de la pared celular. La lignina diferencia a la madera de otros materiales celulósicos. En la madera, se encuentra asociada siempre a la celulosa, pero no ocurre lo mismo en otros materiales celulósicos, en los que la celulosa se puede encontrar prácticamente pura como, por ejemplo, en algodón (Ortuño, 1998).

La lignina es un polímero aromático tridimensional en el cual se repiten unidades de fenilpropano con diferentes tipos de uniones (éter o C – C) entre los monómeros. Esto da lugar a una compleja estructura que solamente puede ser definida por la frecuencia con que aparecen determinadas uniones. Es difícil separar la lignina de la madera que, además, se altera con el método de extracción. El peso molecular del producto separado puede variar entre 1000 y 20000 g/mol (Lu y John, 2010).

Debido al alto contenido de estos compuestos aromáticos fenólicos, las ligninas presentan color oscuro y son fácilmente oxidadas. Son relativamente estables en medios ácidos minerales acuosos, pero son solubles en bases acuosas y bisulfito caliente.

La madera contiene también una serie de compuestos llamados globalmente extractos, de variada composición química, como son: gomas, resinas, azúcares, grasas, alcaloides y taninos, que se pueden extraer de la madera con agua fría o caliente, o disolventes orgánicos como alcohol, bencenos, acetona o éter. La proporción de estas sustancias está comprendida entre el 1 y el 10%, aunque algunas especies tropicales pueden contener hasta un 20% de los mismos. Los componentes inorgánicos no son solubles en los disolventes mencionados, pero a veces se incluyen entre los extractos (Ortuño, 1998).

La materia extraña está constituida por sustancias que pueden separarse por extracción por disolventes no reactivos, residuos de proteínas del protoplasma de la célula en crecimiento y componentes minerales, algunos muy difíciles de eliminar.

6.7. Bioenergía y biocombustibles en México

La bioenergía se define como la manera de generar energía a partir de biomasa: “materia viva” o “derivada de seres vivos”, incluyendo un rango amplio de productos, que se han dividido en tres tipos de combustible: los sólidos (leña, carbón, residuos agrícolas y pecuarios, y residuos municipales) que se gasifican para producir calor y electricidad, y los combustibles líquidos, que utilizan cultivos energéticos (caña de azúcar, oleaginosas, higuerilla, palma de aceite y coco) para generar etanol y biodiesel (Masera *et al.*, 2006). Esta fue la primera fuente de energía que conoció la humanidad. La madera o incluso los excrementos secos son biocombustibles.

Masera *et al.* (2006) describen los diferentes recursos bioenergéticos en México, analizando las existencias actuales de los recursos, y se explora el potencial técnico de los recursos forestales. También presentan las aplicaciones de las tecnologías, mediante una revisión de las principales tecnologías de aprovechamiento de los recursos bioenergéticos. Además de los escenarios de mediano y largo plazo de la sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles, cabe señalar que en el Cuaderno Temático: “Biocombustibles Avanzados en México” (Sandoval, 2010), se hace mención de los biocombustibles avanzados (Etanol, Carburante, Diésel verde y Biodiesel), haciendo referencia en los estudios y proyectos sobre éste tipo de biocombustibles.

Por biocombustibles, se entiende aquel combustible de origen biológico que no se ha fosilizado. Si no se añade “no se ha fosilizado”, el petróleo, los carbones minerales y el gas natural serían considerados biocombustibles, debido a que su origen también es biológico, pero han sido fosilizados hace cientos de miles de años (Camps y Marcos, 2008). El uso de biocombustibles en el país está en vías de desarrollo. Sin embargo, México produce etanol para su uso en bebidas alcohólicas, productos farmacéuticos y alimenticios, como solvente y reactivo industriales. El etanol producido actualmente proviene del jugo de la caña de azúcar y se obtiene en algunos ingenios azucareros, a través de la fermentación del jugo y la destilación (Álvarez-Macié, 2009).

De acuerdo con BNDES y CGEE (2008), hay una fuerte transición de los usos involucrando “bajo nivel tecnológico” (como leña para cocinar), hacia usos comerciales más avanzados (energía eléctrica, vapor, combustibles).

6.8. Factores que influyen en la calidad de un biocombustible

El concepto de calidad depende de la granulación, contenido de humedad, cenizas, carbón fijo, del gusto del consumidor y también de la especie maderable utilizada (Camps y Martín, 2008). Se utiliza el término *análisis inmediatos* para indicar las pruebas estandarizadas que determinan la calidad de un combustible (Ndudi y Gbabo, 2015), basándose en determinar el contenido de humedad, materia volátil, contenido de cenizas y carbón fijo (ASTM, 1995). Dentro de las principales características que definen la calidad, se pueden considerar también la densidad y el poder calorífico (Pérez y Compean, 1989). Si bien todas estas propiedades en cierto modo están interrelacionadas, se miden y se valúan por separado.

Para obtener un biocombustible, las principales etapas de transformación realizables para el tratamiento de biomasa residual son: fragmentación, secado y compactación, con el objetivo de facilitar la ignición y combustión del biocombustible, aumentar su poder calorífico al disminuir su humedad y aumentar la densidad y gastos de almacenaje al disminuir su volumen. Las transformaciones químicas dependen de las propiedades que contengan el material como su poder calorífico, la cantidad y composición de cenizas, composición química ya que estas propiedades afectan la combustión, así como, el diseño y rendimiento de los sistemas de combustión (Martín, 2001).

6.8.1. Contenido de humedad

La madera es un material higroscópico que siempre contiene agua, y de hecho en el árbol en pie, la madera tiene como función el transporte del agua de la raíz hasta las hojas, lo que permite el proceso de crecimiento (SENA, 1987). Para un uso adecuado de la madera, una vez cortado el árbol, es necesario remover o secarla hasta un contenido de humedad, que depende de las condiciones de uso posterior de la madera.

El término contenido de humedad (C.H) se define como la "cantidad de agua que una pieza de madera contiene, expresada como porcentaje del peso anhidro o seco al horno de la pieza de madera. La fórmula para calcular el contenido de humedad es:

$$C.H (\%) = \frac{(\text{Peso original} - \text{Peso seco al horno})}{\text{Peso seco al horno}} \times 100$$

Peso seco al horno

El contenido de humedad tiene efecto en el tiempo que puede durar el biocombustible en el almacén sin deteriorarse por el ataque de hongos y otros microorganismos, en el poder calorífico neto, en la eficiencia en la combustión, en el rendimiento energético y en la durabilidad (García *et al.*, 2012; Obernberger y Thek, 2004).

6.8.2. Materias volátiles

La volatilidad en el contexto de la química, la física y la termodinámica es una medida de la tendencia de una sustancia a pasar a vapor. Se ha definido también como una medida de la facilidad con que una sustancia se evapora. A una temperatura dada, las sustancias con mayor presión de vapor se evaporan más fácilmente que las sustancias con una menor presión de vapor. El material volátil es la cantidad de biomasa que es liberada cuando se calienta a temperaturas desde 400 a 500°C (Kaliyan y Morey, 2009).

6.8.3. Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material, siendo un parámetro clave para predecir problemas en la combustión en las calderas, incluyendo: 1) la obstrucción de los ventiladores de la parrilla; 2) los sistemas automáticos de limpieza de quemadores y los intercambiadores pueden resultar dañados; 3) se generan más productos inquebrados que hay que eliminar frecuentemente; 4) los automatismos, sondas, etc., pueden también resultar dañados; 5) los alquitranes condensados en chimeneas pueden afectar a los electroventiladores de salida de humos (Ortiz-Torres, 2006; Vega-Nieva *et al.*, 2014b).

6.8.4. Carbón fijo

Es el carbono puro que contiene un combustible sólido. Según Márquez (2009), es el componente de mayor importancia energética, lo que constituye una estructura cristalina donde el enlace químico prevalece en la unidad de átomos de carbono. En metalurgia, el carbón fijo es el componente más importante, puesto que es el responsable de la reducción de los óxidos de hierro, durante la producción de hierro fundido.

6.8.5. Poder calorífico

Se entiende por poder calorífico, la cantidad de energía desprendida por un kg de combustible al quemarse. Esta es la característica fundamental que define a un combustible como tal y depende básicamente de la composición química del combustible (Ortiz-Perez, 2006). El poder calorífico se puede determinar mediante cálculos, a partir del contenido de los diferentes elementos que constituyen el combustible, como se puede determinar también de manera experimental mediante el uso de un calorímetro, que mide el valor exacto del calor desprendido durante el proceso de combustión del material a analizar.

6.9. Clasificación de los biocombustibles

En función del proceso de obtención de éstos y de sus propiedades físicas, se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos (Dragone *et al.*, 2010). Los biocombustibles líquidos se obtienen a través de procesos químicos, a partir de aceites vegetales, grasas animales ó cultivos con alto contenido en azúcares, mientras que los biocombustibles gaseosos se obtienen a partir de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de aire. En cuanto a biocombustibles sólidos, son producidos mediante procesos físicos para la generación de energía, y son mayormente utilizados en sistemas de calefacción. Existe una gran variedad de biocombustibles sólidos; los tipos más empleados para sistemas de calefacción son: leña, astillas, pellets, briquetas y los residuos agroindustriales como el hueso de aceituna, cáscara de almendra, poda de vid, etc. (IAASTD, 2009). Estos diferentes tipos de biocombustibles sólidos, que a la fecha se han derivado de la biomasa

forestal, se presentan en la tabla 1 y en lo consecuente, se describe cada uno de ellos con base al estado del arte en el que se encuentra.

Tabla 1. Biocombustibles sólidos derivados de la biomasa forestal

Biocombustible	Tamaño de partícula típico	Método común de preparación
Briquetas	Diámetro mayor a 25 mm	Compresión mecánica
Péllets	Diámetro menor a 25 mm	Compresión mecánica
Astillas	5 a 100 mm	Corte con herramientas con filo
Carbón vegetal	---	---

En la tabla 2, se presentan los principales elementos que componen los diferentes tipos de combustibles sólidos.

Tabla 2. Composición de los principales elementos de los tipos de biomasa

Tipo de biomasa	% en base húmeda					
	Humedad	Cenizas	Volátiles	Azufre	PCI (Kcal/Kg)	Densidad media (Kg/m ³)
Astilla de madera	20-55	1-2	>65	<0.05	1.600-3.300	250
Aserrín (húmedo)	20-55	<1	>65	<0.05	1.600-3.300	350
Pellets de madera	<12	<1	>65	<0.05	>4.000	650
Briquetas	<10	<0.7	---	---	>4.400	580
Leña	20-30	1.2	n.d.	0.02	3.000-3.400	380

Fuente: Sánchez, 2012 y Estévez, 2014.

6.9.1. Normas de calidad del carbón vegetal

El carbón vegetal es el producto que se obtiene de la carbonización de la madera, en condiciones controladas en un horno de carbón, durante éste proceso se controla la entrada del aire para que la madera no se queme, como sucede en un fuego convencional, sino que se descomponga químicamente para formar el carbón vegetal; es un producto sólido, frágil y poroso, con un alto contenido de carbono (alrededor del 80 %). Se produce por el calentamiento de la madera en ausencia de aire (hasta temperaturas de 400 a 700 °C). La capacidad de producir calor del carbón es mayor que la de la madera original (Goche-Télles *et al.*, 2015).

Los mercados europeo y asiático regulan la calidad del carbón con normas basadas en las características fisicoquímicas (tabla 3), color, sonido, facilidad de ignición, sabor y granulometría (tabla 4). En cambio, en los Estados Unidos de Norteamérica, la calidad se basa en la granulación; se debe evitar la producción de chispas, presencia de polvo e impurezas (Stassen, 2002).

Tabla 3. Estándares de calidad del carbón vegetal de acuerdo a las características fisicoquímicas por mercado

Mercado	Norma	Pureza química			
		Carbono fijo (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Humedad (%)
Bélgica	NBN M11-001	75	12	-	7.0
Francia	NF N° 846 E	75	12	-	7.0
Alemania	DIN 51749	78	16	6	8.0
Rusia	GOST 7657-84	77	14	3	6.0
Serbia	SRPS D.B9.020	80	5	5	10.0
Estados Unidos	DIN EN 1860-2	75	9	8	8.0
Japón	--	76	12	4	7.5

Tabla 4. Estándares de calidad del carbón vegetal de acuerdo a la granulometría por mercado

Mercado	Norma	Pureza química			
		>20 mm (%)	>10 mm ≤20 mm (%)	≤10 mm (%)	Humedad (%)
Bélgica	NBN M11-001	75	19	6	7
Francia	NF N° 846 E	19	19	-	-
Alemania	DIN 51749	6	-	-	-
Rusia	GOST 7657-84	77	14	3	6
Estados Unidos	DIN EN 1860-2	20	10	-	8

Otras características que se deben de considerar son la densidad básica y el factor volumen sólido, ya que estos definen la masa del combustible de la madera, importante factor para determinar la cantidad de energía por unidad de volumen (Enciso, 2007).

En México, a pesar de la importancia de la producción a nivel nacional, se carece de estándares, prácticas y normas adecuadas que permitan determinar la relación rendimiento-calidad y clasificación del producto. La calidad del carbón se determina a partir de conocimientos empíricos relacionados, principalmente, con el gusto del consumidor, quien la identifica de acuerdo a la presentación: a granel o empaquetado, con o sin marca (Arias *et al.*, 2010). En cambio, García (2010) indica que la calidad se clasifica por el sonido metálico, color tonos azules brillantes, tamaños robustos con dimensiones mayores a 5 cm y limpieza de impurezas como piedras, suelo o cualquier otro elemento.

6.9.2. Impacto ambiental del sector forestal

El análisis del impacto ambiental generado por las actividades del sector forestal se realiza considerando las emisiones hechas tanto al aire como al agua. En relación a las emisiones al aire, los contaminantes incorporados generalmente inventariados incluyen: MP10 (material particulado de diámetro menor o igual a 10 micrones), CO (monóxido de carbono), NOx (óxidos de nitrógeno), COV (compuestos orgánicos volátiles), SOx (óxidos de azufre) y NH₃ (amoníaco), mientras que los contaminantes al agua son: aceites y grasas, cloruros y sulfatos (Madrones y Saavedra, 2011).

6.9.2.1. Cloruro (Cl⁻)

Los cloruros están ampliamente distribuidos en la naturaleza en forma de sales de sodio (NaCl), de potasio (KCl) y calcio (CaCl₂) (WHO, 2003). Éste es lixiviado desde las rocas al suelo y agua por erosión; es altamente móvil y es transportado desde las cuencas u océanos. El cloruro presente en el agua de consumo procede de fuentes naturales, aguas residuales, vertidos industriales, escorrentía urbana con sal de deshielo e intrusiones salinas (WHO, 2011; OMS, 2006; WHO, 2003).

El sabor del ion Cl⁻ en agua depende del catión asociado, siendo perceptible en excesos de 250 mg.L⁻¹, la guía para agua de consumo no propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el Cl⁻ en el agua de consumo; sin embargo, toma el valor de 250 mg.L⁻¹ como normativa de cumplimiento para agua de consumo (WHO, 2011).

La toxicidad de Cl⁻ en seres humanos no se ha evidenciado, excepto en la alteración del metabolismo del NaCl. El consumo de Cl⁻ para un adulto es de aproximadamente 1 g de sal por persona y por día, para jóvenes de hasta 18 años se sugiere una ingesta de 45 mg.día⁻¹. La toxicidad del Cl⁻ estaría asociada con el catión unido (OMS, 2006; WHO, 2003; 2011).

6.9.2.2. Sulfatos (SO_4^{2-})

Los SO_4^{2-} están presentes de forma natural en muchos minerales y se utilizan comercialmente, sobre todo en la industria química. Se liberan al agua desde residuos industriales y mediante precipitación desde la atmósfera; no obstante, las concentraciones más altas suelen encontrarse en aguas subterráneas y provienen de fuentes naturales. En general, la ingesta diaria media de SO_4^{2-} procedente del agua de consumo, el aire y los alimentos es de aproximadamente 500 mg, siendo los alimentos la principal fuente. Sin embargo, en regiones cuyas aguas de consumo contienen concentraciones altas de SO_4^{2-} , el agua de consumo puede ser la principal fuente de ingesta (OMS, 2006).

Los datos existentes no permiten determinar la concentración de SO_4^{2-} en el agua de consumo que probablemente ocasiona efectos adversos para la salud de las personas. Los datos de un estudio en lechones con una dieta líquida y estudios con agua de grifo en voluntarios muestran un efecto laxante con concentraciones de 1000 a 1200 mg.L^{-1} , pero sin aumento de la diarrea, la deshidratación o la pérdida de peso (OMS, 2006).

No se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el SO_4^{2-} . No obstante, debido a los efectos gastrointestinales de la ingestión de agua de consumo con concentraciones altas de SO_4^{2-} , se recomienda notificar a las autoridades de salud las fuentes de agua de consumo en las que las concentraciones de SO_4^{2-} rebasan los 500 mg.L^{-1} . La presencia de SO_4^{2-} en el agua de consumo también puede producir un sabor apreciable y contribuir a la corrosión de los sistemas de distribución (OMS, 2006).

El método más empleado para realizar el análisis de estos elementos es por intercambio iónico (Moreno, 2011).

6.10. Cromatografía

De acuerdo la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), la cromatografía es un método físico de separación en el cual los componentes a separar se distribuyen entre una fase estacionaria y una fase móvil. La fase estacionaria puede ser un sólido, un gel o un líquido adherido químicamente o inmovilizado sobre un sólido. La fase

móvil constituye el fluido que penetra a lo largo del lecho estacionario, en una dirección determinada y puede ser líquido, gas ó un fluido supercrítico (IUPAC, 1995).

La cromatografía fue inventada y denominada por el botánico Michael Tswett a principios del siglo XX, al utilizar la técnica para separar diferentes pigmentos vegetales, lo cual consistió en pasar la solución que los contenía a través de una columna de vidrio empacada con carbonato de calcio finamente dividido. Las especies separadas aparecían como bandas coloreadas sobre la columna, lo que justifica el nombre griego que eligió para el método *chroma* que significa “color” y *graphein* que significa “escribir” (Skoog *et al.*, 2008).

6.10.1. Historia e importancia de la cromatografía iónica

La cromatografía iónica (CI) aplica a cualquier método moderno para la separación cromatográfica de iones. A mediados de los años 30, se inventaron las resinas de intercambio iónico y se utilizaron las separaciones de intercambio iónico o aniónico. Luego en 1953 y 1950, el conocimiento acerca del intercambio de iones y sus aplicaciones fueron ampliados por el “Manhattan Project” (Methrom, 2010). En los 70, la CI revolucionó al demostrarse que las mezclas de aniones o de cationes se podían separar en columnas para HPLC llenas con resinas de intercambio aniónico o de intercambio iónico y en 1975, la compañía Dow Chemical Company ideó una técnica de supresión de eluyentes haciendo posible la detección de los iones eluidos por conductividad (Skoog *et al.*, 2008).

La CI puede ser usada en la determinación de grandes proteínas, pequeños nucleótidos y aminoácidos; sin embargo, es dominante en la determinación de aniones, donde su mayor campo de aplicación es la investigación de sistemas acuosos, en agua de bebida (Jackson *et al.*, 2001), para el análisis de especies de elementos en elementos aniónicos o complejos, y el tercer campo más grande de aplicación es el análisis de ultra trazas en procesos químicos ultra puros requeridos en la industria de semiconductores (Eith *et al.*, 2001). Las aplicaciones se podrían dividir por segmentos (Passos, 2011):

- Aguas: potable, ríos, lluvia, mar, agua ultra pura, efluentes industriales y aguas residuales;

- Petroquímico: Ácidos orgánicos, aniones, cationes y aminas, cianuro y sulfuro, fenoles;
- Bebidas: Leche, vino, vodka, cerveza, agua mineral, jugos;
- Alimentos: chocolates, extractos vegetales, mayonesa;
- Productos farmacéuticos: micronutrientes, solución de hemodiálisis;
- Concentrados: peróxido de hidrógeno 30%, hidróxido de sodio 50%, ácido clorhídrico 18 mol.L⁻¹;
- Disolvente orgánico polar: alcohol etílico, isopropílico, acetona;
- Fertilizantes y aditivos;
- Papel y celulosa.

Este intercambio sólo puede realizarse entre iones de la misma carga; es decir, positivo con positivo y negativo con negativo. En la cromatografía de intercambio catiónico, se retienen cationes cargados positivamente debido a que la fase estacionaria se encuentra cargada negativamente (SO_3^-); mientras que en la cromatografía de intercambio aniónico, se retienen aniones ya que se usan grupos funcionales cargados positivamente (N^+R_4 , N^+R_3). Es decir, para separar aniones, se utiliza fases estacionarias con cargas positivas que se encontrará unida a algún anión encargado de mantener la electroneutralidad, el mismo que será desplazado por el analito de ensayo para el establecimiento del equilibrio.

En la figura 9, se observan los procesos cromatográficos de intercambio iónico. A la izquierda, el intercambio catiónico y a la derecha, el intercambio aniónico. La fase estacionaria muestra en la superficie, grupos funcionales iónicos que interactúan con iones de carga opuesta. Para la cromatografía aniónica, el proceso consiste en que los analitos A^- y B^- de la muestra se desplacen brevemente por los iones del eluente E^- y se retengan en la resina antes de que sean intercambiados por el ion eluyente (Eith *et al.*, 2001).



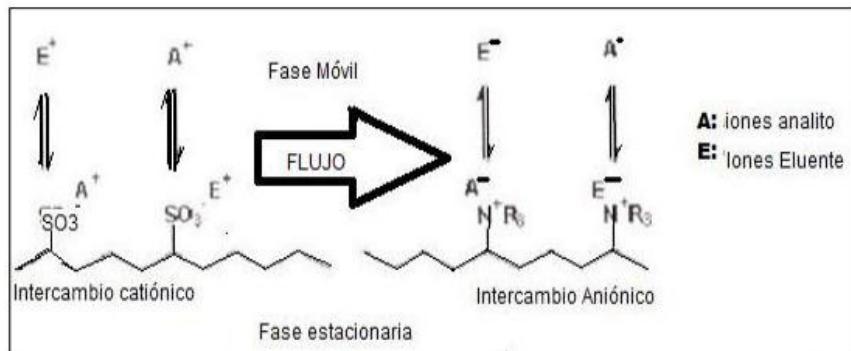


Figura 9. Diagrama esquemático de los procesos en cromatografía iónica (Eith *et al.*, 2001)

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Descripción del área de estudio

7.1.1. Localización

La zona de estudio se ubica dentro del Campus Universitario de la UANL, aproximadamente a 8 km al sur de la ciudad de Linares, N.L. (Fig. 10). Dicha zona se localiza dentro de las coordenadas geográficas $24^{\circ} 47'$ de Latitud Norte y $99^{\circ} 32'$ de Longitud Oeste. Esta área abarca 1,000 has, y está cerca de la Sierra Madre Oriental (Foroughbakhch, 1992).

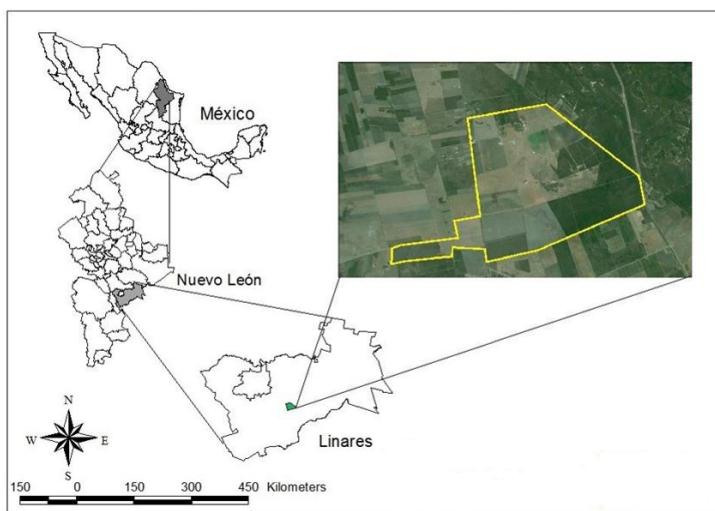


Figura 10. Localización del área de estudio

7.1.2. Topografía

La altitud del área de estudio oscila entre 350 y 375 msnm, el relieve es moderado, figurando lomas con pendientes entre 2 y 10%, entre ellas se encuentran amplios valles con pendientes ligeras. En ciertas zonas, el relieve es más pronunciado, favoreciendo de esta manera, intensos procesos de erosión hídrica (Woerner, 1991).

7.1.3. Clima

El clima de la región es del tipo templado semicálido subhúmedo, con lluvias en verano del tipo (A)C(Wo), de acuerdo a la clasificación de Köppen (1931) y con la adaptación a las condiciones de la República Mexicana (García, 1987). La precipitación anual es muy variable, fluctúa entre 400 y 850 mm, concentrándose en dos períodos de lluvia estivales (de marzo a junio y de septiembre a octubre), y un período menos lluvioso y extremadamente cálido llamado canícula o sequía de medio verano se presenta con frecuencia en los meses de julio y agosto. La temperatura media anual es de 22°C, y las temperaturas máximas que alcanzan en verano sobre todo en julio y agosto son de 28-29°C, con valores absolutos de 40-45°C; el período más frío se presenta en los meses de diciembre, enero y febrero, con temperatura media de 14-15°C y mínimas extremas de -7°C (Woerner, 1991). Se muestran los resultados de temperatura máxima, promedio y mínima, asimismo la precipitación en el año de estudio, contemplados de mayo 2013 a abril 2014 (Fig. 11).

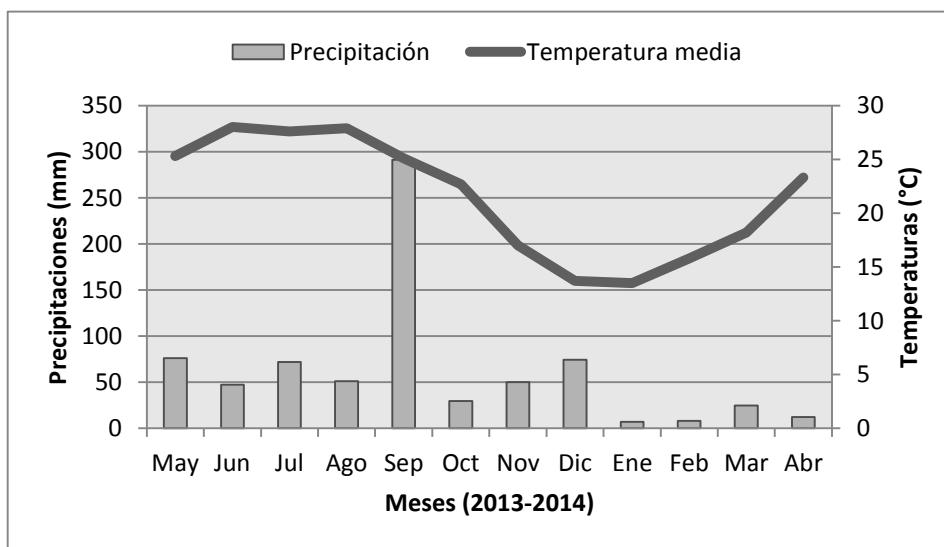


Figura 11. Climograma del período de estudio

7.1.4. Suelo

Los suelos proceden de lutitas del Cretácico Superior y de grava (con caliche) del Pleistoceno con cementación fuerte, clasificándose del tipo vertisol de origen aluvio-coluvial, profundos y de color oscuro en la parte más plana y del tipo rendzina de origen lutita calichosa, de profundidad mediana en los lomeríos. Ambos tipos de suelo se caracterizan por el alto contenido de arcilla, bajo contenido de materia orgánica, con pH moderadamente alcalino, drenaje medio interno, así como también deficiencias de nitrógeno y potasio (Woerner, 1991).

7.1.5. Vegetación

La vegetación del área de estudio presenta una amplia variación florística, así como una alta diversidad en estructura, asociaciones, densidad y altura. La vegetación del matorral en la región de Linares, N.L., se subdivide en: matorral alto espinoso con espinas laterales con *Acacia rigidula* y *A. berlandieri* como dominantes, y matorral mediano subinerme con *Cordia boissieri* y *Havardia pallens* como dominantes (Foroughbakhch y Heiseke, 1990).

7.2. Descripción de los tratamientos, métodos de muestreo y análisis estadístico

7.2.1. Diseño experimental y selección de especies

Se realizó un recorrido por la zona de estudio (Campus de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, Linares, N.L.) a fin de reconocer las especies y seleccionar los individuos-muestra en donde se llevaron a cabo las mediciones. El criterio de selección consistió en elegir las especies leñosas características del matorral, considerando su frecuencia y abundancia (Cabral y Treviño, 1989), según datos registrados de los individuos de una plantación de especies nativas en el Campus Universitario y del vivero, UANL (Foroughbakhch *et al.*, 1987). Las especies elegidas para el desarrollo del estudio se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Características de cinco especies maderables seleccionadas para el estudio

Familia	Especies	Características y forma de vida	Usos
Mimosaceae	<i>Acacia berlandieri</i> Benth	Arbusto espinoso de 2 a 5 m de altura y 8 - 10 cm de diámetro, invadiendo hierbas, leña, dureza natural resistente para leña natural de construcción, distribuida en el noroeste y centro de México.	Artesanías, leña, forraje.
Mimosaceae	<i>Acacia wrightii</i> Benth.	Árbol/arbusto de 6 - 8 m (12 m), 10 - 30 cm en diámetro, distribuido en el Norte de México y sur de Texas, USA.	Leña, carbón de leña, Artesanías, Alimentos (semillas), madera, forraje.
Mimosaceae	<i>Ebenopsis ebano</i> (Berl.) Barneby	Árbol de 4 - 10 (15) m, 50 (120) cm diámetro, madera dura, oscura con una muy buena resistencia natural. Distribuida en norte de México, suroeste Texas, en tierras bajas.	Postes, leña, carbón, madera (Muebles), sombra para los animales protección, alimentos (frutas y vainas).
Mimosaceae	<i>Havardia pallens</i> (Benth.) Britton & Rose.	Arbusto espinoso de 3 - 5 (8) m, madera densa, baja resistencia natural. Distribución: norte y noroeste de México y suroeste de Texas.	Leña, construcción y fabricación de muebles.
Rutaceae	<i>Helietta parvifolia</i> (Gray.) Benth.	Arbusto grande o árbol pequeño de 2 - 10 (12) m, invasor temprano en suelos calcareous, sistema de raíz profunda con alta resistencia natural de madera, es distribuida en el noroeste de México y Texas.	Postes, estantes, madera, carbón de leña, medicinales.

Fuente. Hormazabal (1986), Niembro (1990) y Velazco *et al.* (2011).

El ensayo se realizó en dos áreas: 1) En plantaciones experimentales, donde la muestra estuvo compuesta por 15 parcelas de 10 x 10 m, a razón de tres parcelas por especie nativa y aproximadamente 25 árboles de cada especie por parcela, con una separación de 3 m entre ellos. 2) En el área de vegetación nativa, se realizó primero un inventario mediante transectos, a lo largo de los cuales se delimitaron al azar, áreas de muestreo de 10 x 10 m (Fig. 12) para el estrato arbóreo-arbustivo (tres parcelas por especie).



Figura 12. Delimitación de las parcelas de muestreo en el Matorral nativo

7.2.2. Métodos de muestreo

7.2.2.1. Desarrollo fenológico de especies maderables del MET

Se seleccionaron y marcaron (Fig. 13A) nueve árboles a monitorear por parcela, y el estado de cada árbol fue medido cada 15 días durante un año, a partir de mayo 2013 a abril 2014 y para eso, se utilizó un método de evaluación visual y cuantitativa en términos porcentuales (Fig. 13B), cubriendo todo el periodo de manifestación de las fenofases (desarrollo vegetativo y reproductivo): inicio (Fig. 14A), plenitud (Fig. 14B) y declinación (Fig. 14C), de acuerdo a Villasana y Suárez (1997).



Figura 13. Selección y marcado (A) de árboles muestras para las observaciones fenológicas (B)

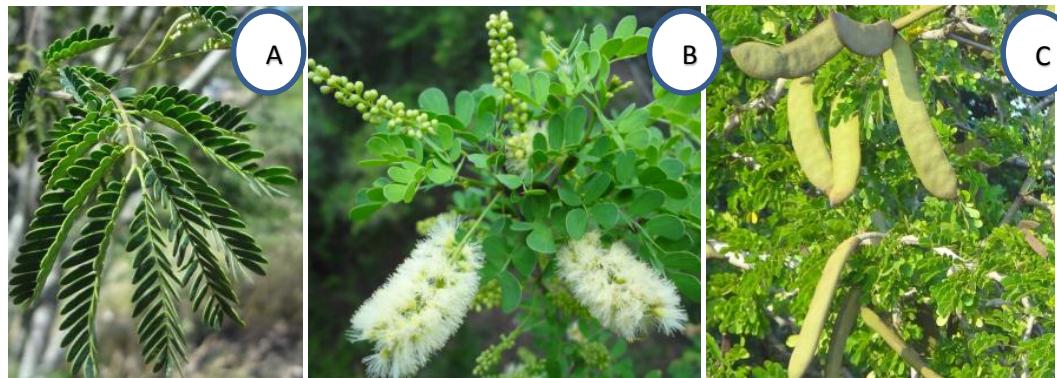


Figura 14. Fases fenológicas estudiadas: A- Foliación (hojas nuevas e inmaduras); B- Floración (Botones florales y flores inmaduras); C- Fructificación (Frutos maduros)

7.2.2.2. Estimación de la producción forestal del MET

El potencial forestal se evaluó al determinar el volumen de cada especie por hectárea, teniendo en cuenta la altura total, el diámetro basal, diámetro a altura de pecho de todos los individuos, se incluyeron también los rebrotos.

Estas variables se seleccionaron para determinar el comportamiento en el desarrollo de los individuos, ya que las proporciones entre altura y diámetro, entre tamaño de la copa del árbol y el diámetro, entre la biomasa y el diámetro, normalmente responden a una regla general, que es la misma para todos los árboles que se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales, considerándose desde el más pequeño al más grande (King, 1996; Archibald y Bond, 2003; Bohlman y O'Brien, 2006; Dietze *et al.*, 2008).

7.2.2.2.1. Diámetro

La medición del diámetro basal (Db) se efectuó a 0,1 m sobre la base del suelo (Fig. 15A), siendo una medida estándar empleada para especies arbóreas y arbustivas del MET, de acuerdo con Gómez, 2000; Alanís *et al.*, 2008a, Jiménez *et al.*, 2012a. Se midió esta variable, partiendo de la premisa de que en ella, se apoya la generación de relaciones para la estructuración de ecuaciones alométricas para estimación de biomasa (Méndez, 2001), calculándose a partir de éste el área basal. Tanto el diámetro basal como el diámetro a altura de pecho (DAP) se midieron mediante una forcípula (Fig. 15B).

7.2.2.2.2. Altura total

Esta variable dendrométrica (h) forma parte de las principales interacciones para la construcción de ecuaciones alométricas de estimación de biomasa (Vanclay, 2009). Se midió mediante una baliza, como se puede observar en la figura 15C.



Figura 15. Mediciones de A- Diámetro basal, B- Diámetro a altura de pecho y C- Altura total

7.2.2.3. Volumen de madera

El volumen de madera de cada árbol se determinó en función de los diámetros y la altura total, aplicando la fórmula de Smalian (Moctezuma, 2007) con un factor de coeficiente mórfico de 0.6.

$$V = [(D_1/2)^2 \times \pi) + (D_2/2)^2 \times \pi)] / 2) \times L$$

Donde V equivale al volumen (m^3/ha), D_1 y D_2 a los diámetros (cm) de cada sección y L al largo (m) de la sección (altura).

Una vez obtenido el volumen por árbol, se realizó el proceso matemático para estimar el volumen de madera correspondiente a cada especie.

7.2.2.2.4. Cobertura

La cobertura de copa según Vanclay (2009), generalmente forma parte de las principales interacciones durante la construcción de ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa, por lo que dicha variable también se consideró para el presente estudio. Canfield (1941) y Cantú (1990) definieron la cobertura como “la proyección

vertical hacia abajo, del follaje o partes superiores de las plantas sobre el suelo” o también como “la proporción del suelo ocupado por la parte aérea de las plantas”.

Conforme a esta definición, se determinó dicha variable al registrar las proyecciones perpendiculares de la parte aérea de cada árbol al suelo, según las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, con el uso de una cinta métrica (Fig. 16).



Figura 16. Medición de la proyección de copa de árboles y arbustos

A partir del método clásico de cálculo del área de un círculo, se desarrolló un método adaptado al matorral, para calcular el área ocupada por cada individuo. De esto, se determinó el área total ocupada por cada especie y el área relativa (en porcentaje) en cada parcela y luego por hectárea.

$$C = \pi \left(\frac{D_1}{2}\right) \left(\frac{D_2}{2}\right)$$

Donde C es la cobertura (m^2) de cada árbol, D1 y D2 son los diámetros (m) de las proyecciones de la copa en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste.

Los datos colectados de la plantación y del matorral nativo fueron ordenados junto con los resultados de un estudio realizado por Foroughbakch et al. (1987) en la misma plantación seleccionada en el presente trabajo, dicho estudio presenta resultados de diámetro basal y altura total desde los años de 1984 a 1987, comparando diferentes modelos matemáticos que obedecen a la forma general de: Altura= f (diámetro).

7.2.2.3. Cuantificación directa del potencial productivo de plantaciones experimentales del MET

El método cuantitativo directo se aplicó solo en el área plantada, y consistió en derribar un árbol en cada parcela, para conseguir la producción exacta por especie, a fin de correlacionar con los valores estimados (Fig. 17).



Figura 17. Medición en campo del peso verde de los componentes de los árboles derivados

7.2.2.4. Cuantificación de la biomasa forrajera del MET

La determinación del potencial forrajero se realizó mediante la cuantificación de la biomasa foliar del estrato arbóreo-arbustivo así como la caída de hojas de dicho estrato, y el desarrollo de herbáceas asociadas a cada especie.

7.2.2.4.1. Biomasa foliar del estrato arbustivo-arbóreo

El recorrido para determinar la biomasa foliar se hizo durante las cuatro estaciones de un año (de verano 2013 a otoño 2014), y se utilizó el método “Adelaide” o Método de referencia de mano (Forouhbakhch *et al.*, 1996), que consistió en seleccionar una rama denominada “unidad de referencia”, representativa de la especie de interés en forma y densidad foliar. Posteriormente, se contó el número de unidades de mano que contendría cada árbol en los cuatro puntos cardinales de la copa, y la muestra de referencia unitaria de cada especie fue llevada al laboratorio para separarla en hojas, ramillas <1 cm (Tallo 1) y ramillas >1 cm (Tallo 2) como indica la figura 18; y el material vegetal se secó en una estufa a 65 °C hasta obtención del peso constante, para estimar la biomasa foliar seca de estas especies.



Figura 18. Muestreo para biomasa foliar mediante el método “Adelaide” y su separación en diferentes componentes de la biomasa: A) Rama de referencia, B) Separación de la rama en diferentes sub-partes (Hojas, Tallo 1, Tallo 2)

7.2.2.4.2. Producción de hojarasca del estrato arbustivo-arbóreo

Para la cuantificación de la hojarasca, la metodología usada fue la propuesta por Návar y Jurado (2009), que consistió en recolectar las hojas caídas a través de trampas de madera de 1 m^2 , con mallas de 1 mm^2 de orificio, colocadas en la base de los árboles. Las trampas fueron distribuidas al azar en las parcelas y se mantuvieron en sus posiciones originales durante todo el tiempo de muestreo (un año), con una recogida de periodicidad quincenal, de mayo 2013 a abril 2014, eliminando restos o materiales de otras especies (Fig. 19). La hojarasca colectada se llevó al laboratorio y se secó en una estufa a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 h.



Figura 19. Recolección de hojarasca mediante trampas

7.2.2.4.3. Biomasa de la vegetación herbácea

En cada parcela, se realizó un inventario de las plantas herbáceas mediante transectos a lo largo de los cuales se delimitaron tres áreas de muestreo de 1 x 1 m (sub-parcels) distribuidas al azar y mediante un marco de madera, registrándose en ellas: especies, número, altura, superficie de copa, área basal y diámetros. Estos datos se registraron para caracterizar las herbáceas según lo establecido en el método de intercepción por puntos de Mueller-Dumbois y Ellenberg (1974), que consistió en anotar la especie que se encuentra bajo los puntos de intercepción de los alambres de la grilla formada por el cuadro de madera, dividido a cada 10 cm (Fig. 20A).

La biomasa producida en cada sub-parcela de muestreo de 1 m² se determinó por el método directo de corte de parcela total, que consistió en cosechar dentro de la sub-parcela de 1 x 1m, todo el material vegetal cortado al ras del suelo (Fig. 20B-C). La biomasa verde cosechada se secó en una estufa a 65 ±5°C, durante 48 a 72 horas hasta peso constante (Fig. 20D); se registró el peso final como biomasa anhidra (Fig. 20E).



Figura 20. Registro de datos del estrato herbáceo: A- Caracterización de herbáceas por método de puntos de intercepción; B- Corte de parcela total; C- Recolección del material vegetal herbáceo; D- Secado y E- peso de biomasa herbácea

La diversidad florística de las herbáceas se determinó mediante la evaluación de los atributos ecológicos propuestos por Mueller-Dombois y Ellenberg (1974), al aplicar las cuatro ecuaciones de afinidad de Sorensen (1948):

$$\text{Frecuencia relativa (FR)} = \frac{\text{Frecuencia de una especie}}{\text{Frecuencia de todas las especies}} \times 100$$

$$\text{Densidad relativa (DR)} = \frac{\text{Número de individuos de una especie}}{\text{Número de individuos de todas las especies}} \times 100$$

$$\text{Cobertura relativa(CR)} = \frac{\text{Cobertura de una especie}}{\text{Cobertura de todas las especies}} \times 100$$

$$\text{Valor de importancia (VI)} = \frac{\text{FR} + \text{DR} + \text{CR}}{3}$$

7.2.2.5. Caracterización energética y composición química

7.2.2.5.1. Preparación de muestras

En cada parcela de las plantaciones experimentales, se derribó un árbol representativo de la comunidad, y sin defectos visibles (Fig. 21).



Figura 21. Derribo de árboles muestras para los análisis químicos y energéticos

Los árboles extraídos se dividieron para obtener material de diferentes componentes (tronco, ramas, ramillas y hojas). Parte de las trozas de troncos y ramas fueron cortadas en “probetas” de 2 cm de longitud, las cuales fueron colocadas en una cámara de acondicionamiento de humedad (65% de humedad relativa) y temperatura (20°) controlada para homogeneizarlas a un contenido de humedad (C.H.) de 12% (Fig. 22A),

a fin de que todas las probetas presentaran el mismo contenido de humedad antes de someterlas al proceso de carbonización. La otra parte de troncos y ramas, junto con las ramillas y hojas fueron astillados, secados al aire hasta alcanzar aproximadamente un C.H. de 10 % (Fig. 22B), de acuerdo con el procedimiento Chife (2005), y teniendo en cuenta que el secado del material vegetal se debe realizar a condiciones moderadas de temperatura para evitar que los compuestos volátiles se disipen en la atmósfera.



Figura 22. Preparación de muestras: A) Acondicionamiento de probetas en la cámara, B) Secado de astillas al aire

7.2.2.5.2. Proceso de carbonización

Después de 30 días de acondicionamiento en la cámara, las probetas fueron carbonizadas mediante cilindros metálicos con tapas, para evitar la entrada de oxígeno durante la combustión en mufla eléctrica, a la temperatura de 650 °C durante tres horas (Fig. 23A), según lo realizado por Briseño *et al.* (2015). Previamente, se prepararon cinco muestras por especie y por componente del árbol (tronco y ramas). Finalizado el ciclo de carbonización, se tuvo un periodo de enfriamiento, para luego proceder a la descarga (Fig. 23B).

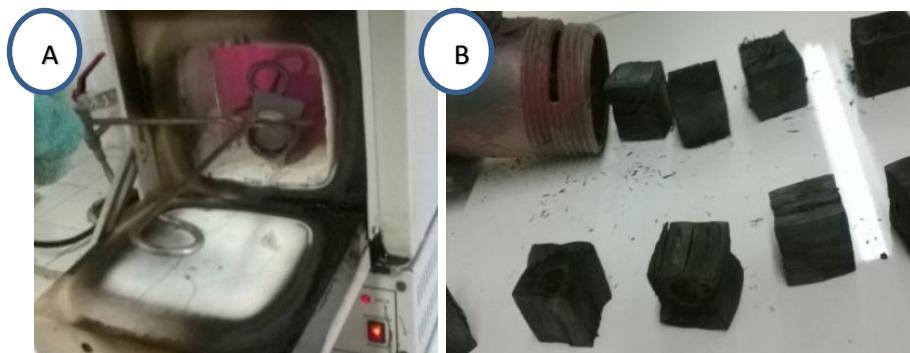


Figura 23. Carbonización de probetas: A) en mufla, B) producto final en enfriamiento y descarga

7.2.2.5.3. Determinación del rendimiento en carbón

El carbón obtenido se acondicionó al medio ambiente, y se registraron el peso, las medidas en los planos longitudinal, radial y tangencial, como inicialmente se realizó a las probetas de madera, y luego se calculó el rendimiento, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = (\text{Peso de carbón}/\text{Peso seco de madera}) * 100\%$$

El carbón muestrado fue molido en un molino ultracentrífugo (marca Retsch, modelo ZM 200), y cribado de manera automática en el mismo equipo (Fig. 24A), a un tamaño de partículas de 425 µm para su posterior análisis inmediato. Las astillas y hojas secas fueron molidas en un equipo Wiley, Modelo 4 Bench, 115 V, 50/60 Hz (Fig. 24B); la harina obtenida se clasificó con tamices (Fig. 24C), y se empleó la fracción contenida entre las mallas 40 (425 mm) y 60 (250 mm), de acuerdo con la norma T 257 cm-85 (TAPPI, 2000) para el análisis químico.



Figura 24. Preparación de muestras mediante: A) Molinado del carbón vegetal, B) Molinado de astillas y hojas secas, C) Tamices de mallas 40 y 60

La molienda se hizo después de secar el material vegetal como lo recomienda Pérez (2009), para evitar el riesgo de contaminación por hongos. Además, según Rivero *et al.* (2002) quienes evaluaron la influencia de la preparación de la materia prima vegetal en el rendimiento del proceso de extracción, la molienda del material se debe realizar después del secado para poder obtener un tamaño de partículas más pequeño y homogéneo, lo que

favorece la unión de las células con el solvente al existir mayor superficie de contacto entre éste y el material vegetal. En efecto, el éxito de la lixiviación depende en gran medida de la forma y dimensión de los sólidos, ya que a menor tamaño de partícula, mayor superficie de contacto entre la droga y el disolvente, y por tanto, mayor acceso de los principios activos al medio líquido. No obstante, tamaños de partícula muy pequeños conducen a la formación de polvos demasiado finos, que pueden causar problemas en el proceso de extracción. Las muestras de tamaño 425 μm (Fig. 25) se utilizaron tanto para los análisis inmediatos como para el análisis elemental.

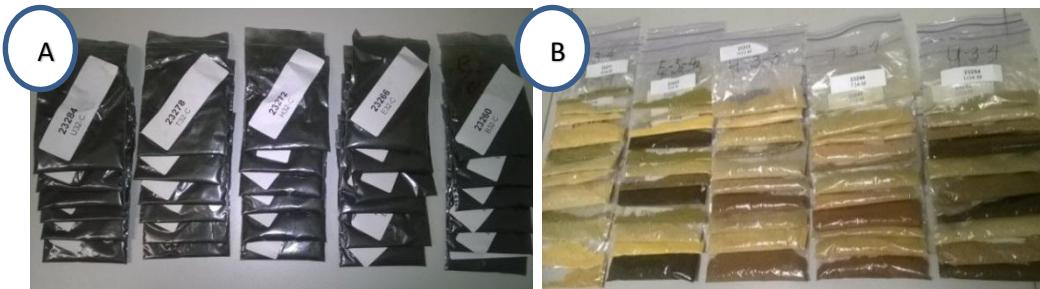


Figura 25. Muestras de tamaño 425 µm: A) Carbón vegetal de troncos y ramas, B) Harina de troncos, ramas, ramillas y hojas de las cinco especies

7.2.2.5.4. Análisis inmediatos

Se analizaron las propiedades físico-químicas de cada muestra, de acuerdo a la norma internacional ASTM D 1762 – 84 (ASTM, 2001), en el Laboratorio de Tecnología de la madera, Facultad de Ciencias Forestales UANL, Linares, Nuevo León, México.

El método Análisis Inmediatos evalúa la calidad de la biomasa sólida en términos porcentuales de los contenidos de humedad (CH), material volátil (MV), cenizas (C) y carbón fijo (Cf), de acuerdo con FAO, 1983 y Kretschmann *et al.* (2007).

7.2.2.5.4.1. Contenido de humedad

Se colocaron crisoles en una mufla (tipo Arsa, modelo AR 340) a 750 °C durante 10 minutos y después de enfriar en el desecador, se registró el peso inicial (P_i) del crisol. Se pesó un gramo (1 g) de cada muestra en los crisoles, con una balanza analítica OHAUS Modelo 300 g x 0.001 g (Fig. 26A). En seguida, se colocaron los crisoles con muestras en

una estufa de secado (Modelo HDP-334) a 105 °C durante tres horas (Fig. 26B), y se dejó enfriar para obtener el peso seco (P_s).

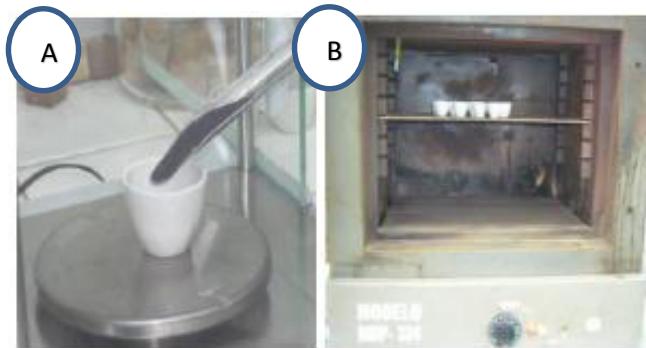


Figura 26. Determinación del contenido de humedad: A) Toma de muestra, B) Secado en estufa

Los datos registrados permitieron calcular el contenido de humedad (H), aplicando la siguiente ecuación:

$$CH = ((P_i - P_s)/P_i) * 100$$

Donde CH es el contenido de humedad, P_i el peso inicial registrado antes del secado, y P_s el peso seco, después del secado.

7.2.2.5.4.2. Materia volátil

La determinación de los compuestos volátiles se hizo al colocar gradualmente los crisoles con tapas respectivas en la mufla, a una temperatura de 950 °C, según un proceso que inició con los crisoles en la puerta de la mufla durante dos minutos (Fig 27A), luego a la entrada por tres minutos (Fig. 27B) y al final al fondo (Fig. 27C), con la puerta cerrada por seis minutos, con el fin de evitar un desperdicio rápido.

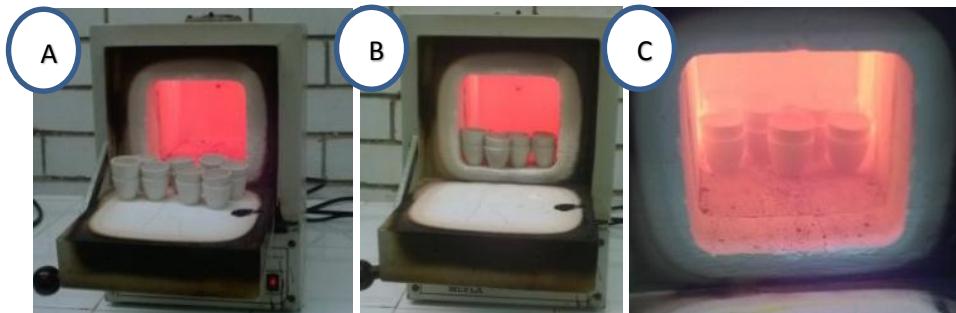


Figura 27. Proceso de determinación de los volátiles con diferentes posiciones de crisoles en la mufla: A) en la puerta, B) a la entrada, C) al fondo

Se calculó el porcentaje de los volátiles, aplicando la siguiente fórmula:

$$MV = ((P_s - P_v)/P_s) * 100$$

Donde VM es el contenido de materias volátiles, P_s el peso del carbón después de someterla a 105 °C y P_v es el peso del carbón después de someterla a 950 °C.

7.2.2.5.4.3. Contenido de cenizas

Se colocaron crisoles sin tapas en la mufla a 750 °C durante seis horas, más una hora adicional, para alcanzar la incineración total del carbón, la cual se comprobó observando un color blancuzco de las cenizas. Se dejó enfriar para obtener su peso, descontando el peso del crisol. El contenido de cenizas (C) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$C = (P_c/P_v) * 100$$

Donde C es el contenido de cenizas, P_c el peso de las cenizas y P_v es el peso después de someter la muestra a 950 °C.

7.2.2.5.4.4. Carbono fijo

Para el cálculo del porcentaje de carbono fijo (C_F), se restó el contenido de humedad, materia volátil y cenizas a la masa del carbón molido y tamizado, utilizando la siguiente ecuación, de acuerdo con Márquez-Montesino *et al.* (2001).

$$C_F = 100 - (CH + MV + C)$$

Donde Cf es el carbón fijo, CH el contenido de humedad, MV el contenido de materias volátiles y C el contenido de cenizas.

7.2.2.5.4.5. Poder calorífico

El poder calorífico (PC) se calculó a partir de los contenidos de carbono fijo (C_F) y materias volátiles (MV), de acuerdo a la siguiente fórmula descrita por Cordero *et al.* (2001).

$$PC = 354.3 C_F + 170.8 MV$$

7.2.2.5.5. Análisis elemental

El análisis elemental es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presentes en un amplio abanico de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas (Vassilev *et al.*, 2013). El análisis se hizo de acuerdo a la norma EN 15103, en el Laboratorio de combustible, suelo y análisis ambientales de la *University of Applied Sciences and Arts (HAWK), Faculty of resource management*, Gotinga, Alemania. La técnica consistió en colocar aproximadamente 5 a 10 mg de la muestra seca y molida en una pieza de lata pesada a 0.01 mg y se enrolló en una pelota hermética (Fig. 28A y B). Durante el análisis, las muestras se llevaron a combustión en ambiente de oxígeno puro, en un equipo *CHN Analyzer, tipo Vario EL III de Elementar GmbH* (Fig. 28C), a la temperatura de 1050 °C.



Figura 28. Preparación de muestras para análisis elemental: A) Bote de lata, B) Muestra enrollada en bote de lata, en pelota hermética y pesada, C) Colocación de las pelotas en equipo *CHN Analyzer*

Con esa combustión, las moléculas orgánicas de las muestras se convierten en gases simples (CO_2 , H_2O , N_2). Los gases generados son impulsados con helio (He) a través de unos reactivos que reducen el número de especies gaseosas presentes en la mezcla resultando de la combustión (Figura 29). A continuación, los gases producidos se presurizan y se separan mediante una columna cromatográfica, que permite medir la cantidad de cada uno de ellos gracias a sus diferentes conductividades térmicas a partir de las cuales se evaluó el contenido de N, C, H de cada muestra. El oxígeno se absorbe en un tubo que se reduce a cobre. El nitrógeno llega directamente al detector de conductividad térmica, el agua y el CO_2 son absorbidos en dos tubos de absorción diferentes y liberados posteriormente por calentamiento de las columnas. La calibración del instrumento se

realizó con acetanilida, que también se utiliza para calcular los factores de corrección diarias para la calibración.

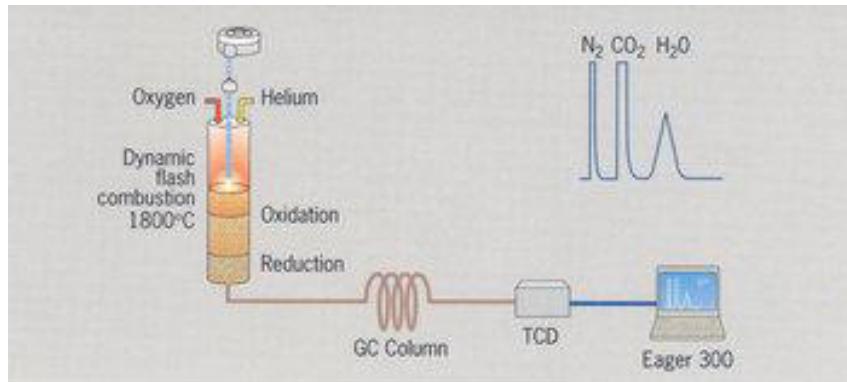


Figura 29. Proceso de determinación de elementos orgánicos *CHN* por combustión y reducción de los gases obtenidos

Esta técnica es esencial para el químico de síntesis, puesto que aporta datos que contribuyen a la confirmación de la estructura de un compuesto de nueva preparación y ayudan a establecer la identidad y pureza de cualquier tipo de muestra con los elementos citados.

7.2.2.5.6. Análisis composicional

Los componentes químicos se analizaron a partir de las muestras originales (harina de madera, de ramillas y de hojas). Se determinaron los contenidos de holocelulosa, de lignina, los extraíbles y las sustancias inorgánicas (Ávila y Rutiaga, 2014).

7.2.2.5.6.1. Sustancias inorgánicas

El porcentaje de cenizas se determinó de acuerdo con la norma ISO 17225-1 (2014), en el Laboratorio de combustible, suelo y análisis ambientales de la *University of Applied Sciences and Arts (HAWK), Faculty of ressource management*, Gotinga, Alemania. Se pesaron entre 35 a 45 g de cada muestra en crisoles, y se colocaron en un horno mufla Nabertherm 15/12 de 5 litros, modelo de 1200°C ref. L050K2CN en programación P330 (Fig. 30A). Después de un tiempo de enfriamiento en desecador (Fig. 30B), se registró el peso de las cenizas obtenidas, y el porcentaje se calculó.

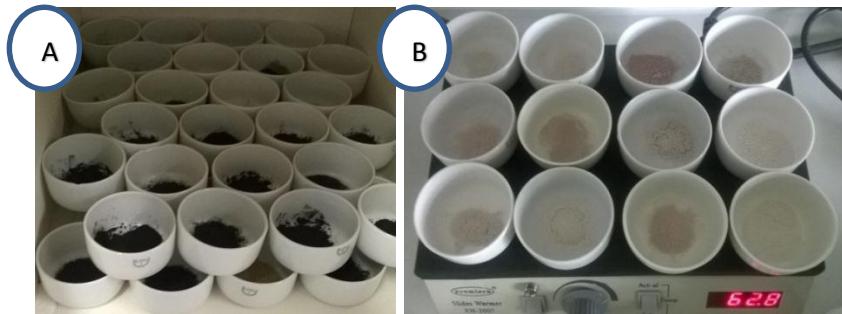


Figura 30. Determinación del contenido de cenizas. A) Muestras en mufla para combustión, B) Enfriamiento de cenizas, producto de la combustión

7.2.2.5.6.2.Microanálisis de cenizas

El microanálisis de las cenizas se realizó en el Laboratorio de metalurgía del Instituto de investigaciones metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Los diferentes elementos que constituyen las cenizas se identificaron y cuantificaron mediante su microanálisis parcial en un espectrómetro de Rayos X, acoplado a un Microscopio Electrónico de Barrido marca Jeol modelo JSM-6400. Las muestras de cenizas fueron previamente montadas en un soporte en carbono (Fig. 31A), para el análisis microscópico (Fig. 31B).

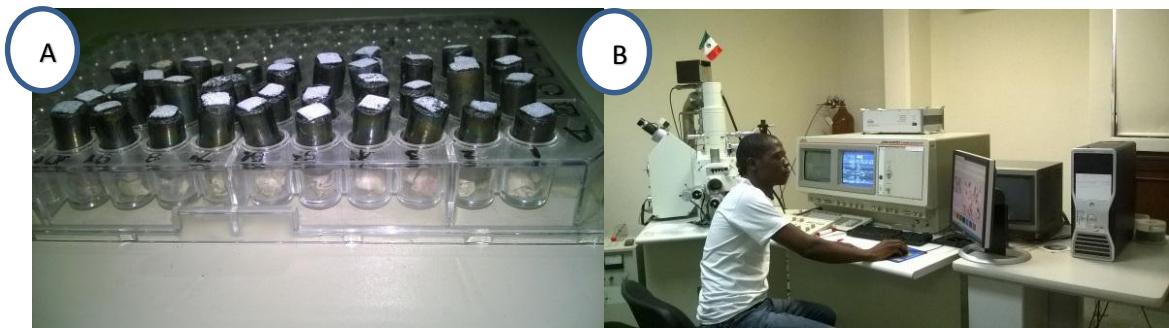


Figura 31. Microanálisis de cenizas. A) Montaje de muestras, B) Observación microscópica

Las condiciones de operación fueron 20 kV y 8.5 segundos (Téllez *et al.*, 2010), obteniéndose la distribución granulométrica de cada muestra (Fig. 32A), y los espectros respectivos en puntos aleatorios (Fig. 32B).

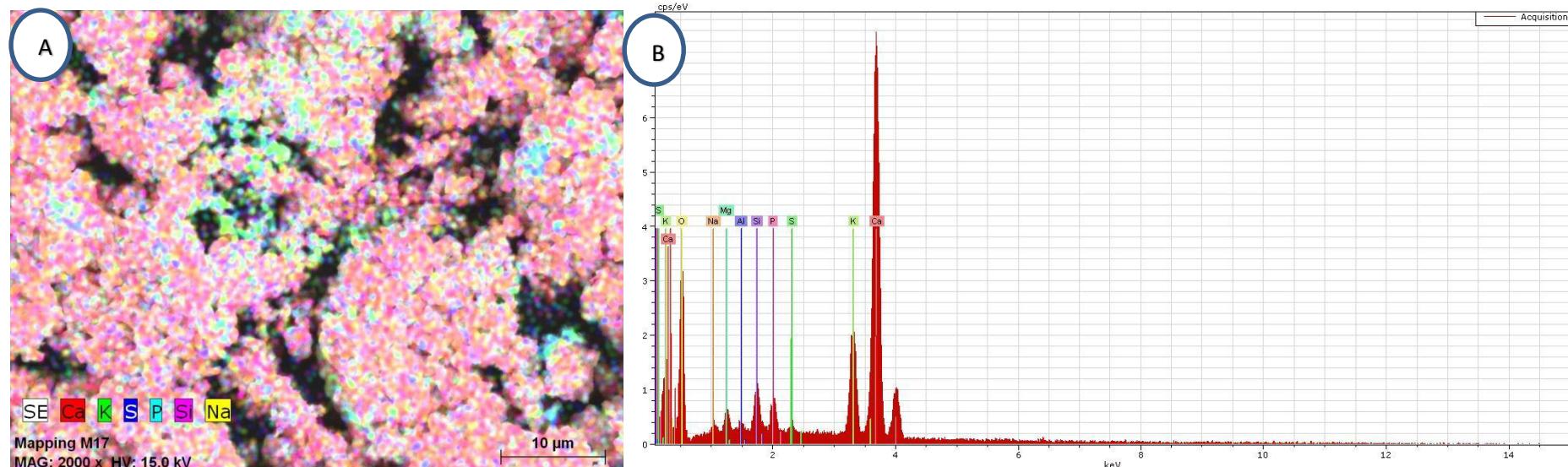


Figura 32. Microanálisis de cenizas: A) Distribución granulométrica de elementos de las cenizas, B) Espectros de dispersión de energía de rayos X para los elementos de las cenizas en puntos aleatorios

7.2.2.5.6.3. Sustancias extraíbles

Las extracciones se realizaron en el Laboratorio de manejo y aprovechamiento de recursos vegetales del Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Biológicas UANL.

En base a la metodología Schwanninger y Hinterstoisser (2002), los extraíbles se determinaron aplicando a la harina de madera (de 8 a 13 g), una extracción sucesiva sólido-líquido en equipo Soxhlet (Fig. 33A), con 200 mL de solventes a polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol y agua destilada bajo reflujo. El periodo de extracción con cada solvente fue de 6 horas, después del cual los extractos se separaron de los solventes mediante un rotavapor marca Yamato BM 100 (Fig. 33B), a 45°C de temperatura, aplicando vacío con una presión reducida.



Figura 33. Determinación de los extraíbles. A) Extracción sucesiva en equipo soxhlet, B) separación de extraíbles en rotavapor

El contenido de extraíbles para cada solvente se calculó dividiendo el peso del extracto anhidro entre el peso de la harina anhidra referido porcentualmente:

$$\text{Extractos (\%)} = (P_e - P_{rs})/P_m$$

Donde P_e = Peso anhidro del extracto; P_{rs} = Peso anhidro del residuo del solvente y P_m = Peso anhidro de la muestra de madera molida.

Los extraíbles totales se calcularon con la suma de los porcentajes de los extraíbles de cada solvente. La harina de madera, después de la extracción sucesiva, se designó como harina libre de extraíbles y se empleó para determinar el contenido de lignina.

7.2.2.5.6.4. Lignina

El contenido de lignina en la harina de madera libre de extraíbles se determinó en conformidad con la técnica Runkel y Wilke (1951), en el Laboratorio de química y tecnología química de la madera, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacan, México. A 1 g de muestra de harina de madera libre de extraíbles, se le adicionaron 50 mL de ácido sulfúrico al 72% y 50 ml de ácido bromhídrico al 40%, agitándola y dejándola reposar por 2 horas (Fig. 34A y B). Posteriormente, se le agregaron 200 mL de agua destilada y se llevó a ebullición por cinco minutos. A continuación, se filtró en embudos Büchner empleando papel filtro Whatman No. 40, y las muestras se lavaron en repetidas ocasiones hasta eliminar los residuos de ácido (Fig. 34C). Para finalizar, se llevaron a peso constante en un horno a 103 °C (Fig. 34D) antes de pasar en un desecador (Fig. 34E) para evitar el consumo de humedad.



Figura 34. Determinación del contenido de lignina. A) Preparación de las soluciones H_2SO_4 y HBr , B) Adición de ácidos a la muestra de harina, C) Filtraje de extraíbles y lavado de residuos de ácidos, D) Secado en horno, E) Desecador con muestras de lignina, F) lignina

El contenido de lignina se calculó dividiendo el peso de la muestra anhidra entre el peso de la harina libre de extraíbles anhidra referido porcentualmente:

$$\text{Lignina (\%)} = (\text{Peso de lignina} \times 100) / \text{Peso anhidro de la muestra}$$

7.2.2.5.6.5. Holocelulosa

El contenido de holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) se calculó por diferencia, sustrayendo los porcentajes de lignina, extraíbles y cenizas del 100%, a partir del análisis sumativo desarrollado por Mocchiutti (2007):

$$\% \text{Extraíbles} + \% \text{Lignina} + \% \text{Holocelulosa} + \% \text{Cenizas} = 100\%$$

7.2.2.5.7. Propiedades físicas

Las propiedades físicas que se determinaron en la madera fueron pH y poder calorífico experimental.

7.2.2.5.7.1. pH

La determinación del pH se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Sandermann y Rothkamm (1959), en el Laboratorio de química y tecnología química de la madera, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacan, México. El proceso consistió en colocar 2 g de harina de madera sin extraer, en un vaso de precipitados (Fig. 35A), con 20 mL de agua destilada, y registrar el pH inicial y luego, el pH a los 5 minutos, a las 4 horas, a las 24 horas y finalmente, a las 48 horas. Para tal efecto, se usó un potenciómetro marca HANNA (Fig. 35B).



Figura 35. Determinación del pH: A) Muestras en vasos de precipitados, B) lectura en potenciómetro

7.2.2.5.7.2. Poder calorífico experimental

El poder calorífico se determinó experimentalmente de acuerdo con la norma ISO 17225-1 (2014), en el Laboratorio de combustible, suelo y análisis ambientales de la *University of Applied Sciences and Arts (HAWK), Faculty of ressource management*, Gotinga, Alemania. El proceso consistió en fabricar una pastilla a partir de aproximadamente 1g de harina de cada muestra, mediante una prensa de laboratorio (Fig. 36A). La pastilla se colocó en un crisol para combustible (Fig. 36BC), con 5 μL de parafina a 46260 J g^{-1} para encender el alambre de ignición firmemente atado a los electrodos de la tapa de la bomba calorimétrica (Fig. 36D), de manera que toque el combustible para provocar su encendido. La bomba es un recipiente de acero inoxidable, de cierre hermético, que permite llegar a su interior, mediante dos electrodos, una corriente eléctrica que atraviesa un hilo fusible en contacto con la pastilla. Antes de cerrar la bomba, 5 mL de agua fue introducida para absorber el calor que liberará el combustible. Posteriormente, se agregaron entre 20 y 30 atmósferas de oxígeno, necesario para la combustión. La bomba se colocó dentro de un calorímetro marca IKA, C 7000 (Fig. 36E), aislado del exterior y de temperatura regulable, para evitar pérdidas de calor al exterior.

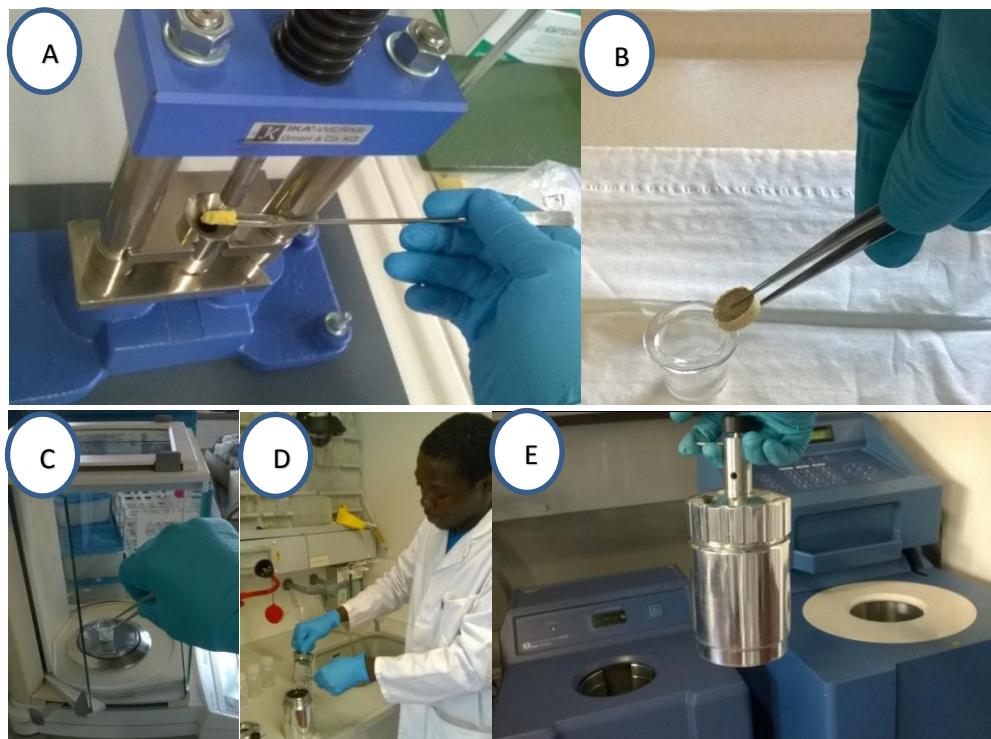


Figura 36. Determinación del poder calorífico en bomba calorimétrica: A) Fabricación de pastilla mediante prensa manual, B) Pastilla colocada en crisol para combustible, C) Peso de la muestra-pastilla, D) Bomba calorimétrica y tapa para la combustión, E) Calorímetro

Al hacer llegar la corriente al hilo, este se funde y quema la pastilla de combustible, cediendo su calor de combustión, a través de las paredes de la bomba al agua, de forma que midiendo el incremento de temperatura experimentado por esta, y al estar previamente calibrado el sistema, se puede determinar el poder calorífico del combustible, como lo indica la siguiente ecuación (ISO/CD 18125 o EN 14918):

$$qv, gr, d = qv, gr \frac{100}{100 - Mad}$$

En esta ecuación qv, gr, d es el poder calorífico superior a volumen constante del combustible (sin humedad) seco, en julios por gramo; Mad es la humedad en la muestra de análisis, en porcentaje de masa; y qv, gr es el poder calorífico superior a volumen constante del combustible como se analiza, en julios por gramo.

7.2.2.6. Caracterización de los biocombustibles con el medioambiente

El efecto de la combustión de biomasa sólida sobre el medioambiente se determinó mediante el análisis de los sulfatos y cloruros, en el Laboratorio de combustible, suelo y análisis ambientales de la *University of Applied Sciences and Arts (HAWK), Faculty of ressource management, Gotinga, Alemania*.

Con 100 mL de agua destilada, se recuperaron los residuos resultantes de la combustión realizada para la determinación del poder calorífico (Fig. 37A), y las muestras colectadas se preservaron en refrigeración a temperatura de 4 °C en frascos de plástico (Fig. 37B), por un período no mayor a 28 días, dado que ciertas bacterias pueden reducir el sulfato a sulfuro, como es el caso especialmente en aguas contaminadas.

El sulfato y cloruro se analizaron mediante cromatografía iónica, que es uno de los métodos más eficientes para el análisis de trazas de aniones y cationes, técnica absolutamente imprescindible en el análisis de aguas y medio ambiente. En base a los procedimientos propuestos por Manahan (2007), el método consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazando los cationes y/o aniones por el ion hidrógeno (H^+) y/o el ion hidroxilo (OH^-) respectivamente (Fig. 37C).



Figura 37. Análisis de los residuos postcombustión A) Recuperación y dilución de los residuos, B) refrigeración de las soluciones diluidas; C) Cromatografía iónica y registro de datos

El contenido de SO_4^{2-} y Cl^- de cada muestra se obtuvo a partir de la curva de calibración previamente obtenida. La calibración se realizó con tres soluciones control (3, 5 y 7) a diferentes concentraciones (1, 5 y 10 mg/L, respectivamente). El cromatograma de la figura 38 muestra el resultado de la selectividad de la solución preparada con los aniones, motivo de la investigación, y se presentan ademas los tiempos de retención de cada uno de ellos.

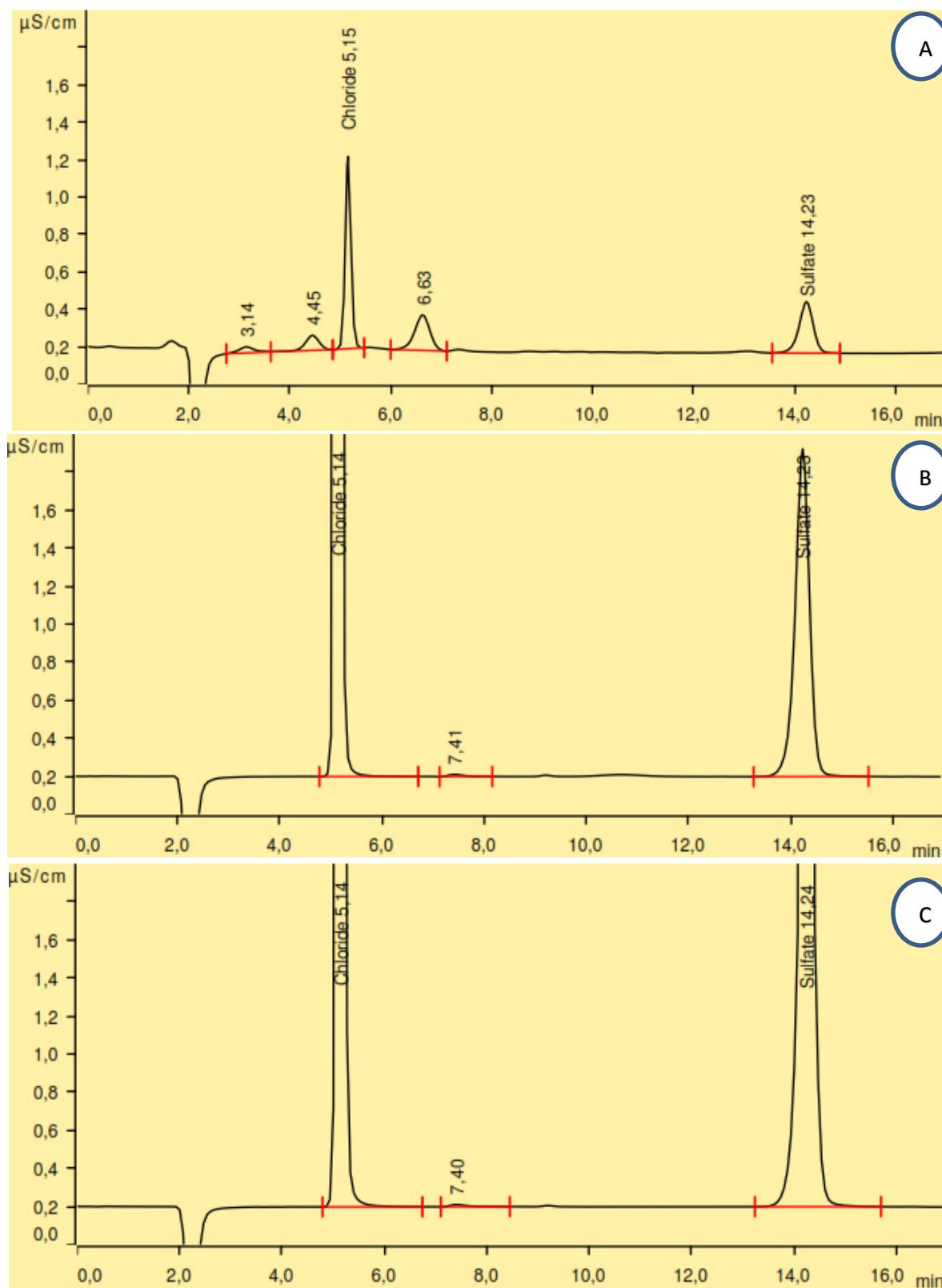


Figura 38. Cromatograma de los aniones Cl^- y SO_4^{2-} en soluciones estándar: A) Estándar 3 a 1 mg/L, B) Estándar 5 a 5 mg/L y C) Estándar 7 a 10 mg/L

Las concentraciones de SO_4^{2-} y Cl^- variaron como se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Concentraciones de SO_4^{2-} y Cl^- en las soluciones estándares

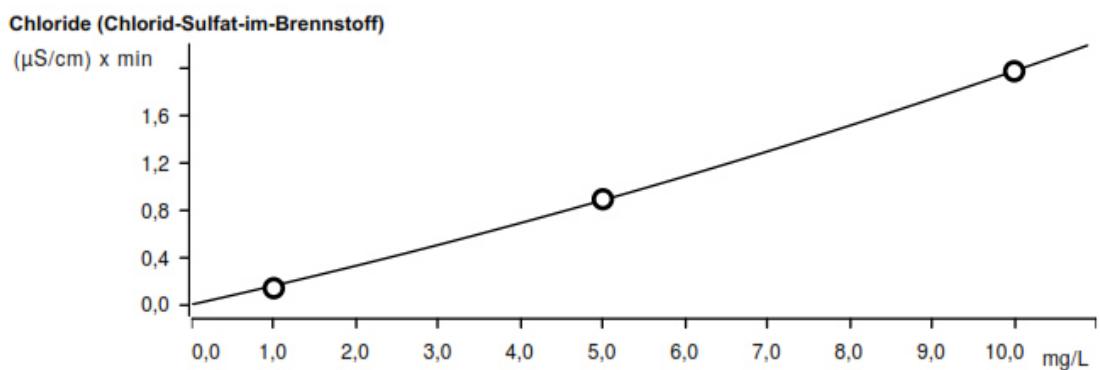
Peaknummer	Retentionszeit min	Fläche ($\mu\text{S}/\text{cm}$) x min	Höhe $\mu\text{S}/\text{cm}$	Konzentration mg/L	Komponentenname
1	3,142	0,0120	0,032	ungültig	
2	4,448	0,0260	0,080	ungültig	
3	5,148	0,1378	1,028	0,868	Chloride
4	6,628	0,0676	0,190	ungültig	
5	14,232	0,0906	0,275	0,836	Sulfate

Peaknummer	Retentionszeit min	Fläche ($\mu\text{S}/\text{cm}$) x min	Höhe $\mu\text{S}/\text{cm}$	Konzentration mg/L	Komponentenname
1	5,137	0,8871	6,871	5,039	Chloride
2	7,410	0,0039	0,011	ungültig	
3	14,228	0,5666	1,724	5,055	Sulfate

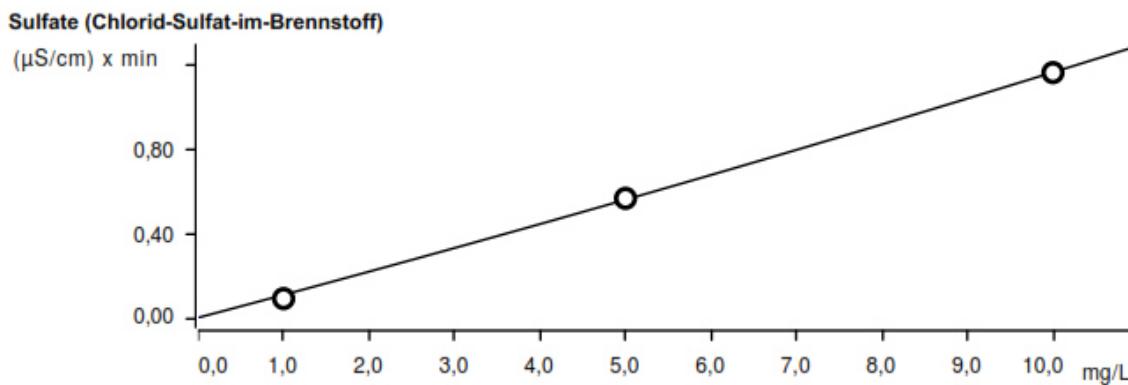
Peaknummer	Retentionszeit min	Fläche ($\mu\text{S}/\text{cm}$) x min	Höhe $\mu\text{S}/\text{cm}$	Konzentration mg/L	Komponentenname
1	5,135	1,9653	15,677	9,993	Chloride
2	7,397	0,0046	0,011	ungültig	
3	14,238	1,1634	3,573	9,989	Sulfate

De esta misma manera, se obtuvo un cromatograma para cada muestra, y las concentraciones generadas de SO_4^{2-} y Cl^- se registraron para los análisis estadísticos.

Aunque se presentaron concentraciones diferentes de SO_4^{2-} y Cl^- para las muestras estándares, la curva de calibración mostró resultados similares (Fig. 39A y B), lo que valida la tendencia de los resultados. En esta gráfica, se observa la curva de calibración para SO_4^{2-} y Cl^- , la ecuación de la curva, la desviación estándar obtenida y el coeficiente de correlación. Además, la gráfica muestra la concentración de aniones (ppm) versus área ($\text{uS}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}$) y se observa una buena correlación de acuerdo a su coeficiente r igual a 0.9998 y 0.9996 para SO_4^{2-} y Cl^- respectivamente.



Funktion: $A = 7,75270E-3 \times Q + 1,04113E-5 \times Q^2$
 Relative Standardabweichung 2,295240 %
 Korrelationskoeffizient 0,999845



Funktion: $A = 5,37834E-3 \times Q + 2,22855E-6 \times Q^2$
 Relative Standardabweichung 3,141199 %
 Korrelationskoeffizient 0,999686

Figura 39. Curvas de calibración de los aniones en solución estándar a diferentes concentraciones, a través del programa Magic Net. A) SO_4^{2-} y B) Cl^-

7.2.3. Análisis estadístico

El paquete estadístico utilizado para el análisis de los datos sobre la productividad del matorral fue SPSS versión 21, los estadísticos practicados incluyeron un análisis de varianza para verificar diferencias significativas entre las variables de crecimiento (diámetros, altura y volumen) y la biomasa (biomasa foliar, hojarasca, herbáceas), con intervalo de 95 % de confianza. La aplicación de la prueba de Tukey se utilizó para determinar grupos de homogeneidad entre las especies y entre sitios para las variables mencionadas, a un nivel de confianza de 95% ($p=0.05$) de acuerdo a Zar (2010).

Para la cobertura, el diseño experimental utilizado para el presente estudio fue “Diseño de Bloques al Azar con arreglo Factorial”. Esto con el fin de considerar el acomodo original de la plantación (Gutiérrez y De la Vara, 2012). Para tal efecto se determinaron dos factores, los cuales se describen a continuación: Factor A. Corresponde al efecto del tipo de sitio, correspondiendo a dos niveles: área nativo y plantación experimental. Factor B. Se refiere al efecto producido por la especie vegetal siendo cinco niveles: *Helietta parvifolia*, *Ebenopsis ebano*, *Acacia berlandieri*, *Havardia pallens*, *Acacia wrightii*.

Dado que los datos resultado del análisis inmediato son valores porcentuales, se transformaron con la función de la raíz cuadrada del arcoseno de p, donde p = a la proporción de la variable dependiente (Schefler, 1981). Posteriormente, se realizaron pruebas de normalidad de los datos para cada variable, mediante la prueba Kolmogorov–Smirnov. La significancia de los resultados obtenidos se determinó mediante un diseño experimental con un criterio de bloques completos al azar. En los casos donde se observaron diferencias significativas, se realizaron pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey (Steel y Torrie, 1980), a un nivel de confianza de 95% ($p=0.05$).

Los valores de los componentes químicos (extraíbles, lignina, holocelulosa) y variables físicas (pH, poder calorífico) se procesaron mediante un análisis de varianza con un factor y cuatro niveles (tronco, ramas, ramillas y hojas) con el programa *Statgraphics* ver. 7.0. El valor de probabilidad (α) establecido para calificar como significativas a las diferencias encontradas en la fuente de variación fue de 0.01.

8. RESULTADOS

8.1. Desarrollo fenológico de las especies estudiadas

Los resultados del estudio fenológico de cada especie se presentan en función de las fenofases vegetativa (foliación) y reproductiva (floración y fructificación).

8.1.1. Foliación

El desarrollo vegetativo presentó diferencias significativas ($P<0.05$) tanto entre especies como por tipo de formación vegetal, con un padrón similar en todas las especies, tanto en las plantaciones experimentales como en el matorral nativo (Figura 40), con una irregularidad temporal y cuantitativa de las diferentes fenofases. La formación de hojas nuevas se presentó principalmente durante la primavera y otoño (de mayo a octubre) del año de estudio, con los picos en primavera (abril, mayo). El porcentaje de renovación de hojas osciló entre 50 y 100%, siendo *Havardia pallens* la especie con mayor renuevo (95-100%) y *Helietta parvifolia* la de menor renuevo (50%). Por su parte, *Ebenopsis ebano*, *Acacia berlandieri* y *A. wrightii* renovaron sus hojas a 70–85%, 70–80% y 55–70% respectivamente. Este desarrollo vegetativo coincidió con las lluvias de finales del verano y principios de otoño, aunque el porcentaje de brotes foliares se acercó apenas a un 10%.

En cuanto a la perdida de hojas, se empezó a observar desde el inicio de noviembre (otoño) con un porcentaje de caída inferior a 10%, hasta alcanzar un máximo del orden de 75 a 95% por la mitad de invierno (entre febrero y marzo), a excepción de *H. parvifolia* que no mostró una pérdida notable de hojas durante el invierno, por su pico registrado a solo 25%. De ahí, se puede constatar que esta última especie no perdió completamente sus hojas en ninguna época del año, al igual que tampoco las renueva por completo.

Todas las especies presentaron un recambio gradual de hojas en las diferentes épocas del año de estudio, y las hojas maduras se mantuvieron en la mayor parte del año. *Helietta*

parvifolia nunca careció de hojas maduras, mientras que las otras especies, después del pico registrado a 100% a finales de octubre (otoño), se observó un descenso notable hasta 15, 10, 5 y 0% para *A. berlandieri*, *E. ebano*, *A. wrightii* y *H. pallens*, respectivamente, en el periodo de invierno.

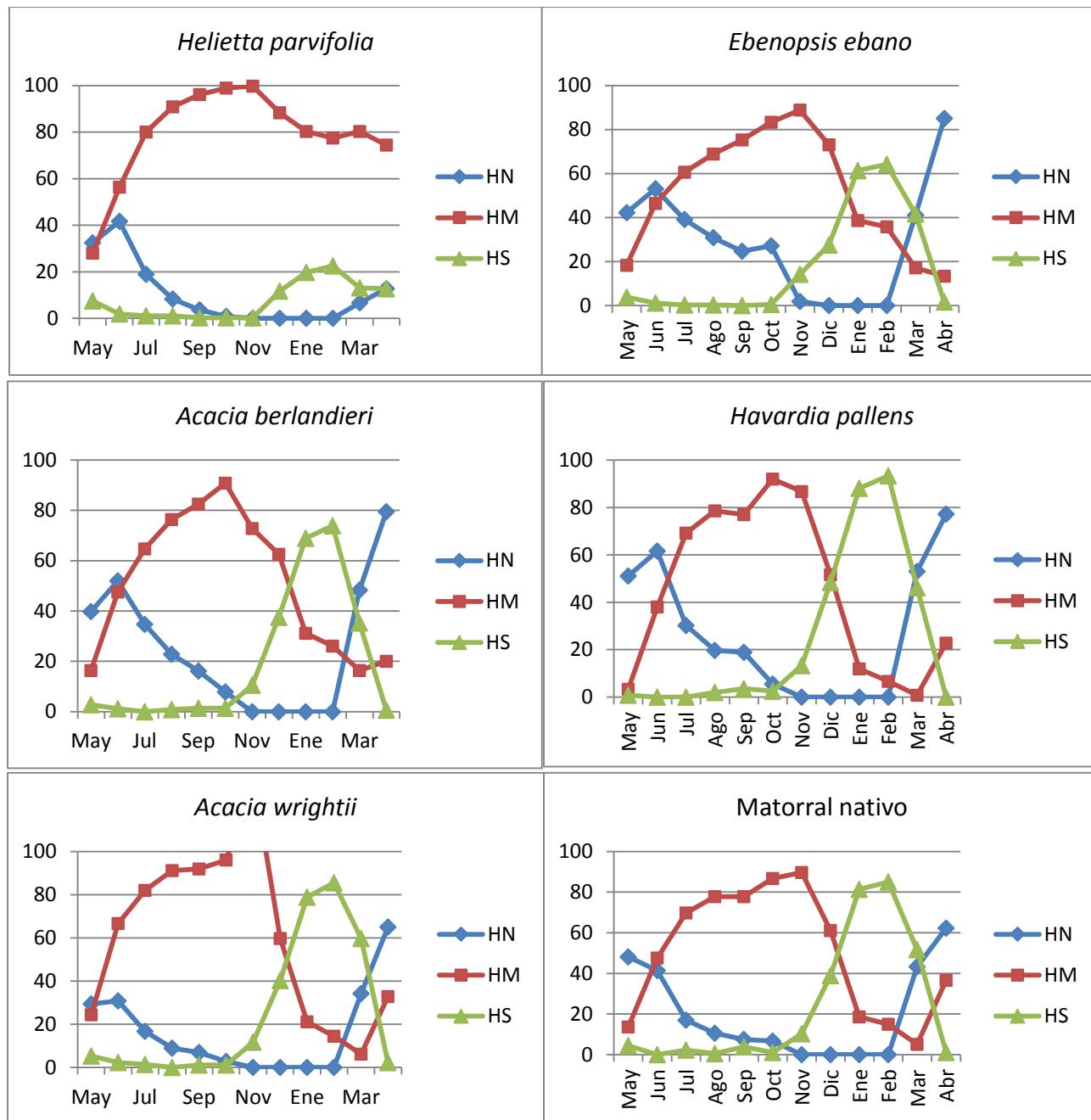


Figura 40. Desarrollo vegetativo de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco de mayo 2013 a abril 2014. HN = Hojas nuevas, HM = Hojas maduras, HS = Hojas secas

8.1.2. Floración

El desarrollo floral fue irregular en términos cuantitativos, y registró una periodicidad anual en la cual se observaron cuatro eventos (figura 41), con diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$) entre especies. La etapa de formación de botones fue la más larga, iniciando en el mes de mayo y concluyendo en noviembre, con excepción de *A. wrightii* donde fue de mayo a julio. *Helieta parvifolia* y *Havardia pallens* presentaron los picos máximos en el mes de junio (primavera), a los valores porcentuales de 80 y 90% respectivamente. En el área de vegetación nativa, el pico de presencia de botones florales se registró hasta el mes de septiembre (en primavera y verano), a 50%. Estos botones maduraron gradualmente, con un comportamiento propio a cada especie. Duración e intensidad de flores inmaduras fueron mayores en *H. parvifolia* y *H. pallens* (de la mitad de mayo hasta octubre, con los picos a 45 y 55% respectivamente, correspondientes a finales de la primavera hasta principios de otoño). La menor duración de flores inmaduras se registró en *A. berlandieri* y *A. wrightii* (de mayo a julio), a 25 y 39% de intensidad, respectivamente. Las flores inmaduras se tardaron más en aparecer en *E. ebano*, presentándose en agosto (mitad de verano), al igual que las flores maduras, que se observaron hasta el mes de octubre (otoño), con una intensidad de 35%.

El periodo de maduración de flores fue muy breve en *A. berlandieri* y *A. wrightii*, con bajas intensidades (15 y 30% respectivamente), mientras que fue más prolongado en *H. parvifolia* y *H. pallens* con dos picos a 70% en agosto y 65% en septiembre para *H. parvifolia*, a 65% en agosto y 35% en septiembre para *H. pallens*, siendo el verano para esa fase fenológica.

Se puede apreciar que el proceso de maduración floral es más lento en *E. ebano* que en las demás especies, que maduraron en forma simultánea. En la vegetación nativa, se presentó una secuencia sucesiva en términos de duración e intensidad, con la aparición de botones en mayo (20%), las flores inmaduras en junio (10%) y las flores maduras en agosto (8%).

No se registraron flores seniles en *E. ebano* y *A. berlandieri*. En cuanto a *H. parvifolia* y *H. pallens*, las flores cayeron hasta octubre (otoño), registrándose porcentajes de 25 y 65% de flores seniles, respectivamente. El menor valor se registró con *A. wrightii* (5%) en el mes de junio (primavera).

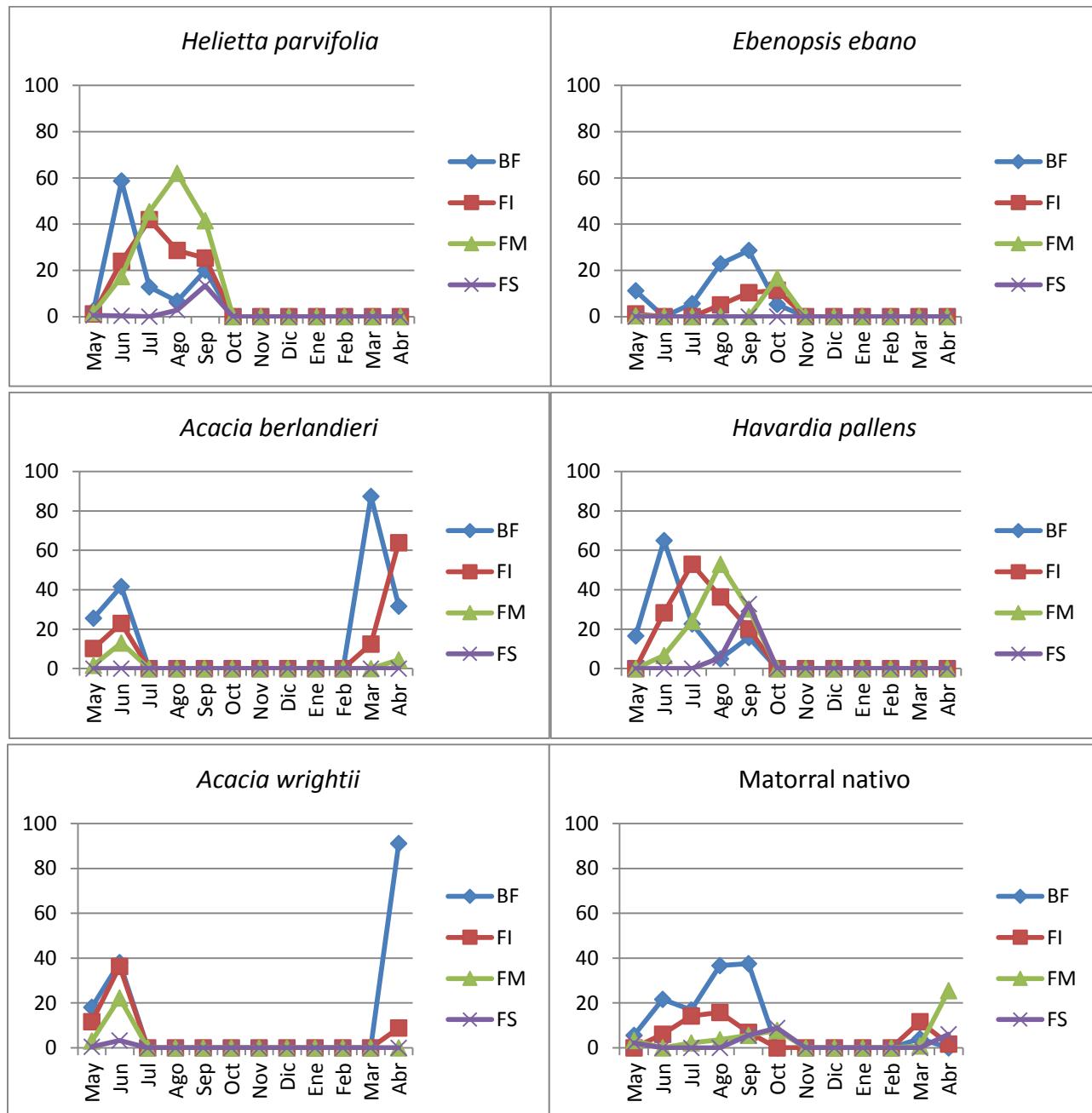


Figura 41. Producción de flores en cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco de mayo 2013 a abril 2014. BF = Botón floral, FI = Flores inmaduras, FM = Flores maduras, FS = Flores seniles

Para las plantaciones experimentales, se pueden identificar dos principales grupos funcionales de especies de acuerdo a su floración durante el período de estudio: el primero de ellos formado por dos especies con un solo evento (*E. ebano* y *H. pallens*) y el segundo con tres especies (*H. parvifolia*, *A. berlandieri* y *A. wrightii*), las cuales presentaron más de un evento. El área de vegetación nativa se encuentra clasificada en este segundo grupo.

8.1.3. Fructificación

Evento consecutivo a la floración, la fructificación fue muy variada en función de las especies (figura 42). Se presentaron diferencias altamente significativas ($p<0.001$) entre especies y por formación vegetal. No se observaron frutos en *E. ebano* debido a los eventos de aborto floral que ocurrieron en esta especie. Para *A. berlandieri*, se observó un bajo porcentaje de frutos inmaduros (10%) a finales de primavera (julio), que no pudieron madurar, y se cayeron inmediatamente.

El proceso de fructificación se distinguió de manera positiva en las demás especies, con cuatro etapas bien marcadas. La primera de ellas se inició en el mes de junio, y se mantuvo hasta octubre para *H. parvifolia*, con el desarrollo de frutos embrionarios, los cuales alcanzaron su madurez en los meses de octubre hasta marzo, presentándose como la especie con mayor duración de frutos maduros, al igual que mayor intensidad (>95% entre noviembre y diciembre). Estos frutos alcanzaron su pico de madurez durante el mes de diciembre (otoño), e iniciaron directamente la dispersión de semillas prolongándose esta etapa hasta en abril (inicio de primavera), registrándose la máxima dispersión en marzo (final de invierno).

La fructificación de *H. pallens* inició en pleno verano, con un bajo porcentaje de flores jóvenes que alcanzaron su máximo en septiembre (35%), los cuales empezaron a madurar, alcanzando su máxima madurez a finales del mes de octubre (95%), e iniciando a la vez la dispersión. La fase de dispersión de los frutos se concluyó hasta en el mes de abril, siendo la etapa con mayor duración e intensidad.

Se apreció un comportamiento similar en el Matorral nativo, pero con menor intensidad (20, 45 y 55% de frutos embrionarios, frutos maduros y frutos en dispersión, respectivamente). Sin embargo, se registró una fructificación adicional en el mes de mayo, pero que no superó el 10%, de los cuales el 5% alcanzaron a madurar antes de caerse en julio. En la mayoría de los casos, la duración de las fases de frutos embrionarios a inmaduros es relativamente breve, cubriendose en aproximadamente dos semanas. En cuanto a la maduración de los frutos, se presentó entre cuatro y seis semanas después del inicio de la fructificación. Sin embargo, la dispersión de las semillas fue lenta, ocupando varios meses.

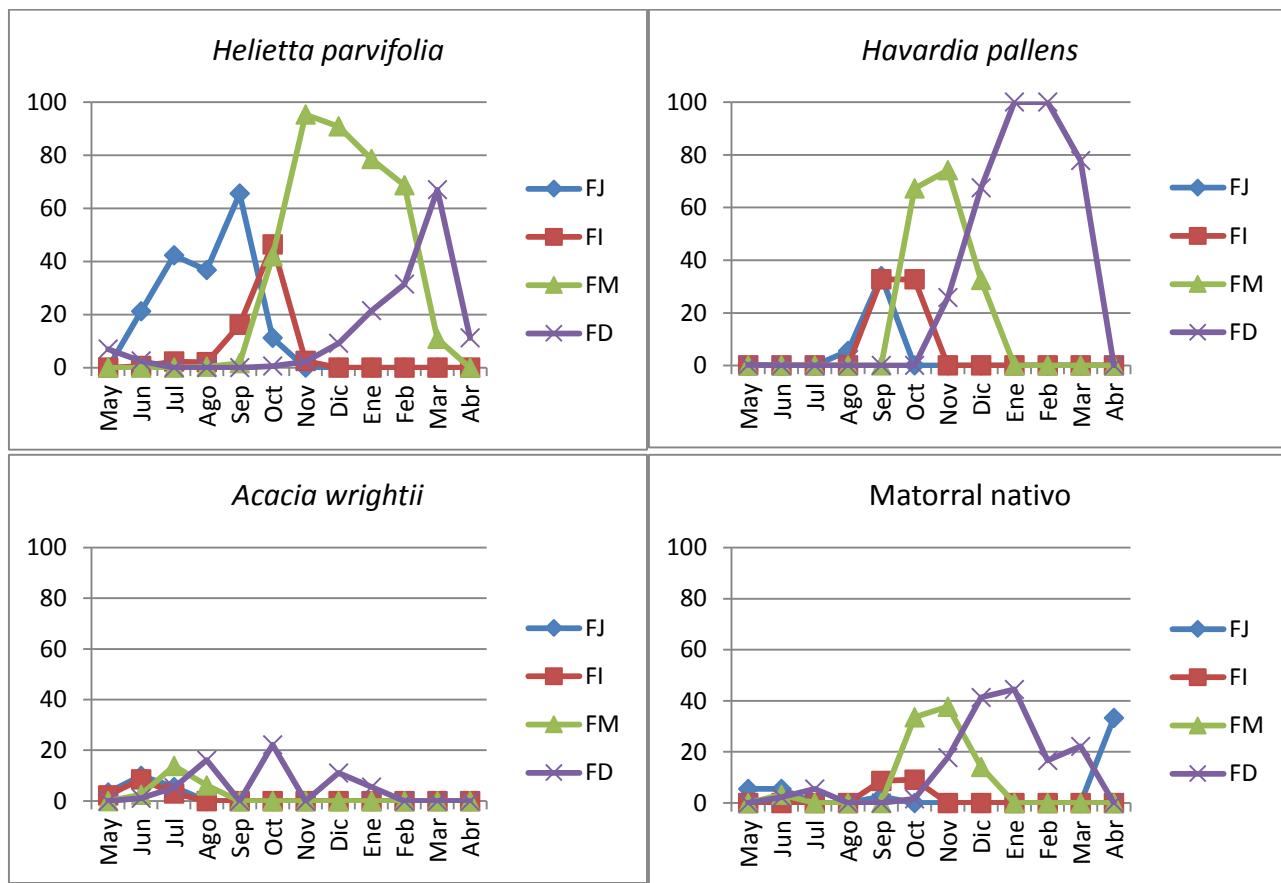


Figura 42. Fenograma de fructificación en especies del matorral espinoso tamaulipeco de mayo 2013 a abril 2014. FJ = Frutos jóvenes, FI = Frutos inmaduros, FM = Frutos maduros, FD = Frutos dehiscentes

8.2. Producción forestal

La evaluación del potencial forestal se realizó mediante la determinación de los valores dasométricos, como se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Valores dasométricos (\pm desviación estándar) de cinco especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México.

Especies	Sitios	N° de rebrotos	Altura total (m)	Db (cm)	DAP (cm)	V ($m^3/ha/año$)
<i>H. parvifolia</i>	PE	7.56 \pm 0.38	4.94 \pm 0.13	4.53 \pm 0.34	3.05 \pm 0.28	0.396 \pm 0.03
	MN	2.96 \pm 0.44	4.88 \pm 0.15	4.69 \pm 0.39	3.51 \pm 0.32	0.068 \pm 0.04
<i>E. ébano</i>	PE	3.28 \pm 0.36	4.70 \pm 0.12	7.73 \pm 0.32	5.79 \pm 0.26	0.118 \pm 0.03
	MN	2.69 \pm 0.83	5.74 \pm 0.28	12.84 \pm 0.74	9.68 \pm 0.61	0.377 \pm 0.07
<i>A. berlandieri</i>	PE	7.78 \pm 0.36	3.29 \pm 0.12	3.18 \pm 0.32	2.21 \pm 0.26	0.052 \pm 0.03
	MN	5.52 \pm 0.65	3.49 \pm 0.22	2.35 \pm 0.58	1.74 \pm 0.48	0.029 \pm 0.01
<i>H. pallens</i>	PE	3.49 \pm 0.35	4.72 \pm 0.12	5.21 \pm 0.31	3.84 \pm 0.26	0.059 \pm 0.03
	MN	3.26 \pm 0.45	3.65 \pm 0.15	3.55 \pm 0.41	2.50 \pm 0.33	0.022 \pm 0.04
<i>A. wrightii</i>	PE	2.02 \pm 0.39	3.57 \pm 0.13	7.48 \pm 0.35	4.25 \pm 0.29	0.061 \pm 0.04
	MN	1.36 \pm 0.89	4.32 \pm 0.30	10.23 \pm 0.80	7.84 \pm 0.66	0.211 \pm 0.08

Db=Diámetro basal, DAP=Diámetro a altura de pecho, V=Volumen, PE=Plantación experimental, MN=Matorral nativo

8.2.1. Número de rebrotos

La capacidad para rebotrar es considerada como el principal modo de funcionamiento del matorral, al establecerse y mantenerse después de cada corte y/o daños por heladas, sequías, fuego, etc. La tabla 8 indica que existen diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre sitios, entre especies y en las interacciones Sitio*Especie.

Tabla 8. Análisis de varianza del número de rebrotos por árbol en los dos sitios

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	4741.046	1	4741.046	533.987	0.000
Sitio	206.907	1	206.907	23.304	0.000
Especie	875.159	4	218.790	24.642	0.000
Sitio * Especie	303.467	4	75.867	8.545	0.000

El mayor número de rebrotos lo registraron las especies *Acacia berlandieri* y *Helietta parvifolia*, con un promedio de 7.78 y 7.56 rebrotos por árbol respectivamente (tabla 7), en plantaciones experimentales. Por otra parte, *Acacia wrightii* casi no desarrolló rebrotos,

presentándose generalmente solo un fuste. Un desarrollo similar se registró con *Ebenopsis ebano*, ya que presentaba un fuste principal de buen tamaño y vigor, mientras que el rebrote, cuando existía, no era nada parecido al fuste principal. En cuanto a *Havardia pallens*, se registró un número constante de rebrotos (3 rebrotos/árbol), tanto en el Matorral nativo como en las plantaciones experimentales.

8.2.2. Altura total

Existe diferencia altamente significativa ($P<0.01$) en la altura total de los árboles entre especies, como lo revela la tabla 9. Sin embargo no hubo diferencia significativa ($P>0.05$) entre los sitios.

Tabla 9. Análisis de varianza de la altura total

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	5582.151	1	5582.151	5493.963	0.000
Sitio	2.391	1	2.391	2.353	0.126
Especie	136.874	4	34.218	33.678	0.000
Sitio * Especie	48.936	4	12.234	12.041	0.000

La altura total osciló entre 3.29 y 4.94 m en plantaciones experimentales, mientras que en el Matorral nativo, varió de 3.49 y 5.74 m (Tabla 7). En ambos sitios, *E. ebano* y *H. parvifolia* presentaron la mayor altura, con 5.24 y 4.90 m respectivamente, mientras que *A. berlandieri* registró la altura más baja, 3.29 y 3.49 m en plantaciones y en el área nativa, respectivamente.

8.2.3. Diámetro basal (DB) y diámetro a altura de pecho (DAP)

Las tablas 10 y 11 muestran la existencia de diferencias altamente significativas ($P<0.01$) respecto al diámetro basal (Db) y diámetro a altura de pecho (DAP). El diámetro basal promedio fue de 5.59 cm en la plantación y 5.20 cm en la vegetación nativa, mientras que el diámetro a altura de pecho fue de 3.83 cm en la plantación y 3.86 cm en la vegetación nativa, *E. ebano* y *A. wrightii* fueron las especies de mayor diámetro tanto basal como a la altura de pecho con 12.84 y 10.23 cm (Db), 9.68 y 7.84 cm (DAP) respectivamente (Tabla 7). Los

diámetros más bajos se registraron en *A. berlandieri*, con valores de 2.35 cm (Db) y 1.74 cm (DAP).

Tabla 10. Análisis de varianza del diámetro basal (Db) de las especies

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	11355.280	1	11355.280	108.469	0.000
Sitio	90.899	1	90.899	12.812	0.000
Especie	2110.337	4	527.584	74.361	0.000
Sitio * Especie	433.875	4	108.469	15.288	0.000

Tabla 11. Análisis de varianza del diámetro a altura de pecho (DAP) de las especies

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	5866.758	1	5866.758	1224.739	0.000
Sitio	111.279	1	111.279	23.231	0.000
Especie	1149.875	4	287.469	60.012	0.000
Sitio * Especie	321.523	4	80.381	16.780	0.000

Por otra parte, se puede observar en la tabla 7, que las especies cuyo número de rebrotes es menor, presentaron el mayor diámetro tanto basal (Db) como a altura de pecho (DAP). Esto se aprecia en *E. ebano* y *A. wrightii*, que registraron respectivamente un promedio de 3 y 2 rebrotes/árbol, con un promedio de 10 y 9 cm de Db, respectivamente, y el DAP de 8 y 6 cm, respectivamente.

8.2.4. Volumen de madera

El volumen de madera en pie no presentó diferencias estadísticas significativas ($P>0.05$) entre sitios; sin embargo, hubo diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre especies (tabla 12). El mayor volumen se registró con *H. parvifolia* ($0.396 \text{ m}^3/\text{ha/año}$) en el área plantada y *E. ebano* ($0.377 \text{ m}^3/\text{ha/año}$) en el matorral nativo, mientras que la producción menor, la registraron las especies *H. pallens* y *A. berlandieri* con 0.022 y $0.029 \text{ m}^3/\text{ha/año}$ respectivamente, en la vegetación nativa (ver Tabla 7).

El volumen de madera fue mayor en el sitio nativo en comparación con el volumen encontrado en la plantación para las especies *E. ebano* y *A. wrightii* con 0.377 contra $0.118 \text{ m}^3/\text{ha/año}$ y 0.211 contra $0.061 \text{ m}^3/\text{ha/año}$ respectivamente.

Tabla 12. Análisis de varianza del volumen de madera aprovechable

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	5.752	1	5.752	80.414	0.000
Sitio	.001	1	.001	.019	0.890
Especie	3.089	4	.772	10.795	0.000
Sitio * Especie	3.451	4	.863	12.063	0.000

8.3. Producción forrajera

La evaluación del potencial forrajero se realizó a través de la determinación de la cobertura que representa el porte y/o densidad foliar del estrato arbóreo-arbustivo; biomasa foliar propia de cada especie; la hojarasca, que constituye el material foliar que se pierde, pero que contribuiría posteriormente en proveer materia orgánica y nutriente a los árboles. En esta sección, el estrato herbáceo tiene gran importancia, por lo que su cuantificación y caracterización fue también realizada.

8.3.1. Cobertura de especies nativas del MET

El análisis de varianza indica diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre especies, entre sitios y en las interacciones Especies*Sitio (tabla 13).

Tabla 13. Análisis de varianza de la cobertura de especies por sitio

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	21215.746	1	21215.746	542.555	0.000
Sitio	1307.468	1	1307.468	33.436	0.000
Especie	3798.215	4	949.554	24.283	0.000
Sitio * Especie	4237.175	4	1059.294	27.090	0.000

Los individuos de las especies *E. ebano* y *A. wrightii* presentaron los valores más elevados de cobertura en la vegetación nativa. El área ocupada por sus copas fue de 19.68 y 17.6 $\text{m}^2/\text{individuo}$, respectivamente (Fig. 43). Los individuos de las especies *H. pallens*, *H. parvifolia* y *A. berlandieri* cubrieron mayor área en plantaciones (8.53, 6.78 y 6.72

$\text{m}^2/\text{individuo}$ respectivamente) en comparación con la vegetación nativa (6.96, 5.62 y 2.73 $\text{m}^2/\text{individuo}$ respectivamente). La menor cobertura (2.73 $\text{m}^2/\text{individuo}$), la presentó *A. berlandieri*, en el Matorral nativo.

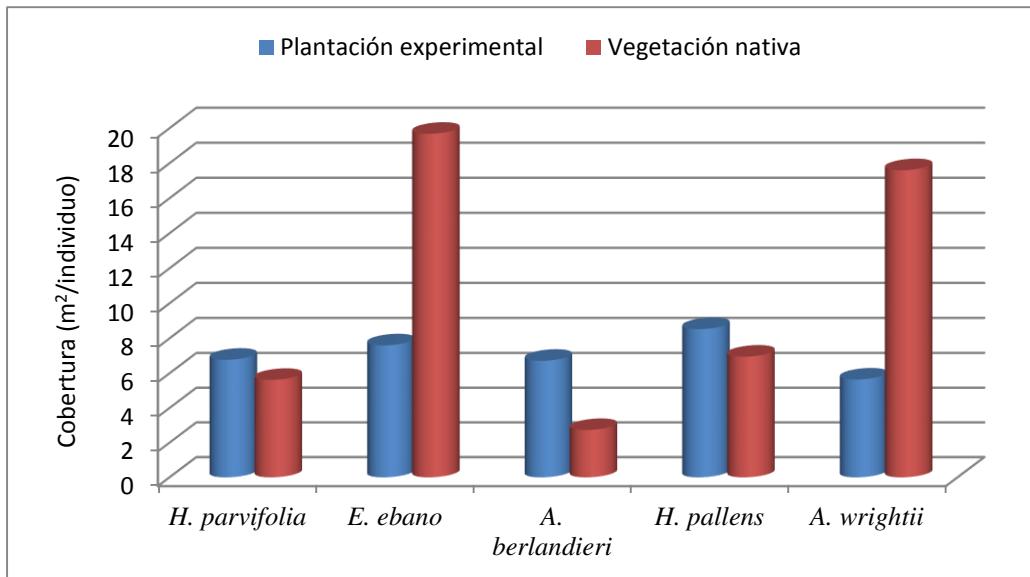


Figura 43. Cobertura vegetal de especies arbustivas y arbóreas del MET en plantaciones experimentales y en la vegetación nativa

8.3.2. Biomasa foliar

Se observaron diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre especies y por estaciones (Tabla 14). La producción promedio anual fue mayor en *E. ebano* con 2686.80 kg ha^{-1} , y menor en *A. wrightii*, con 431.21 Kg ha^{-1} (Fig. 44).

Tabla 14. Análisis de varianza para biomasa foliar

Fuente de variación	Suma de cuadrados	G1	Cuadrados medios	F	P
Especies	4.99701E7	4	1.24925E7	6.39	0.0003
Estación	5.51028E7	3	1.83676E7	9.40	0.0000
Residuo	1.01584E8	52	1.95354E6		
Total corregido	2.06657E8	59			

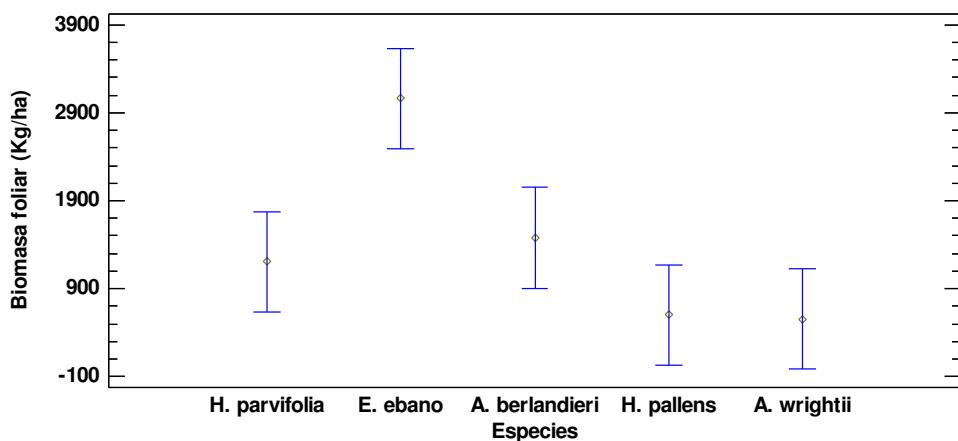


Figura 44. Producción promedio anual de biomasa foliar de cinco especies leñosas del matorral espinoso tamaulipeco

La biomasa foliar alcanza el máximo de su productividad en verano, con un valor muy alto ($9029.32 \text{ kg ha}^{-1}$) en *E. ebano*, mientras que el valor menor ($103.08 \text{ kg ha}^{-1}$) se registró con *A. wrightii*, en invierno (Fig. 45).

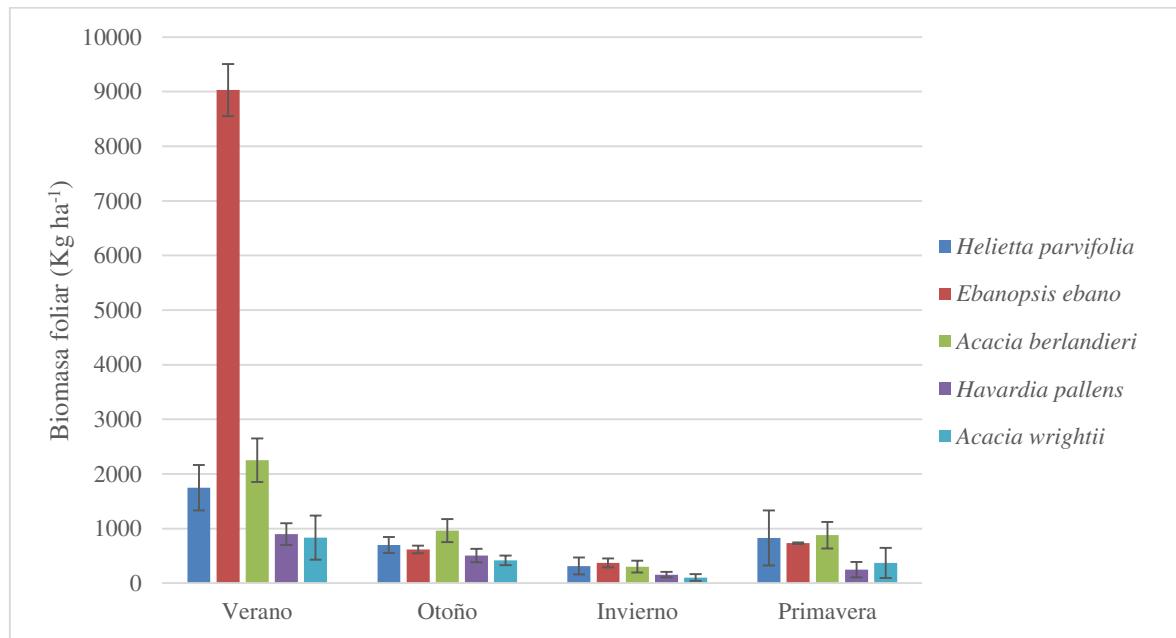


Figura 45. Biomasa foliar de cinco especies leñosas del matorral espinoso tamaulipeco en plantaciones experimentales, por estaciones del año

8.3.3. Producción de hojarasca

Todas las especies presentaron un patrón similar en la producción de hojarasca durante el período de estudio (Fig. 46). No se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($P>0,05$) entre especies (Tabla 15). Sin embargo, se observaron diferencias altamente significativas entre las épocas del año ($P<0.01$).

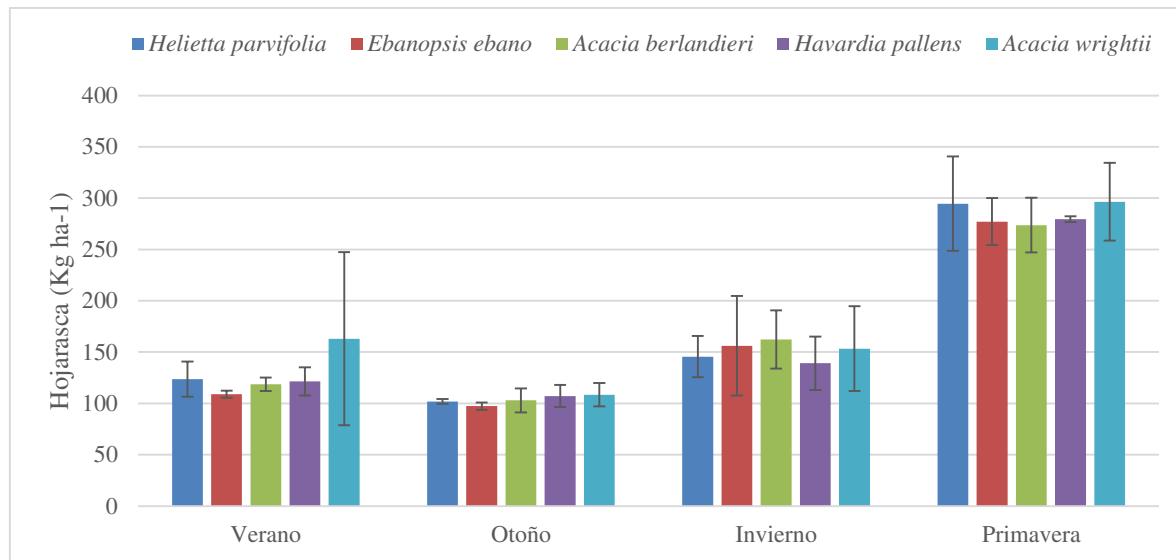


Figura 46. Tasa estacional de producción de hojarasca (Kg ha^{-1}) y su desviación estándar en plantaciones experimentales de cinco especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco

Tabla 15. Análisis de varianza para hojarasca en función de especies y estación del año

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados promedios	F	P
Especies	2894.58	4	723.644	0.90	0.4707
Estación	292499	3	97499.7	121.29	0.0000
Residuo	41800.2	52	803.85		
Total (coregido)	337194.	59			

La producción anual promedio de hojarasca varió entre 159.87 y 180.33 kg ha^{-1} , valores que corresponden respectivamente a *E. ebano* y *A. wrightii* (Fig. 47).

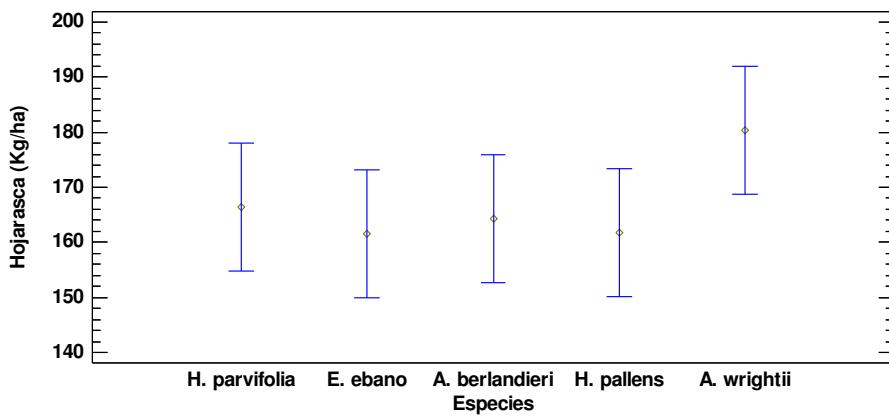


Figura 47. Deposición anual de hojarasca en plantaciones experimentales de cinco especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco

8.3.4. Producción de herbáceas

El análisis de varianza (Tabla 16) indica que no hubo diferencias significativas en la producción de biomasa de las especies herbáceas entre ambos sitios ($P=0.358$). Sin embargo, se presentaron diferencias altamente significativas ($P<0.01$) en la biomasa de herbáceas bajo las especies arbustivas estudiadas, por estaciones. El invierno presentó la menor producción de biomasa de herbáceas, con valores entre $0.08 - 0.18 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para plantaciones experimentales, y $0.07 - 0.22 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la vegetación nativa. Los valores más altos se registraron en primavera para *A. berlandieri* ($0.27 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y *H. pallens* ($0.25 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en el matorral nativo, y en otoño para *A. wrightii* ($0.24 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en plantaciones experimentales.

Tabla 16. Análisis de varianza de la biomasa de herbáceas bajo arbustos por sitio

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Intersección	1.542	1	1.542	291.856	0.000
Sitio	0.005	1	0.005	0.856	0.358
Especie	0.160	4	0.040	7.559	0.000
Sitio * Especie	0.085	4	0.021	4.017	0.005

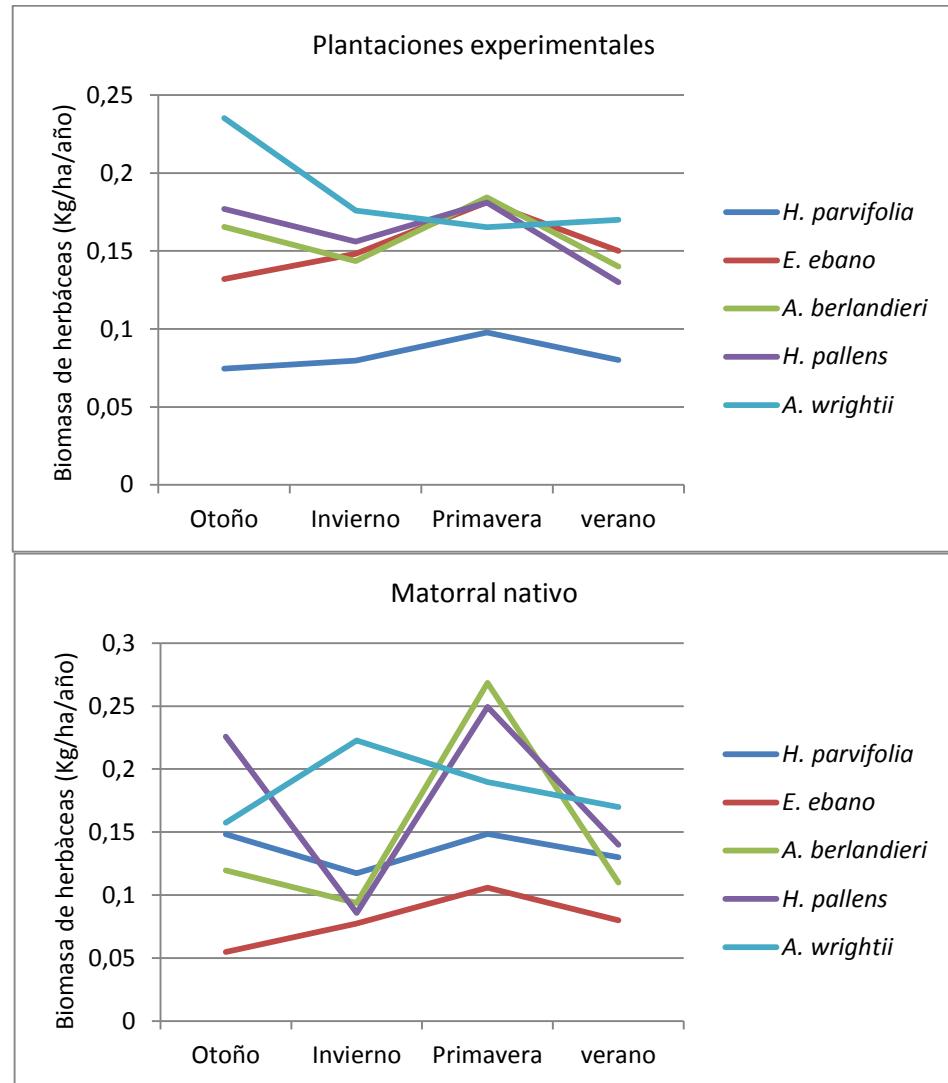


Figura 48. Biomasa anual de herbáceas bajo cinco especies leñosas del Matorral espinoso tamaulipeco

8.3.5. Caracterización de herbáceas

La tabla 17 presenta las especies encontradas en el estrato bajo, que es considerado como recurso forrajero potencial, en función de su importancia por arbusto y por sitio.

Tabla 17. Valor de importancia de la vegetación herbácea bajo cinco especies arbustivas y arbóreas del MET en plantaciones experimentales y Matorral nativo

Especies herbáceas	Índice de Valor de Importancia (%)									
	<i>H. parvifolia</i>		<i>E. ebano</i>		<i>A. berlandieri</i>		<i>H. pallens</i>		<i>A. wrightii</i>	
	PE	MN	PE	MN	PE	MN	PE	MN	PE	MN
<i>Lantana sp.</i> (Verbenaceae)	18.23	23.74	15.18	10.36	18.78	19.02	19.57	18.54	16.18	12.94
Zacate (Poaceae)	9.60	2.59	5.51	2.84	4.20	3.12	6.81	4.30	5.13	21.88
<i>Malpighia glabra</i> (Malpighiaceae)	5.23		5.48	2.84	13.08		6.35	1.99	24.28	1.82
<i>Maximalva filipes</i> (Malvaceae)	3.95						2.49			
<i>Croton cortesianus</i> (Euphorbiaceae)	3.72	9.32	9.78	4.73	3.03		4.03	6.73	8.64	4.66
<i>Justicia pilosella</i> (Acanthaceae)	3.69		1.18				2.55			
<i>Parthenium fruticosum</i> (Asteraceae)	3.61		2.43	5.06			5.75			
<i>Ruellia occidentalensis</i> (Acanthaceae)	3.57		1.80	4.95	3.03		4.15			
<i>Karwinskia humboldtiana</i>	3.57	3.83	5.16		2.71	2.94		1.36		2.65
<i>Evolvulus alsinoides</i> (Convolvulaceae)	3.52		13.02				1.12			
<i>Eysenhardtia polystachya</i> (Fabaceae)	3.44	2.20			1.35		4.47	1.36	1.15	1.26
<i>Forestiera angustifolia</i> (Oleaceae)	3.19							1.36		1.26
<i>Hisbiscus cardiophyllus</i>	2.84				3.39		2.40			
<i>Senna greggii</i> (Fabaceae)	2.75						1.12			
<i>Acacia berlandieri</i> (Fabaceae)	2.46				8.07	3.74	1.76	1.36	1.15	
<i>Acacia rigidula</i> (Fabaceae)	1.70						1.12			
<i>Scutellaria sp.</i> (Lamiaceae)	1.23	4.59		3.15			5.75			
<i>Urvillea ulmacea</i> (Sapindaceae)	1.70	1.49		2.26	3.39		3.18			
<i>Cyphomeris gypsophiloides</i> (Nyctaginaceae)	1.23						4.31			
<i>Havardia pallens</i>	1.47						1.91			1.82
<i>Zexmenia hispida</i>	1.23						5.11			
<i>Elytraria bromoides</i> (Acanthaceae)	1.99		4.54				3.34			
<i>Leucaena sp.</i> (Fabaceae)	1.23							1.15		
<i>Helietta parvifolia</i> (Rutaceae)	1.23	3.69						1.67		
<i>Randia rhagocarpa</i> (Rubiaceae)	2.20	1.18	2.22					3.67	1.15	2.65
<i>Lantana velutina</i> (Verbenaceae)	6.10									
<i>Salvia ballotiflora</i> (Lamiaceae)	6.89						1.36	1.15		
<i>Fraxinus greggii</i> (Oleaceae)	1.49		2.30							
<i>Phyllanthus polygonoides</i> (Euphorbiaceae)	4.21		1.36							
<i>Diospyros texana</i> (Ebenaceae)	3.05							1.15	4.07	
<i>Caesalpinia mexicana</i> (Fabaceae)		1.18	1.36							
<i>Zanthoxylum fagara</i> (Rutaceae)	1.18	2.26	4.56				2.86	1.36	2.70	1.26
<i>Ebenopsis ebano</i> (Fabaceae)	1.18									
<i>Ibervillea tenuisecta</i> (Cucurbitaceae)	1.18		1.35	2.12						
<i>Bernardia myricifolia</i> (Euphorbiaceae)		3.58					1.36			1.26
<i>Bastardia viscosa</i> (Malvaceae)		4.28								
<i>Amyris texana</i> (Rutaceae)		2.26						1.26		
<i>Mimosa malacophylla</i>		1.36								1.26
<i>Porlieria angustifolia</i> (Zygophyllaceae)		1.36								
<i>Justicia turneri</i> (Acanthaceae)		4.99								
<i>Ipomoea sp.</i>		1.36					2.61			
<i>Aloysia lycioides</i> (Verbenaceae)		2.26								
<i>Solanum triquetrum</i>		3.11								
<i>Viguiera stenoloba</i> (Asteraceae)				4.15						
<i>Cynanchum barbigerum</i> (Asclepiadaceae)				1.12						
<i>Cissus incisa</i>				2.40						
<i>Capsicum annuum</i> (Solanaceae)					1.67					
<i>Chromolaena odorata</i> (Asteraceae)					1.15					
<i>Celtis pallida</i> (Ulmaceae)					1.15					
<i>Acacia wrightii</i>					2.18					
Total	24	14	16	22	12	5	24	13	16	14

PE= Plantación experimental; MN= Matorral nativo

El inventario de las herbáceas del MET en ambos sitios hace constar la presencia de aproximadamente 80 especies, pertenecientes a 15 familias distintas. Este inventario revela que varias herbáceas se encuentran bajo casi todos los arbustos de todas las especies del MET. *Lantana sp.* y *Stipa lessingiana* (zacate) fueron las especies más comunes, estas dos herbáceas resultaron ser las especies de mayor importancia, lo que demuestra su alta capacidad a resistir a las condiciones drásticas que pueden prevalecer bajo los arbustos.

En cuanto a la riqueza específica, la plantación de *A. wrightii* resultó ser la más rica en biodiversidad (N=30), mientras que en el matorral nativo, *A. berlandieri* se caracterizó por una pobreza muy marcada en término de biodiversidad del estrato bajo al presentar N=7.

8.4. Características energéticas y composición química

8.4.1. Producción de carbón vegetal

El rendimiento del carbón vegetal mostró diferencias significativas ($P<0.05$) con respecto a las especies (tabla 18); sin embargo, los diferentes componentes de la planta (tronco y ramas) presentaron resultados similares ($P>0.05$).

Tabla 18. Análisis de varianza del rendimiento en carbón vegetal en función de especies y componentes de la planta

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	P
Especies	639.096	4	159.774	3.34	0.0138
Componentes	50.4094	1	50.4094	1.05	0.3079
RESIDUAL	4024.06	84	47.9055		
TOTAL (Corregido)	4713.57	89			

Los valores obtenidos oscilaron entre 20 y 30%, siendo el porcentaje más alto correspondiente a *A. wrightii* con 30% de carbón vegetal producido por su tronco y el porcentaje más bajo lo presentó *H. parvifolia* con 19.94% de carbón producido por sus ramas (Fig. 49).

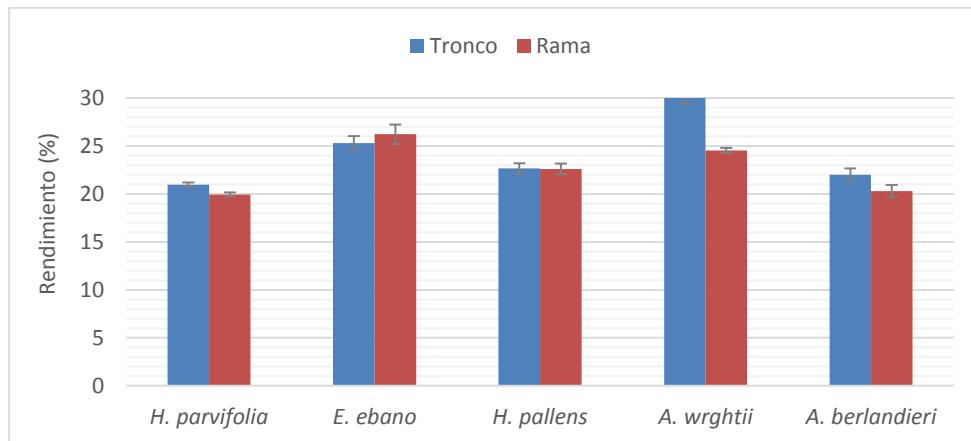


Figura 49. Rendimiento en producción de carbón vegetal de cinco especies nativas del Matorral espinoso tamaulipeco

8.4.2. Calidad de biocombustibles

La calidad como biocombustible de la biomasa estudiada se evaluó a través de los análisis inmediatos, que consistieron en determinar los contenidos de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo.

8.4.2.1. Contenido de humedad

El análisis de varianza (tabla 19) indicó diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre especies, mientras que los componentes no presentaron variaciones significativas ($P>0.05$).

Tabla 19. Análisis de varianza realizado sobre el contenido de humedad en función de especies y sus componentes vegetales

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	P
Componentes	0.0045334	1	0.0045334	0.05	0.8252
Especies	6.67996	4	1.66999	18.07	0.0000
Residual	7.76155	84	0.0923994		
TOTAL (Corregida)	14.446	89			

El contenido de humedad osciló entre 6.88 y 12.22% para las muestras de madera (Fig. 50A), mientras que el carbón vegetal registró un rango de 4.25 a 4.9% (Fig. 50B), con el mayor contenido de humedad (4.9%) tanto en tronco como en ramas de las especies *H. parvifolia*, *A. wrightii* y *A. berlandieri*. El menor contenido de humedad, lo produjeron *E. ebano* y *H. pallens* con 4.26% en el tronco de las dos especies, y de 4.25 y 4.41% en ramas, respectivamente.

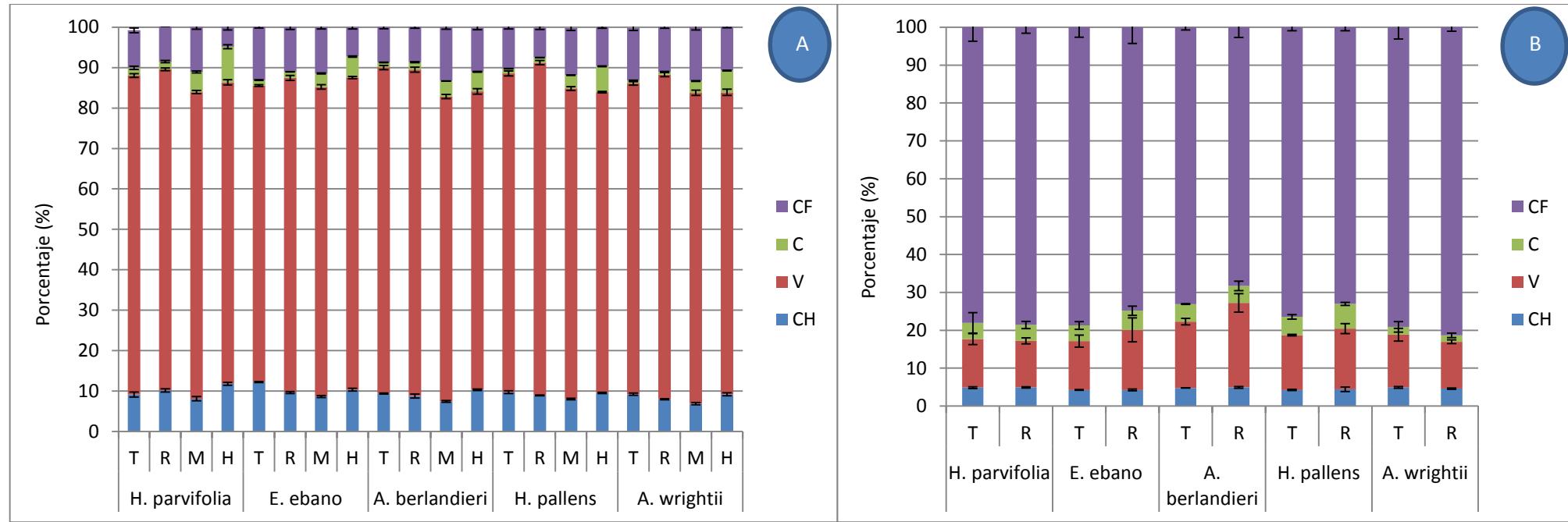


Figura 50. Propiedades fisicoquímicas (CH=contenido de humedad, V=volátiles, C=carbón, CF=carbón fijo) de madera (A) y carbón vegetal (B) de especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco en sus diferentes componentes (T=tronco, R=ramas, M=ramillas y H=hojas)

8.4.2.2. Materias volátiles

Se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P<0.05$) entre los componentes del árbol y altamente significativas ($P<0.01$) entre las especies estudiadas (Tabla 20).

Tabla 20. Análisis de varianza para el contenido de materias volátiles en tronco, ramas, ramillas y hojas de cinco especies forestales en Linares, N.L.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	P
Componentes	47.3774	1	47.3774	8.25	0.0052
Especies	610.699	4	152.675	26.59	0.0000
Residual	482.384	84	5.74267		
TOTAL (Corregido)	1140.46	89			

Los valores del contenido de volátiles fluctuaron entre 73.35 y 82.30% para las muestras de madera (Fig. 50A), el contenido mayor fue registrado por las ramas de *H. pallens* y el contenido menor, por el tronco de *E. ebano*. Para el carbón vegetal, los valores fluctuaron de 12.29 a 22.28% (Fig. 50B), siendo el mayor contenido correspondiente a *A. berlandieri*, tanto en ramas (22.28 %) como en el tronco (17.51 %), y el contenido menor (12.29 %) a ramas de *H. parvifolia*.

8.4.2.3. Contenido de cenizas

Las especies presentaron diferencias altamente significativas ($P<0.01$), mientras que entre componentes no hubo diferencias significativas ($P>0.05$), como lo muestra la tabla 21.

Tabla 21. Análisis de varianza para el contenido de cenizas en función de especies y sus componentes (tronco, ramas, ramillas y hojas)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	P
Componentes	3.56903	1	3.56903	1.92	0.1698
Especies	141.638	4	35.4094	19.03	0.0000
Residual	156.337	84	1.86116		
TOTAL (Corregido)	301.544	89			

Los contenidos de cenizas variaron entre 0.66 y 8.79% para las muestras de madera (Fig. 50A), siendo los valores menores (0.66 y 0.67%) correspondientes a los troncos y ramas de *A. wrightii* respectivamente, el mayor valor correspondiente a las hojas de *H. parvifolia*. Los

valores más altos se registraron en las hojas de todas las especies, seguidos por las ramillas, lo que apoya la idea de una desmineralización del tronco hacia las hojas.

En cuanto al carbón vegetal, el rango obtenido fue de 1.68 a 6.49% (Fig. 50B), valores presentados por las ramas de *A. wrightii* y *H. pallens*, respectivamente, con diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre especies.

Estos resultados presentan la misma tendencia que los resultados del contenido de cenizas obtenido de acuerdo a la norma ISO 17 225 – 2. Todas las especies mostraron un patrón similar: tronco<ramas<ramillas<hojas, con variaciones de 1.09 a 2.29% para troncos, 0.86 a 2.75% en ramas, 4.26 a 6.76% en ramillas y 5.77 a 11.79% en hojas para las muestras de madera, y 5.16 a 8.91 en troncos y 3.68 a 11.54 en ramas para carbón vegetal (Fig. 51). Dicho resultado indica que el contenido de cenizas es mayor en el carbón vegetal que en biomasa.

El análisis de varianza mostro diferencias altamente significativas ($P<0.001$) entre especies y entre componentes del árbol (tronco, ramas, ramillas y hojas), lo que indica una variación del contenido de las sustancias inorgánicas en función de los componentes del árbol, y por especie.

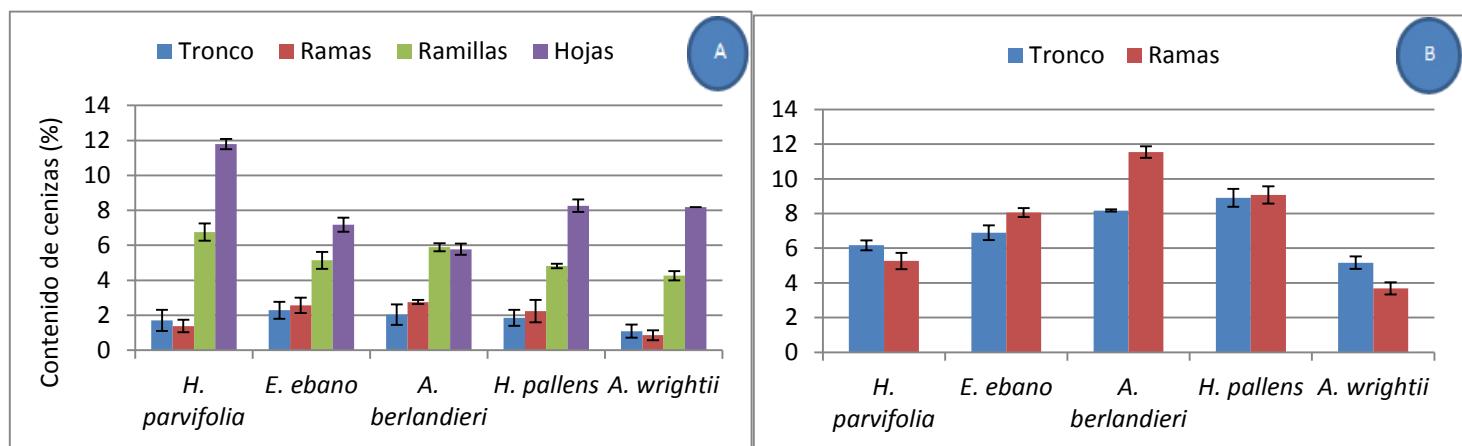


Figura 51. Contenido de cenizas de madera (A) y carbón vegetal (B), obtenido de acuerdo a la norma ISO 17 225 -2

Los valores más bajos se registraron en tronco (1.09%) y ramas (0.86%) de *A. wrightii*, mientras que el porcentaje más alto de cenizas lo presentaron las hojas de *H. parvifolia*.

8.4.2.4. Carbón fijo

En lo referente al carbón fijo, las diferencias fueron altamente significativas ($P<0.01$) entre especies, y significativas ($P<0.05$) entre los diferentes componentes (Tabla 22).

Tabla 22. Análisis de varianza para carbón fijo en función de especies y sus componentes

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	P
Componentes	78.1393	1	78.1393	7.95	0.0060
Especies	966.32	4	241.58	24.57	0.0000
Residual	825.75	84	9.83036		
TOTAL (Corregido)	1870.21	89			

El carbón fijo presentó un rango de 4.9 a 13.31% en muestras de biomasa (Fig. 50A), siendo el contenido menor correspondiente a las hojas de *H. parvifolia*, y el valor mayor a tronco de *E. ebano*, ramillas de *A. berlandieri* y *A. wrightii*. Este rango es muy inferior al rango de 68.26 a 81.34% registrado por el carbón vegetal, valores que corresponden a ramas de *A. berlandieri* y ramas de *A. wrightii*, respectivamente (Fig. 50B).

8.4.2.5. Poder calorífico

Para el poder calorífico, se detectaron diferencias altamente significativas ($P<0.01$) entre especies, y diferencias significativas ($p<0.05$) entre componentes del árbol (Tabla 23).

Tabla 23. Análisis de varianza para poder calorífico en función de especies y sus componentes

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	P
Componentes	3.82691E6	1	3.82691E6	6.52	0.0125
Especies	5.09455E7	4	1.27364E7	21.69	0.0000
Residual	4.93168E7	84	587105.		
TOTAL (Corregido)	1.04089E8	89			

A partir de los cálculos realizados, se obtuvieron valores de poder calorífico entre 14,533 y 17,844 KJ Kg⁻¹ para las muestras de madera, siendo el mayor poder calorífico registrado en el tronco de *A. wrightii* y el menor en hojas de *H. parvifolia* (Fig. 52). Para el carbón vegetal,

los valores obtenidos fluctuaron entre 28,000 y 30,932 KJ Kg⁻¹, valores que corresponden a las ramas de *A. berlandieri* y *A. wrightii*, respectivamente (Fig. 52).

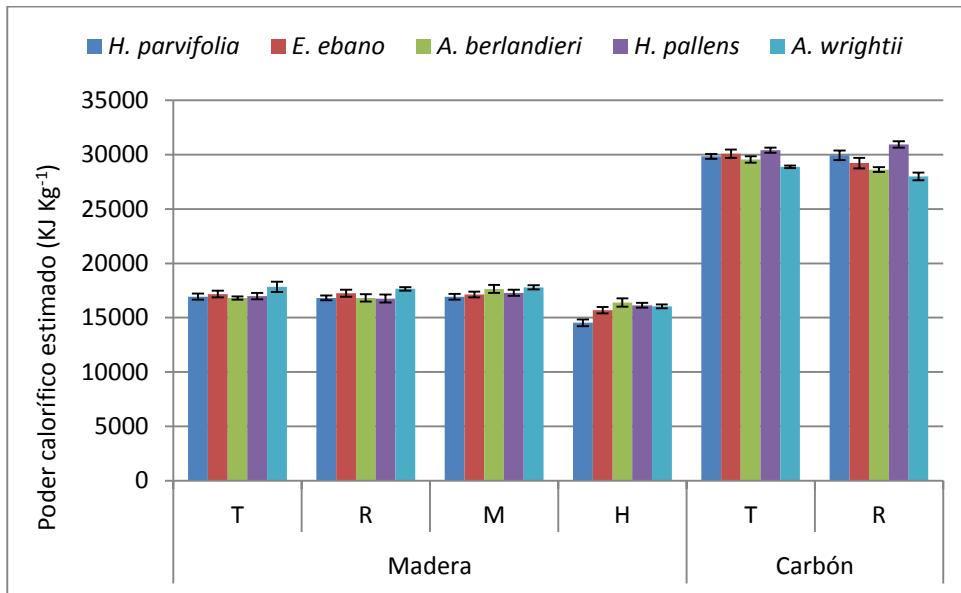


Figura 52. Poder calorífico estimado de madera y carbón vegetal de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco, en sus diferentes componentes (T=tronco, R=ramas, M=ramillas y H=hojas)

Para los resultados de la determinación por medio de la bomba calorimétrica, se registraron rangos de 27.12 a 31.20 MJ kg⁻¹ y de 17.15 a 19.36 MJ kg⁻¹ para carbón vegetal y muestras de madera, respectivamente (Fig. 53). Estos valores experimentales corresponden a los valores obtenidos a partir de la evaluación por cálculo, lo que consagra la determinación del poder calorífico mediante los análisis inmediatos como un método aplicable a las especies del matorral espinoso tamaulipeco.

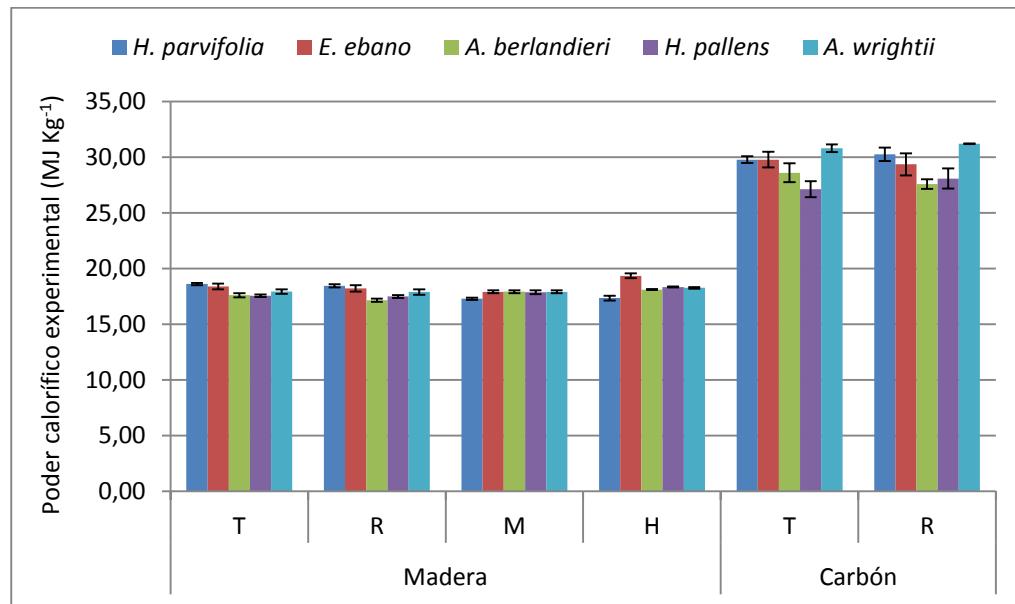


Figura 53. Poder calorífico experimental de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en diferentes componentes (T = Troncos, R = Ramas, M = Ramillas, H = Hojas)

En todos los casos, se observa que el poder calorífico del carbón es mayor al que presentan las muestras de biomasa. Los valores registrados oscilaron entre 27.12 y 30.80 MJ kg⁻¹ en troncos, valores correspondiendo a *H. pallens* y *A. wrightii*; y entre 27.59 y 31.20 MJ kg⁻¹ en ramas, valores correspondientes a *A. berlandieri* y *A. wrightii*, respectivamente.

En cuanto a las muestras de madera, el poder calorífico se encuentra dentro de los rangos de 17.56 a 18.61 MJ kg⁻¹ para troncos y 17.15 a 18.45 MJ kg⁻¹ para ramas, *H. parvifolia* siendo la especie con mayor valor (18.61 MJ kg⁻¹), seguido por *E. ebano* (18.40 MJ kg⁻¹) y *A. wrightii* (17.93 MJ kg⁻¹) por lo que es de los troncos, y con el mismo patrón en cuanto a las ramas (18.45, 18.22 y 17.90 MJ kg⁻¹, respectivamente). El menor poder calorífico, lo presentaron ramillas y hojas (17.29 y 17.35 MJ kg⁻¹) de *H. parvifolia*. En forma contraria, se observaron valores elevados en hojas de las otras cuatro especies, que alcanzaron el máximo de 19.36 MJ kg⁻¹ en *E. ebano*.

8.4.2.6. Correlaciones entre las características de biocombustibles ensayados

El carbón fijo resultó ser el principal componente del carbón vegetal con un contenido superior a 70%, mientras que los volátiles constituyen el segundo componente principal del carbón vegetal, con un porcentaje superior a 15%. Esta tendencia es inversa en las muestras

de madera analizadas, donde el mayor componente lo constituyen los volátiles, con contenidos superiores a 70%, mientras que el carbón fijo se encuentra en una escala de 10%.

La tabla 24 revela correlaciones altas ($P<0.01$) entre carbón fijo y volátiles, cenizas y poder calorífico. Existe un equilibrio entre las propiedades del carbón: un carbón con gran cantidad de materiales volátiles y menos carbón fijo, se quema con mayor rapidez, por lo que se tendrá que utilizar más carbón, y si un carbón posee demasiado carbón fijo tendrá un mayor contenido de cenizas. Por lo tanto, se recomienda utilizar una determinada cantidad de carbón con tiempo de ignición relativamente rápido y la otra parte del carbón cuyo tiempo de ignición es menor. De esta forma se estará asegurando que al momento de encender el carbón sea fácil de encender y la otra parte más duradera por el alto porcentaje de carbono fijo.

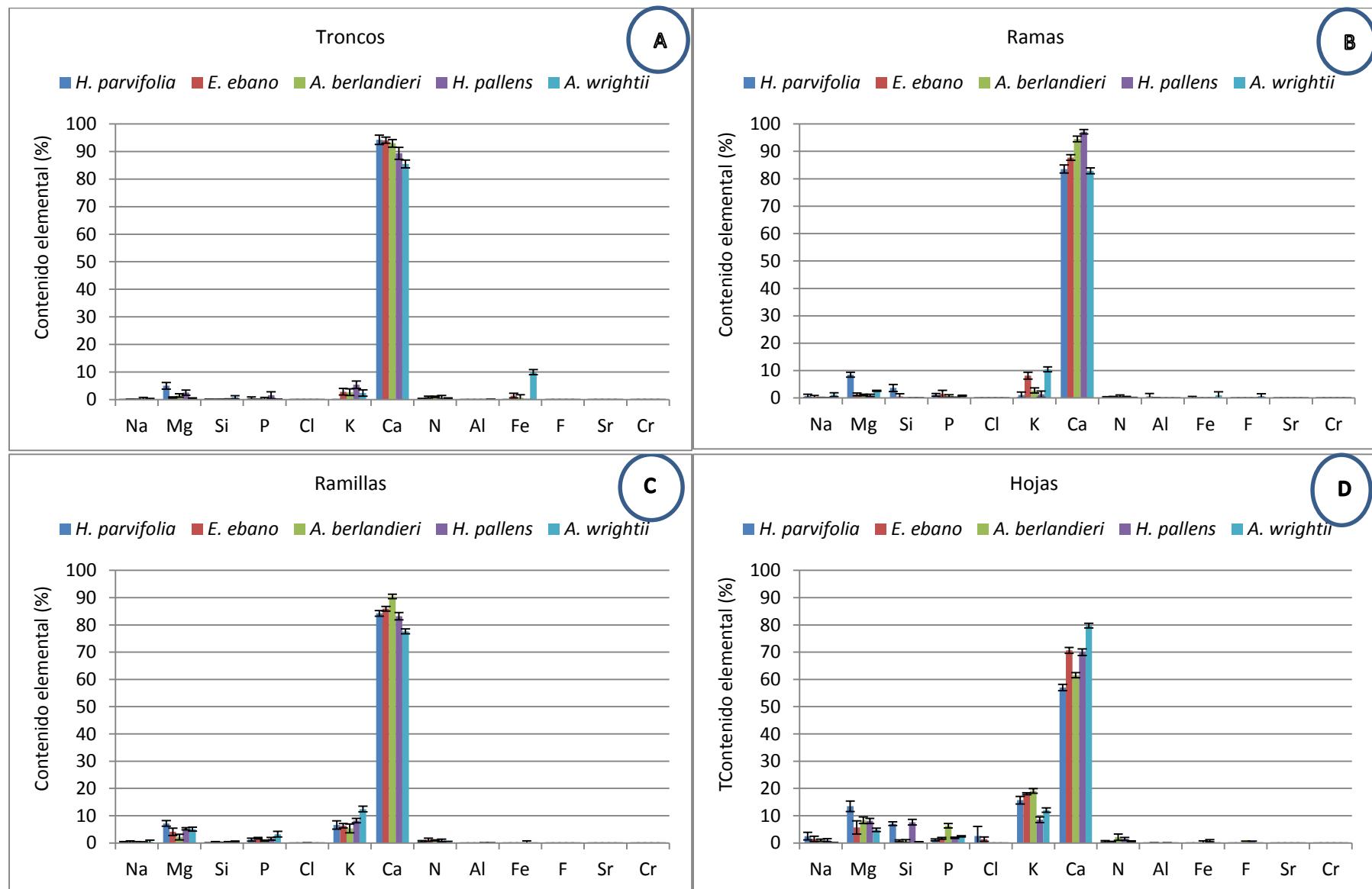
Tabla 24. Matriz de correlaciones entre variables determinantes de la calidad de biocombustibles

	Humedad	Volátiles	Cenizas	Carbón fijo	Poder calorífico
Humedad	1.0000	0.2355	0.3021	0.1807	0.1807
Volátiles		1.0000	0.0011	0.0000	0.0000
Cenizas			1.0000	0.0000	0.0000
Carbón fijo				1.0000	0.0000
Poder calorífico					1.0000

Por otra parte, se observan valores más elevados de contenidos de cenizas en carbón vegetal (5%) que en las muestras de madera (< 2%), para troncos y ramas (Fig. 50AB).

8.4.3. Sustancias inorgánicas obtenidas del micro análisis de las cenizas

La ceniza es el residuo de la combustión, y está constituida principalmente por elementos inorgánicos. La espectroscopia de rayos-x realizada, permitió detectar una distribución similar de estos elementos en las especies estudiadas (Fig. 54), con una muy alta proporción de calcio (57.03 - 95.53%), seguido de potasio (0.95 - 19.21%) y magnesio (0.88 - 13.47%).



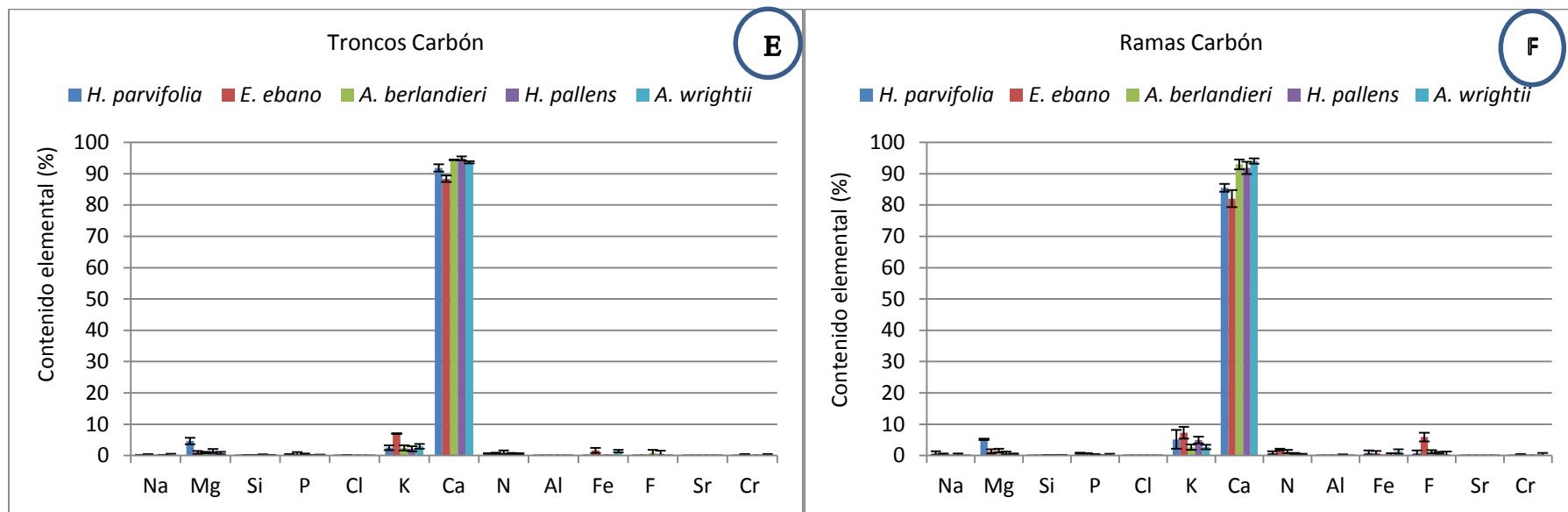
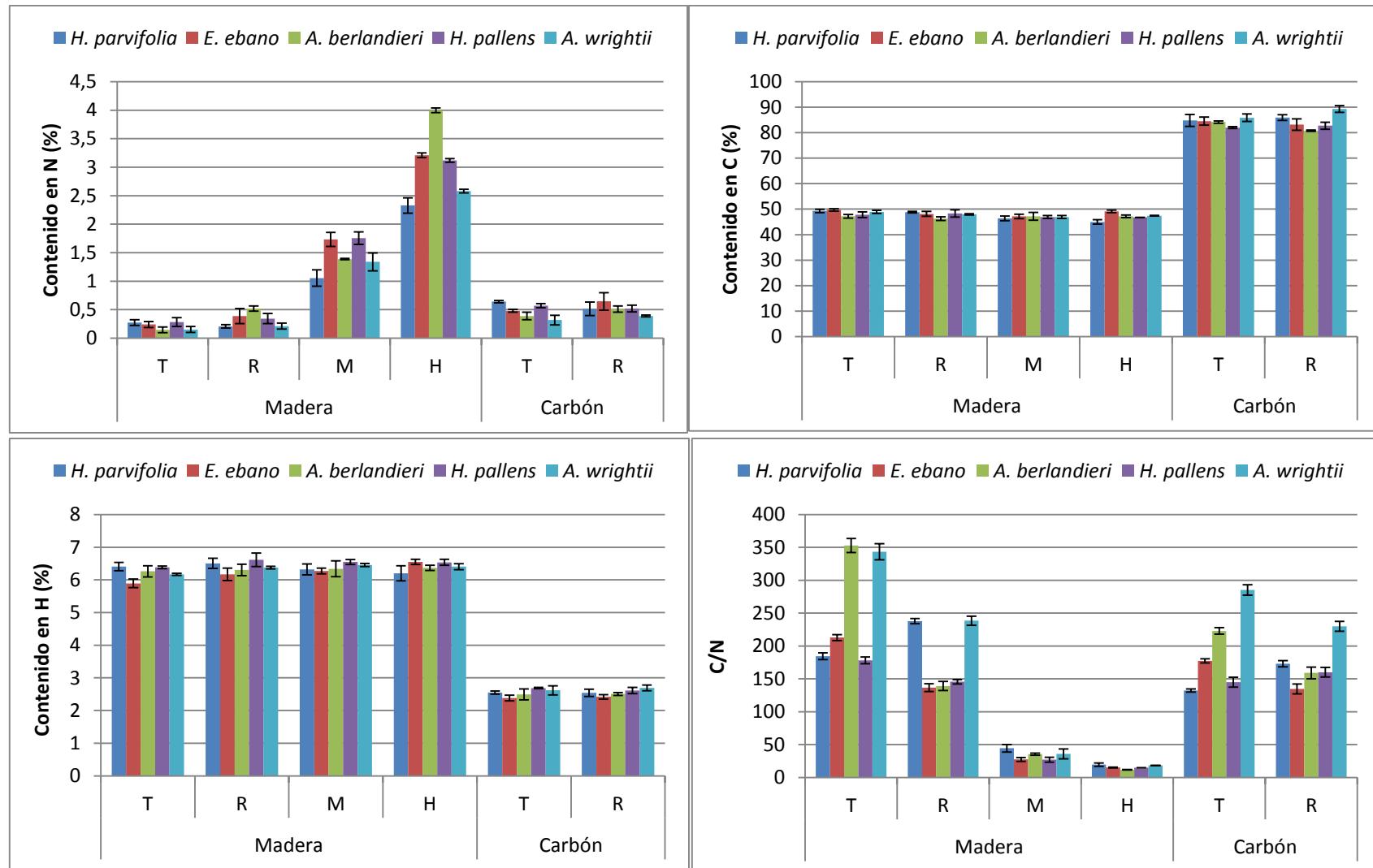


Figura 54. Contenido de los elementos inorgánicas (%) y desviación estándar de cenizas obtenidas a partir de madera (A, B, C, D) y carbón vegetal (E, F) de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en sus diferentes componentes

8.4.4. Elementos químicos (Contenido de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno) en madera y carbón

El análisis de varianza reveló diferencias significativas ($P<0.05$) en los valores de los elementos químicos de la madera, presentando al carbono e hidrógeno como principales componentes elementales de la biomasa forestal, con una tendencia constante tanto para el carbón vegetal como para la madera. Se registraron fluctuaciones de 44.99 a 49.70 % de C en harina de madera y hojas; 80.77 a 89.30 % de C en carbón vegetal; 5.89 a 6.62 % de H en harina de madera y hojas; 2.38 a 2.69 de H en carbón vegetal (Fig. 55). Estos rangos indican que se encuentra mucho más carbono (C) en el carbón vegetal que en la madera pura, y por el contrario, más hidrógeno (H) en la madera que en el carbón vegetal. En cuanto al contenido de nitrógeno, se observó una gran variación ($P<0.001$), respecto a los diferentes componentes y del tipo de muestra. Se registró la secuencia porcentual (2.33–4.0) > (1.06–1.76) > (0.21–0.52) > (0.15–0.28), intervalos correspondientes a muestras de harina para hojas > ramillas > ramas > troncos, respectivamente. El carbón vegetal presentó intervalos de 0.39–0.65 % y 0.32–0.64 % de N para ramas y troncos, respectivamente. Con base a estos resultados, se ve que la biomasa contiene también pequeñas proporciones de nitrógeno, y que se encuentra en mayor proporción en carbón vegetal que en madera. Dicha tendencia se presenta en forma inversa, para la relación C/N (Fig 55).



8.4.5. Componentes químicos de la madera

Las especies de madera se destacan por la concentración de los componentes químicos que las constituyen, como celulosa, hemicelulosa y lignina, y por su densidad. La tabla 25 desglosa los promedios y desviación estándar de los componentes químicos para cada especie estudiada, en sus diferentes componentes vegetales.

Tabla 25. Componentes químicos y desviación estándar de cinco especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco en diferentes componentes vegetales (T=Tronco, R=Ramas y M=Ramillas)

Species	Componente vegetal	Extraíbles ¹	Lignina ²	Holocelulosa ²
<i>Helietta parvifolia</i>	T	14.56±1.08	35.94±1.01	47.8±0.90
	R	10.38±0.97	31.39±0.61	56.85±0.65
	M	32.08±0.52	20.61±0.37	40.55±0.80
<i>Ebenopsis ebano</i>	T	38.12±1.05	35.43±0.20	24.17±0.58
	R	11.99±2.13	28.08±0.34	67.36±0.97
	M	24.95±0.48	29.92±0.59	49.99±0.52
<i>Acacia berlandieri</i>	T	11.97±0.27	28.78±0.54	57.22±0.47
	R	9.16±1.99	21.04±1.68	67.05±1.73
	M	30.48±0.18	26.56±0.30	37.07±0.67
<i>Havardia pallens</i>	T	12.10±1.94	32.21±0.69	53.84±1.03
	R	10.99±1.42	20.18±1.39	66.49±1.15
	M	31.81±1.06	28.51±0.25	34.86±0.68
<i>Acacia wrightii</i>	T	26.84±1.29	33.94±2.67	38.13±1.45
	R	19.37±0.11	17.14±1.48	62.63±0.62
	M	22.01±0.43	29.04±0.88	44.69±0.69
P		0.019*	0.014*	

¹Componentes en porcentaje basado en el peso seco de la muestra original

²Componentes en porcentaje basado en el peso seco de las muestras libres de extraíbles

P (*): Significancia a 5 %.

8.4.5.1. Sustancias extraíbles

Los extraíbles variaron significativamente ($P<0.05$) tanto entre especies como por componente vegetal, con los rangos de 11.98 a 38.12% en troncos, 9.16 a 19.37% en ramas y 22.01 a 31.81% en ramillas (Tabla 25).

En todas las especies, se puede observar el patrón secuencial: Metanol > Agua caliente > Acetona > Ciclo-hexano, según un gradiente de rendimiento decreciente de los extraíbles totales (Fig. 56). La menor cantidad de extraíbles se obtuvo con ciclohexano con un intervalo

de 1.03% a 1.33% ($P=0.0581$), seguido de los obtenidos con agua caliente, metanol y acetona. Por un lado, se encontraron diferencias significativas en el contenido de extraíbles solubles en acetona y metanol presentes en los diferentes componentes; por otro lado hubo diferencias del contenido de extraíbles solubles en agua caliente en los cuatro tipos de materiales.

Queda destacado en la figura 56 la solubilidad registrada en los solventes utilizados, donde se observa la máxima solubilidad en el metanol, con mayor proporción de extraíbles en las ramillas para *H. parvifolia* (17.03%), *E. ebano* (13.96%), *A. berlandieri* (14.62%) y *H. pallens* (15.60%), y en el tronco para *E. ebano* (13.72%) y *A. wrightii* (14.41%). La menor cantidad de extraíbles se obtuvo con ciclohexano con valores mínimo y máximo de 0.67 y 3.36%, respectivamente.

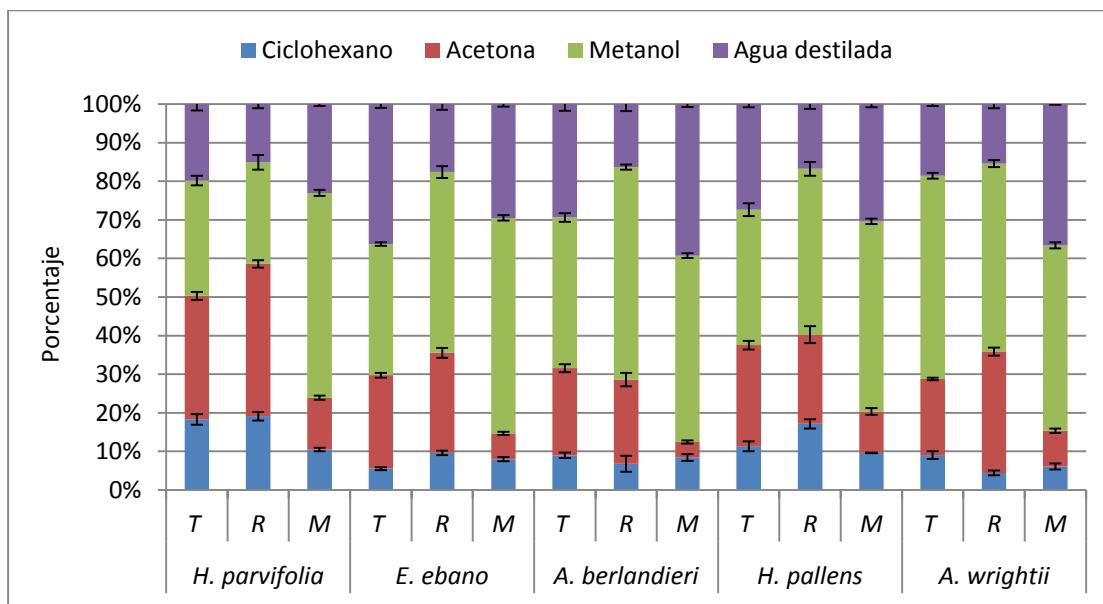


Figura 56. Solubilidad de diferentes componentes (T=Tronco, R=Ramas, M=Ramillas y H=Hojas) de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco en solventes de diferente polaridad

8.4.5.2. Lignina Runkel

Los contenidos porcentuales de lignina variaron significativamente ($P<0.05$) de 28.78 a 35.84 para los troncos, de 17.14 a 31.39 para las ramas y de 20.61 a 29.92 para las ramillas (Tabla 25). Los troncos presentaron mayor porcentaje de lignina en todas las especies, seguidos por las ramillas, con excepción de *H. parvifolia* donde se reportó mayor porcentaje de lignina en ramas que en ramillas.

8.4.5.3. Holocelulosa

El contenido de holocelulosa presentó rangos de 24.17-57.22% para troncos, 56.85-67.36% para ramas y 34.86-49.99% para ramillas (Tabla 25). Los valores más altos se registraron en las ramas, siendo *E. ebano*, la especie con mayor contenido (67.36%). Los troncos presentaron los valores más bajos, siendo también *E. ebano*, la especie de menor contenido (24.17%).

8.5. Características físicas

8.5.1. pH

El pH varió de 3.90 a 5.74, reflejando una tendencia ácida para las especies estudiadas, en sus diferentes niveles de crecimiento (Fig. 57). Con excepción de *Helietta parvifolia*, los troncos presentaron valores más bajos en comparación a los demás niveles; es decir una tendencia a ser más ácidos en el interior del fuste.

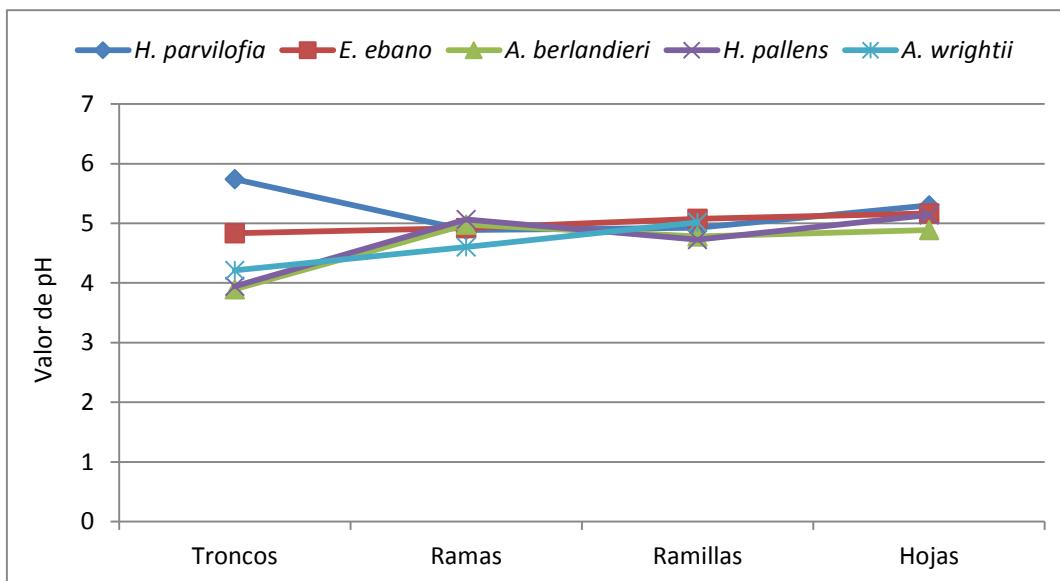


Figura 57. pH de cinco especies arbustivas y arbóreas del MET en diferentes componentes

Sin embargo, no se registraron diferencias significativas ($P>0.05$) entre especies, y tampoco en los componentes.

8.6. Correlación entre poder calorífico y componentes físico-químicos de la madera

Al correlacionar los datos del poder calorífico con los componentes químicos, se obtuvieron las gráficas (Fig. 58) y los modelos matemáticos de ajuste junto con los coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2), como se presenta en la tabla 26.

En la figura 58, se puede observar que el poder calorífico tiende a disminuir, cuando mayor es el contenido de los compuestos inorgánicos. Esta tendencia del poder calorífico se invierte con los extraíbles y con el pH, pero a baja intensidad. Registraron bajos coeficientes de correlación (r) de 0.13 y 0.36 respectivamente, lo que indica correlaciones relativamente débiles entre estas variables. Además, el coeficiente de determinación (R^2) presenta que la tendencia registrada se puede justificar solo en 1.59 y 13.13% de los casos, respectivamente.

En cuanto a la lignina, el coeficiente de correlación registrado de 0.66 (Tabla 26) indica correlación moderadamente fuerte con el poder calorífico, lo que se puede justificar en 44% de los casos (R^2). El modelo obtenido puede ser empleado para las futuras observaciones, ya que es estadísticamente significativo ($P<0.05$).

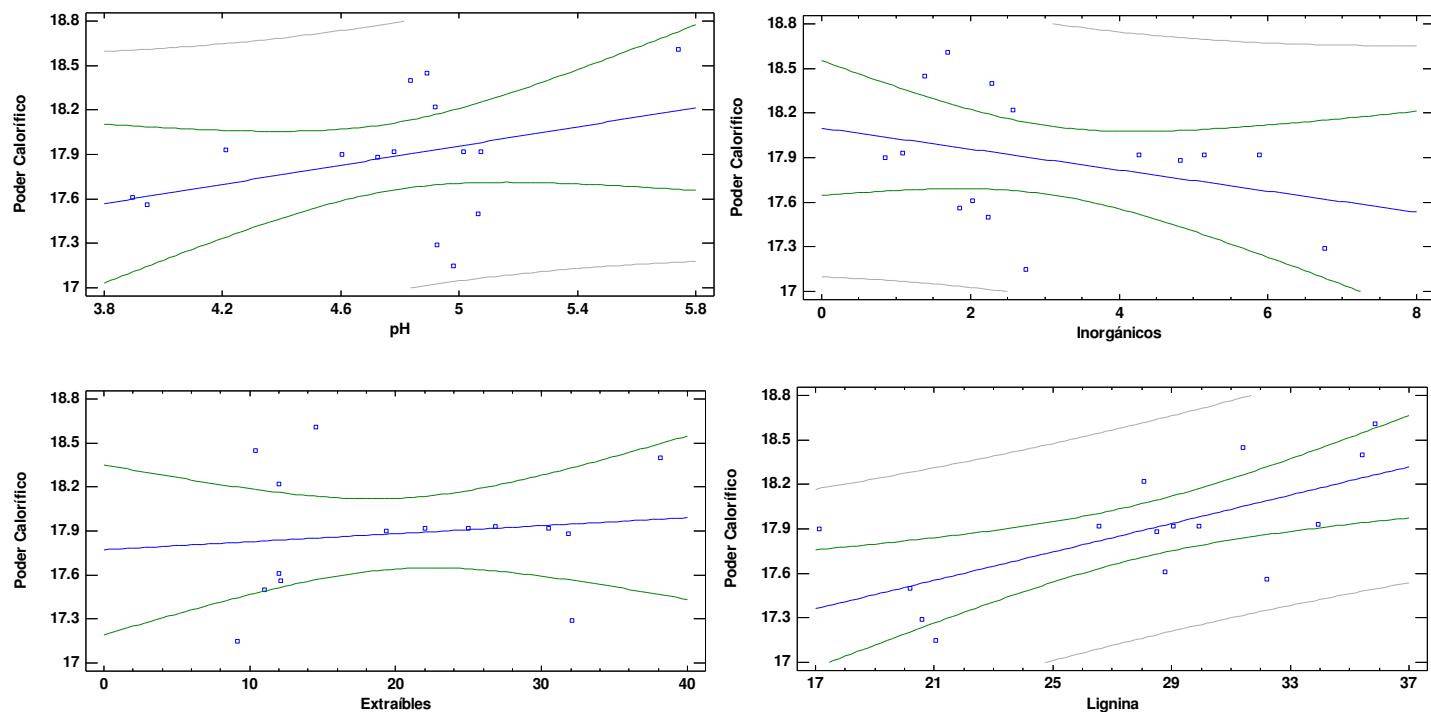


Figura 58. Regresión lineal simple entre poder calorífico y componentes químicos (pH, inorgánicos, extraíbles y lignina) de la madera

Se registraron diferencias significativas ($P<0.05$) entre poder calorífico, extraíbles y lignina; pero con el $R^2 = 44.08$ (tabla 26), parecido a lo señalado entre poder calorífico y lignina, no se nota una diferencia al agregar los extraíbles en el modelo.

Sin embargo, al agregar los compuestos inorgánicos en lugar de extraíbles, se mejoró un poco el modelo, con $R^2 = 47\%$ ($P=0.02$), aunque los inorgánicos presentaron un efecto negativo en el poder calorífico. Al considerar el pH y la lignina, se obtuvo el valor más alto de R^2 (58.86). Por lo tanto, la acidez y lignina a la vez, tienen una influencia significativa en el poder calorífico ($P=0.005$).

Tabla 26. Ecuaciones de regresión simple y correlación múltiple entre poder calorífico (PC) y componentes químicos de la madera

Nº	Parámetros	Ecuaciones	R^2	r	P
1	PC y pH	PC = 16.3406 + 0.323322*pH	13.13	0.36	0.184
2	PC y Inorgánicos	PC = 18.0988 - 0.070599*Inorgánicos	9.77	-0.31	0.257
3	PC y Extraíbles	PC = 17.7722 + 0.00546609*Extraíbles	1.59	0.13	0.654
4	PC y Lignina	PC = 16.5477 + 0.0478768*Lignina	44.04	0.66	0.007*
5	PC, pH, Inorg.	PC = 16.2072 + 0.411899*pH - 0.0951561*Inorgánicos	29.90	-	0.119
6	PC, pH, Extraíbles	PC = 16.2524 + 0.320308*pH + 0.00501283*Extraíbles	14.47	-	0.392
7	PC, pH, Lignina	PC = 14.8803 + 0.343794*pH + 0.0488191*Lignina	58.86	-	0.005*
8	PC, Inorg., Extra.	PC = 17.8816 - 0.123761*Inorgánicos + 0.018522*Extraíbles	22.53	-	0.216
9	PC, Inorg., Lignina	PC = 16.7467 - 0.0400171*Inorgánicos + 0.0451078*Lignina	47.03	-	0.022*
10	PC, Extra., Ligni	PC = 16.5365 + 0.000864855*Extraíbles + 0.0476448*Lignina	44.08	-	0.031*

*Valor significativo $P \leq 0.05$, ** Valor altamente significativo $P \leq 0.01$

8.7. Grado de contaminación de los biocombustibles

Se detectaron diferencias significativas entre los tipos de muestras ($P<0.05$), y altamente significativas entre los diferentes componentes ($P<0.01$). En todos los casos, los sulfatos presentaron concentraciones mucho más altas que los cloruros. Se registraron valores decrecientes, desde las hojas hacia las estructuras más lignificadas. Para los sulfatos, las concentraciones presentaron el siguiente patrón de rangos: Hojas ($38.39\text{--}57.69 \text{ mg L}^{-1}$) > Ramillas ($12.29\text{--}46.18 \text{ mg L}^{-1}$) > Ramas ($1.30\text{--}4.49 \text{ mg L}^{-1}$) > Troncos ($1.05\text{--}5.45 \text{ mg L}^{-1}$), al igual que para los cloruros: Hojas ($1.33\text{--}24.13 \text{ mg L}^{-1}$) > Ramillas ($0.89\text{--}6.63 \text{ mg L}^{-1}$) >

Ramas ($0.46\text{--}2.92 \text{ mg L}^{-1}$) > Troncos ($0.21\text{--}2.47 \text{ mg L}^{-1}$), como se puede observar en la figura 59. Tales resultados destacan que el ion sulfato es abundante en la biomasa forestal.

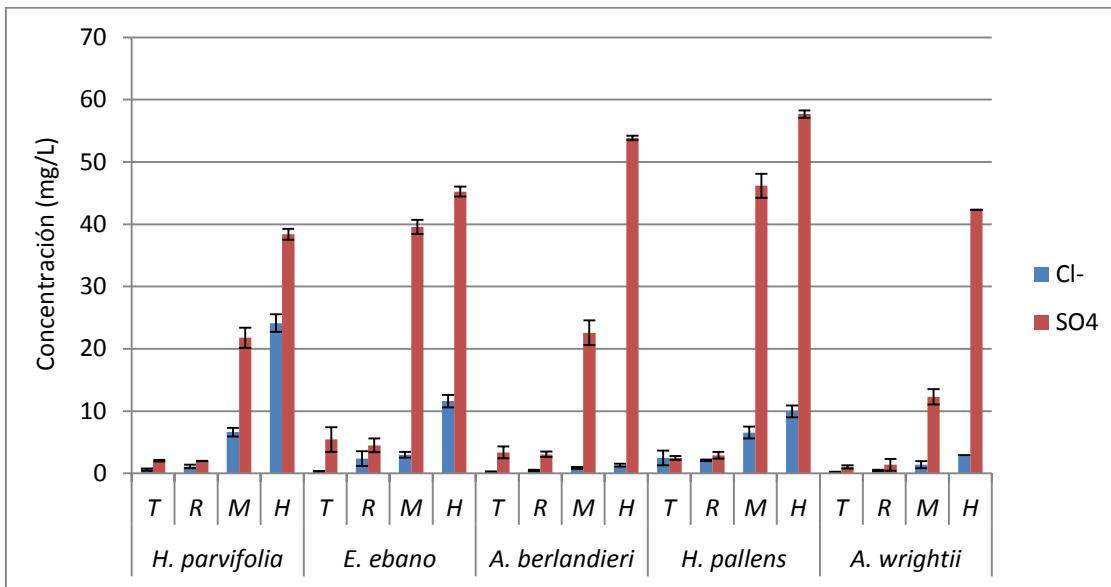


Figura 59. Concentraciones de cloruros y sulfatos en diferentes componentes de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco (T = Tronco, R = Ramas, M = Ramillas, H = Hojas)

En cuanto al carbón vegetal, se registraron variaciones en Ramas ($0.90\text{--}3.07 \text{ mg L}^{-1}$) > Tronco ($0.99\text{--}3.56 \text{ mg L}^{-1}$) para sulfatos, y Ramas ($0.10\text{--}0.82 \text{ mg L}^{-1}$) > Troncos ($0.11\text{--}0.71 \text{ mg L}^{-1}$) para cloruros (Fig. 60). Estos rangos son inferiores a los que observaron las mismas estructuras (ramas y troncos) para las muestras de madera.

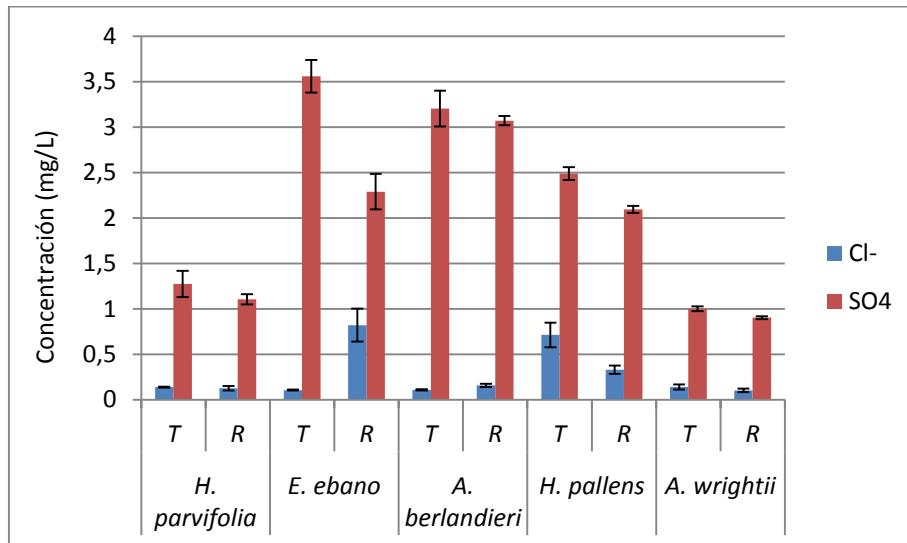


Figura 60. Concentraciones de cloruros y sulfatos en el carbón vegetal de troncos (T) y ramas (R) de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco

9. DISCUSIÓN

9.1. Desarrollo fenológico de las especies estudiadas

9.1.1. Foliación

De acuerdo con Sayed (1998), la pérdida de hojas ha sido observada frecuentemente en respuesta a la sequía, teniendo como objetivo disminuir la transpiración, principalmente en los meses de julio y agosto (verano) en que se presentan las mayores temperaturas además de una notable sequía. En este sentido, las especies en estudio respondieron al no producir hojas nuevas a medida que se extreman las condiciones. Esto concuerda con lo reportado por Pavón y Briones (2001) para nueve especies perennes (3 cactáceas), incluyendo *Prosopis laevigata*, en un ecosistema semiárido en México (Valle de Zapotitlán, Puebla). La pérdida de hojas como tal, ocurre hasta el invierno, en concordancia con lo reportado por Reíd *et al.* (1990), quienes mencionan que en los matorrales del noreste de México, las condiciones climáticas invernales fueron una causa significativa de pérdida de follaje en 1989 en que se alcanzaron temperaturas de -9 °C, y reportaron para 58 especies del matorral un comportamiento semi-caducifolio en el invierno. De igual manera, los mismos autores no enfatizan tampoco el efecto de la sequía y altas temperaturas del medio verano sobre la pérdida de hojas.

9.1.2. Floración

En cuanto a la floración, Cantú-Ayala (1990) reportó para *Prosopis laevigata*, un periodo de floración y fructificación de principios de marzo a mediados de junio, en los años 1965-1986 en el área de Linares, N.L., al igual que Alvarado (2003) en los años 2000-2001. De acuerdo a las observaciones en *H. pallens* y *Z. fagara*, Alvarado (2003) supone que aquellas especies que evolutivamente han optado por desarrollar con mucha anticipación sus botones florales, posiblemente han ajustado la antesis de los mismos con determinadas condiciones ambientales (p. ej. temperatura, precipitación o fotoperíodo), con lo cual corren el riesgo de llevar a maduración los botones al presentarse una determinada condición ambiental y si esta condición no es sostenida, las flores posiblemente no completarán su desarrollo, por lo que

la planta ante esta situación opta por abortarlos tempranamente y no invertir recursos en flores que difícilmente alcanzarán el objetivo final de producir semillas; y para compensar estas pérdidas de estructuras reproductoras la planta ha desarrollado estrategias tales como: a) formar una gran cantidad de botones y ante una determinada condición ambiental favorable madurar solamente una parte de ellos, b) la capacidad de desarrollar nuevamente y con rapidez nuevas estructuras reproductoras y c) flores pequeñas para poder producir muchas y en caso de pérdida el costo sea mínimo.

9.1.3. Fructificación

Este evento fenológico fue el que consumió mayor tiempo en todas las especies estudiadas, ya que desde la formación de frutos embrionarios hasta el final de la dispersión transcurrieron seis meses o más. Por lo tanto, se presentó solo una vez en el año de estudio. Pero en otras especies como *Leucophyllum frutescens* y *Cordia boissieri*, Alvarado (2003) encontró múltiples eventos reproductivos en el año, atribuyéndolo a la rapidez para madurar y dispersar los frutos y semillas.

Con respecto a la época de esta dispersión de frutos y semillas, los presentes resultados indican que estos son más abundantes en el verano y a principios del invierno, lo cual es consecuencia de los mayores picos de floración en primavera y otoño. El verano y el invierno en teoría no presentan las condiciones óptimas para la germinación de las semillas; sin embargo de acuerdo con Jurado *et al.* (2001) en los matorrales del noreste de México no existe una asociación entre la época de producción de semillas y la época de germinación, y por otra parte Jurado *et al.* (1998, 2000), y Flores y Jurado (1998) reportan que las plantas leñosas del matorral del noreste de México muestran una tendencia de germinación en las condiciones de fines de verano y muchas otras especies no muestran una época de preferencia para la germinación. Estos resultados apoyan la teoría de que en las plantas del matorral existen otros factores, más importantes que la época óptima de germinación de las semillas, que determinan la época de producción de semillas y estos pueden ser la disponibilidad de recurso o de agentes polinizadores y/o dispersores (Jurado *et al.* 2001).

Según Sharp y Davis (1989), los ritmos fenológicos de las plantas están determinados por factores ambientales tales como agua, luz y temperatura. Sin embargo en las plantas de zonas

áridas, la disponibilidad de agua quizá sea el factor principal (Sayed, 1998; Pavón y Briones, 2001); esto es congruente con los eventos fenológicos de las especies en estudio, particularmente floración y desarrollo vegetativo. Sin embargo, Alvarado (2003) observó en las especies *A. famesiana*, *A. rígida* y *P. laevigata* que los eventos fenológicos de floración y desarrollo vegetativo están determinados al menos parcialmente, además del agua, por otros factores ambientales, posiblemente temperatura y fotoperíodo.

Es notaría la presencia en la región de un patrón de precipitación bimodal, con lluvias en primavera y otoño, separadas en medio verano por un notable periodo de sequía y altas temperaturas, y en invierno por otro de sequía y temperaturas bajas, lo cual ha determinado significativamente los eventos fenológicos de las especies en estudio ya que la mayor parte de estos eventos se presentaron en primavera y otoño, además de finales de invierno, previo a las lluvias. Esto es congruente con reportes de sistemas estacionales de desarrollo vegetativo y reproductivo (Murali y Sukumar, 1994; Smith-Ramirez y Armesto, 1994; Ghazanfar, 1997; Ramírez, 2002). Sin embargo, de acuerdo con Sakai *et al.* (1999), la floración sincronizada de diferentes especies puede además facilitar la polinización, ya que aumenta la densidad de recursos florales y la atracción de los polinizadores.

9.2. Producción forestal

9.2.1. Número de rebrotes

En todos los casos, el número de rebrotes aparece como un parámetro de útil incidencia en el manejo de estos recursos, ya que tiene una influencia notable sobre la regeneración vegetativa y el crecimiento. De esta forma, *A. berlandieri* y *H. parvifolia* tendrían un alto potencial regenerativo, por sus mejores capacidades de rebrotar. En forma contraria, *H. pallens*, *E. ebano* y *A. wrightii* tendrían dificultad para regenerarse, debido a que por lo regular, presentan solo un fuste, o con máximo dos rebrotes de bajo vigor.

El bajo número de rebrotes que presentaron *Ebenopsis ebano* y *Acacia wrightii* propicia mayor espaciamento entre árboles en las comunidades estudiadas, lo que repercute en una menor competencia, favoreciendo de esta forma, la captación de luz y absorción de nutrientes necesarios para la formación de nuevos rebrotes. Estévez (2004) relaciona el menor número

de rebrotos en la “Barrosa”, a daños sufridos en el lignotuber, que se manifiestan con una ausencia de rebrotos.

9.2.2. Altura total

De manera general, el promedio de las alturas fue de 4.27 m, valor que aproxima la altura promedio de 4 m encontrado para el estrato arbustivo por Jurado y Reid (1989) al describir la composición y estructura de una porción de matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México. Por su parte, Ruiz (2005) en un estudio similar, estableció que la altura promedio de las especies del matorral fue de 3.28 m, presentando a *H. pallens* como la especie de mayor altura con 5 m. García (1999) por su parte, obtuvo en su estudio una altura promedio de 3.2 m, siendo también *H. pallens* la especie con mayor altura con 5.8 m, esto debido a que el estudio se realizó en lugares cercanos a la sierra madre oriental lo cual hace que esta especie sea más predominante y como consiguiente presente mayor altura.

El crecimiento en altura tiene gran influencia en el poder competitivo de una especie además en incrementar el volumen aprovechable en término de producción forestal. Pero por las heladas que hubo durante los periodos de invierno de 1987–1988 (Foroughbakhch y Heiseke, 1990), el desarrollo de las plantaciones tanto en altura como en diámetro fue afectado, por lo que los resultados de las plantaciones no reflejan lo esperado en comparación del matorral nativo, donde las especies son más vigorosas.

9.2.3. Diámetro basal (DB) y diámetro a altura de pecho (DAP)

El diámetro de los árboles se presenta como un parámetro muy importante a tener en cuenta en el aprovechamiento forestal, ya que indica el uso potencial que se le puede dar al recurso. Por ejemplo, las especies de mayor diámetro como *E. ebano* y *A. wrightii* se pueden utilizar para producción de madera aserrada, mientras que las demás especies pueden servir para otros fines como leña, postes, mangos, etc.

En esta perspectiva, Heiseke y Foroughbakhch (1990) evaluaron el incremento en diámetro de cuatro especies por medio del conteo de los anillos de crecimiento a la altura de pecho, en dos comunidades del matorral de la región de Linares: "matorral de planicie" y "matorral de la loma" e indicaron que, para que un árbol alcance un DAP de 6.5 cm, deben

transcurrir 16 años en la planicie y 32 años en la loma. A los 32 años que tienen actualmente las plantaciones estudiadas, los diámetros alcanzados por *E. ebano* y *A. wrightii* superan los 6.5 cm, lo que permite confirmar la predicción hecha para las dos comunidades (matorral de planicie y matorral de la loma).

Por otra parte, se encontró que las especies con mayor número de rebrotes presentan los diámetros más pequeños. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Estévez *et al.* (2004), quienes relacionan la disminución del número de rebrotes con el aumento del diámetro. Esto se puede notar en *Acacia berlandieri*, que registró el mayor número de rebrotes (7 rebrotes/árbol), pero con el diámetro más pequeño (2.77 cm Db y 1.97 cm DAP).

9.2.4. Volumen de madera

De acuerdo con Martínez *et al.* (2006), la finalidad del establecimiento de plantaciones forestales a nivel mundial es para satisfacer la demanda de materia prima industrial, uso doméstico, producción de forraje, postes para la construcción y/o leña. Los resultados observados en *Ebenopsis ebano* y *Acacia wrightii* contradicen esta opinión, ya que el volumen que registró el Matorral nativo fue muy superior al encontrado en plantaciones. Se puede ver en eso, la dificultad que tienen en adaptarse a condiciones artificiales (plantación), en comparación con su desarrollo vigoroso y productivo en condiciones naturales.

9.3. Producción forrajera

9.3.1. Cobertura de especies nativas del MET

Las especies *H. parvifolia*, *A. berlandieri* y *H. pallens* mostraron más rebrotes en condición experimental que en su área nativa (Maginot *et al.*, 2014a), lo que podría justificar la mayor superficie ocupada por sus individuos en plantaciones, como resultado de una gran competencia entre ellos, donde cada uno invierte en expandir sus ramas de manera a ocupar la mayor superficie posible. Por su parte, *E. ebano* y *A. wrightii* ocuparon mayor superficie en su área nativa, donde presentaron menor número de individuos por hectárea, pero con gran espaciamiento. En todos los casos, las especies arbustivas con mayor recubrimiento forrajero presentan un porte más denso que aquellas con bajo recubrimiento de su proyección de copa hacia abajo. En consecuencia, son cerrados, los arbustos con porte más denso, y abiertos

aquellos con porte no denso (menor área de ocupación). De acuerdo con Wilson y Tupper (1982), los resultados obtenidos permiten considerar el parámetro cobertura vegetal como un indicador de impacto del pastoreo o alguna práctica de mejoramiento, ya que cualquier cambio en ella es el primer síntoma de cambios en procesos ambientales como erosión, cantidad de mantillo sobre el suelo y composición botánica.

9.3.2. Biomasa foliar

La mayoría de las especies del matorral florecen y producen hojas al inicio de la primavera, como lo indican los trabajos de Navar y Jurado (2009), lo que explica la máxima productividad registrada en verano, y la más baja en invierno. Estos valores bajos registrados en invierno, ponen de manifiesto el papel del clima como factor determinante en la productividad foliar. El verano parece entonces ser la época propicia para un buen desarrollo de hojas, mientras que en invierno, las diferentes especies solo necesitan un mínimo de hojas para sus funciones fisiológicas.

En muchos estudios realizados en matorral nativo, se ha evaluado un valor de biomasa foliar, mayor a lo encontrado en el presente trabajo realizado en plantaciones experimentales. Por ejemplo, Yerena-Yamallel *et al.* (2011) obtuvieron el valor de 25 Mg ha^{-1} de biomasa foliar en un matorral primario, mientras que Návar (2008) y Bürquez *et al.* (2010) encontraron respectivamente 12.93 y 13.03 Mg ha^{-1} para el matorral espinoso tamaulipeco. Pero en un matorral de desierto, Bürquez y Martínez (2011) señalan un valor de 6.67 y 10.57 Mg ha^{-1} para el matorral espinoso. Tales variaciones se deben a las distintas formas de vida que presentan las diferentes especies en cuestión.

Por otro lado, Eckstein y Karlsson (1997) comprobaron que hay ciertos rasgos de las plantas que están asociados a una alta productividad, y el más decisivo es la relación entre la superficie foliar y su masa. Este razonamiento no se confirmó en el caso de *H. parvifolia*, donde se observa mayor superficie foliar, en comparación con las demás especies estudiadas.

9.3.3. Producción de hojarasca

La menor tasa de producción de hojarasca foliar se registró en otoño, con el valor promedio de $103.59 \text{ Kg ha}^{-1}$ para todas las especies, lo que indica que durante la época otoñal, la planta

reduce su necesidad de alimento al máximo, preparándose para pasar el periodo más frío del año; para ello se desprende de todo aquello que no necesita. Esto se observa más en regiones con climas áridos o semiáridos, donde la abscisión gradual de hojas parece ser una adaptación al estrés hídrico, como lo señalan López-Hernandez *et al.* (2013).

El mayor aporte de hojarasca foliar ocurrió en primavera, con valores de 273.73 a 296.45 kg ha⁻¹, respectivamente para *A. berlandieri* y *A. wrightii*. En un estudio similar, González *et al.* (2008) encontraron que la mayor acumulación de hojas ocurre entre los meses de marzo a mayo.

Piatek y Allen (2000) mencionan que las hojas presentan una alta demanda de nutrientes con respecto al resto de los órganos del árbol, con la precisión de que entre el 30 y el 70% del total de los nutrientes almacenados anualmente se encuentran en las hojas. De esta manera, la cantidad de hojarasca que retorna al suelo y la concentración de nutrientes acumulados en ella determina la cantidad de cada uno de los elementos minerales que retornarán al suelo.

En concordancia con Kimmins (1997), en general, la producción de hojarasca es mayor en zonas húmedas y cálidas con suelos fértiles, mientras que disminuye en zonas secas y frías y con una baja disponibilidad de nutrientes. Esto se debe a que las precipitaciones lavan los nutrientes de las hojas verdes (Wood *et al.*, 2005). En cambio, la sequía puede aumentar las concentraciones en nutrientes de la hojarasca. Sin embargo, la falta de agua en el suelo reduce la actividad microbiana que según Imbert *et al.* (2004), es responsable de la liberación de nitrógeno, fósforo y azufre. La consecuencia de esto es un ralentizamiento en la descomposición de la materia orgánica, lo que provoca una baja productividad en nutrientes. De esta manera, se puede entender que la acumulación de hojarasca no es sinónimo de disponibilidad de nutrientes. Se necesitarían estudios específicos sobre los mecanismos de liberación de los elementos minerales.

El presente estudio provee valores que se encuentran dentro del intervalo definido para plantaciones establecidas con especies características de suelos pobres y degradados (Lim, 1988; Bernhard-Reversat, 1993).

La variación mensual en la producción de hojarasca y sus componentes ha sido reportado con anterioridad por Prause *et al.* (2003) quienes reportaron variaciones mensuales que van de 0.42 a 28.2 g m⁻² año⁻¹. Es importante recordar además, que las especies arbustivas y arbóreas lignifican principalmente en los tallos y no tanto en las hojas, como lo hacen la gran mayoría de las gramíneas utilizadas para el pastoreo. De allí, la mayor estabilidad en la calidad nutricional del follaje de las especies leñosas a través del tiempo.

9.3.4. Producción de herbáceas

A. berlandieri presentó la menor área de copa y fue el arbusto bajo el cual las herbáceas presentes tienen mayor desarrollo. Esto se puede explicar por las hojas compuestas y lo pequeño de sus folíolos (Texas A&M System, 2013), lo que permitió una buena captación de luz solar por parte de las especies asociadas y de baja altura, para una exitosa actividad fotosintética. En forma contraria, *E. ebano* que presentó la mayor cobertura mostró muy poca producción de biomasa herbácea. Chris (2012) encontró resultados similares en cuanto a la cobertura de *E. ebano*, concluyendo que presenta un dosel denso. Además, el mismo autor menciona que es una especie de crecimiento lento, con ramas múltiples que se extienden en zig-zag, y que necesita un gran espacio paisajístico para madurar. Estas ramas en zig-zag son el origen del empobrecimiento del estrato herbáceo observado en las parcelas de *E. ebano* y por ende, de su baja producción de materia seca.

Dado lo anterior, se puede destacar que la oferta forrajera de las especies nativas del MET es muy variable, dependiendo de la densidad del porte de los arbustos. Es máxima en los matorrales más abiertos y mínima en aquellos con alta densidad arbustiva. Es decir, que la cobertura vegetal podría resultar un indicador apropiado de la producción de forraje. Pero con las restricciones observadas en *H. pallens*, se puede entender el planteamiento de Cantú (1990), quien señala que la amplia cobertura de una especie no necesariamente significa que la especie es más productiva que aquella con menor cobertura.

En cuanto a *H. parvifolia*, que produjo menos biomasa en plantación experimental que en su área nativa, se podría explicar por mayor área de ocupación en dicha condición. Pero considerando los efectos de la cobertura aquí demostrados, esta baja producción de biomasa herbácea es más comprensible, al considerar el estudio sobre las propiedades biológicas de

H. parvifolia, realizado por Rovalo *et al.* (1983), quienes reportaron que esta especie ejerce una dominancia en número y biomasa en su comunidad debido a la liberación de cumarinas, alcaloides del tipo de las furanoquinolinas y aceites esenciales al suelo, los cuales evitan la germinación de otras semillas ahí presentes. Es decir que *H. parvifolia* produce un efecto alelopático sobre las herbáceas dentro de sus parcelas.

Sobre la dinámica de disponibilidad de MS en cuestión, el zacate se presentó como una de las especies forrajeras más importantes en la región. Para Saldivar (1998), diversos factores dan constancia de esto dentro de los cuales se destacan: la superficie ocupada por esta especie, de aproximadamente 1'063,000 ha dedicadas a la explotación ganadera, más del 35% corresponden a praderas de riego y temporal de zacate. Asimismo, los zacates poseen una buena adaptación a los diferentes ecosistemas que se encuentran en la región noreste de México, así como buenos atributos forrajeros tales como el contenido de proteínas (7.5% de proteína cruda en base seca) y un alto grado de consumo por parte de los animales (3 Kg /día de zacate verde). Estos y otros atributos determinan que este zacate sea altamente preferido por muchos productores pecuarios no sólo del estado, sino también, del noreste del país.

9.4. Características energéticas y composición química

9.4.1. Producción de carbón vegetal

El rango de 20 a 30% obtenido, coincide con lo reportado por Hernandez y Tello (2014) quienes obtuvieron rendimientos del 22.2 al 40.3% (media = 30.3%) para las mismas especies. De acuerdo a Corradi *et al.* (2013), el rendimiento de carbón comercial no supera el 30%, no sólo por el hecho de que la materia prima influye en el rendimiento del carbón vegetal, sino también, debido al proceso de conversión utilizado. En este estudio, las condiciones de obtención de carbón fueron controladas.

En México, se utiliza generalmente la madera de encino y mezquite para la producción de carbón vegetal. Sería conveniente experimentar con otras especies de zonas semiáridas, que podrían ofrecer una alternativa de ingreso a la población que habita esas regiones de la República Mexicana. Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten posicionar las cinco especies estudiadas dentro de las especies a considerar en dicho proceso, tanto el tronco como las ramas. Sin embargo, es necesario implementar planes de manejo que permitan

aprovechar estas especies de manera apropiada para la producción de carbón vegetal (Galaz, 2004).

Los rendimientos de la carbonización fueron variados debido a diversos factores, entre los que destacan: equipos y procesos utilizados, densidad básica, composición química de la madera, grado de acotamiento, contenido de extractivos y contenido de humedad (Romahn, 1992). En cuanto a los equipos, un factor importante es la clase de horno, el tipo fosa empleado genera carbón con mayor peso, como resultado de emplear temperaturas bajas (< 600 °C), en comparación a los de colmena brasileño que alcanzan temperaturas cercanas a los 1,000 °C (Bustamante-García *et al.*, 2013). Los factores que influyen en la pirólisis son: el radio de carbonización o acumulación de calor, característica de la atmósfera, presión, catalizadores, características de la biomasa (composición química, contenido y composición de las cenizas, tamaño y forma de las partículas, densidad, contenido de humedad, etc.), temperatura del proceso y pretratamientos térmicos (Guardado *et al.*, 2010).

9.4.2. Calidad de biocombustibles

9.4.2.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad registrado para carbón vegetal se encuentra muy por debajo del 8%, que representa el valor estandarizado en conformidad a lo establecido en las normas internacionales, y de acuerdo con Carrillo *et al.* (2013) quienes definieron el carbón vegetal como un material con bajo porcentaje de humedad y poca higroscopidad. Para ellos, los valores de humedad mayores a 8% inducen el consumo de mayor material durante la combustión, para la evaporación del exceso de agua. En estas condiciones, se conoce que el producto es más resistente a la biodegradación, es difícilmente alterable con las condiciones atmosféricas normales y no es afectado por los agentes biológicos que degradan la madera. Para las muestras de madera, a parte de las ramillas de *A. berlandieri*, ramas y ramillas de *A. wrightii* que presentaron valores inferiores a 8% (7.42, 7.97 y 6.88% respectivamente), los demás valores fueron muy arriba del 8%. El contenido más alto de humedad (12.22%) lo registró el tronco de *E. ebano*.

El agua requiere 2.300 kcal/kg para vaporizarse y 1.500 kcal/Kg para alcanzar 700°C durante la pirolisis o gasificación. Un excesivo contenido en humedad impide que se alcancen

temperaturas adecuadas en el horno de carbonización, así como problemas en la regulación y control del proceso. Por otra parte, se producen más inquemados y escorias y se generan humos con elevado contenido en CO. Asimismo, se producen atascos y paradas en los sistemas de alimentación de los equipos de combustión y en los silos, válvulas, etc. (Ortiz, 2006). El contenido de humedad se presenta entonces como el factor clave, muy importante por su influencia en la calidad de un biocombustible.

9.4.2.2. Materias volátiles

Los valores obtenidos son inferiores al rango de 20-30% establecido por Williamson (2006). Los volátiles en el carbón se encuentran en muy poca cantidad comparado a las muestras de madera, lo que procede de su liberación durante el proceso de carbonización. Suele así ser más amigable para el ambiente, utilizar el carbón vegetal como biocombustible, que la madera y/o sus sub-productos.

Los troncos de *E. ebano*, *H. pallens* y *A. berlandieri* mostraron un contenido de materiales volátiles menor al de sus ramas, presentando de esa manera una ventaja desde el punto de visto energético, porque se queman más lento que las ramas, que tienen mayor cantidad de volátiles, como indicaron Cuvilas *et al.* (2014) que las especies con menor material volátil se queman más lento que aquellas con mayor material.

Por otra parte, el resultado de este bajo porcentaje de materiales volátiles es una combustión limpia, cuidadosa del medio ambiente y clave para el uso eficiente del recurso, características importantes señaladas por Luxán y Jiménez (2003) requeridas en las centrales termoeléctricas.

9.4.2.3 Contenido de cenizas

Los valores altos registrados en las hojas de todas las especies, seguidos por las ramillas, apoyan la idea de una desmineralización del tronco hacia las hojas. Esto se debe a que antes de la caída de las hojas, la savia se concentra en ellas y al desprenderse, desmineraliza al tronco (Guadalfajara-Alcalde, 2015).

Determinando la composición química de *Haematoxylum brasiletto*, Ávila-Calderon y Rutiaga-Quiñones (2014) encontraron valores de 4.31% en albura y 2.88% en duramen,

valores semejantes a los promedios obtenidos en este trabajo, para ramas y troncos, respectivamente. Según Cuvilas *et al.* (2014), el combustible con bajo contenido de ceniza es deseable; ya que su acumulación ensucia los intercambiadores de calor y obstruyen el flujo de gases de combustión, con el riesgo de causar problemas en los reactores (Werkelin *et al.*, 2011). Responde a esta expectativa, la especie *A. wrightii*, con los mas bajos contenidos de cenizas obtenidos en sus troncos y ramas, con los valores de 2.05 y 1.68 %, respectivamente. Pero estos valores difieren un poco de los presentados por Hernández y Tello (2014), quienes encontraron que el contenido de cenizas no rebasa el 2%, sus valores fueron 0.47, 0.96, 1.31, 1.34, para *A. wrightii*, *H. parvifolia*, *E. ebano* y *H. Pallens*, respectivamente.

Obernberger y Thek (2010) establecieron que con contenidos de cenizas elevados, se requiere limpieza constante de los equipos de combustión. En efecto, altos valores de elementos inorgánicos pueden provocar que las partículas se dispersen y se adhieran en el interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía; a largo plazo, pueden obstruir el canal de gases de combustión e inducir la corrosión de los hornos, reactores, turbinas y dispositivos de control de emisiones (Liu y Bi, 2011; Werkelin *et al.*, 2011). El tamaño de la biomasa influye notablemente en el contenido de cenizas. Así, Somoza (2014) encontró diferencias significativas entre los contenidos de cenizas de astillas de cuatro especies forestales *Pinus sp.*, *Betula sp.*, *Quercus sp.* y *Populus sp.*, cribadas con mallas de 16 y 8 mm, para producción de astilla y de pélet con la fracción fina, siendo más favorable el primer tamaño de malla, al incluir un menor porcentaje de fracción fina.

Varios autores han notado mayores contenidos de cenizas en las fracciones finas de biomasa forestal residual que forman las hojas, ramillas, y troncos más finos (Nuñez-Regueira, 1996, 1997, 1999 y 2004; Kauter *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2008; García *et al.* 2012) debido a su mayor relación de corteza/madera (Werkelin *et al.*, 2005, 2011; Vega-Nieva *et al.*, 2010c). Por ejemplo, Vega-Nieva *et al.* (2014a) encontraron que los valores promedio de restos forestales con corteza y hojas de varias especies del norte de España sólo serían aptos para producción A2 o B en base a su contenido de cenizas. Para Merino *et al.* (2005), los restos forestales con hojas presentan valores de cenizas no admisibles, además de un elevado riesgo de formación de escorias o sinterizados, debido a su alto contenido de nutrientes.

Adicionalmente, los distintos grados de contaminación por suelo son otro de los factores que pueden incrementar el contenido de cenizas de la biomasa forestal residual (Vega-Nieva *et al.*, 2014b). Por último, la fecha de corte y el tiempo que permanecen los residuos en monte, son factores que afectan el contenido de cenizas de los restos forestales (Kauter *et al.*, 2003; Werkelin *et al.*, 2005, 2011; Nuñez-Regueira, 1996, 1997, 1999 y 2004). Un tiempo prolongado de permanencia en monte puede reducir el contenido de nutrientes y cenizas en los residuos al depositarse las fracciones más finas en el suelo, mejorando la calidad de los residuos como biocombustible y minimizando los nutrientes extraídos (Ortiz, 2006; Merino *et al.*, 2005), lo cual debe de ser ponderado por el riesgo de incendios al mantener los restos en monte sin triturar (Stephens y Moghaddas, 2005).

Cabe señalar que los combustibles con moderado o medio contenido de cenizas pueden presentar alto riesgo de corrosión o de formación de escorias que limiten el funcionamiento de la caldera al presentar nutrientes que formen sinterizados o corroan los intercambiadores. Es por ello que además del contenido de cenizas, debe estudiarse la composición de estas cenizas y su riesgo asociado de sinterización o slagging (Vega-Nieva *et al.*, 2010a, 2014a, 2015) como se discute en el apartado a continuación.

9.4.2.4 Carbón fijo

Las especies *H. parvifolia*, *E. ebano*, *A. wrightii* y el tronco de *H. pallens* presentaron un contenido de carbón fijo superior a 75%, como lo exige el mercado europeo para utilizar el carbón con fines industriales (Carrillo *et al.*, 2013). Pero hay algunas industrias que compran el carbón vegetal sin consideración a que el contenido de carbón fijo alcance alguna cantidad.

Por otro lado, Demirbas (2003) señala que un bajo contenido de carbón fijo aumenta la friabilidad y fragilidad; y disminuye la resistencia a la compresión y cohesión.

9.4.2.5 Poder calorífico

Para el carbón vegetal, los valores obtenidos en el presente estudio son parecidos a los que reportaron Masera *et al.* (2005), que van entre 29,000 y 35,000 KJ kg⁻¹, presentándose como una fuente importante de energía.

En cuanto a las hojas, los valores elevados de poder calorífico registrado, pueden ser atribuidos a la presencia de sustancias extraíbles, ya que según Kollmann (1959), ellas suelen incrementar el poder calorífico. Dichos valores de poder calorífico para las muestras de madera del presente estudio son similares a los encontrados por Quirino (2005) en eucalipto, y se encuentran dentro del rango de 17,882 a 19,629 J g⁻¹ reportado por Francescato *et al.* (2008) para coníferas, lo que es un resultado interesante, que posibilita el uso de residuos de estas cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco estudiadas, para fines energéticos, ya que siempre se ha considerado que las coníferas tienen una potencia calorífica superior a las frondosas (Guadalfajara-Alcalde, 2015).

Desde el punto de vista energético, la FAO (2000) encontró que no hay diferencia entre carbón de las diferentes especies, aunque puede tener diferentes propiedades físicas. En este sentido, se puede extender la producción y uso de carbón vegetal hasta lo producido por ramas, con el fin de disminuir la presión sobre este recurso, que generalmente se hace empleando el tronco, que es la parte más densa del árbol. Esta alternativa da mayor utilidad a las especies que producen muchos rebrotes, con pequeños diámetros, reduciendo la presión que se ejerce sobre las especies de fuste con diámetros mayores.

9.4.2.6 Correlaciones entre las características de biocombustibles ensayados

Se obtuvo que el carbón vegetal es principalmente constituido de carbón fijo, mientras que las maderas se constituyen principalmente por los materiales volátiles. Guardado *et al.* (2010) encontraron resultados similares, indicando que a mayor cantidad de gases volátiles, menor es la cantidad de carbón fijo y viceversa.

Con los valores más elevados de contenidos de cenizas en carbón vegetal que en las muestras de madera tanto para troncos como ramas, se puede entender que mientras más carbón fijo contenga un biocombustible, mayor porcentaje de cenizas producirá.

Estas variaciones están en la base de la diferencia en la calidad de cada tipo de material como biocombustible, conllevando a que la mayor parte de la energía de la biomasa la contiene la materia orgánica. Sin embargo, Jenkins *et al.* (2011) establecen que la fracción inorgánica tiene también importancia, para el diseño y el funcionamiento del sistema de

combustión, particularmente en lo que respecta a las incrustaciones de ceniza. Su generación en cantidades elevadas representa un desafío para la industria química y la producción de energía, debido a los costos y logística para su colecta, transporte, manipulación y almacenamiento (Kargbo *et al.*, 2009).

Jenkins *et al.* (2011) relacionaron también el contenido de ceniza al poder calorífico, concluyendo que las especies con menos de 1% de ceniza por lo regular tienen un poder calorífico cerca de 20 MJ kg^{-1} , mientras que cada aumento de 1% en la ceniza se traduce en una disminución de 0.2 MJ kg^{-1} , debido a que la ceniza en general no contribuye sustancialmente al calor liberado por la combustión, a pesar de que algunos elementos en la ceniza pueden catalizar la descomposición térmica, por lo que la ceniza disminuye la energía disponible por unidad de masa (Jenkins *et al.*, 1998). Dicho resultado explica también la estrecha relación que existe entre carbono fijo y poder calorífico ($P<0.01$), lo que corrobora otra vez lo encontrado en las correlaciones entre el contenido de carbono y el poder calorífico por Jenkins *et al.* (2011), quienes establecieron que cada aumento del 1% en carbono, eleva el poder calorífico en aproximadamente 0.39 MJ kg^{-1} .

Además, la ceniza tiene una reacción alcalina cuando se mezcla con el agua, el pH de la solución se incrementa e induce la corrosión del metal (Karltun *et al.*, 2008). Por eso, Obernberger *et al.* (2006) señalaron que la determinación de la concentración y composición de cenizas es esencial para la elección de tecnologías de combustión y de depuración de gases apropiadas.

El contenido de humedad no presentó correlación significativa ($P>0.05$) con otras variables, por lo que no influye en las demás propiedades del carbón vegetal. Sin embargo, Carrillo *et al.* (2013) obtuvieron una relación entre contenido de humedad y poder calorífico. En cuanto al contenido de materiales volátiles, se detectó una correlación significativa ($P<0.05$) con la ceniza.

9.4.3. Sustancias inorgánicas obtenidas del micro análisis de cenizas

De acuerdo a los resultados obtenidos, los elementos calcio, potasio y magnesio se presentan como principales componentes de las sustancias inorgánicas en la madera. Esto

corrobora los resultados de Fengel y Wegener (1989) y Rojas (2013), quienes han encontrado también mayor proporción de dichos elementos en las cenizas de madera de cuatro coníferas (*Abies religiosa*, *Pinus montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla*), con valores de hasta 80 %. Estos elementos existen en la madera como oxalatos, carbonatos y sulfatos (Hon y Shiraishi, 2001), y pertenecen al grupo de los siete conocido como macro elementos o macronutrientes (magnesio, fósforo, azufre, potasio, calcio y nitrógeno), y que los vegetales requieren para su completo crecimiento (Gil, 1995).

Según Martínez-Perez *et al.* (2012), el calcio es el catión intercambiable mayoritario de los suelos fértiles, que se halla asociado a la materia orgánica del suelo y que en la célula vegetal, es importante en la formación y mantenimiento de las membranas celulares y de las estructuras lipídicas por su facilidad para establecer enlaces reversibles. El alto contenido de este elemento es causado por la presencia de cristales de oxalato de calcio encontrados principalmente en células de parénquima axial y radial (Chattaway 1956; Carlquist, 2001).

El potasio por su parte, forma asociaciones con las proteínas y ayuda a activar enzimas (Gil, 1995). Un elevado contenido en K₂O (15%) en las cenizas de madera ataca los materiales cerámicos de los hogares cuando la temperatura de la combustión es alta (Guadalfajara-Alcalde, 2015). Pero con las bajas temperaturas que se manejan en la práctica, esta situación no se presenta.

En cuanto al magnesio, su función más importante está en relación con la fotosíntesis y el metabolismo glucídico (Gil, 1995).

Por otra parte, se encontraron de manera permanente, trazas de N (0.17–1.53%), P (0.06–5.51%), Na (0.02–1.3%), y Si (0.004–7.59%) en todas las estructuras. El silicio es un elemento que da rigidez a las hojas, mejorando así la fotosíntesis (Gil, 1995). El rango registrado por este elemento es muy amplio, comparado a lo encontrado por Martínez-Pérez *et al.* (2012), de 0.04 a 1.20 % en cortezas de seis árboles frutales.

Para el sodio, el límite superior del rango obtenido es similar a los promedios reportados por Correa-Méndez *et al.* (2014) en las cenizas del aserrín y viruta, 1.4% y 1.0%, respectivamente. Estos valores se aproximan al límite inferior del rango 2.0 - 4.4% encontrado por Revilla (2011), al analizar madera de *P. cembroides*, *P. johannis*, *P.*

maximartinezii y *P. pinceana*. Para el contenido de P, Correa-Méndez *et al.* (2014) publicaron valores promedio de 4.9% en las cenizas del aserrín y 4.0% en la viruta, lo que se encuentra dentro del rango obtenido en el presente trabajo.

Se estima que la composición de la ceniza determina su punto de fusión, es decir, la temperatura a la que forma escoria. Las temperaturas de fusión más bajas son generalmente las del carbón vegetal, con alto contenido de sílice. La ceniza de carbón contiene carbonatos de sodio y potasio y grandes cantidades de silicato combinado con una amplia gama de metales. Según Thyrel *et al.* (2013), estos materiales son propensos a la formación de escoria y ensuciamiento a altas temperaturas, lo que puede reducir la eficiencia del sistema de combustión.

9.4.4. Elementos químicos (C, H, N) en la madera y carbón

Según Raju *et al.* (2014), la calidad de la biomasa combustible es afectada por la proporción de estos elementos. Para Bustamante *et al.* (2015), el hidrógeno se encuentra en la biomasa en forma de humedad y agua de hidratación o como constituyente de los silicatos de la materia mineral. Por tanto, permite determinar la cantidad de agua que se producirá durante la combustión.

Las moléculas de hidrógeno y oxígeno que se liberan en forma de vapor propician una serie de reacciones que resultan de la reorganización de los compuestos para formar gas de síntesis, principalmente H₂, CO y CO₂. El gas de síntesis se convierte en metanol amoniaco u otros productos (Demirbas, 2003). El oxígeno se considera un indicador del rango de oxidación de la biomasa. Calventus *et al.* (2009) aseguran que la cantidad de oxígeno disminuye el poder calorífico del combustible. Además, la cantidad de oxígeno se relaciona con la formación de óxidos de nitrógeno emitidos en los gases de combustión. Con iguales tecnologías la especie de madera influye en el carbón vegetal obtenido de forma sencilla; especies vegetales con mayor contenido de carbono producen carbones con más carbono fijo y de mayor poder calorífico (Marcos, 1989).

El nitrógeno se relaciona con la formación de óxidos de nitrógeno. La cantidad de nitrógeno de la biomasa no produce efectos negativos al medio ambiente si se compara con los combustibles fósiles (Demirbas, 2003; Serrano, 2009).

9.4.5. Componentes químicos de la madera

9.4.5.1. Sustancias extraíbles

Los resultados dejan apreciar que los extraíbles rinden más en ramillas. Sin embargo, los troncos presentaron mayor contenido que las ramas. Rojas (2013) indicó un resultado parecido en coníferas, llegando a concluir que el duramen contiene, en general, mayor porcentaje de componentes extraíbles que la albura.

El patrón obtenido mediante extracción sucesiva, de menor solubilidad en solventes no polares, seguido de mayor solubilidad con disolventes de polaridad media y disminuyendo nuevamente en la extracción acuosa fue observado también en el duramen de *Andira inermis* (Téllez *et al.*, 2010) y en el duramen de *Enterolobium cyclocarpum* (Ramos-Pantaleon *et al.*, 2011).

La menor cantidad de extraíbles obtenida con el ciclohexano es superior al intervalo de 1.03% a 1.33% encontrado por Ávila-Calderon y Rutiaga-Quiñones (2014) en albura, duramen y corteza de *Haematoxylum brasiletto*.

Es conocido que los extraíbles del duramen y la corteza pueden presentar alta resistencia al biodeterioro; a este respecto se ha encontrado que el extracto metanólico de corteza de *Haematoxylum brasiletto* es inhibidor de bacterias y levaduras, en él se ha identificado hematoxilina, brasilina y ácido gálico como los mayores inhibidores de estos agentes biológicos (Rivero, 2008).

El mayor rendimiento obtenido en el solvente metanólico de las especies en estudio sugiere que dichas especies tendrían una fuerte capacidad para resistir a enfermedades. Esta propiedad puede ser utilizada para la sanidad vegetal, como bactericida y fungicida.

Por otro lado, el contenido de extraíbles influye en las propiedades físicas y tecnológicas, al aumentar la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica o disminuir el punto de

saturación de la fibra y el contenido de humedad en equilibrio (Poblete *et al.*, 1991; Ávila y Herrera, 2012). Los rendimientos alcanzados en este trabajo son superiores al rango de 2.4% a 7.7% reportado para especies de pino (Fengel y Wegener, 1989; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006). Esto indica que las especies del matorral espinoso tamaulipeco son menos vulnerables a los diferentes cambios de humedad, posibilitando su multi-uso de manera eficiente en diferentes sectores como construcción, mueblería, artesanía y sobre todo, el sector bioenergético, para sistemas integrados.

9.4.5.2. Lignina Runkel

El rango obtenido para los troncos es superior a los que encontraron Rutiaga *et al.* (2010) en duramen de madera de algunas especies tropicales como *Dalbergia granadillo* (26,25% a 26,50%) y *Platymiscium lasiocarpum* (25,25% a 25,95%). El mayor porcentaje de lignina presentado por los troncos para todas las especies, seguidos por las ramillas y luego por ramas, sugiere una variación del contenido de lignina en los diferentes componentes de un árbol, a diferencia de lo reportado por Fonseca (2006), quien determinó que no había diferencia significativa para los contenidos de lignina a tres niveles de altura del árbol en *P. oocarpa* y *P. maximinoi*.

Los rangos registrados tanto para ramas como para ramillas de las especies estudiadas incluyen el valor más alto publicado por Bernabé *et al.* (2013) para madera de *Pinus leiophylla* (28.5%) y por Rutiaga-Quiñones (2001) para duramen de *P. pseudostrobus* (27.6%).

Desde el punto de vista físico, la madera sufre cambios dimensionales, debido a las variaciones en el contenido de humedad en su interior. Ante estos cambios, el contenido de lignina desempeña un papel importante en el comportamiento de la madera (Bárcenas y Dávalos, 1999), por lo que, el alto contenido de lignina registrado en estas especies de zonas áridas, las conforma como especies de baja contracción, en comparación con la contracción, relativamente alta publicada para las maderas de *P. montezumae* (radial 5.0%, tangencial 6.6%), de *P. oocarpa* (radial 3.3%, tangencial 4.4%) (Herrera-Ferreyra y Bocanegra-Ojeda, 1996) y para *P. michoacana* (radial 3.1%, tangencial 6.9%) (Sotomayor *et al.*, 2010).

En cuanto a la relación entre la lignina y las propiedades mecánicas de la madera, El-Osta *et al.* (1981) encontraron que el alto contenido de lignina proporciona mayor dureza en la pared celular lo que contribuye a incrementar su resistencia a esfuerzos de compresión. Por el contrario, Bodig y Jayne (1993) explican que no está totalmente probada la contribución de la lignina para que la pared celular resista esfuerzos de compresión debido a la restricción del hinchamiento transversal de las microfibrillas. Al respecto, el mayor contenido de lignina que presentó la madera infectada, no explica la disminución de los ELP en compresión paralela y perpendicular, determinada en madera de *Pinus pringlei* infectada con muérdago (Acevedo y Ambriz, 1999). La disminución en los esfuerzos mencionados en la madera infectada, puede estar relacionada, como ya se discutió, con el contenido de holocelulosa y con la estructura anatómica y no con el contenido de lignina.

9.4.5.3. Holocelulosa

La holocelulosa está integrada por celulosa y hemicelulosa, éstas son, en gran medida, los responsables de la resistencia mecánica de la madera. La celulosa es extremadamente resistente a la tensión y otros esfuerzos en dirección longitudinal, debido a los enlaces covalentes dentro del anillo piranoso y entre unidades monoméricas. La resistencia a la tensión de las moléculas de celulosa se debe a los enlaces de hidrógeno, lo que le permite a la molécula absorber los esfuerzos ante esta solicitud (Bergander y Salmén, 2002; Winandy y Rowell, 2005). Otros trabajos recientes han demostrado que las hemicelulosas influyen positivamente sobre la resistencia a la compresión, la dureza y, en general, a su resistencia en la dirección transversal (Winandy y Lebow, 2001; Bergander y Salmén, 2002; Konnerth *et al.*, 2010). Acevedo y Ambriz (1999) encontraron una baja proporción de holocelulosa en madera infectada que en madera sana, indicando que eso puede explicar la disminución de los valores de esfuerzos de la madera de *Pinus pringlei* en flexión estática: al límite de proporcionalidad (ELP) en madera infectada con muérdago (586 kg/m^2) con relación a la madera sana (766 kg/m^2); en compresión paralela, la disminución del ELP (347 kg/m^2) y el esfuerzo máximo ($E_{\max} R 386 \text{ kg/m}^2$) en madera infectada respecto a la madera sana (418 kg/m^2 y 468 kg/m^2 , respectivamente); y en compresión perpendicular la disminución del ELP de madera infectada (116 kg/m^2) respecto al de la madera sana (132 kg/m^2).

9.5. Características físicas

9.5.1. pH

El pH presentó una tendencia a ser más ácido en el interior del fuste, lo que coincide con lo encontrado en latifoliadas por McNamara *et al.* (1970). Se ha reportado resultado similar en duramen y albura de *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* por Rojas (2013), con valores de 4.81 y 4.94, respectivamente.

La no existencia de diferencias significativas ($P>0.05$) entre especies y entre los componentes de las plantas, puede ser atribuido a una mayor cantidad de ácido acético, compuesto de acilo y la interacción entre ellos, como se ha demostrado en algunas especies de latifoliadas (Fengel y Wegener 1989; Volz, 1971).

En cuanto al papel del pH, se señala que es una característica que tiene influencia en el uso de la madera, en la corrosión de metales en contacto con ella, en la fijación de determinados preservantes químicos, entre otros (Fengel y Wegener, 1989; Choon y Roffael, 1990). Visto de esta manera, el presente estudio ofrece una visión a considerar indudablemente para un eficiente uso de las maderas del matorral espinoso tamaulipeco.

9.6. Correlación entre poder calorífico y componentes físico-químicos de la madera

La tendencia del poder calorífico a disminuir cuanto mayor es el contenido de los compuestos inorgánicos, concuerda con la literatura (Fengel y Wegener, 1989; Martínez-Perez *et al.*, 2012). El modelo obtenido de la correlación moderadamente fuerte de la lignina con el poder calorífico coincide con lo reportado por Francescato *et al.* (2008), al reportar que los valores altos de lignina en materiales combustibles incrementan la calidad como combustible. Guadalfajara-Alcalde (2015) reporta un gran poder calorífico en las coníferas, por su riqueza en resinas ($9000 \text{ kcal kg}^{-1}$) y su mayor contenido en lignina ($6000 \text{ kcal kg}^{-1}$).

Rojas (2013) reportó que la lignina constituye uno de los desperdicios industriales más grandes del mundo, cuando es desechada en la forma de derivados de lignina en el licor de sulfito empleado en el proceso industrial de transformación de madera en pasta para papel. Este residuo es frecuentemente propuesto como combustible para la generación de calor mediante la determinación de las propiedades de combustión de residuos ricos en lignina.

Al agregar los extraíbles en el modelo, no se registraron diferencias significativas, lo que contrasta con Browning (1975) citado por Cunha *et al.* (1989), quien asegura que el poder calorífico es más alto cuanto mayor sea el tenor de lignina y extraíbles, porque contienen menos oxígeno que los polisacáridos presentes en la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa).

Por otro lado, algunos componentes de la madera tienen mayor o menor influencia en el desarrollo de la carbonización y en la obtención de productos de la misma. Así por ejemplo, a mayor contenido de holocelulosa incrementa la producción de destilados y el rendimiento de carbón disminuye. Por el contrario la presencia de lignina incrementa la obtención de carbón (Bravo-García, 1995 y FAO, 1983). El rendimiento del carbón vegetal muestra también cierta variación con respecto al tipo de madera, ya que el contenido de lignina en la madera tiene un efecto positivo sobre el rendimiento del carbón. Una madera densa tiende también a producir un carbón vegetal denso y fuerte, lo que es también deseable. Sin embargo, madera muy densa produce en ocasiones carbón quebradizo, puesto que la madera tiende a desmenuzarse durante la carbonización (FAO, 1983).

Dentro de las principales características que definen la calidad y el uso del carbón vegetal, se pueden considerar los contenidos porcentuales de: carbono fijo, material volátil, cenizas, contenido de humedad, rendimiento leña-carbón, densidad y poder calorífico (Pérez y Compean, 1989; Sánchez-Rojas, 1996).

9.7. Grado de contaminación de los combustibles

Según Orozco *et al.* (2005), el sulfato junto con otros iones ejercen un poder incrustante, y de allí la importancia de su determinación para usos industriales, especialmente en el caso de las calderas, ya que este fenómeno en dichos equipos, puede disminuir su efectividad y por consiguiente, su tiempo de vida. Un amplio rango de concentración de este ion se encuentra presente en lluvias ácidas y su determinación proporciona valiosa información respecto a la contaminación y a los fenómenos ambientales; adicionalmente, puede aportar datos acerca del ácido sulfúrico proveniente del dióxido de azufre presente en la atmósfera (Arboleda, 2000).

Se sabe que los sulfatos de sodio y magnesio tienen acción laxante, por lo que no es deseable un exceso de los mismos (Guzmán, 2011; Ríos *et al.*, 2001). El ion sulfato precipita en medio ácido con cloruro de bario formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La concentración de sulfatos en la muestra y la absorbancia luminosa de la suspensión se pueden medir espectrofotométricamente a 420 nm, siendo la concentración de SO_4^{2-} determinada, respecto a una curva de calibración, según los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, AWWA, WEF, 2012).

El ion cloruro (Cl^-) por su parte, es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual (Castillo-Flores, 2010). El contenido de cloruro es variable y se debe principalmente a la naturaleza de los terrenos atravesados. Habitualmente, el contenido de ion de cloruro de las aguas naturales es inferior a 50 mg/L.

En el agua potable, el sabor salado producido por el Cl^- es variable y depende de la composición química de la misma. Al igual que los cloruros, el contenido en sulfatos es muy variable y puede ir desde muy pocos miligramos por litro hasta cientos de miligramos por litro.

Los sulfatos pueden tener su origen en las aguas que atraviesan terrenos ricos en yesos o a la contaminación con aguas residuales industriales. El contenido de sulfatos no suele presentar problema de potabilidad a las aguas de consumo pero, en ocasiones, contenidos superiores a 300 mg/L pueden ocasionar trastornos gastrointestinales en los niños. Se sabe que los sulfatos de sodio y magnesio pueden tener acción laxante, por lo que no es deseable un exceso de los mismos en las aguas de consumo humano.

10. CONCLUSIONES

El estudio sobre el desarrollo de las cinco especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco, constituyó una etapa de gran relevancia, ya que es indispensable en el óptimo diseño de estrategias de manejo y aprovechamiento, para lograr una buena producción de este sistema productivo, afín de plantear proyectos, sea para uso ganadero (follaje), forestal y/o bioenergético.

La mayoría de las especies estudiadas desprendieron sus hojas y las renovaron gradualmente en las épocas favorables del año. La fructificación en la mayoría de los casos se presentó inmediatamente después de la floración y por lo tanto, el número de eventos fue similar, con excepción de *E. ebano* y *H. pallens* en que se presentaron eventos de aborto floral. Los frutos pasaron rápidamente del estado embrionario a frutos inmaduros, y permanecieron en esta etapa durante dos a tres meses hasta alcanzar su madurez alrededor del mes de agosto. Los frutos maduros fueron particularmente abundantes en los meses de julio-agosto y noviembre. Estas variaciones tanto en duración como en intensidad del desarrollo vegetativo y reproductivo del matorral espinoso tamaulipeco se presentaron de acuerdo a las condiciones climáticas, constituyéndose como una herramienta factible para el manejo de este recurso, de manera que se pueden predecir los potenciales cambios en su dinámica, para asegurar su permanencia y sustentabilidad. Los resultados obtenidos justifican el gran potencial de los estudios fenológicos para entender la influencia de los factores climáticos sobre las plantas.

La estimación de cobertura de arbustos y árboles del MET se empleó para evaluar su capacidad productiva de forraje con base a las herbáceas desarrolladas bajo dichas especies, completado por la caracterización y descripción de esta vegetación de herbáceas. Esta capacidad contribuye a asegurar una dieta nutritiva para el ganado, según la influencia protectora de los arbustos del MET, al desarrollo de herbáceas. Se observó que no hay necesariamente una influencia del porte de los arbustos sobre el desarrollo del estrato herbáceo. Sin embargo, las principales especies del MET ofrecieron distintas

disponibilidades de biomasa herbácea. En esta dinámica, *Havardia pallens* y *Acacia wrightii* se presentaron como las especies con las mejores potencialidades, al favorecer notablemente el desarrollo de *Lantana sp.* y *Stipa lessingiana* (zacate) que disponen de buenos atributos forrajeros. La gestión de esta oferta debe orientarse hacia el control de los arbustos, evitando que se cierren en exceso, para limitar de esta manera, el incremento del riesgo de incendios, la pérdida de recursos pastables y la diversidad herbácea. Esta orientación permite determinar tendencias a largo plazo para los productores. En este sentido, se recomendaría aumentar el espacio entre los individuos de *Helietta parvifolia* al momento de plantarlas, dado que son especies muy cerradas. Igual con *Ebenopsis ebano* que requiere de mucho espacio para crecer en buenas condiciones.

La caída de hojarasca en plantaciones de *H. parvifolia*, *E. ebano*, *A. berlandieri*, *H. pallens* y *A. wrightii*, es en promedio cuatro veces menor que la biomasa foliar, con variación significativa en función de estaciones. Tal balance establece una relación funcional entre la producción y la pérdida de hojas, que permite valorar la capacidad que tienen dichas especies para aportar materias orgánicas y nutrientes al suelo para el crecimiento y desarrollo de la vegetación, bajo condiciones edáficas muy desfavorables. Este aporte de materia orgánica varió en función de las especies estudiadas, pero el valor promedio destaca la importancia que revisten estas especies por su potencial utilidad en la rehabilitación de sitios degradados. Para lograr esto, se recomienda una combinación de árboles, para que la hojarasca tenga diferentes niveles de concentración de carbono y nitrógeno, para una mejor calidad del humus formado. La caída de hojarasca se convierte entonces, en una herramienta determinante en el manejo de los ecosistemas en cuestión, por lo que su determinación abre la puerta a la posibilidad de ser valiosa en programas de restauración ecológica y reforestación.

La producción de carbón resulta ser una buena opción para la generación de energía, ya que se presentó en este estudio como un combustible eficiente, por su contenido considerable en carbono, que induce su alto poder calorífico. El carbón de las especies estudiadas en el presente trabajo, tanto del tronco como de las ramas, resultó adecuado para uso doméstico o industrial, ya que cumple con lo establecido en las normas internacionales. Al seleccionar estas especies para utilizarlas como biocombustible, contribuye ineludiblemente al desarrollo socio económico, sin comprometer la existencia -del recurso, y cuidando al mismo tiempo la sanidad del ambiente para el bienestar del poblador.

De acuerdo con el análisis químico, el contenido de sustancias inorgánicas, sustancias extraíbles y de celulosa resultaron ser conforme a lo establecido en las normas correspondientes. Sin embargo, se registraron algunas variaciones entre especies y tambien en las diferentes secciones de cada una. El pH presenta una tendencia ácida en los diferentes componentes de todas las especies. Los principales constituyentes de la cenizas son: potasio, calcio, sodio, silicio, fósforo y magnesio; también el cloro se encuentra en concentraciones significativas en la biomasa, donde el calcio resultó ser el mayor elemento de las cenizas de estas especies. Estos elementos son repartidos según la secuencia ascendente troncos<ramas<ramillas<hojas. Los extractos presentaron el padrón secuencial Metanol>Agua destilada>Acetona>Cyclohexano, de acuerdo a un gradiente decreciente de desempeño, con la mayor proporción en ramillas para *H. parvifolia*, *E. ebano* y *A. berlandieri*, y en troncos para *E. ebano* y *A. wrightii*. En cuanto a la lignina, los valores mas altos se encontraron en troncos de todas las especies, seguido por ramillas, excepto con *H. parvifolia* donde el mayor porcentaje de lignina se reportó en ramas que en ramillas. El poder calorífico presentó mayor valor en troncos de *H. parvifolia*, seguido por *E. ebano* y *A. wrightii*; este mismo patrón se observó en ramas. La correlación entre lignina y pH resultó determinante en el potencial energético. Sin embargo, el contenido total de los inorgánicos es un factor a considerar, ya que indica el monitoreo que se requiere para uso energético.

11. LITERATURA CONSULTADA

- Abascal, F.J.I. 2011. Estudio de factibilidad para la producción de carbón vegetal Corral Viejo en Honduras. Tesis profesional. Carrera de Administración de Agronegocios. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Tegucigalpa, Honduras. 21 p.
- Acevedo, S.B. y Ambriz, P.J.E. 1999. Efecto del muérdago (*Psittacanthus macrantherus* Eichl.) en las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus pringlei* Shaw. Tesis profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 94 p
- Alanís, R.E. 2006. Diversidad de especies arbóreas y arbustivas en áreas con distinto historial antropogénico en el matorral espinoso tamaulipeco. Tesis de maestría. UANL.
- Alanís, E., Jiménez, J., Aguirre, O., Treviño, E., Jurado, E. y González, M. 2008. Efecto del uso del suelo en la fitodiversidad del matorral espinoso tamaulipeco. Ciencia UANL. 11(1):56-62.
- Alvarado-Vazquez, M.A. 2003. Análisis fenológico y algunos aspectos reproductivos en especies selectas del matorral xerófilo del noreste de México. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. 145 p.
- Álvarez, E. 1993. Composición florística, diversidad, estructura y biomasa de un bosque inundable, en la Amazonia Colombiana. Tesis de Magister en Biología, área Ecología. Universidad Antioquia. Medellín.
- Álvarez-Maciel, C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Economía Informa 359: 63-89.
- Alvares-Vergel, R., Blanco González, Colonia Vuelta, J., Fernández Bustamante, A., Fernández Martínez, C., García de la Fuente, M., García Fernández, L., González Álvarez, R., Roces Díaz, J. y García Rubio, J.V. 2011. Estrategia Regional de Aprovechamiento Sostenible de la Biomasa Forestal del Principado de Asturias. Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio. Universidad de Oviedo.
- American Standard of Testing and Materials. 2001. ASTM D 1762-84, Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.
- American Standard of Testing and Materials, 2007. ASTM D1102-84, Standard Test Method for Ash in Wood, ASTM International, 1984, West Conshohocken, PA.
- Andersen, R., Towers, W. y Smith, P. 2005. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. Biomass & Bioenergy 29(2): 73-82.

- Antal, M.J. y Gronli, M. 2003. The Art, Science and Technology of Charcoal Production. American Chemical Society. Published on web 03/14/2003 Hawaii Natural Energy. Institute of the University of Hawaii. 22 p.
- APHA, AWWA, WEF. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th Ed. American Public Health Association/ American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA, pp. 4-188 y 4-190.
- Arboleda, J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia: Ed. Mc Graw Hill, p.31.
- Archibald, S. y Bond, W.J. 2003. Growing tall vs growing wide: tree architecture and allometry of *Acacia karroo* in forest, savanna, and arid environments. *Oikos*, 102(1): 3-14.
- Arias, T., Miranda, K. y Bacalini, P. 2006. Diagnóstico del mercado de carbón vegetal en el noreste de México. Querétaro, México, Conafor-NYDE AC. Informe Técnico. 93 pp.
- Arias, T., Riegelhaupt, E., Martínez, B.R. y Masera, C.O. 2010. Wood fuel development and climate change mitigation in Mexico. In: Forests and Climate Change Working Paper. 70 p.
- Askew, M. y Holmes, C. 2002. The potential for biomass and energy crops in agriculture in Europe, in land use, policy and rural economy terms (Reprinted from Aspects in Applied Biology, vol 65, pg 365-374, 2001), International Sugar Journal 104 (1247): 482.
- ASTM, 1995. Standard test methods for sulfate ion in water. Ed ASTM annual book, USA, D 516-90.
- Ávila, L.E. y Herrera., M.A. 2012. Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque*, 33(2):115-120.
- Ávila-Calderón, L.E y Rutiaga-Quiñones, J.G. 2014. Chemical components of the wood and bark of *Haematoxylum brasiletto* Karsten (*Leguminosae*). *Madera y Bosque* 20(2):153-158.
- Bárcenas-Pazos, G. y Dávalos-Sotelo, R. 1999. Efecto de la lignina en las contracciones de la madera, revisión bibliográfica. *Madera y Bosques*, 5(1):13-26.
- Basaure, P. 2009. Fenología vegetal/Conceptos, aplicaciones. Manual de lombricultura. Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/18577.html>.
- Bassow, S.L., Ford, E.D. y Kiester, A.R. 1990. A critique of carbon-based tree growth models. In Process modeling of forest growth responses to environmental stress. Edited by R.K. Dixon, R.S. Meldahl, G.A. Ruark, and W.G. Warren. Timber Press, Portland, Oreg. pp. 50–57.

- Battey, N.H. 2000. Aspects of seasonality. *Journal of Experimental Botany* 51(352): 1769-1780.
- Baumgartner, J. y Hartmann, J. 2000. The Use of Phenology Models in Plant Conservation Programmes: The Establishment of the Earliest Cutting Date for the Wild Daffodil *Narcissus radiiflorus*. *Biological Conservation* 93:155-161.
- Beatley, J.C. 1974. Phenological events and their environmental triggers in Mojave desert ecosystems. *Ecology* 55: 856-863.
- Benavides, J.E. 1993. Utilización de poró (*Erythrina spp.*) en sistemas agroforestales con ruminantes menores. In: S.B. Westley and M. Powell (Editors), *Erythrina in the New and Old Worlds*, Nitrogen Fixing Tree Association, Paia, HI, USA, pp. 237-249.
- Bergander, A. y Salmén, S. 2002. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. *Journal of Materials Science* 37:51-156.
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L.E.A. y Rutiaga-Quiñones, J.G. 2013. Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques*, 19(2): 21-35.
- Bernhard-Reversat, F. 1993. Dynamics of litter and organic matter at the soil-litter interface in fast-growing tree plantations on sandy ferrallitic soils (Congo). *Acta Oecol.* 14(2):179-195.
- Bernhard-Reversat, F., Loumeto, J.J. y Laclau, J.P. 2001. Litterfall, litter quality and decomposition changes with Eucalypt hybrids and plantation age: In: Effect of Exotic Tree Plantations on Plant Diversity and Biological Soil Fertility in the Congo Savanna: With Special Reference to Eucalypts. Bernhard-Reversat F (ed) Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia. pp: 23-29.
- Bertiller, M.R., Beekow, A.M. y Coronato, F. 1991. Seasonal environmental variation and plant phenology in arid Patagonia (Argentina). *J. Arid Env.* 21: 1-11.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). 2008. Etanol de caña de açúcar – Agroenergia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES. 316 p.
- Bodig, J. y Jayne, B.A. 1993. Mechanics of wood and wood composites. Krieger Publishing Company. Florida, United States of America. 712 p.
- Bohlman, S. y O'Brien, S. 2006. Allometry, adult stature and regeneration requirement of 65 tree species on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 22(2): 123-136.
- Borja, V.M. 2006. Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético. Universidad Politécnica de Valencia. España.

- Branson, A.F., Gifford, G.F., Renard, K.G. y Hadley, R.F. 1981. Range Science Series. No. 1. Second Edition. Rangeland Hydrology. Society for Range Management. Kendall/Hunt Publishing Company.
- Bravo García, L.R. 1995. III Seminario Nacional sobre utilización de encinos Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Bray, J.R. y Gorham, E. 1964. Litter production in forest of the world. Adv. Ecol. Res. 2:101-157.
- Burquez, A., Martinez-Yrizar, A., Nuñez, S., Quintero, T. y Aparicio, A. 2010. Above-ground biomass in three Sonoran Desert communities: variability within and among sites using replicated plot harvesting. Journal of Arid Environments, 74: 1240-1247.
- Burquez, A. y Martinez-Yrizar, A. 2011. Accuracy and bias on the estimation of above-ground biomass in the woody vegetation of the Sonoran Desert. Botany, 89: 625-633.
- Bustamante, G.V., Carrillo, P.A., González, R.H., Corral, R.J.J. y Garza, F.O. 2013. Evaluation and quality profile of the charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla*. Humb., & Bonpl. in Brazilian beehive kiln. Industrial Crops and Products. 42: 169– 174.
- Bustamante-García, V., Carrillo-Parra, A., Corral-Rivas, J.J., Goche-Télles, J.R., Prieto-Ruiz, J.A. y Solís-Moreno, R. 2015. Densificación energética por torrefacción de la biomasa vegetal. En: Biocombustibles sólidos (Eds). Carrillo-Parra, A. y Rutiaga-Quiñones, J.G. Capítulo 7, Pp. 160-183.
- Cabral, I. y Treviño, B. 1989. Efecto de corte en la dinámica de crecimiento de especies de uso múltiples del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México. Simposio Agroforestal de México: sistemas y métodos de uso múltiple del suelo. Facultad de Ciencias Forestales, UANL (memorias) tomo II: 457-469.
- Calventus, Y.A., Carreras, R., Casals, M., Colomer, P., Costa, M., Jaén, A., Monserrat, S., Olivia, A., Quera, M. y Roca, X. 2009. Tecnología energética y medio ambiente – I. Edición de la Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 190 p.
- Campbell, C.J. y Laherrere, J.H. 1998. The end of cheap oil. Scientific American, 3: 78–83.
- Campbell, C.J. 2013 The oil age in perspective. Energy Exploration and Exploitation, 31: 149–165.
- Campos Cisneros, R. 2007. Tecnología de los materiales. Curso, unidad temática I. Facultad de Ingeniería civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Monografías.
- Camps, M.M. y Marcos, F.M. 2008. Los Biocombustibles. 2da Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 361 p.
- Canfield, H.R. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. J. Forestry. 39 (4): 333-394.

- Cantú, B.J.B. 1990. Manejo de Pastizales. 2^a Ed. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Unidad Laguna, Torreón, Coahuila, México. 289 pp.
- Cantú-Ayala, C. 1990. Fenología de la Floración y Fructificación del Mezquite *Prosopis laevigata* (Humb and Bonpl. Ex Willd) M C. Johnst. en Nuevo León y el Efecto de las Cabras sobre la Dispersión de sus Semillas. Reporte Científico No. 18. Fac. de Ciencias Forestales, U.A.N.L. 38 p.
- Cantú-Ayala, C. y Reid, N. 1991. Fruit Production, Phenology and Seed Dispersal Patterns in The Semiarid thornscrub of North-Eastern Mexico. Simposio Internacional sobre Frugivorismo y Dispersión de Semillas. San Andrés Tuxtla, Veracruz.
- Carlquist, S. 2001. Comparative wood anatomy. Springer. 2ed New York. 448p.
- Carrillo, P.A. 1991. Efecto de algunos Tratamientos Silvícolas y de Factores Abióticos sobre la Regeneración y Manejo del Matorral. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N. L., México.
- Carrillo-Parra, A., Foroughbakhch-Pournavab, R. y Bustamante-García, V. 2013. Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4(17): 62-71.
- Carrillo-Parra, A., Contreras-Ortiz, E., Pérez-Pérez, E.E., Bustamante-García, V., Corral-Rivas, J.J. y Goche-Télles, J.R. 2015. BRIQUETAS. En: Biocombustibles sólidos. (eds) Carrillo-Parra y Rutiaga-Quiñones. Universidad Autónoma de Nuevo León. ISBN: 978-607-27 0376-6.
- Castillo-Flores, N. 2010. Determinación de cloruros mediante los métodos de precipitación Mohr y Volhard. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos79/determinacion-cloruros-metodos-precipitacion/determinacion-cloruros-metodos-precipitacion.shtml#ixzz4NvSztbPs>
- Chattaway, M. 1956. Crystals in woody tissues II. Trop. Woods. 104: 100-124.
- Chife, C. 2005. Garantía y control de calidad de materias primas vegetales para fines farmacéuticos. Rev. Lab Ciencia 4: 6-8, 24-26. Disponible en: www.noticias-tecnicas.com
- Choon, K.K. y Roffael, E. 1990. The acidity of five hardwood species. Holzforschung 44(1):53–58.
- Clement, B.A., Christina, M.G. y David, T.A. 1997. Toxic amines and alkaloids from *Acacia berlandieri*. Phytochemistry 46 (2):249-254. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422\(97\)00240-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422(97)00240-9).
- Cordero, T., Márquez, F., Rodríguez-Mirasol, J. y Rodríguez, J.J. 2001. Predicting heating values of lignocellulosic and carbonaceous materials from proximate analysis. Fuel. 80(11):1567-1571.

- Corradi, P.B.L., Carneiro, A., Carvalho, A., Coldette, J., Costa, O.A. y Fontes, M. 2013. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioRes.* 8(3): 1-19.
- Correa, J.B. 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. Fac. de Ciencias Forestales., U.A.N.L., México. 47 págs.
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J.G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E. y Garza-Ocañas, F. 2014. Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 20: 77-88.
- Cortes, G. 1999. Lineamientos para el control de calidad analítica. Ed. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Colombia, 1999, p.11.
- Cruz-Contreras, C. 2012. Residuos generados del aprovechamiento maderable en el estado de Durango. Tesis de Ingeniero Forestal Industrial, Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 83 p.
- Cunha, M.P., Pontes, C.C.L., Cruz, F.I., Cabral, A.M.F., Cunha-Neto, D.Z.B. y Barbosa A.P.R. 1989. Estudio Químico de 55 especies lenhosas para geracao de energía em caldeiras. In, 3º. Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madera. Anais, v.2. São Carlos, Brasil.
- Cunia, T., y Briggs, R.D. 1984. Forcing additivity of biomass tables — some empirical results. *Canadian Journal of Forest Research* 14: 376-384.
- Cuvilas, C., Lhate, I., Jirjis, R. y Terziev, N. 2014. The characterization of wood species from Mozambique as a fuel. *Energy Sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects.* 36(8): 851-857.
- Demirbas, A. 2003. Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management.* 44(9):1465-1479.
- Demirbas, A. 2008. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management* 49: 2106-2116.
- Desclaux, D. y Roumet, P. 1996. Impact of Drought Stress on the Phenology of two Soybean (*Glycine max* L. Merr) Cultivars. *Field Crops Research* 46:61-70.
- Dietze, M.C., Wolosin, M.S. y Clark, J.S. 2008. Capturing diversity and interspecific variability in allometries: A hierarchical approach. *Forest Ecology and Management,* 256(11): 1939–1948.
- DOF. 2014. Programa Nacional Forestal 2014-2018. Diario Oficial de la Federación. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342498&fecha=28/04/2014

- Dragone, G., Fernandes, B., Vicente, A.A. y Teixeira, J.A. 2010. Third generation biofuels from microalgae. In: Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Mendez-Vilas A (Ed.), Formatex, pp. 1355-1366.
- Eckstein, R.L. y Karlsson, P.S. 1997. Above-ground growth and nutrient use by plants in a subarctic environment: effects of habitat, life-form and species. *Oikos* 79: 311-324.
- EIA - Energy Information Administration. International Energy Outlook 2008. September, 2008. 260 p. Disponible en: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/04842008.pdf>
- Eith, C., Kolb, M. y Seubert, A. 2001. Practical ion Chromatography, An Introduction. Herisau: Metrohm Ltd.
- El-Osta, M.L.M., Lotfy, M., Badran, O.A. y Ajoung, E.M.A. 1981. Crushing strength of three sudanese tropical hardwoods in relation to specific gravity, extractive and lignin contents. *Wood Science* 13(4): 225-232.
- Enciso, E.E. 2007. Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. España. 40 p.
- Estévez, I. 2004. Estudio dendroecológico y estructural de *Erica australis* L. Trabajo de Investigación Tutelado. Universidad de Santiago de Compostela.
- Estévez, R. 2014. La guía de la biomasa para tu casa. Disponible en: <http://www.ecointeligencia.com/2014/12/guia-biomasa-para-tu-casa-3/>
- European Food Safety Authority (EFSA), 2012. Compendium of botanicals reported to contain naturally occurring substances of possible concern for human health when used in food and food supplements. EFSA Journal 10 (5): 2663. doi: <http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2663>
- Everitt, H.J. y Lynn, D.D. 1993. Trees, shrubs & Cacti of South Texas. Tech University Press. 213 p.
- Eviner, V.T. 2003. Functional matrix: a conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes. *Annual Review Ecology, Evolution and Systematics* 34:455-485.
- FAO. 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Recuperado el 29 de marzo de 2013 en: <http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S00.htm#Contents>.
- FAO. 2013. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Estudio FAO Montes 163. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Fengel, D. y Wegener, G. 1989. *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*; Walter de Gruyter: Berlín, Germany; p. 415.

- Fernández, M.O.A. 2012. Impactos de la producción clandestina de carbón vegetal sobre los patrones espaciales de degradación forestal en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría en Geografía. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán. 165 p.
- Flores, J. y Jurado, E. 1998. Germination and early growth traits of 14 plant species native to northern Mexico. *The Southwestern Naturalist* 43(1): 40-46.
- Fonseca, M.R. 2006. Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (*Pinus maximinoi* H.E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, 125 p.
- Foroughbakhch, R., Peñaloza, R. y Stienen, H. 1987. Increasing productivity in the matorral of Northeastern Mexico: domestication of ten native multipurpose tree species. Strategies for classification and management of native vegetation for food production in arid zones. USDA Forest Service, general technical report RM-150, Tucson, Arizona, USA. 90-98.
- Foroughbakhch, R. y Heiseke, D. 1990. Manejo Silvícola del Matorral: raleo, enriquecimiento y regeneración Controlada. Reporte Científico No. 19. Fac. de C. Forestales, U.A.N.L. 28 páginas.
- Foroughbakhch, R. 1992. Establishment and Growth potential of fuel wood species in northeastern Mexico. *Agroforestry Systems*, 19: 95-108.
- Forouhbakhch, R., Diaz, R.G., Hauad, L.A. y Badii, M.H. 1996. Three Methods of Determining Leaf Biomass on Ten Woody Shrub Species in Northeastern Mexico. *Agrociencia*. 30: 3-24.
- Foroughbakhch, R., Reyes-Reyna, G., Alvarado-Vázquez, M.A., Hernández-Piñero, J.L. y Rocha, A. 2005. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management* 216: 359–366.
- Fournier, L. y Charpartier, C. 1978. El tamaño de la muestra y la frecuencia de las observaciones en el estudio de las características fenológicas de los árboles tropicales. *Cespedesia*. Suplemento 2, (7): 25-26.
- Francescato, V., Antonini, E., Bergomi, L.Z., Metschina, C., Schnedl, C., Krajnc, N., Koscik, K., Gradziuk, P., Nocentini, G. y Stranieri, S. 2008. Wood Fuels Handbook. AIEL– Italian Agriforestry Energy Association. Legnaro, Italy.
- Fresnillo-Fedorenko, D.E., Fernández, O.A., Busso, C.A. y Elia, O.E. 1996. Phenology of *Medicago minima* and *Enodium cicutarium* in Semi-arid Argentina. *Journal of Arid Environments* 33:409-416.
- Friedel, M.H., Nelson, D.J., Sparrow, A.D., Kinloch, J.E. y Maconochie, J.R. 1994. Flowering and Fruiting of Arid Zone Species of Acacia in Central Australia. *Journal of Arid Environments* 27:221-239.

- Galaz, M.I.M. 2004. Caracterización del sistema de producción de carbón de espino *Acacia caven* (Mol.) Mol, en la comuna de Pumanque, VI Región. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 60 p.
- Gaither, E.R. y Buckhouse, J.C. 1983. Infiltration rates of various vegetative communities within the blue Mountains or Oregon. *J. Range Management*. 36: 58-60.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adecuarlo a las condiciones de la república mexicana, 4 ed. Offset Larios México. 214 p.
- García, H.C., Guyat, D.M.A., Martell, O.D. y Capote, V.P. 2004. Caracterización química del follaje, corteza y madera de cinco especies forestales del grupo de Guamuhaya. *Revista Forestal Baracoa*, 1 (1): 57-65.
- García, H.J. 1999. Caracterización del matorral en condiciones prístinas en el área de Linares, N. L. México. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 68 pp.
- García H.J. y Jurado, E. 2008. Caracterización del matorral con condiciones prístinas en Linares, N.L., México. *Ra Ximhai*. 4 (1): 1-21.
- García, M.J.G. 2010. Determinación de rendimientos y calidad de carbón de residuos de *Quercus* spp, grupo Erythrobalanus, en dos tipos de hornos. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Dgo. p. 91.
- García-Mosqueda, G.E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A., González-Rodríguez, H., Carrillo-Parra, A., Espinosa-Ramírez, M. y García-García, D.A. 2014. Biomasa de dos especies de matorral en tres densidades de plantación en Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 10 (2): 52-59.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A.G. y Bueno, J.L. 2012. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1): 249-258. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>.
- Ghazanfar, S.A. 1997. The phenology of desert plants: a 3-year study in a gravel desert wadi in northern Oman. *Journal of Arid Environments*. 35: 407-417.
- Ghosh, T.K. y Prelas, M.A. 2011. Energy resources and systems: Volume 2. Springer Science + Business Media B.V.
- Gil, M.F. 1995. Elementos de Fisiología Vegetal. Ediciones Mundi-Prensa: Madrid, España.
- Goche-Télles, J.R., Domínguez-Calleros, P.A., Montiel-Antuna, E. y Palacios-Mendoza, C. 2015. Biocombustibles sólidos, una opción sustentable para la producción de energía. En: Biocombustibles sólidos. (eds) Carrillo-Parra y Rutiaga-Quiñones. Universidad Autónoma de Nuevo León. ISBN: 978-607-27 0376-6.
- Gómez, A. 2000. Evaluación de áreas forestales de matorral utilizando un inventario multifásico. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México. 62 pp.

Gómez, P.P.A. 1995. Residuos generados por la industria maderera de la provincia de Talca determinación de las condiciones adecuadas para su briqueteo. Tesis Licenciatura. Universidad de Talca. Talca, Chile.

González, R.H., Cantú, S.I., Ramírez, L.R.G., Gómez, M.V., Domínguez, T.G., Bravo, J.G. y Maiti, R.K. 2008. Spatial and seasonal litterfall deposition pattern in the Tamaulipan thornscrub, Northeastern Mexico. Intern. J. Agric. Environ. Biotechnol. 1:177-181.

González, M.F. 2012. Las Zonas Aridas y Semiáridas de México y su Vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

Guadalfajara-Alcalde, B. de. 2015. Producción de sal culinaria de alta calidad con tecnologías renovables. Tesis, Escuela Técnica superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas de Madrid. 125p.

Guardado, G.M.B., Rodríguez, J.A.R. y Monge, L.E.H. 2010. Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos de retorta y hornos metálicos portátiles en el Salvador. Tesis Profesional Ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. Antiguo Cuscatlán, El Salvador. 67 p.

Guo, J.F., Xie, J.S., Lu, H.L., Liu, D.X., Yang, Y.S. y Chen, G.S. 2004. Carbon return and dynamics of litterfall in natural forest and monoculture plantation of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. For. Studies China 6:33-36.

Gutiérrez, P. y De La Vara, R. 2012. Análisis y diseño de experimentos. México, Editoriales F.T. S.A.D.E C.V. 489p.

Guzmán, G. 2011. Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. Revista internacional de contaminación ambiental(México). 27(2): 89-102.

Heiseke, D. 1984. Regeneración por rebrotos en dos tipos de matorral subinerme de la región de Linares, N.L., Facultad de silvicultura y Manejo de Recursos Renovables, UANL, México, p.17.

Heiseke, D. y Foroughbakhch, R. 1985. El matorral como recurso forestal. Reporte científico No. 1. Facultad de Silvicultura y Manejo de Recursos Renovables. Universidad Autónoma de Nuevo León. 31 p.

Hernández, R.D.I. y Tello, P.S.K. 2014. Propiedades energéticas de la madera y el carbón de 15 especies forestales del noreste de México. División de ciencias forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Mexico. P. 75.

Hernández, H.M. y Carreón-Abud, Y. 1987. Notas sobre la Ecología Reproductiva de Árboles en un Bosque Mesófilo de Montaña En Michoacán, México. Bol. Soc. Bot. México 47:5-35.

Herrera-Ferreyra, M.A. y Bocanegra-Ojeda, S. 1996. Características físico mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia. Ciencia y Tecnología de la Madera, 10:3-11.

- Hinkelmann, K. y Kempthorne, O. 1994. Design and Analysis of Experiments. Volume 1. Introduction to experimental Design. New York: Wiley.
- Hon, D. y Shiraichi, N. 2001. *Wood and Cellulosic Chemistry*, 2nd ed.; Mercel Dekker: New York, NY, USA; p. 914.
- Hopkins, A.D. 1918. The Bioclimatic Law as Applied to Entomological Research and Farm Practise. *The Scientific Monthly*, 8: 496-513.
- Hormazabal, F. 1986. Especies forestales exóticas de interés económico para Chile. Santiago, Instituto Forestal, Vol. 32:61-111.
- Huss, D. L., Bernardón, A.E., Anderson, D.L. y Brun, J.M. 1986. Principios de manejo de praderas naturales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pp.151-180.
- IAASTD. 2009. Bioenergía y biocombustibles: Oportunidades y limitaciones. (Online). Disponible en: <http://www.unep.org/dewa/agassessment/docs/bioenergyESlowres.pdf>
- IDAE. 2007. Energía de la biomasa. Manuales de Energía Renovables. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España. 140 p.
- Imbert, J.B., Blanco, J.A. y Castillo, F.J. 2004. “Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global”. F. Valladares (ed.). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. pp. 479-506. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España.
- Kavvadias, V.A., Alifragis, D., Tsiontsis, A., Brofas, G. and Stamatelos, G. 2001. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *For. Ecol. Manage.* 144:113-127.
- INE. 2007. Condiciones generales del ambiente en la frontera norte de México, segundo capítulo. Instituto Nacional de Ecología
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1997. Carta de uso del suelo y vegetación. Hoja Pachuca. Esc. 1:1 000 000. Sistema meteorológico mexicano. México, D.F.
- INEGI. 2005. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación: escala 1:250 000. Serie III (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes.
- ISO 17225 -1: 2014. Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements.
- IUPAC. 1995. Nomenclatura para cromatografía. Unión Internacional de Química Pura y Aplicada. Madrid: Fareso S.A.
- Jackson, P.E., Thomas, D.H., Donovan, B., Pohl, C.A. y Kiser, R.E. 2001. New block-grafted anion exchanger for environmental water analysis by ion chromatography. *Elsevier. Journal of Chromatography*. 51-60.

- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R. y Miles, T.R. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54:17–46. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3)
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L. y Koppejan, J. 2011. Biomass Combustion. En: Brown, R. C. (Ed.) *Thermochemical Processing of Biomass, Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. Department of Mechanical Engineering, Iowa State University. Iowa. pp 13-33.
- Jiménez, J., Alanís, E., Aguirre, O.A., Pando, M. y González, M.A. 2009. Análisis sobre el efecto del uso del suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco. *Maderas y Bosques*. 15(3):5-20.
- Jiménez, J., Alanís, E., Ruiz, J.L., González, M.A., Yerena, J.I. y Alanís, G.J. 2012. Diversidad de la regeneración leñosa del matorral espinoso tamaulipeco con historial agrícola en el NE de México. *Ciencia UANL*. 15(2):66- 71.
- Jurado, E. y Reid, N. 1989. Influencia de factores edaficos y perturbación sobre el matorral espinoso tamaulipeco en Linares, Nuevo León. Reporte Científico N° 10. Facultad de Ciencias Forestales. U.A.N.L. Linares, N.L., México.
- Jurado, E., Flores, J., Navar, J. y Jiménez, J. 1998. Seedling establishment under native tamaulipan thornscrub and *Leucaena leucocephala* plantation. *Forest Ecology and Management* 105:151-157.
- Jurado, E., Aguirre, O., Flores, J., Navar, J., Villalón, H. y Wester, D. 2000. Germination in tamaulipan thornscrub of north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 46:413-424.
- Jurado, E., Navar, J. Villalón, H. y Pando, M. 2001. Germination associated with season and sunlight for Tamaulipas thornscrub plants in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 49:833-841.
- Kaliyan, N., Vance Morey, R. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products, *Biomass and Bioenergy*. 33: 337–359. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kargbo, F.R., Xing, J. y Zhang, Y. 2009. Pretreatment for energy use of rice straw: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 4(13):1560-1565.
- Karlton, R., Saarsalmi, E., Ingerslev, A., Mandre, M., Andersson, M., Gaitnieks, S., Ozolinus, T., y Varnagiryte-Kabasinskiene, I. 2008. Wood Ash Recycling – Possibilities And Risks. Sustainable Use of Forest Biomass for Energy. In: Röser, D., A. Asikainen, K. Raulund-Rasmussen K. and I. Stupak, (eds.). Springer Netherlands. pp. 79-108.
- Kauter, D., Lewandowski, I. y Claupeina, W. 2003. Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use-a review of the physiological basis and management influences. *Biomass and Bioenergy*, 24:411-427. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00177-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00177-0)

- Kavvadias, V.A., Alifragis, D., Tsiontsis, A., Brofas, G. y Stamatelos, G. 2001. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *For. Ecol. Manage.* 144:113-127.
- Kimmins, J.P. 1997. Forest ecology. A foundation for sustainable management. Prentice-Hall, Nueva Jersey. USA.
- King, D.A. 1996. Allometry and life history of tropical trees. *Journal of Tropical Ecology*, 12: 25–44.
- Kojima, M. y Johnson, T. 2005; Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries. Washington: Energy Sector Management Assistance Programme ESMAP of the International Bank for Reconstruction and Development WORLD BANK. 182 p.
- Kollmann, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones (Vol. 1). Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. Madrid, España.
- Konnerth, J., Eiser, M., Jäger, A., Bader, T. K., Hofstetter, K, Follrich, J., Ters, T, Hansmann, C. y Wimmer, R. 2010. Macro- and micro-mechanical properties of red oak wood (*Quercus rubra* L.) treated with hemicelluloses. *Holzforschung* 64: 447–453.
- Köppen, W. 1931: Grundriss der Klimakunde (Outline of climate science). Walter de Gruyter, Berlin, 388pp. map
- Korol, R.L., Running, S.W., Milner, K.S. y Hunt, E.R. 1991. Testing a mechanic carbon balance model against observed tree growth. *Can. J. For. Res.* 21: 1098-1105.
- Kretschmann, D., Winandy, J., Clausen, C., Wiemann, M., Bergman, R., Rowell, R., Zerbe, J., Beecher, J., White, R., Mckeever, D. y Howard, J. 2007. Wood. Kirt-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, NY. USA. 890p.
- Landsberg, J.J. y Gower, S.T. 1997. Applications of Physiological Ecology to Forest Management. Academic Press. Nueva York, NY, EEUU. 345 pp.
- Ledesma, M., Carranza, C.A. y Balzarini, M. 2010. Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas. *Agriscientia*, Córdoba, 27 (2): 87-96.
- Leith, H. y Whithacker, R. 1975. Primary Productivity of the Biosphere. Ecological Studies v. 14. Springer-Verlag, New York-USA.
- Lim, M.T. 1988. Studies on *Acacia mangium* in Kemasul forest, Malaysia. I. Biomass and productivity. *J. Trop. Ecol.* 4(3):293-302.
- Liu, C.J., Westman, C.J. y Ilvesniemi, H. 2001. Matter and nutrient dynamics of pine (*Pinus tabulaeformis*) and oak (*Quercus variabilis*) litter in North China. *Silva Fennica* 5:3-13.

- Liu, X. y Bi, X.T. 2011. Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass. *Fuel Processing Technology.* 92(7): 1273–1279. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.016>.
- Long, J.N. y Smith, F.W. 1988. Leaf area – sapwood area relations of lodgepole pine as influenced by stand density and site index. *Can. J. For. Res.* 18: 247–250.
- López-Hernández, J.M., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R.G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M.V., Pando- Moreno, M. y Estrada-Castillón, A.E. 2013. Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de nuevo león, méxico. *Polibotánica,* (35) 41-64. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62125675002>
- Luxán, B.A. y Jiménez, A.M. 2003. Energías e impacto ambiental. Equipo Sirius. Pp. 5-143.
- Lu, F. y John, R. 2010. Lignin. In S. Run-Cang, *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biochemicals and Biofuels* (First ed., pp. 169-207). Amsterdam: Elsevier B.V.
- Madrones, C.P. y Saavedra, J.E. 2011. Matriz de contabilidad social extendida ambientalmente para análisis económico de la región del Bío Bío. *Revista de Análisis Económico*, Vol. 26, N°1, pp. 17-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-88702011000100002>
- Marco, D.E., Calviño, A.A. y Sergio, P. 2000. Patterns of Flowering and Fruiting in Populations of *Larrea divaricata* in Dry Chaco (Argentina). *Journal of Arid Environments* 44:327-346.
- Marcos, M.F. 1989. El carbón vegetal: propiedades y obtención. Agroguías mundiprensa. Editorial Mundi-prensa. Madrid, España. 114 p.
- Marquéz, L. y Roy, A. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Fundación Solar, Guatemala.
- Márquez-Montesino, F., Cordero, T.A., Rodríguez-Mirasol, J. y Rodríguez-Jiménez, J.J. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribea* Morelet var. caribea (Pc) y *Pinus tropicalis* Morelert (Pt); *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citrodora* Hook (Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); de la Provincia de Pinar del Río. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(1): 83-89.
- Márquez, M.F. 2009. Aprovechamiento energético de la biomasa forestal: una alternativa sostenible. Universidad del Pinar del Rio. Cuba. 52 p.
- Martínez, R., Azpiroz, R., Rodríguez, de la O., Cetina, A. y Gutiérrez, E. 2006. Importancia de las Plantaciones Forestales de *Eucalyptus*. Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable. Universidad Autónoma Indígena de México.
- Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F.E., Apolinar-Cortes, J., López-Miranda, J. y Rutiaga-Quiñones, J.G. 2012. Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. *Rev. Chapingo SER CIE*, 18:375–384.

- Martín, M.F. 1989. El carbón vegetal propiedades y obtención agroguías Mundi-prensa. Madrid, España. pp. 13-21.
- Martín, M.F. 2001. Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid, España.
- Masera, O.R., Aguillón, J. y Gamino, B. 2005. Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la biomasa como energético renovable en México. Anexo. 2. P 118.
- Masera Cerutti, O.R., Aguillón Martínez, J.E., Arvizu Fernández, J.L. 2006. La Bioenergía en México, un catalizador del desarrollo sustentable. México, CONAFOR. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada A. C. Red Mexicana de Bioenergía. Mundi-Prensa. México. 119p.
- McDicken, K.G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington.
- McMurtrie, R.E., Landsberg, J.J. y Linder, S. 1989. Research priorities in field experiments on fast-growing tree plantations: implications of a mathematical production model. In Biomass production by fast-growing trees. Edited by J.S. Pereira and J.J. Landsberg. Kluwer Academic Publishers, Boston. pp. 181–207.
- McNamara, W.S., Sullivan, S.E. y Higgins, J.C. 1970. pH Measurements on northeastern woods. Wood Sci. 3: 48-51.
- Medina, C.M.C. 1995. Fitodiversidad en relación al tamaño de los fragmentos remanentes del matorral, en Linares, Nuevo León. Tesis de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, U.A.N.L. Linares, Nuevo León, México. 44p.
- Metrohm. 2010. 850 Professional IC. 2.850.2110-Anion MCS Prep 1. Manual. Herisau: Teachware Metrohm AG.
- Mendez, E. 2001. Ecuaciones de Biomasa para especies de matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. Datos con aplicaciones para inventarios de biomasa. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León.
- Méndez, G.J., Luckie, N.S.L., Capó, A.M.A. y Nájera, L.J.A. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. Agrociencia. 45(4):479-491.
- Merino, A., Balboa, M.A., Rodríguez Soalleiro, R. y Alvarez, J.G. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. Forest Ecology and Management 207: 325–339.
- Meza, S.R. 2002. Metodología para evaluar las poblaciones de mezquite (*Prosopis* spp). Folleto Técnico No. 6. INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Todos Santos. La Paz, B. C. S. México. 46 p.

- Mittelbach, G.G., Steiner, C.F., Scheiner, S.M., Gross, K.L., Reynolds, H.L., Waide, R.B., WILLIG, M.R., DODSON, S.I. y GOUGH, L. 2001. What is the observed relationship between species richness and productivity? *Ecology*, 82 (9), 2381–2396.
- Mocchiutti, P. 2007. Fundamentos de la producción de pastas celulósicas.
- Moctezuma, L.G. 2007. Primer ciclo de seminarios de investigación del CENID-COMEF. México DF: En Memorias de Seminario INIFAP-CENID, 38 p.
- Moreno, A.R. 2011. Parámetros químicos de calidad de las aguas. Cloruros y Sulfatos. En: El agua. Calidad y contaminación. Disponible en: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-1-2/parametros-quimicos-calidad-aguas-cloruros-sulfatos>
- Mora, C., Alanís E., Jímenez, J., González M., Yerena, J. y Cuellar, G. 2013. Estructura, Composición Florística y Diversidad del Matorral Espinoso Tamaulipeco, México. *Ecología aplicada*, 12 (1), 2013. ISSN 1726-2216. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Mueller-Dombois, D. y Ellenberg, H. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York.
- Muller, C.H. 1947. Vegetation and climate of Coahuila, México. *Madroño* 9: 33-57.
- Murali, K.S. y Sukumar, R. 1994. Reproductive Phenology of a Tropical Dry Forest in Mudumalai, Southern India. *Journal of Ecology*. 82:759-767.
- Nájera, L.J.A. y Hernández, H.E. 2009. Acumulación de biomasa aérea en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Ra Ximhai* 5:225-230.
- Návar, J., Nájera, J. y Jurado, E. 2001. Preliminary estimates of biomass growth in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 47(3): 281-290.
- Návar, J., Mendez, E., Graciano, J., Dale, V. y Parresol, B. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 59: 657-674.
- Návar, J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management*, 3: 6. Doi 10.1186/1750-0680-3-6.
- Návar, C.J. y Jurado, Y.E. 2009. Productividad foliar y radicular en ecosistemas forestales del Noreste de México. *Rev. Cien. For. Mex*, 34 (106): 89-106.
- Ndudi, A.E.y Gbabo, A. 2015. The Physical, proximate and ultimate analysis of rice husk briquettes produced from a vibratory block mould briquetting machine. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2(5): 2348-7968.
- Niembro-Rocas, A. 1990. Árboles y arbustos útiles de México. Mexico, DF: Limusa, 206.

- Nuñez Regueira, L. 1996. Calorific values and flammability of forest species in Galicia. Coastal and hillsidezone. *BioresourceTecnology* 57:283-289. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(96\)00083-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00083-1)
- Nuñez Regueira, L. 1997. Calorific values and flammability of forest species in Galicia. Continental high mountainous and sumid atlantic zones. *BioresourceTecnology* 61: 111-119. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00053-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00053-9)
- Núñez-Regueira, L., Rodríguez, J., Proupín, J. y Mouriño, B. 1999. Forest waste as an alternative energy source. *Thermochimica Acta* 328: 105-110. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031\(98\)00630-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00630-3)
- Núñez-Regueira, L., Proupín-Castiñeiras, J. y Rodríguez-Añón, J.A. 2004. Energy evaluation of forest residues originated from shrub species in Galicia. *Bioresource Technology* 91: 215-221. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00169-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00169-X)
- Obernberger, I. y Thek, G. 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy*. 27(6):53–69.
- Obernberger, I., Brunner, T. y Bärnthal, G. 2006. Chemical properties of solid biofuels, significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30(11): 973-982.
- Obernberger, I. y Thek, G. 2010. The pellet handbook (1st ed.). London-Washington DC: Earthscan.
- Odum, E.P. 1965. Ecología, estructura y función de la naturaleza. México, CECSA. 201p.
- OMS. 2006. Guías para la calidad del agua potable (primer apéndice a la tercera edición ed., Vol. 1). Versión electrónica para la web. Organización mundial de la salud.
- Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F. y Alfayate, J. 2005. Contaminación ambiental. Una visión desde la química. Ed. Thomson, España, 631-650pp.
- Ortiz Torres, L. 2006. Xiloenergética. Ed. Gamesal. Vigo, 370 pg.
- Ortuño, A.V. 1998. Introducción a la química industrial. Editorial Reverté. [Alhambra Universidad](#). 636p.
- Parresol, B. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45: 573-593.
- Passos, I.S. 2011. Cromatografía iónica. Teoría. Presentación Power Point, Regional Support Centre Latin America, Brazil.
- Patiño, D.J.F. y Smith, Q.R. 2008. Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistemático. In: Revista energética. No. 39. Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia. pp. 19-36.

- Pavón, N.P. y Briones, O. 2001. Phenological Patterns of Nine Perennial Plants in an Intertropical Semi-Arid Mexican Scrub. *Journal of Arid Environments* 49:265-277.
- Pavón, N.P., Briones, O. y Flores, J.R. 2005. Litterfall production and nitrogen content in an intertropical semi-arid Mexican scrub. *J. Arid Environ.* 60:1-13.
- Pérez, M. y Compean, G. 1989. Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango. INIFAP-Durango. Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Pérez, S., Renedo, C.J., Ortiz, A., Manana, M. 2008. Energy potential of waste from 10 forest species in the North of Spain (Cantabria). *Bioresource Technology*, 99:633- 645.
- Pérez, C.A., Goya, J.F., Bianchini, F., Frangi, J.L. y Fernández, R. 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de misiones, Argentina. *Interciencia* 31:794-801.
- Pérez, 2009. Obtención de extractos a partir de plantas medicinales. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos66/extractos-plantas-medicinales/extractos-plantas-medicinales.shtml#ixzz4Nv6A1Blh>
- Piatek, K.B. y Alen, H.L. 2000. "Site preparation effects on foliar N and P use, retranslocation, and transfer to litter in 15-years old *Pinus taeda*". *Forest Ecology and Management*, 129: 143-152.
- PNUMA. 2010. Anuario, avances y programas científicos en nuestro cambiante medio ambiente 2010. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Kenia. pp. 58.
- Poblete, H., Rodríguez, S. y Zárate, M. 1991. Extraíbles de la madera, sus características y efectos sobre la utilización de esta materia prima. Publicación docente núm. 34. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 51 p.
- Prause, G.J., Arce, C. y Angeloni, P.N. 2003. "Variación mensual en el aporte de hojas de cuatro especies forestales nativas del Parque Chaqueño Húmedo (Argentina)". *Revista de Ciencias Forestales- Quebracho*, 10: 39-45.
- Proctor, J., Anderson, J.M., Fogden, S.C.L. y Vallack, H.W. 1983. Ecological studies in four contrasting lowland rainforests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. 11. Litter fall, litter standing crop and preliminary observation on herbivory. *J. Ecol.* 71:261-283.
- Quirino, W. 2005. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira*, n.89, p.100-106, 2005.
- Raev, I., Asan, Ü. y Grozev, O. 1997. Accumulation of CO₂ in the above-ground biomass of the forests In Bulgaria and Turkey in the recent decades. Proceedings of the XI World Forestry Congress 1: 131-138.
- Rai, S.N. y Proctor, J. 1986. Ecological studies on four rainforests in Karnataka, India. II. Litterfall. *J. Ecol.* 74: 455-463.

- Raju, A.I., Ramya, K.J., Satya, M. y Praveena, U. 2014. Studies on development of fuel briquettes for household and industrial purpose. International Journal of Research in Engineering and Technology. 3:2.
- Ramírez, N. 2002. Reproductive phenology, life-forms, and habitats of the Venezuelan central plain. Am. J. Bot. 89 (5):836-842.
- Ramos-Pantaleón, D., Ávila-Calderón, L.E.A., Ochoa Ruíz, H.G. y Rutiaga- Quiñones, J.G. 2011. Contenido de sustancias extraíbles en la madera de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (*Leguminosae*). *Ciencia Nicolaita*, 53: 7-19.
- Reíd, N., Stafford Smith, D.M., Beyer-Münzel, P. y Marroquin, J. 1990. Floristic and Structural Variation in the Tamaulipan Thornscrub, Northeastern Mexico. *Journal of Vegetation Science* 1:529-538.
- Revilla, G.E. 2011. Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección Cembroides. Tesis, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México.
- Ríos, F., Maroto, A. y Bosque, R. 2001. "La validación de Métodos analíticos". Rev. Tec. Lab. (Cuba). 22 (252):12-17.
- Rivero Martínez, R., Rodríguez Leyes, E.A., Menéndez Castillo, R., Fernández Romero, J.A., Barrio Alonso, G. del y González Sanabia, M.L. 2002. Obtención y caracterización preliminar de un extracto de *Aloe vera* L. con actividad antiviral. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 7(1), 32-38. Recuperado en 27 de abril de 2016, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S102847962002000100007&lng=es&tlang=es.
- Rivero-Cruz, J.F. 2008. Antimicrobial compounds isolated from *Haematoxylon brasiletto*. *Journal of Ethnopharmacology* 119(1,2):99-103.
- Rocha Domínguez, L. 1995. Estudio poblacional del falso peyote *Astrophytum asterias* (Zucc.) Lem. (Cactaceae) en una fracción del matorral espinoso tamaulipeco en Villagrán, Tamaulipas. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. U.A.N.L. 116p.
- Rodríguez, R.G.A. 1994. Análisis de la fitodiversidad (sinusias: arbórea y arbustiva) de dos comunidades de matorral espinoso tamaulipeco en Linares, N.L., México. Tesis Profesional. F.C.B., U.A.N.L. San Nicolás de los Garza N.L.
- Rodríguez, L.M.E. 2005. Determinación de los componentes químicos de la madera de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl.) proveniente de la finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, 90 p.
- Rojas, L.L. 2013. Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. 55p.

- Romahn de la, V.C.F. 1992. Principales productos no maderables de México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 376 p.
- Rondón, J.A. 1992. Hábito Fenológico de 53 Especies Arbóreas del Jardín Botánico de San Juan de Lagunillas, Edol Mérida. Rev. For. Venez. No. 35 y 36:23-33.
- Rossi, B.E., Debandi, G.O., Peralta, I.E. y Martínez Palle, E. 1999. Comparative Phenology and Floral Patterns in *Larrea* Species (Zygophyllaceae) in the Monte Desert (Mendoza, Argentina). Journal of Arid Environments 43:213-226.
- Rovalo, M., Grauce, B., González, Ma. E., González, L., Rojas, D. B., Covarrubias, Ma. L. y Magallanes, E. 1983. La barreta o barreto, *Helietta parvifolia*, recurso vegetal desaprovechado del semidesierto del Noreste de México. INIREB p 5-7.
- Ruiz, J.L. 2005. Caracterización estructural del Matorral Espinoso Tamaulipeco, Linares N.L. Tesis de Maestría. FCF_UANL.
- Runkel, R. y Wilke, K.D. 1951. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz. Roh. Werkst.* 9, 260-270.
- Rutiaga, Q.J.G., Pedraza, B.F.E. y López, A.P. 2010. Componentes químicos principales de la madera de *Dalbergia granadillo* Pittier y de *Platymiscium lasiocarpum* Sandw. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(2):179-186.
- Rutiaga Quiñones, J.G. 2001. Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag Gräfelfing, München, 201 S.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa. México, D.F. México. 745 p.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. Acta Botanica Mexicana 14:3-21.
- Sakai, S., Momose, K., Yumoto, T., Nagamitsu, T., Nagamasu, H., Hamid, A. y Nakashizuka, T. 1999. Plant reproductive phenology over four years including an episode of general flowering in a lowland dipterocarp forest, Sarawak, Malaysia. Am. J. of Bot. 86(10): 1414-1436.
- Sakai, S. 2001. Phenological diversity in tropical forests. Population Ecology 43(1): 77-86.
- Saldivar, F. 1998. Persistencia de Praderas de Zacate Buffel. *Seminario Internacional. Forrajes para la Alimentación Animal Sustentable*. Universidad Autónoma Chapingo. 17 y 18 de Febrero. Texcoco, Edo. de México. México.
- Sandermann, W. y Rothkamm, M. 1959. Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz. Roh. Werkst.* 17:433-440.
- Sánchez Rojas, L. 1996. Problemática de la producción de carbón vegetal en hornos fijos de ladrillo en México. Revista Chapingo, Serie "Ciencias Forestales". 2(1):1996.

- Sánchez, A.D. 2012. La biomasa, una oportunidad para las entidades locales. Centro Nacional de Energías Renovables. España. (Online) Disponible en: http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/212/172/4biomasa_cener_david_sanchez.pdf
- Sandoval, G. 2010. Biocombustibles Avanzados en México. Estado actual y perspectivas. Cuadernos temáticos sobre Bioenergía. Edición: Red Mexicana de Bioenergía A. C. México D.F.
- Santa Regina, I., Leonardi, S. y Rapp, M. 2001. Foliar nutrient dynamics and nutrient-use efficiency in *Castanea sativa* coppice stands of southern Europe. *Forestry* 74: 1-10.
- Santillán, J. 1986. Elementos de dasonomía. Chapingo, Universidad autónoma. División de Ciencias Forestales. México, D.F. 346 p.
- Sayed, O.H. 1998. Phenomorphology y Ecophysiology of Desert Succulents in Eastern Arabia. *Journal of Arid Environments* 40:177-189.
- Schefler, W. 1981. Bioestadística. Fondo Educativo Interamericano, México DF, 267 pp.
- Schwanninger, M. y Hinterstoisser, B. 2002. Comparison of the classical wood extraction method using a soxhlet apparatus with an advanced extraction method. *Holz. Roh. Werkst.* 60: 343–346.
- Schwartz, M.D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. *Int. J. Biometeorol.* 42(3): 113-118.
- SEMARNAT. 2007. Anuario Estadístico de la Producción Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. 2010. Compendio de Estadísticas Ambientales 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/index.html>
- SEMARNAT. 2012. Anuario Estadístico de la Producción Forestal. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Internet]. Disponible en <https://semarnat.gob.mx>. [Visitada el 22 de abril del 2014].
- SENA. 1987. Seminario sobre: secado de la madera. Servicio Nacional de Aprendizaje. Disponible en el sitio de red: <http://www.banrepultural.org/blaavirtual/ciencias/sena/carpinteria/madera/maderale.htm>. [Revisado el 26 de mayo de 2016].
- Serrano, A.L.O. 2009. Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid, España. 153 p.
- Sharp, R.E. y Davis, W.J. 1989. Regulation of growth and development of plants growing with restricted supply of water. - In: Hamlyn, G. J., Flowers, T. J. and Jones, M.B. (eds.), *Plants under stress*. Cambridge University Press, pp. 71-93.

- Simanton, R.J., Welts, M.A. y Larsen, H.D. 1991. Rangeland experiments to parameterize the water erosion prediction Project model: vegetation Canopy cover effects. *J. Range Management.* 44: 276-282.
- Skoog, D.A., Holler, F.J. y Crouch, S.R. 2008. Principios de Análisis Instrumental (sexta edición ed.). México: Edamsa Impresiones, S.A. de C.V.
- Smith-Ramirez, C. y Armesto, J.J. 1994. Flowering and Fruiting Patterns in the Temperate Rainforest of Chiloé, Chile - Ecologies and Climatic Constraints. *Journal of Ecology* 82: 353- 365.
- Somoza, L., Vega-Nieva, D. y Ortiz, L. 2014. Quality control of wood chips and wood pellet from the biomass logistic center of Biopalas. Master's Thesis University of Vigo.
- Soto, G. y Núñez, M. 2008. Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 10(2):129-137.
- Sotomayor-Castellanos, L.J., García-Mariscal, J.R., Moya-Lara, C.E. y Olguín-Cerón, J.B. 2010. Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 6(3):3-32.
- SPAIN, A.V. 1984. Literfall and the standing crops of litter in three Tropical Australian rainforests. *L. Ecol.* 72:947-961.
- Stassen, E.H. 2002. Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal. *Unasylva* 211. Madera de energía. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. 53:34. Roma, Italia.
- Steel R.G.D. y Torrie, J.H. 1980. Principles and Procedures of Statistics, Second Edition, New York: McGraw-Hill Book Co.
- Stephens, S.L. y Moghaddas, J.J. 2005. Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest. *For Ecol Manage* 215:21-36. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.070>
- Technical Association for Pulp and Paper Industry (TAPPI). *TAPPI Test Methods (1994–1995)*; TAPPI Press: Atlanta, GA, USA, 2000.
- Téllez, S.C., Ochoa-Ruiz, H.G., San Juan-Dueñas, R. y Rutiaga-Quiñones, J.G. 2010. Componentes químicos del duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (Leguminosae). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(1):87-93.
- Texas A&M System. 2013. Toxic plants of Texas. AgriLife Extension. Department of ecosystem science and management.
- Thurow, L.T., Blackburn, W.H. y Taylor, C.A.Jr. 1988. Infiltration and interril erosion responses to selected livestock grazing strategies, Edwards Plateau, Texas. *Journal of Range Management.* 41: 296-302.

- Thyrel, M., Samuelsson, R., Finell, M. y Lestander, T.A. 2013. Critical ash elements in biorefinery feedstock determined by X-ray spectroscopy. *Applied Energy*. 102: 1288–1294.
- Udvardy, M.D.F. 1975. A classification of the biogeographical provinces of the world. IUCN, Morges, 446 Switzerland, Occas. Paper 18:48.
- Vanclay, J.K. 2009. Tree diameter, height and stocking in evenaged forests. *Annals of Forest Science*, 66(7): 702.
- Van Schaik, C.P., Terborgh, J.W. y Wright, S.J. 1993. The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. 24: 353-377.
- Van Wesemael, B. 1993. Litter decomposition and nutrient distribution in humus profls in some Mediterranean forest in southern Tuscany. *Ecology and Management* 57: 99- 114.
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., y Morgan, T.J. 2012. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, 94:1-33. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K. y Vassileva, C.G. 2013. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel*, 105:19-39.
- Vega-Nieva, D.J., Dopazo, R. y Ortiz, L. 2010. Aspectos Medioambientales del aprovechamiento de la biomasa y cultivos energéticos. En: I Congreso Ibérico de Biocombustibles sólidos. 21-23 Junio 2010, Pontevedra, España.
- Vega-Nieva, D., Alvarez, C. y Ortiz, L. 2014a. Results of new laboratory methods and slagging classification systems for the prediction and quantification of ash slagging in woody and herbaceous biomass fuels. En: Cent. Eur. Biomass Conference, Graz Austria, February 2014.
- Vega-Nieva, D., García-Maraver y Ortiz, L. 2014b. Slagging and fouling risks derived from the combustion of solid biofuels. In: García-Maraver et al. (Eds). *Biomass Pelletization: Standards and Production*. Wit Press.
- Vega-Nieva, D., Ortiz, L., Míguez, J.L. y Moran Gonzalez, J.C. 2015. Measuring and predicting the slagging of woody and herbaceous Mediterranean biomass fuels on a domestic pellet boiler. *Energy & Fuels*. ISSN: 0887-0624, 1520-5029.
- Velazco-Macías, C.G., Alanis-Flores, G., Alvarado-Vázquez, M.A, Ramírez-Freire, L. y Foroughbakhch-Pournavab, R. 2011. Endemic Flora from Nuevo León, Mexico and Adjacent States. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 5:275-298.
- Villalón, M.H., Carrillo, P.A. y Soto, R.J.M., 1991. Comparación de dos Longitudes de Líneas Muéstreos para estimar cobertura en el Matorral Tamaulipeco mediante el Método de Puntos Modificado. Facultad de Ciencias Forestales. Pp.1-19.

- Villalpando, J.F. y Ruiz, J.A. 1993. Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura, UTEHA, México. 134 p.
- Villasana, R.A. y Suárez de Giménez, A. 1997. Estudio Fenológico de Dieciséis Especies Forestales Presentes en la Reserva Forestal Imataca Estado Bolívar-Venezuela. Revista Forestal Venezolana 41(1):13-21.
- Vines, R.A. 1984. Trees, shrubs, and woody vines of the southwest / by Robert A. Vines, with drawings by Sarah Kahlden Arrendale. University of Texas Press, USA 1104 p.
- Vitousek, P.M. y Sanford, R.L. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. Annu. Rev. Ecol. Systemat. 17: 137-167.
- Volpe, C.A. 1992. Citrus Phenology. In: Proceedings of the Second International Seminar on Cítrus Physiology, p. 103-122.
- Volz, K.R. 1971. Holz-Zentralbl. p 97.
- Wackett, L.P. 2008. Microbial-based fuels: science and technology. Microbial Biotechnology, 13: 211-225.
- Waring, R.H. 1985. Imbalanced forest ecosystems: assessments and consequences. For. Ecol. Manage. 12: 93-112.
- Werkelin, J., Skrifvars, B.J. y Hupa, M. 2005. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 1: Summer harvest. Biomass and Bioenergy 29:451-466. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.06.005>
- Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B.J. y Hupa, M. 2011. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. Biomass and Bioenergy 35(1):725-733. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.010>
- West, P.W. 1987. A model for biomass growth of individual trees in forest monoculture. Ann. Bot. (London), 60: 571–577.
- WHO, 2003. Water sanitation health. Chloride in drinking water. (WHO, Ed.) Revisado Enero 28, 2013. en: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/chloride/en/index.html
- WHO, 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization, 4th ed. Switzerland.
- Williamson, C. 2006. The Energy Sector: A Hidden Goliath. In: JCF Walker (Ed.) *Primary Wood Processing*. 2nd Ed. Dordrecht. The Netherlands: Springer. New York. Pp 535-556.
- Williams, G. y Tolome, J. 1996. Litterfall, temperate and tropical dominant tree, and climate in a Mexican lower montane forest. Biotropica 28(4b):649-56.

- Wilson, D.A. y Tupper, J. G. 1982. Concepts and factors applicable to the measurement of range condition. *Journal of Range Management* 35(6): 684-689.
- Winandy, J.R. y Lebow, P.K. 2001. Modeling strength loss in wood by chemical composition. Part I. An individual component model for southern pine. *Wood and Fiber Science* 33(2):239-254.
- Winandy, J.R. y Rowell, R.M. 2005. Chemistry of wood strength. In: Rowell. 2005. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Taylor & Francis. United States of America. pp 303-347.
- Wood, T.E., Lawrence, D. y Clark, D.A. 2005. "Variation in leaf litter nutrients of Costa Rica rain forest is related to precipitation". *Biogeochemistry*, 73: 417-437.
- Woerner, M. 1991. Los suelos bajo vegetación del matorral del noreste de México, descritos a través de ejemplos en el Campus Universitario de la UANL. Reporte Científico No. 22 Facultad de Ciencias Forestales, UANL 116 p.
- Wu, M.R., Schott, D.L. y Lodewijks, G. 2011. Physical properties of solid biomass. *Biomasa and Bioenergy*. 35(5): 2093-2105.
- Xu, X.N. y Hirata, E. 2002. Forest floor mass and litterfall in *Pinus luchuensis* plantations with and without broad-leaved trees. *For. Ecol. Manage.* 157:165-173.
- Yaman, S. 2004. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*. 45(5): 651-671.
- Yan, W. y Wallace, D.H. 1998. Simulation and Prediction of Plant Phenology for Five Crops Based on Photoperiod X Temperature Interaction. *Annals of Botany* 81:705-716.
- Yerena-Yamallel, J.I., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A. y Treviño-Garza, E.J. 2011. Concentraciones de carbón en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(2):283-291.
- Zamudio Sánchez, F.J., Romo Lozano, J.L. y Cervantes Carrillo, J.O.A. 2010. Evaluación financiera y de riesgo de una plantación forestal comercial en Zihuateutla, Puebla. *Rev. Chapingo*.16(1): pp. 69-78.
- Zapata, D.C.M, Ramírez, J.A., León, J.D. y González, M.I.H. 2007. Producción de hojarasca fina en bosques altoandinos de Antioquia, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 60:3771-3784.
- Zar, J.H. 2010. *Biostatistical Analysis* (5th ed.). New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 947.

Artículos científicos publicados con los resultados de esta Tesis

Septiembre 2016. ***Botanical Science***. “Foliar biomass production and litterfall pattern of five timber species in forest plantations of semi-arid lands of the northeastern Mexico”. (En edición)

Marzo 2016. ***Forests***. “Calorific Value and Chemical Composition of Five Semi-Arid Mexican Tree Species. ISSN: 1999-4907, Volume 7(3), Number 58. <http://dx.doi.org/10.3390/f7030058>

Noviembre-2014. ***International Journal of Agricultural Policy and Research***. “Bioenergy potential of shrub from native species of northeastern Mexico”. ISSN: 2350-1561, Vol.2 (12), pp. 475-483. <http://dx.doi.org/10.15739/IJAPR.020>

Agosto-2014. ***International Journal of Current Research and Academic Review***. “Fodder production under canopy of five species of the Tamaulipan torn scrub in the northeast of Mexico”. ISSN: 2347-3215, Volume 2, Number 8, pp. 185-195.

Marzo-2014. ***Open Journal of Forestry***. “Estimation of timber production of five species of the Tamaulipas thorny shrubs growing in native stands and plantations”. ISSN Print: 2163-0429, ISSN Online: 2163-0437, Vol. 4 pp. 239-248. <http://dx.doi.org/10.4236/ojf.2014.43031>

Capítulos de libros, desarrollados con información de esta Tesis

Noviembre 2016. Contenido de humedad y calidad de biocombustibles. Capítulo 1:12-28. En En JG Rutiaga-Quiñones, A Carrillo Parra (Eds) (2016). Química de los Materiales Lignocelulósicos y su Potencial Bioenergético. sierke-Verlag. Goetingen. Berlin. 253p. ISBN 13: 978-3-86844-863-4.

Noviembre 2016. Compuestos inorgánicos de la madera en la combustión. Capítulo 3: 44-69. En JG Rutiaga-Quiñones, A Carrillo Parra (Eds) (2016). Química de los Materiales Lignocelulósicos y su Potencial Bioenergético. sierke-Verlag. Goetingen. Berlin. 253p. ISBN 13: 978-3-86844-863-4.

Noviembre 2015. Conceptualización y caracterización de los pellets madereros en el marco del desarrollo sustentable. Capítulo 5 en: Carrillo-Parra A. y Rutiaga Quiñones J. G. (Eds) “Bio combustibles sólidos”. Primera edición, Universidad Autónoma de Nuevo León. Pp. 120-137. ISBN: 978-607-27 0376-6.

RESUMEN CURRICULAR

MAGINOT NGANGYO HEYA

Nacionalidad:	Camerunesa
Lugar de Nacimiento:	Camerún
Estudios profesionales:	Biología y Fisiología Vegetales
Estancias de Investigación:	Faculty of Resources Management” de la “University of Applied Sciences and Arts” (HAWK), Göttingen, Alemania; y en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
E-mail:	nheyamaginot@yahoo.fr

Candidato para el Grado de Doctor en Ciencias con Acentuación en Manejo y Administración de Recursos Vegetales

Tesis: Potencial forestal, forrajero y bioenergético de especies maderables del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México

Campo de Estudio: Ciencias biológicas

Biografía: Datos Personales: Nacido en Camerún, de Heya Michel y Yango Augustine. Educación: Egresado de la Universidad de Yaoundé I, donde obtuvo la Licenciatura en Biología Vegetal, sesión de Junio 2007, con Mención “Passable”; la Maestría en Biología Vegetal, Opción Botánica-Ecología, sesión de Septiembre 2008, con la Mención “Assez-Bien”; y el Master en Biología Vegetal, Opción Botánica-Ecología, sesión de Septiembre 2011, con la Mención “Très-Bien”.

Cuenta con varios artículos científicos publicados en revistas indexadas y ha participado en varios congresos nacionales e internacionales. Revisor de revistas indexadas como International Journal of Agricultural Policy and Research, Ciencia UANL, entre otros.