

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**ALMACENES Y FLUJO DE CARBONO EN PLANTACIONES FORESTALES DEL  
NORTE DE MÉXICO**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**PRESENTA:**

**ING. FELIPA DE JESÚS RODRÍGUEZ FLORES**

**LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**JUNIO DE 2005**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

ALMACENES Y FLUJO DE CARBONO EN PLANTACIONES FORESTALES  
DEL NORTE DE MÉXICO

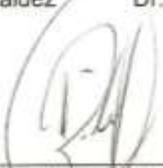
TESIS DE MAestrÍA

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

ING. FELIPA DE JESÚS RODRÍGUEZ FLORES

COMITÉ DE TESIS

 Ph. Dr. José de Jesús Nívar Cháidez Presidente	 Dr. Eduardo Estrada Castellón Secretario
 Dr. Ricardo López Aguillón Vocal	

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

JUNIO DE 2005

## DEDICATORIA

### *A Dios*

*Por haberme dado lo que soy hoy y por lo que seré mañana, gracias por tu bondad, por tu misericordia y por acordarte de mí, en mis ratos de penas y alegrías, por estar en los momentos justos en que te implore; mil gracias por estar siempre conmigo.....Señor*

### *A mis padres:*

*A mi madre Sra. Maria Flores Pérez y a mi padre el Sr. Mauro Rodríguez Salcido por ser los mejores padres del mundo, y aunque no estemos juntos.....sabes papá te quiero mucho. Gracias a los dos por la oportunidad de haberme hecho su hija, por enseñarme el valor de la vida, por educarme con firmeza, y por hacerme saber que las cosas se pueden hacer mientras exista fe, amor, valor, tolerancia, respeto, responsabilidad y sobre todo ganas de seguir luchando ante los retos de la vida.*

### *A mis hermanos y hermanas:*

*A mis Hermanos José Antonio, José Cruz, José Guadalupe, Mauro, Juan Manuel y Nino, a mis hermanas Rosa Elva, Maria Guadalupe, Maria Natividad, Maria y Olga gracias por el valor que me han dado, por el amor que siempre me han demostrado y por su apoyo incondicional que siempre me han brindado, mil gracias por ser quienes son..... mis hermanos*

### *Y:*

*A como olvidar a las esposas de mis hermanos y esposos de mis hermanas, a mis sobrinos (as), gracias por formar la familia que ahora somos y por su apoyo moral e incondicional que me han dado.*

*Saben que los amo, y que esto es por ustedes para seguir superándonos como familia....*

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme el apoyo económico a través una beca crédito para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias Forestales.

Al proyecto denominado “Almacenes y Tasa de Secuestro de Bióxido de Carbono en las Plantaciones Forestales del Norte de México”. Clave No. CONACYT-CONAFOR 2002-C01-6230.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León a través de la Facultad de Ciencias Forestales por aceptarme en su programa de maestría y las facilidades otorgadas para culminar con el presente estudio.

Al Ph. Dr. José de Jesús Nívar Cháidez. Director del trabajo de tesis, por su excelente dirección, apoyo profesional en las diferentes etapas del trabajo, por compartir desinteresadamente sus conocimientos y experiencia, por sus valiosos consejos y observaciones, por la amistad y su paciencia durante la realización de este trabajo de investigación.

A la señora Graciela Mendiola de Nívar, por brindarme su cálida amistad y hospitalidad y sobre todo gracias por compartir el tiempo que le correspondía con nosotros los tesisistas del Dr. Nívar.

Al Dr. Pedro Antonio Domínguez Calleros por su amistad y su confianza.

Al Dr. José A. Prieto Ruiz, por aceptar ser parte de mi comité de tesis, como asesor externo, por su excelente disponibilidad y amistad, por sus valiosas observaciones y comentarios para el mejoramiento hacia este trabajo de investigación

Al Dr. Eduardo Estrada Castellón, por aceptar ser parte de mi comité de tesis, por su excelente disponibilidad y amistad, por sus valiosas observaciones y sugerencias a este trabajo de investigación.

Al Dr. Ricardo López Aguillón por formar parte del comité de tesis de esta investigación, por disponibilidad y amistad, por sus valiosos comentarios y sugerencias, para el mejoramiento de este trabajo de investigación.

A los maestros de la Facultad de Ciencias Forestales, por compartir sus conocimientos y formar parte de mi preparación profesional. Así como al personal académico y técnico de esta institución que de alguna manera participaron en mi

formación académica. En especial a Sandra Cano excelente persona y secretaria de postgrado.

A mi amiga Olga Lidia López González, por tu amistad, tu hospitalidad, por tus consejos y animo que me brindaste durante estos dos años, ojala sigamos igual de amigas para siempre.

A mis amigos Raúl, José Dueñez, Humberto, Rolando y Rodrigo, por sus consejos, sus observaciones muy atinadas a mi persona y sobre todo a mi trabajo, muchas gracias por convivir conmigo estos dos años y por hacernos amigos en los momentos difíciles y felices de nuestra estancia en esta maestría, a Ruth y a Chuy aunque tenemos mas poco tiempo de convivir, se han portado como amigos, ojala nunca olvidemos esta bonita amistad que hemos empezado y donde quiera que estemos, encontremos una vía de comunicación para seguir en contacto.

A Lalo de los Ríos por su amistad, amabilidad y colaboración dentro del laboratorio, por sus pocos pero muy buenos comentarios a este trabajo de tesis.

A mis compañeros de generación: Olga, Raúl, Humberto, Rolando, Mary, José, Eliud, Dorian, Eduardo, Juan Luis, Gabriel, Graciela y Paco, con quienes compartí diversas experiencias durante la carrera.

A los compañeros del laboratorio Lalo de los Ríos, José Dueñez, Jorge Méndez, Enrique Merlín, Julio Ríos, Raúl Espinosa, Humberto González, Rolando Orozco, Flor María, Armando Telles, María Arreola, Ana Estrada, Melissa Puga, Marisela Garza, Manuel Unzueta, Joel y Chencho.

A quienes participaron en forma directa y conjunta en el trabajo de campo para esta investigación de tesis y otras: especialmente a José Dueñez, Raúl Espinosa, Manuel Unzueta, Félix Cervantes, Joel Balboa y Julio Ríos.

A los compañeros que me ayudaron en la toma de datos en Pueblo Nuevo y en San Dimas, Dgo., a Sergio, Chon, Gerardo y Pablo y en Saltillo, Coah. A José Luis y al Teco, demás personas que me ayudaron que no recuerdo sus nombres.

Y a todas aquellas personas que directa o indirectamente me brindaron su apoyo.....son muchas....gracias.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	i
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	v
<b>CAPITULO</b> .....	1
<b>PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES DEL NORTE DE MÉXICO</b> .....	1
<b>1. 1 RESUMEN</b> .....	1
<b>1. 2 ABSTRACT</b> .....	2
<b>1. 3 INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>1. 4 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	5
1. 4. 1 Localización del área de estudio.....	5
1. 4. 2 Características del área de estudio.....	5
1. 4. 3 Diseño del muestreo.....	7
1. 4. 4 Estimación de biomasa área y raíces.....	8
1. 4. 5 Estimación de biomasa del mantillo orgánico y necreomasa.....	9
1. 4. 6 Análisis estadístico.....	9
<b>1. 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	10
1. 5. 1 Productividad de las Plantaciones evaluadas.....	12
1. 5. 2 Productividad en plantaciones del estado de Durango.....	12
1. 5. 3 Productividad en plantaciones del estado de Nuevo León.....	14
1. 5. 4 Productividad en plantaciones del estado de Coahuila.....	16
<b>1. 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	18
<b>1. 7 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	19

ÍNDICE

	Página
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>21</b>
<b>ECUACIONES PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO E INCREMENTO EN ÁREA BASAL, VOLUMEN, BIOMASA Y ALMACEN DE CARBONO EN SITIOS REFORESTADOS EN EL NORTE DE MÉXICO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 RESUMEN.....</b>	<b>21</b>
<b>2. 2 ABSTRACT.....</b>	<b>22</b>
<b>2. 3 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>23</b>
<b>2. 4 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
2. 4. 1 Localización del área de estudio.....	24
2. 4. 2 Características de las áreas de estudio.....	24
2. 4. 3 Diseño Muestreo.....	26
2. 4. 3 Análisis estadístico.....	27
<b>2. 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>31</b>
<b>2. 6 CONCLUSIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>2. 7 BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1 Ubicación de los sitios reforestados estudiados en el Norte de México.....	5
Figura 2 Análisis estadístico multivariado de análisis de correspondencia canónica sin tendencia (DCCA) aplicadas a datos de las parcelas muestreadas en el Norte de México.....	11
Figura 3 Curvas de productividad de biomasa para plantaciones del estado de Durango.....	14
Figura 4 Curvas de productividad de biomasa para plantaciones del estado de Nuevo León.....	16
Figura 5 Curvas de productividad de biomasa para la especie <i>Pinus halepensis</i> para el estado de Coahuila.....	18

### **CAPITULO II**

Figura 1 Distribución de las áreas reforestadas en los estados de Durango, Nuevo León y Coahuila .....	25
Figura 2 Estimaciones de curvas de índices de sitio para las áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila(c) del norte de México.....	31
Figura 3 Áreas basales muestreadas y estimadas para las áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila(c) del norte de México.....	33
Figura 4 Volumen muestreado y estimado para las áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila(c) del norte de México.....	35

Figura 5 Biomasa muestreada y estimada para las áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila(c) del norte de México.....37

Figura 5 Carbono muestreado y estimado para las áreas reforestadas de Durango (a) Nuevo León (b) y Coahuila(c) del norte de México.....38

## ÍNDICE DE CUADROS

### CAPITULO I

Tabla 1 Especies y localización de las plantaciones muestreadas en el Norte de de México.....	6
Tabla 2 Ecuaciones para estimar la biomasa aérea y de raíces, sugeridas por Návar <i>et., al</i> (2001).....	9

## CAPÍTULO I

### PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES DEL NORTE DE MÉXICO

#### 1. 1 RESUMEN

La reforestación es importante en la conservación de suelos, en el mejoramiento del hábitat para flora y fauna, en la regulación del ciclo hidrológico, en la recarga de los mantos acuíferos, en la producción de oxígeno y captura de carbono, entre otros. Este último tema se ha discutido en virtud del potencial que representan las prácticas de reforestación para reducir el efecto invernadero. La estimación de la producción de biomasa juega un papel importante en el amortiguamiento del cambio climático por las áreas reforestadas. En esta investigación se midieron los parámetros dasométricos de los árboles reforestados, de mantillo orgánico y necromasa de 124 parcelas plantadas con 10 especies de pino en los estados de Durango, Coahuila y Nuevo León, de las Sierras Madre Occidental y Oriental.

Se estimaron los componentes de biomasa por árbol y parcela con el uso de ecuaciones alométricas desarrolladas para este propósito. Se obtuvieron curvas de productividad de biomasa con el ajuste de modelos no lineales. Con base a los resultados obtenidos se presentan las potencialidades diferenciales de las especies y sitios para producir biomasa total, fustal, ramal, foliar y radical, para que puedan ser sometidos a programas de captura de carbono. Otras ventajas adicionales de estas áreas reforestadas son: que la mayoría de las especies estudiadas fueron plantadas en sitios degradados, incendiados o desprovistos de vegetación; son especies, en general nativas de los sitios y no contrastan con el ecosistema

circundante. Es importante agregar que dos especies se encuentran listadas en la NOM-059-ECOL-2001.

**Palabras claves:** Sitios degradados, productividad, servicios ambientales

## **1. 2 ABSTRACT**

Site reforestation is important in soil conservation, biodiversity habitat, aquifer recharge, the hydrological cycle regulation, oxygen production and carbon sequestration, among others. The latest issue has been widely discussed because of its environmental importance to amortigate the nurse effect. Biomass estimation plays an important role to buffer climate change in reforested sites. In this research we measured the dasometric parameters of reforestation, litter, and necromass of 124 reforested sites with 10 tree species in the Mexican States of Durango, Coahuila, and Nuevo Leon of the western and eastern Sierra Madre mountain ranges. Biomass components were estimated by using allometric equations derived for this purpose. We estimated productivity curves by fitting non linear models to biomass and age of reforestation. The results stress the sites and species with highest potential to produce total, bole, branch, leaf, and root biomass with the aim to restore plant cover and promote environmental services by carbon sequestration. Most tree species planted were native to sites and had the advantages that they were planted in degraded sites, burned areas, or sites with no tree cover. Two tree species are listed in the red conservation book.

**Key words:** Degraded sites, biomass productivity, environmental services.

### 1. 3 INTRODUCCIÓN

México es un país que con un alto potencial para el desarrollo de plantaciones forestales. Se estima que existen 8.1 millones de hectáreas con gran variabilidad de climas y suelos que permiten el desarrollo y crecimiento de plantaciones forestales, que pueden alcanzar altos valores de productividad (CONAFOR, 2004).

Si bien el aumento de la demanda de fibras, celulosa y de los derivados de madera ha propiciado el establecimiento de plantaciones forestales de rápido crecimiento, los programas gubernamentales nacionales y los esfuerzos locales tienden a establecer plantaciones en ecosistemas forestales degradados, incendiados y que por causas antropogénicas y/o naturales están perdiendo su productividad (Mesera,1996).

Este tipo de plantaciones o reforestaciones, por sus características de desarrollo y crecimiento desempeñan un papel importante en la captura de bióxido de carbono, a través de la acumulación de la biomasa de hojas, ramas, fuste, raíces, mantillo orgánico, necromasa y suelos, estos compartimientos almacenan el carbono y disipan el oxígeno hacia la atmósfera en el proceso de la fotosíntesis (Brown, 1997). Esto sucede a una tasa mayor que el ecosistema natural por sus características de alta densidad que alcanzan a los 10-15 años de edad y por la pronta disponibilidad de planta, en contraste con la regeneración natural (Návar *et al.*, 2001).

En México existen pocos estudios de producción de biomasa en plantaciones forestales o en sitios reforestados y como consecuencia de los servicios ambientales que proporcionan (Návar *et al.*, 2004). Sin embargo, con los incentivos gubernamentales que se están otorgando, tanto nacionales como internacionales, a través de los instrumentos económicos como el Mecanismo de Desarrollo Limpio propuesto en el Protocolo de Kyoto, el banco Mundial y las propuestas de la UNFCCC (Convención del Marco de Naciones Unidas en el Cambio Climático) se abre la posibilidad de establecer plantaciones forestales, reforestar sitios degradados,

establecer forestaciones prácticas de forestación, etc. con fines de captura de bióxido de carbono, en el amortiguamiento del cambio climático y como consecuencia lograr el aprovechamiento sostenible del recurso forestal.

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de medir los componentes de biomasa en la vegetación (hojas, ramas, fuste, raíces, mantillo orgánico y necromasa), desarrollar curvas de productividad y recomendar las especies y sitios en los cuales se permita proyectar la densidad de biomasa con el fin de establecer proyectos de servicios ambientales en el norte de México.

## 1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.4.1. Localización de las áreas de estudio

Esta investigación se desarrolló en sitios reforestados de la Sierra Madre Occidental, en Durango y de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León y Coahuila, México (Figura 1).

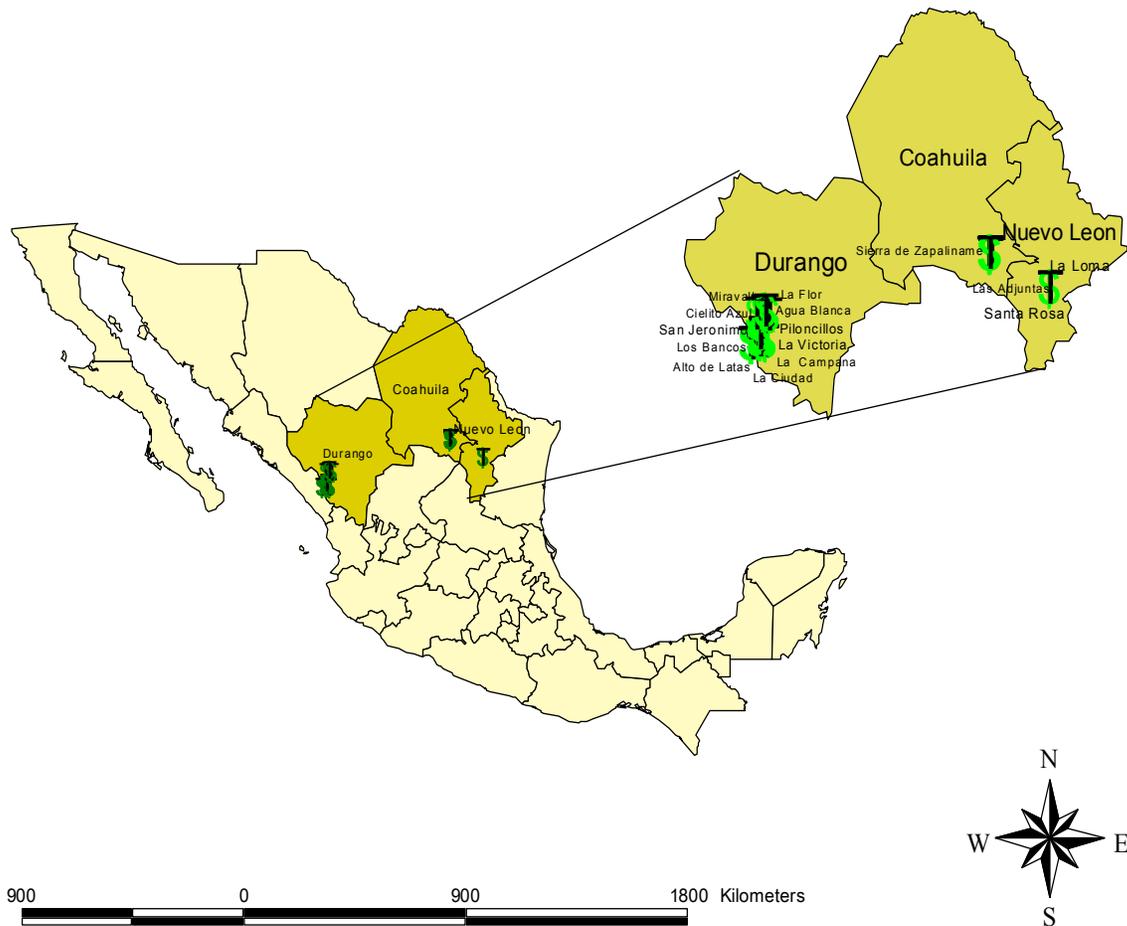


Figura 1. Ubicación de los sitios reforestados estudiados en el Norte de México.

### 1.4.2. Características de las áreas de estudio

La información se colectó de 38 parcelas reforestadas de Durango, establecidas para restauración y protección. En Nuevo León se tomaron datos de 46 parcelas plantadas, (dos de ellas corresponden a ensayos de procedencia) con fines

de investigación. En Coahuila, se tomaron datos de 40 parcelas en ocho áreas reforestadas en la Sierra de Zapalinamé. Las especies y localización de las plantaciones evaluadas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro1. Especies y localización de las plantaciones muestreadas en el Norte de México.

Especie	Estado	Municipio	Predios	Altitud	Longitud	Asnm	No parcela
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	Pueblo Nuevo	La Campana	23°68'98"	105°56'91"	2690	4
<i>P. engelmannii</i> Carr. y <i>P. durangensis</i> Mart.	Durango	Pueblo Nuevo	San Jerónimo)	23°84'00"	105°52'73"	2752	4
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	Pueblo Nuevo	Los Bancos	23°68'98"	105°71'99"	2690	4
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	Pueblo Nuevo	La Victoria	23°69'64"	105°42'11"	2824	6
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	Pueblo Nuevo	Alto de Latas	23°72'88"	105°52'04"	2849	4
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	Pueblo Nuevo	Piloncillos	23°73'34"	105°46'79"	2685	2
<i>P. cooperi</i> Blanco, <i>P. arizonica</i> Engel. y <i>P. durangensis</i> Mart.	Durango	Pueblo Nuevo	La Ciudad	23°77'46"	105°53'81"	2800	8
<i>P. engelmannii</i> Carr.	Durango	San Dimas	Agua Blanca	24°25'27"	105°47'37"	2542	3
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	San Dimas	Cielito Azul	24°21'53"	105°39'56"	2748	1
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	San Dimas	Miravalles	24°20'04"	105°59'36"	2583	1
<i>P. cooperi</i> Blanco	Durango	San Dimas	La Flor	24°26'28"	105°42'03"	2499	1
<i>P.pseudostrobus</i> Lindl.	Nuevo León	Iturbide	Santa Rosa	24°69'99"	99°85'99"	1562	2
<i>P. nelsonii</i> Shaw. , <i>Pinceana</i> Gord & Glend., <i>P.</i> <i>cembroides</i> Zucc.	Nuevo León	Iturbide	La Loma	24°70'70"	99°86'40"	1562	21
<i>P.pseudostrobus</i> Lindl.	Nuevo León	Iturbide	La Loma 1	24°69'99"	99°85'99"	1562	1
<i>Cupressus arizonica</i> Greene*	*Nuevo León	Iturbide	La Loma 1	24°69'99"	99°85'99"	1667	1
<i>P. nelsonii</i> Shaw. , <i>Pinceana</i> Gord. & Glend. y <i>P.</i> <i>cembroides</i> Zucc.*	*Nuevo León	Iturbide	Las Adjuntas	24°69'89"	99°86'03"	1562	21
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 1	25°32'14'	101°03'79"	1820	5
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 2	25°34'61"	101°01'59"	1780	5
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 8	25°34'41"	101°03'16"	1820	4
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 11	25°33'69"	101°01'82"	1820	6
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 13	25°33'39"	101°02'44"	1820	5
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 14	25°33'99"	101°03'25"	1820	5
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 15	25°34'32"	101°03'45"	1780	5
<i>P. halepensis</i> Mill.	Coahuila	Saltillo	Area 16	25°34'71"	101°01'84"	1871	5

\*Ensayo de procedencia

La mayor parte de las áreas reforestadas tienen diferentes características fisiográficas, climáticas y de suelos. Las regiones del Estado de Durango se caracterizan por tener un clima templado frío con precipitación y temperatura promedio anual de 900 mm y 15°C, respectivamente. Comprende varios tipos de suelo, de los cuales predominan cambisoles, litosoles, feozems y regosoles (García, 1987). En cambio, las regiones estudiadas de Nuevo León pertenecen a un clima semiseco, con precipitación media anual de 600 mm y temperatura media anual de 17°C. Los suelos son someros del tipo litosol, rendzina y regosol calcáreo (Woerner, 1990). Las áreas evaluadas en el Estado de Coahuila se presentan en clima seco, con precipitación y temperatura media anual de 350 mm y 18°C, respectivamente, y con un suelo xerosol cálcico (Oviedo, 1980).

#### **1. 4. 3. Diseño del muestreo**

Para este trabajo de investigación se consideraron las áreas reforestadas con edades entre uno y 43 años. En cada una de ellas se establecieron parcelas al azar de 20 x 20 m, en la mayoría de los casos y delimitadas con cintas métricas. A cada parcela se le determinó la densidad y supervivencia de individuos mediante el conteo total de árboles vivos y relacionándolo con el total de los árboles plantados inicialmente. De igual manera a cada uno de los árboles se les midió el diámetro basal, con una forcípula, la altura total y cobertura de copas de 10 individuos para lo cual se utilizó una regla y cinta graduada. Las variables medidas al nivel del sitio fueron la exposición y coordenadas geográficas para su ubicación de cada una de las parcelas mediante un sistema de posicionamiento geográfico global (GPS).

En cada parcela se ubicaron al azar tres sub parcelas (sitios) de 1 m<sup>2</sup> cada una, de donde se recolectó toda la biomasa acumulada (mantillo y necromasa al ras del suelo) y se pesó en balanza graduada digital. Posteriormente, se tomó una submuestra de los subcomponentes de ramas y hojarasca en bolsas de papel y se llevó al laboratorio para determinar el peso seco. Para determinar la relación peso seco y peso húmedo, se requirió secar las muestras en un horno a 104°C Con los

datos obtenidos de la relación de peso húmedo y seco se determinó el contenido de biomasa seca en cada compartimiento. En la estimación de la biomasa por componentes, se utilizaron las ecuaciones alométricas reportadas por Návar *et al.*, 2004 (Cuadro 2)

#### **1. 4. 4 Estimación de biomasa aérea y raíces**

Para la estimación de biomasa aérea en las plantaciones de Durango se utilizaron ecuaciones lineales y no lineales siguiendo la metodología desarrollada por Návar, (2001). Se estimó la biomasa total del árbol usando las ecuaciones para *P. cooperi* [1], *P. engelmannii* [2], *P. durangensis* [3] y otras especies [4]. Para el estado de Nuevo León se usaron ecuaciones para *P. pseudostrobus*, *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. pinceana* [5]. En las plantaciones de *P. halepensis* en Coahuila se usaron la ecuación para otras especies [4] (Cuadro 2).

En estas ecuaciones no se consideró la biomasa de las raíces. Para esta estimación se desarrollaron y ajustaron ecuaciones de regresión no lineal considerando las variables de diámetro y altura promedio de la plantación. En cada una de las regiones se le aplicó una ecuación para la estimación de biomasa en raíces. Para la parte de la Sierra Madre Occidental se utilizó la ecuación [6] y para las plantaciones de la Sierra Madre Oriental la ecuación [7] (Cuadro 2)

Cuadro 2. Ecuaciones para estimar biomasa aérea y de raíces, sugeridas por Nívar *et al.*, (2001)

No	Hojas	Ramas	Fuste
1	Btpc $=[-13.9108-0.0014db^2h+19.669Ldb-4.9704Lh]+$	$25.42101+2.58648db-50.1084Ldb)+$	$(-0.24462+0.009397db^2h)]$
2	Btpe $=[(10.0098+1.4498db-9.1305Ldb^2h)+$	$(-1.7333+0.007146 db^2h)+$	$(4.2778-0.6922db+0.01424db^2h)]$
3	Btpd $=[(3.3299+0.7384db-3.6282Ldb^2h)+$	$(0.2517+0.00298db^2h)+$	$(-0.2452+0.009172db^2)]$
4	btE $=[-1.13+0.353D-0.54 \ln H)+$	$(9.413+1.605D-10.3 \ln D)+$	$(0.93+0.009D^2H)]$
5	BPcnp $=[(0.0151(db)^{2.6135})+$	$+(0.00459(db)^{1.9106})+$	$(0.00211(db)^{1.9794})]$
<b>Biomasa de Raíces</b>			
6	Br= $[(0.0077(DH^2)^{0.9688})]$		
7	Br= $[(0.0051(D)^{0.8308})]$		

Donde db=diámetro a la base (cm.), h= altura (m), L= logaritmo base 10, bt = biomasa total del árbol (hojas +ramas+fuste) (kg /árbol<sup>-1</sup>), br= Biomasa raíces, P.c, P.d., y P.e.= *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis*, y *Pinus engelmannii* y otras especies respectivamente. P.cnp= *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii*, *Pinus pinceana*, *Pinus pseudoestobus*

La biomasa total de hojas, ramas, fuste y raíces por hectárea para cada sitio, se obtuvo de la suma de todos los valores de cada compartimento mencionado de los árboles en la parcela, este valor total se multiplicó por 10,000 m<sup>2</sup> y se dividió por el área de cada parcela.

#### 1. 4. 5 Estimación de biomasa del mantillo y necromasa

Para la obtención de biomasa del mantillo orgánico y necromasa se tomó en cuenta el peso seco y se sumaron los dos subcomponentes hojas y ramas para obtener un promedio y para efectos de los cálculos de biomasa total se interpolaron los datos para obtener biomasa total por hectárea.

#### 1. 4. 6 Análisis estadístico

Con los datos obtenidos de las variables dasométricas y físicas de las plantaciones forestales se realizó un análisis de gradiente directo mediante el análisis estadístico multivariado de correspondencia canónica sin tendencia (DCCA), con el fin de obtener tendencias y grupos de cada una de las variables medidas, que permitiera relacionarlos o diferenciarlos para así determinar los modelos a utilizar para estimar

la productividad de las plantaciones evaluadas. Una vez determinados los grupos de plantaciones, se determinaron las curvas de productividad con el ajuste de ecuaciones no lineales a los datos de edad y biomasa total.

## **1. 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las plantaciones se localizaron en diferentes condiciones fisiográficas, de suelo y clima. El análisis estadístico multivariado de análisis de correspondencia canónica sin tendencia (DCCA), de todas las áreas reforestadas mostró la necesidad de desarrollar índices de productividad para cada una de las regiones fisiográficas estudiadas. Las diferencias pudieron explicarse con los gradientes de precipitación y temperatura en relación a las variables tomadas y se encontraron contrastes entre los sitios, dadas las características edafológicas y topográficas, de cada región forestal. Además, la presencia de especies nativas y exóticas modifica los niveles de productividad entre las especies forestales medidas (Figura 2).

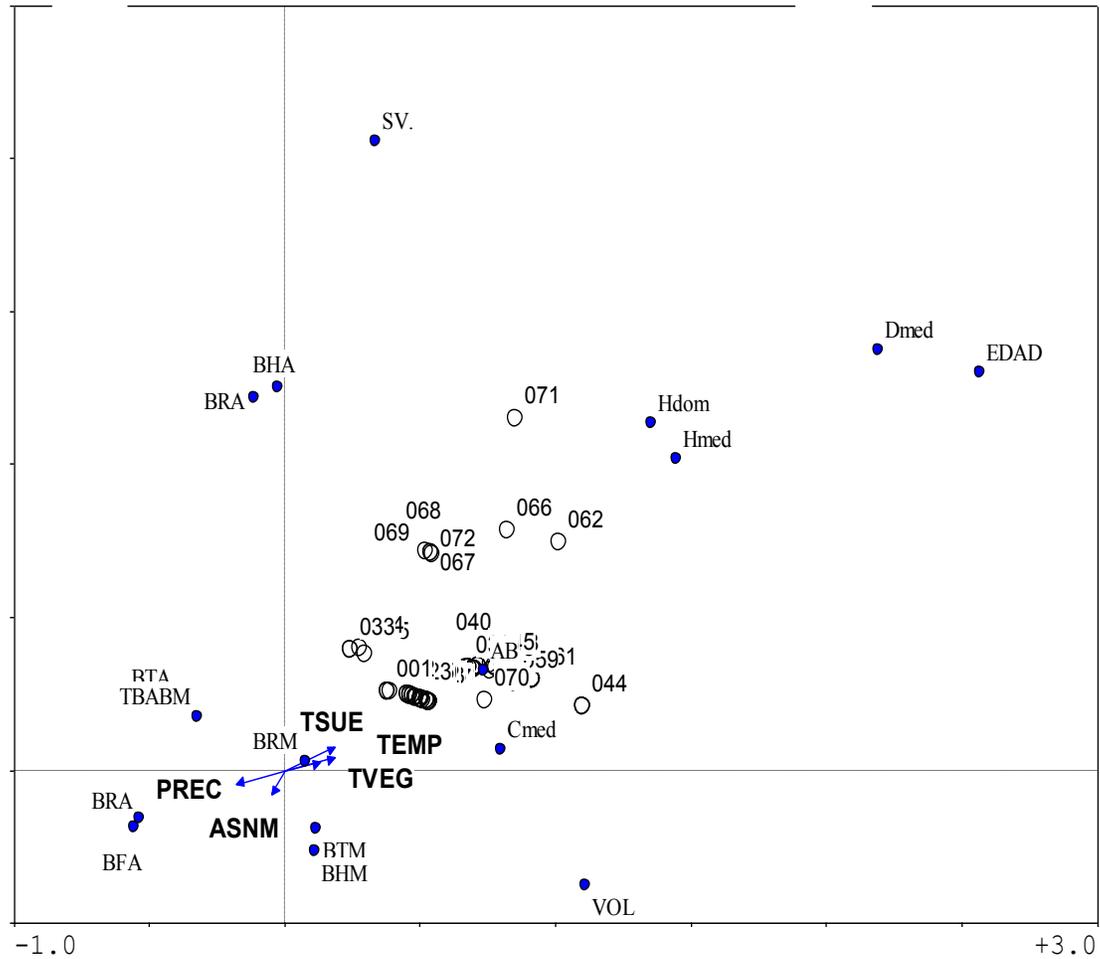


Figura 2. Análisis estadístico multivariado de análisis de correspondencia canónica sin tendencia (DCCA) aplicado a datos de las parcelas muestreadas en el norte de México

Donde TSUEL=Tipo de suelo, TVEG=Tipo de vegetación, PREC=Precipitación, TEMP=Temperatura, ASNM=Altitud sobre el nivel del mar, BHA=Biomasa hojas área, BRA=Biomasa ramas aérea, BRA=Biomasa raíces, BTA=Biomasa total aérea, BRM=Biomasa ramas mantillo, BHM=Biomasa hojas mantillo, BTM=Biomasa total mantillo, TBABM=Biomasa total área y mantillo, Dmed=diámetro medio, Hdom=Altura dominante, EDAD=edad, Hmed=Altura media, Cmed=Cobertura media, AB=área basal, VOL=Volumen, 001-038=parcelas de la Sierra Madre Occidental en Durango, (Pueblo Nuevo y San Dimas) 039-041=parcelas de La Sierra Madre Oriental de Nuevo León (Iturbide) y 042-078 parcelas de Coahuila (Sierra de Zapalinamé).

En el análisis estadístico se muestra una dispersión amplia en las diferentes plantaciones muestreadas. A pesar de esta variación, se pudieron aislar adecuadamente los grupos de plantaciones por los estados representados (Durango, Coahuila y Nuevo León). En los sitios de Durango se observan muy aglomerados

con numeraciones mas bajas (01-038), inmediatamente arriba se observan los de nuevo León (039-041) con mayor dispersión. Después de estos sitios se observan los de Coahuila con las numeraciones más altas.

Este agrupamiento obedece a un doble gradiente. El primero de ellos de izquierda a derecha y el segundo de abajo hacia arriba. Ambos parecen estar predominantemente influenciados por un gradiente de precipitación, de derecha a izquierda y otro de temperatura incrementando de abajo hacia arriba. Es decir los sitios más productivos desde el punto de vista de la biomasa presente (BRA, BRM, BFA, BHM, BRM, BTM y TBABM) son aquellos localizados en los lugares mas fríos, con mayor precipitación y profundidad de suelo.

Con estos datos se definió un modelo para cada región ya que ninguna presenta algún tipo de similitud entre tendencias y grupos entre sus variables (Figura 2)

### **1. 5. 1 Productividad de las plantaciones evaluadas**

Las plantaciones evaluadas en la parte alta de la Sierra Madre Occidental, en el estado de Durango, alcanzan un rango de productividad de biomasa entre 6 a 295 Mg ha<sup>-1</sup>(Fig. 3). En las plantaciones de la Sierra Madre Oriental, en Nuevo León, la productividad se encuentra en dentro de un rango de 0 a 71 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 4) y en Coahuila la productividad de biomasa oscila de 0 a 64 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 5)

### **1. 5. 2 Productividad en plantaciones del estado de Durango**

En el Estado de Durango, *P. cooperi* presenta la mayor plasticidad en los niveles de productividad. En sitios de la parte alta de la Sierra Madre Occidental (en los predios Alto de Latas, La Victoria, La Escondida, La Ciudad y Los Bancos), es la especie que más domina, crece en sitios con exposición zenital, en suelos profundos, ricos en materia orgánica y en altitudes sobre el nivel del mar mayores a

los 2600 msnm, presenta la mayor productividad. En sitios caracterizados por algún disturbio en su calidad de sitio se presentan productividades intermedias. En sitios con altitudes menores de 2600 msnm, con condiciones pobres del lugar y cerca de áreas pobladas se presentan las especies de menor productividad (en predios como Agua Blanca, Miravalles y la Flor). Es decir, *P. cooperi* plantado en sitios cubiertos por pastizales y posiblemente en condiciones de sobre pastoreo y ramoneo que se presenta por animales domésticos muestran las menores productividades (Figura 3)

La especie *Pinus durangensis* también muestra una alta plasticidad, aunque menor que *P. cooperi*. Esta especie alcanza niveles de productividad alta en sitios caracterizados por altitudes mayores a los 2600 msnm, se presenta en mesetas con suelos profundos y también ricos en materia orgánica. En sitios con suelos poco profundos, pobres en materia orgánica y con algún disturbio antropogénico u ambiental presentan productividades bajas a regulares (Figura 3)

A pesar que la especie *Pinus engelmanni* se localiza fuera de su rango de distribución, la cual es un poco más hacia la región oriental de la Sierra Madre Occidental, generalmente crece por debajo de los 2400 msnm, se presentan niveles de productividad media en sitios en donde se han aplicado tratamientos silvícola (eliminación de especies competidoras y podas); sin embargo en sitios donde no se ha realizado ninguna práctica silvícola y en condiciones fuera de su rango de crecimiento, presenta niveles bajos de productividad comparado con las especies nativas de la región (Figura 3)

Las plantaciones de *Pinus arizonica* por localizarse en sitios pobres, poco profundos y pedregosos con poco drenaje, y en pequeños bajíos (predios Piloncillos y San Jerónimo) presentan productividades bajas a muy bajas. Además, comparada con la productividad de las especies nativas ésta presenta un rendimiento muy abajo. Esta especie pertenece a un rango de distribución más al norte del estado (Figura 3)

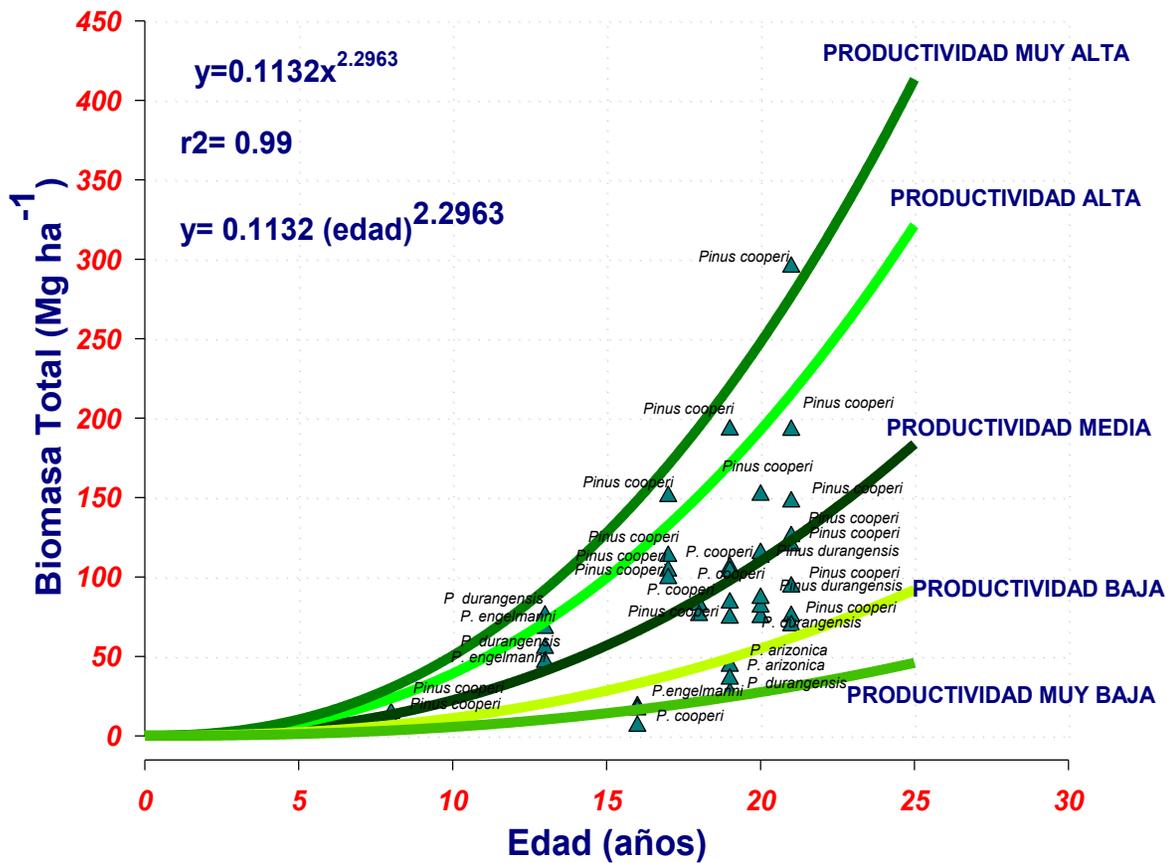


Figura 3. Curvas de productividad de biomasa para plantaciones del Estado de Durango.

### 1. 5. 3 Productividad en plantaciones del estado de Nuevo León

En el Estado de Nuevo León el *Pinus pseudostrobus* presenta la mayor productividad. La plantación está en una loma la cual se caracteriza por tener suelos someros, con 20 cm de profundidad, pedregosos y presenta poca materia orgánica, con drenaje moderadamente drenado (Figura 4)

La especie *Pinus cembroides* presenta una distribución muy amplia en los niveles de productividad, aunque muestra una productividad alta, menor que *P. pseudostrobus*, crecen en las mismas condiciones. En sitios también similares se

presentan productividades intermedias y muy bajas, posiblemente por factores climáticos adversos, heladas y repentinos cambios de temperaturas (Figura 4). A pesar que estas plantaciones fueron auxiliadas con irrigaciones presentan poca productividad, son plantaciones que se tenían como ensayos de procedencia y se les daba seguimiento en su desarrollo para fines de investigación (Domínguez *et al.*, 2000)

La especie *Cupressus arizonica* se localiza fuera de su rango de distribución, a pesar de ello presenta un nivel de productividad medio en sitios con suelos poco profundos, calichosos, con poca humedad, y poca materia orgánica; se ha adaptado a las características medioambientales que prevalecen en el área (Figura 4)

Las especies *P. pinceana* y *P. nelsonii* se presentan en sitios pobres, degradados, pedregosos, con suelos someros poco profundos y una humedad relativamente baja, presentan productividad entre media y muy baja. Su baja productividad se debe a falta de adaptación a estos sitios porque son especies introducidas en las áreas estudiadas (Figura 4). Cuando alcanzan una edad de 20 años en la parte baja de la Sierra, donde los suelos son un poco más profundos, se presentaban semillas comestibles de estas especies, aunque con producción baja.

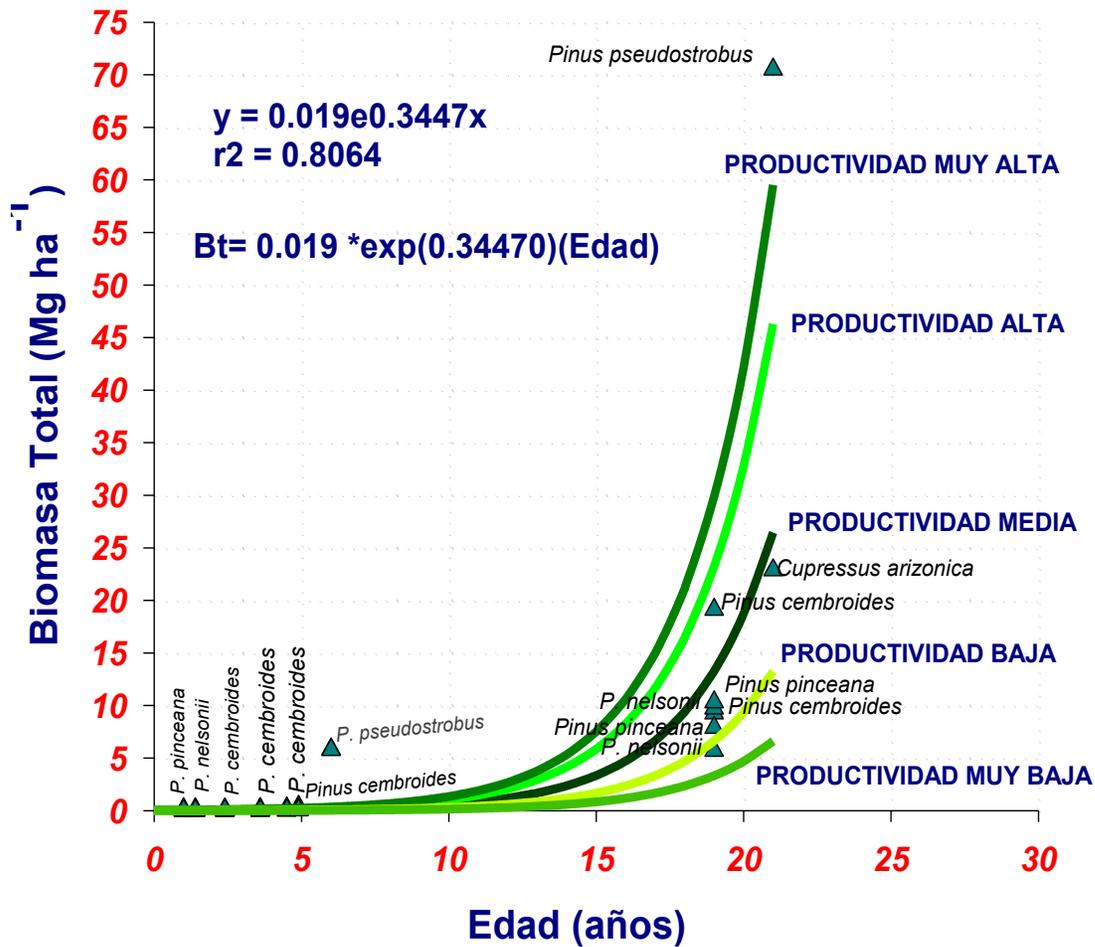


Figura 4. Curvas de productividad de biomasa en plantaciones de Nuevo León

#### 1. 5. 4 Productividad en plantaciones del estado de Coahuila

En el estado de Coahuila, las plantaciones con *Pinus halepensis*, a pesar de que es una especie originaria de las costas central y oeste del Mediterráneo, se introdujo para fines de reforestación en áreas degradadas y protección en la Cuenca de la Sierra de Zapalinamé. Las características edafológicas y climáticas de la región, parecidas a las mediterráneas permitieron el establecimiento de la plantación.

Sin embargo esta plantación presenta las productividades más bajas. La densidad baja está afectando la productividad, inicialmente se plantó a diferentes espaciamientos: a 3.5 x 4.0 m, 4.5 x 4.5 m y, 6.0 x 6.0 m de distancia, la supervivencia fue regular. Según Oviedo, (1980) en su trabajo de tesis la supervivencia en las áreas reforestadas de *Pinus halepensis* fluctuó entre 38 y 84% (183 a 559 árboles por ha), actualmente la densidad de arbolado es menor debido a las desfavorables condiciones medioambientales y antropogénicas presentes en los sitios. La escasa humedad en el suelo, la poca acumulación de materia orgánica, suelos con características calcáreas, la poca precipitación y las extremas temperaturas durante el año, influyeron en los bajos niveles de productividad en comparación a aquellos sitios registrados para el Estado de Nuevo León (Figura 5).

El *P. halepensis*, en sitios donde se presentan productividades entre alta y media suelen ser sitios pobres, suelos calcáreos, no muy profundos y con poca materia orgánica. Las áreas A-11(área 11), A-14 (área 14) y A-15 (área 15), se presentan estas características. El arbolado presente es achaparrado, su crecimiento se inhibe por la falta de humedad en el suelo (Figura 5).

En las áreas A-1, A-2, A-8, A-13, A-16 se caracterizan por ser sitios degradados, pedregosos y con una humedad relativamente baja, se presentan productividades de baja a muy baja, aunado a estas características la eliminación de arbolado en pie, por ataque de plagas o enfermedades o por el mismo estrés hídrico presente, han provocado una disminución parcial del número de individuos y su densidad se ha visto disminuida, provocando una baja productividad en las áreas estudiadas. (Figura 5)

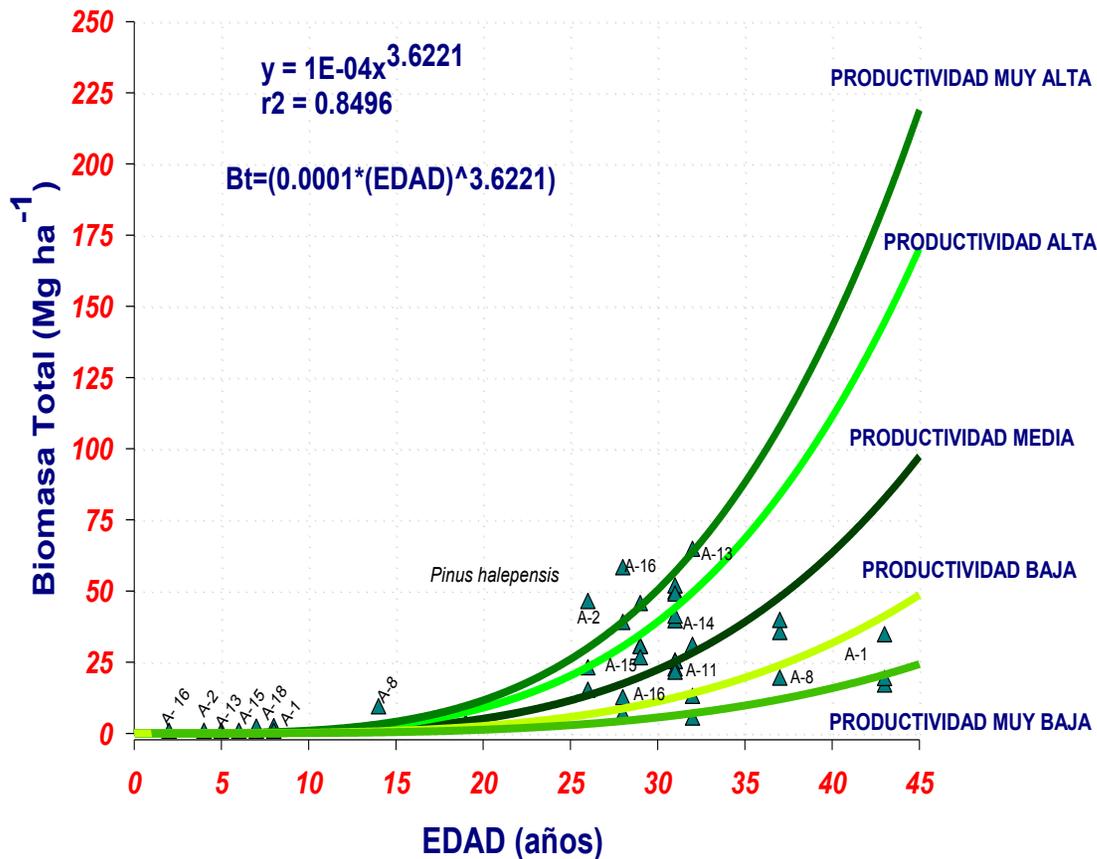


Figura 5. Curvas de productividad de biomasa para la especie de *Pinus halepensis* en Coahuila.

## 1. 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las diferentes características de las especies plantadas, además de las características fisiográficas, edáficas y biológicas presentes en cada una de las plantaciones evaluadas en el Norte de México, permitieron definir un modelo de estimación de curvas de productividad para cada una de las regiones estudiadas. Las plantaciones que se localizan en la Sierra Madre Occidental, en el estado de Durango, presentan mayores índices de productividad, debido a la presencia de especies nativas y condiciones favorables para su establecimiento. En la Sierra Madre Oriental, las reforestaciones presentaron baja productividad porque en su

mayoría se observaron especies exóticas y la calidad de los sitios es menor. Las condiciones climáticas con mejor balance hidrológico se presentaron en Nuevo León y por consiguiente los sitios reforestados presentaron mayores niveles de productividad que aquella registrada para Coahuila. A pesar de utilizar especies nativas para Durango, éstas presentaron una plasticidad alta en productividad. Esta se asoció principalmente a las condiciones de los sitios reforestados dados por el clima, la topografía, la pendiente, la exposición, etc. Los resultados aplicables de esta investigación reflejan la necesidad de generar individualmente el desarrollo de modelos para las plantaciones de cada región, para poder encontrar mecanismos que permitan valorar los servicios ambientales que prestan las reforestaciones de la región.

## 1. 7 BIBLIOGRAFÍA

- Brown S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In: *Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Árboles*. Vol. 1 Antalya, Turkia 13-22 October of 1997. pp. 107-108
- CONAFOR, 2004. Evaluaciones PRONARE 2000-2001. Consultado en [http://www.conafor.gob.mx/programas\\_nacionales\\_forestales/evaluaciones/index.html](http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/evaluaciones/index.html). (Julio 2004)
- Domínguez C., P. A. y Návar Ch., J. J. 2000. Einfluss der Pflanzenqualität von *Pinus pseudoestrobis* Lindl. Auf urlebensrate und Wuchsleitung be: Aufforstungen in der ostlinchen Sierra Madre Mexikos. Forstarchiv, 71. Heft 1: 9-13.
- Mesera O. M. 1996. Servicios ambientales de las plantaciones comerciales: la captura de carbono. *Bosques y Plantaciones Forestales*. México, D. F. pp. 79-81
- Návar J., González N., Maldonado D., Graciano J., Dale V. 2001. Carbon sequestration by forest plantations of Durango, México. Enviado a *Biomasa & Bioenergy*. 35 p.

- Návar J., González N., Maldonado D., Graciano J., Dale V., and Parresol, B. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10(2): 17-28
- Návar J., Estrada C., Contreras J. C., Domínguez C. P. A and Muller U. B. 2001. Evaluation of the Abundance, Form of Establishment, and the Causes of Variation of Pine Regeneration in Coniferous Stands of the Western Sierra of Durango, Mexico. *FORSTARCHIV* 72(2001), 175-179
- Oviedo R. J. 1980. Inventario de las alternativas de transformación de especies forestales de la Sierra de Zapalinamé en Saltillo, Coahuila. Tesis de Ingeniero Agrónomo Forestal, Universidad Autónoma Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, Mexico. pp. 4-58.
- Woerner M. 1990. Los suelos del Bosque-Escuela de la UANL en la Sierra Madre Oriental, Iturbide, N. L. Reporte Científico No. 20 Facultad de Ciencias Forestales. UANL Linares, Nuevo León. 90 p.

## CAPITULO II

### ECUACIONES PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO E INCREMENTO EN ÁREA BASAL, VOLUMEN, BIOMASA Y ALMACÉN DE CARBONO EN SITIOS REFORESTADOS EN EL NORTE DE MÉXICO

#### 2. 1 RESUMEN

En este reporte de investigación se presenta un modelo para estimar el crecimiento en área basal y volumen y con el uso de factores se expande para estimar biomasa y almacén de carbono de la biomasa en pie, en sitios reforestados del Norte de México. Se ajustó un modelo de incremento y rendimiento a nivel del rodal para los sitios reforestados en los estados de Durango, Nuevo León y Coahuila, México. La base de datos para estimación de parámetros se obtuvo de 29 parcelas rectangulares de 20x20 m de dimensión en Durango, 34 en Nuevo León y 30 en Coahuila. Asimismo, para la validación del modelo se consideraron 9 parcelas en Durango, 12 en Nuevo León y 30 en Coahuila. Las especies plantadas en Durango fueron: *P. durangensis* Mart., *P. cooperi* Blanco, *P. engelmannii* Carr., *P. arizonica* Engelm., para Nuevo León *P. nelsonii* Shaw. , *P. pseudostrobus* Lindl., *P. pinceana* Gord & Glend., *Cupressus arizonica* Greene, *P. cembroides* Zucc., *P. pseudostrobus* y para Coahuila *P. halepensis* Miller. El modelo de captura de carbono fue validado correctamente a la fuente independiente de datos y predice una tasa promedio anual de captura de carbono (IMAC) de 3.92 Mg ha<sup>-1</sup> para Durango, de 0.88 Mg ha<sup>-1</sup> para Nuevo León y de 0.44 Mg ha<sup>-1</sup> para Coahuila. Las variaciones entre estados se explican por las condiciones regionales, mientras que las variaciones entre cada uno de los estados se explicaron por las especies y los sitios.

**Palabras clave:** Modelos de incremento y rendimiento, rodal, área basal, volumen, biomasa, factor de expansión, carbono, servicios ambientales.

## 2. 2 ABSTRACT

In this research, we present a whole stand growth and yield model to estimate basal area and volumen, and with the use of factores it is expanded to proyect biomass and carbon in standing biomass in reforested sites of northern Mexico. We fitted the stand model for each of the reforested sites of Durango, Nuevo León and Coahuila, México. Dasometric data of 29 (Durango), 34 (Nuevo León), and 30 (Coahuila) quadrats were available to estimate model parameters and 9 (Durango), 12 (Nuevo León), and 10 (Coahuila) quadrats for validating the modelo. Studied planted pine species were for Durango *P. durangensis*, *P. cooperi* ., *P. engelmannii* y *P. arizonica*, for Nuevo León *P. pseudostrobus*, *P. cembroides*, *P. nelsonni*, *P. Pinceana*, and *Cupressus arizonica*, and for the State of Coahuila *P. halepensis*. The model was properly validated and it projects an annual mean carbon sequestration rate of 3.92 Mg ha<sup>-1</sup> for Durango, 0.88 Mg ha<sup>-1</sup> for Nuevo León, and 0.44 Mg ha<sup>-1</sup> for Coahuila. Spatial variations between states are explained by the regional characteristics while the intrinsic spatial variations were explained by species and site productivity.

**Key Words:** Stand class growth and yield model, basal area, volume, biomass, expansion factors, carbon, standing biomass, environmental services.

## 2. 3 INTRODUCCIÓN

La temperatura de la tierra está incrementándose en forma continua. La acumulación de gases con efecto de invernadero son los responsables del cambio climático (IPCC, 2001). El carbono es el principal gas con efecto de invernadero y se libera hacia la atmósfera por la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la producción de cemento.

La Convención Marco Para Cambio Climático, emergente de la ONU en 1992, se encarga coordinar las acciones necesarias para evitar la interferencia antropogénica con el clima. El Protocolo de Kyoto apoya las actividades de forestación y reforestación, como prácticas elegibles para amortiguar el cambio climático a través de la reducción de emisiones o el incremento en la tasa de captura de carbono.

En estado de Durango, se reforestan anualmente aproximadamente 5,000 hectáreas y entre Nuevo León y en Coahuila alrededor de unas 6,000 hectáreas, en sitios degradados, incendiados, potreros abandonados, etc. apoyados por proyectos gubernamentales como el Programa Nacional de Reforestación (PRONARE) e iniciativas del gobierno estatal y de los ejidos o pequeños propietarios (SEMARNAT,; 2001). Se han desarrollado modelos para la estimación del almacén y captura de carbono en los sitios reforestados (Návar *et al.*, 2005), con la deficiencia de que se han utilizado un bajo número de parcelas en la estimación de sus parámetros.

En este reporte de investigación se presentan los resultados del desarrollo de un modelo para estimar el almacén y tasa de captura de carbono en sitios reforestados de cada uno de los Estados de Durango, Coahuila y Nuevo León. La propuesta del modelo se basa en el cálculo del área basal y volumen, con los clásicos modelos de incremento y rendimiento al nivel del rodal y con el uso de factores de expansión se transfiere a biomasa y carbono, como parte de la metodología recomendada por el Banco Mundial y por diversos investigadores

(Brown, 1997). Esta información es clave en la puesta en marcha de proyectos de sobre servicios ambientales por las prácticas de forestación y reforestación de los estados del Norte de México indicados anteriormente.

## 2. 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1. Localización del área de estudio.

El trabajo de campo para generar los modelos de incremento y rendimiento, biomasa y almacén de secuestro de carbono se realizó en sitios reforestados en los municipios de Pueblo Nuevo y San Dimas, Durango. En Iturbide, Nuevo León, y en Sierra de Zapalinamé, Saltillo, Coahuila. Se estudiaron plantaciones forestales de diez especies: *P. durangensis* Mart., *P. cooperi* Blanco, *P. engelmannii* Carr., *P. arizonica* Engelm., *P. nelsonii* Shaw. , *P. pseudostrobus* Lindl., *P. pinceana* Gord & Glend., *P. cembroides* Zucc., *P. halepensis* Mill y *Cupressus arizonica* Greene. En la Figura 1, se muestra la distribución de las áreas reforestadas evaluadas.

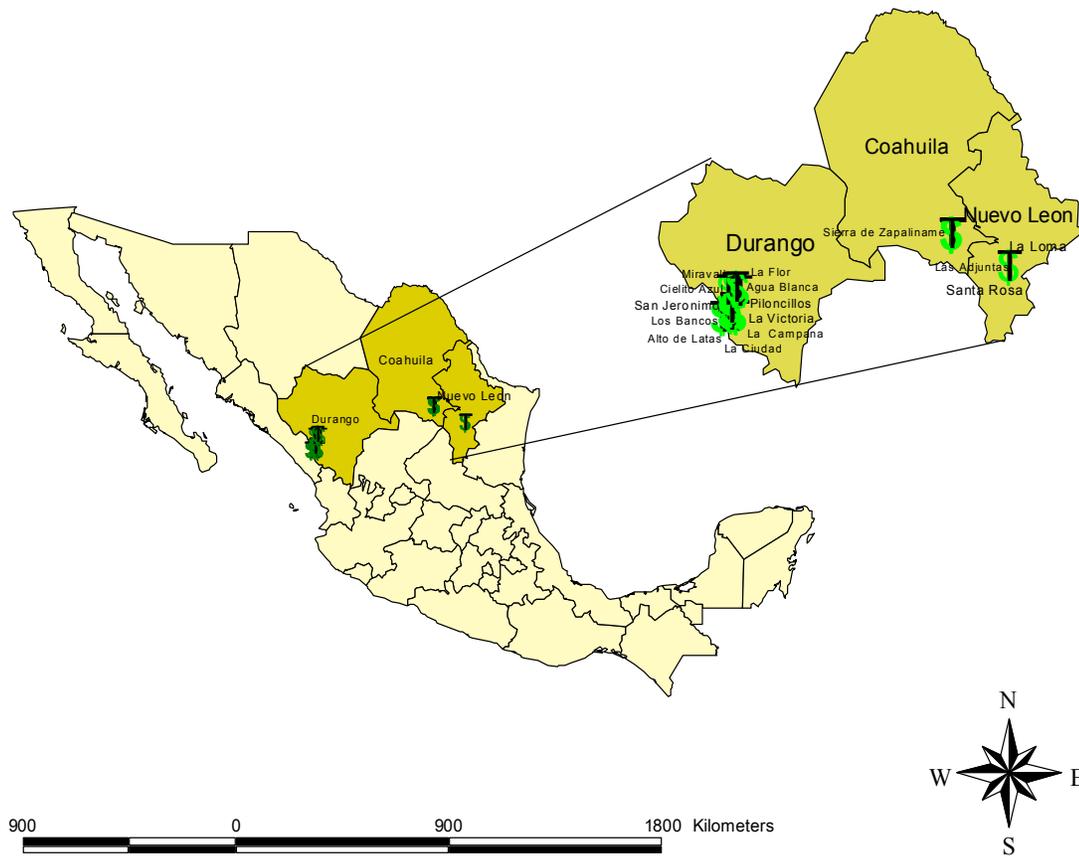


Figura 1. Distribución de las áreas reforestadas en los Estados de Durango, Nuevo León y Coahuila.

#### 2. 4. 2 Características de las áreas de estudio.

Las áreas de estudio se caracterizan por estar ubicadas en la Sierra Madre Occidental y en la Sierra Madre Oriental. Las áreas reforestadas en el estado de Durango se caracterizan por un clima templado o semifrío subhúmedo, con lluvias veraniegas que ascienden a los 1200 mm anuales, con una temperatura promedio anual de 11.7°C. Los suelos son predominantemente cambisoles, litosoles y regosoles, con profundidades que no exceden los 30 cm. La vegetación nativa se caracteriza por ser bosques desde mixtos e irregulares de pino-encino hasta masas puras de pino en altitudes mayores a los 2500 msnm (García, 1987). En Nuevo León las áreas reforestadas se encuentran enclavadas en la Sierra Madre Oriental y

caracterizan por tener un clima semi-seco con lluvias en verano que ascienden a 600 mm anuales, con una temperatura anual de aproximadamente de 17°C, y con temperaturas que pueden llegar hasta los 30°C en el verano y bajo 0°C en el invierno. Los suelos son delgados con una gran variación en cuanto a los colores y fertilidad, son someros del tipo litosol, redzina, y regosol calcáreo y con una profundidad de 20 cm. La vegetación nativa es de pino-encino se localiza altitudes de 1400 msnm (Woerner, 1990). En Coahuila, el área de estudio se caracteriza por un clima seco con lluvias en verano que ascienden a 350- 500 mm anuales, con una temperatura entre 10 y 35°C. Los suelos predominantes son suelo xerosol cálcico con profundidades de menores de 20 cm. La vegetación nativa antiguamente estaba caracterizada por bosques de pino, con el tiempo pasaron a ser dominados por matorrales sarcocracicaule, roseto filo y desértico micrófilo en altitudes de 1830 y 1958 (Oviedo, 1980).

#### **2. 4. 3 Diseño de muestreo**

Este trabajo de investigación se realizó en 124 parcelas reforestadas en el Norte de México. En Durango se evaluaron 38 parcelas, en Nuevo León 46 parcelas y en Coahuila 40 parcelas con dimensiones predominantemente de 20x20 m, dentro de las cuales se midieron y cuantificaron todos los individuos presentes. Las medidas realizadas incluyeron el diámetro a la base (DB), la altura total (H) y la cobertura dada por la medición de un radio o un diámetro de copa y ajustada a la superficie de un círculo (COB) en una muestra de 10 árboles.

En cada parcela se ubicaron al azar tres subparcelas (sitios) de 1 m<sup>2</sup>, en donde se recolectó toda la biomasa acumulada en el suelo. Es decir se tomaron muestras de los componentes de la necromasa (hojas, ramas, raíces en muestras de suelo). Las muestras tomadas se pesaron en fresco por componente de necromasa y mantillo (hojas, fuste, ramas y raíces). Después se secaron en una estufa a 104°C por 48 horas y se volvió a pesar. Con ecuaciones desarrolladas se estimaron los componentes de biomasa de la vegetación en pie.

#### 2. 4. 4 Análisis de la información

Para la estimación de biomasa en pie de las áreas reforestadas se utilizaron ecuaciones lineales y no lineales desarrolladas por Nívar *et al.*, (2001; 2004a; 2004b). Las ecuaciones utilizadas se desarrollaron para las especies: *P. cooperi* [1], *P. engelmannii* [2], *P. durangensis* [3] y; otras especies [4]. Para el estado de Nuevo León se desarrollaron ecuaciones para los componentes de biomasa de los piñoneros *P. cembroides*, *P. nelsonii* y *P. pinceana* y se aplicaron también para árboles jóvenes de *P. pseudostrobus* [5]. En las áreas reforestadas de la Sierra de Zapalinamé en Coahuila se uso la ecuación para otras especies [4] desarrollada por Nívar *et al.*, (2004a). Además se ajustaron dos ecuaciones para estimar biomasa de raíces (Nívar, 2005).

$$[1]. Btpc=[(-13.9108-0.0014db^2h+19.669Ldb-4.9704Lh)+25.42101+2.58648db-50.1084Ldb)+ (-0.24462+0.009397db^2h)]$$

$$[2] Btpe =[(10.0098+1.4498db-9.1305Ldb^2h)+(-1.7333+0.007146 db^2h)+(4.2778-0.6922db+0.01424db^2h)$$

$$[3] Btpd =[(3.3299+0.7384db-3.6282Ldb^2h)+(0.2517+0.00298db^2h)+(-0.2452+0.009172db^2)]$$

$$[4] btE =[-1.13+0.353D-0.54 \ln H)+(9.413+1.605D-10.3 \ln D)+(0.93+0.009D^2H)]$$

$$[5] BPcnp=[(0.0151(db)^{2.6135})++(0.00459(db)^{1.9106})+(0.00211(db)^{1.9794})]$$

El primer set de paréntesis estima la biomasa foliar, el segundo la biomasa de ramas y el tercero la biomasa fustal. La suma de estas ecuaciones proporcionan la biomasa total aérea.

La biomasa radical, se estimó con las siguientes ecuaciones:

$$[5] Br = [(0.0077(DH^2)^{0.9688})]$$

$$[6] Br = [(0.0051(D)^{0.8306})]$$

Donde db=diámetro a la base (cm), h= altura (m), L= logaritmo base 10, bt = biomasa total del árbol (hojas +ramas+fuste) (kg /árbol<sup>-1</sup>), br= Biomasa raíces, P.c, P.d., y P.e.= *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis*, y *Pinus engelmannii* y otras especies respectivamente (*P. arizonica*). P.cnp= *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii*, *Pinus pinceana* y *Pinus pseudoestrobis*.

La biomasa al nivel del rodal se estimó como la suma de la biomasa de cada uno de los árboles que componen el rodal.

El modelo de incremento y rendimiento. Los datos de diámetro y altura sirvieron para estimar el volumen fustal individual. La suma de los volúmenes de los árboles individuales resultó en el volumen por hectárea. El área basal se calculó con el diámetro y la densidad. Un análisis preliminar de análisis de correspondencia canónica sin tendencia indicó que se requería un modelo para cada región (Durango, Nuevo León y Coahuila). El modelo (1) basa su filosofía en el cálculo del volumen a partir de la edad de la reforestación, el área basal y la productividad del sitio. La productividad del sitio se caracterizó con un índice tradicional de sitio, derivado de la ecuación de Schumacher. El área basal se proyectó en tiempo y en función del índice de productividad, aunque para Nuevo León se requirió de un parámetro de la especie en lugar de un parámetro de la productividad.

Para el cálculo del índice de sitio se ajustó la ecuación de Shumacher a la relación altura de los árboles dominantes en función de la edad.

#### Para Durango

$$H = (45.65 * \text{Exp}^{-(30.2427 * 1/t)})$$

Para Nuevo León

$$H = (10.98 * \text{Exp}^{-(12.62 * 1/t)})$$

Para Coahuila

$$H = (10.80 * \text{Exp}^{-(14.96 * 1/t)})$$

El índice de sitio se deriva de la ecuación por medio de:

$$S = H * \exp(-b * (1/t) - (1/t_0))$$

Donde:  $t_0$  = edad base. Cuya edad para estas plantaciones se determinó como 15 años.

El modelo de incremento y rendimiento sigue el procedimiento de Clutter (1963) y Clutter *et al.* (1983) y es descrito por Zepeda y Domínguez (1998) y Nívar *et al.*, (2005) para la estimación del incremento y rendimiento en volumen, como sigue:

$$\ln(Vt) = B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{t} + B_3 \ln(AB)$$

$$H_0 = B_0 * \exp(-b_1 * \frac{1}{t}); \quad IS = H_0 * \exp(-b_1 * \frac{1}{t_0} - \frac{1}{t})$$

$$\ln(AB) = B_0 + B_1 * \ln(IS) + B_2 * \ln(t)$$

Donde:  $t$  = edad (años),  $AB$  = área basal ( $m^2$ ),  $Vt$  = volumen fustal ( $m^3 \text{ ha}^{-1}$ ),  $IS$  = índice de sitio,  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , son parámetros estadísticos.

El modelo para la estimación de biomasa se desarrolló con los clásicos factores de expansión, como a continuación se describe:

$$B_t = V_t * FEB$$

Donde: FEB= factor de expansión de volumen fustal a biomasa=  $Bt/Vtm$ ;  $Bt$  = Biomasa del componente en este caso biomasa en pie por hectárea,  $Vtm$  = volumen fustal medido en  $m^3$  por hectárea;  $Vt$  = volumen fustal estimado en  $m^3$  por hectárea.

La densidad de carbono por superficie se estimó por medio de la ecuación siguiente:

$$C=Bt*0.5$$

El factor 0.5 se considera como una constante en estudios ambientales. Por esta razón para calcular el contenido de carbono del fuste, ramas, raíces y hojas de cada árbol, se utilizó el factor 0.5 como constante (Nabuurs y Mohren, 1993).

El modelo se ajustó con el 75 % de la información individualmente para cada estado y se validó con el 25% restante. Estos porcentajes fueron seleccionados aleatoriamente. El proceso de validación consistió en aplicar el modelo a la fuente de datos independientes y calcular los estadísticos coeficiente de determinación,  $r^2$ , y error estándar,  $S_x$ , para los submodelos de área basal y volumen por estado.

## 2. 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestran los índices de sitio estimados para las áreas reforestadas de Durango (1a), Nuevo León (1b) y Coahuila (1c). A la edad base de 15 años, las curvas alcanzan una altura dominante de siete metros en Durango, cinco metros en Nuevo León y cuatro metros en Coahuila.

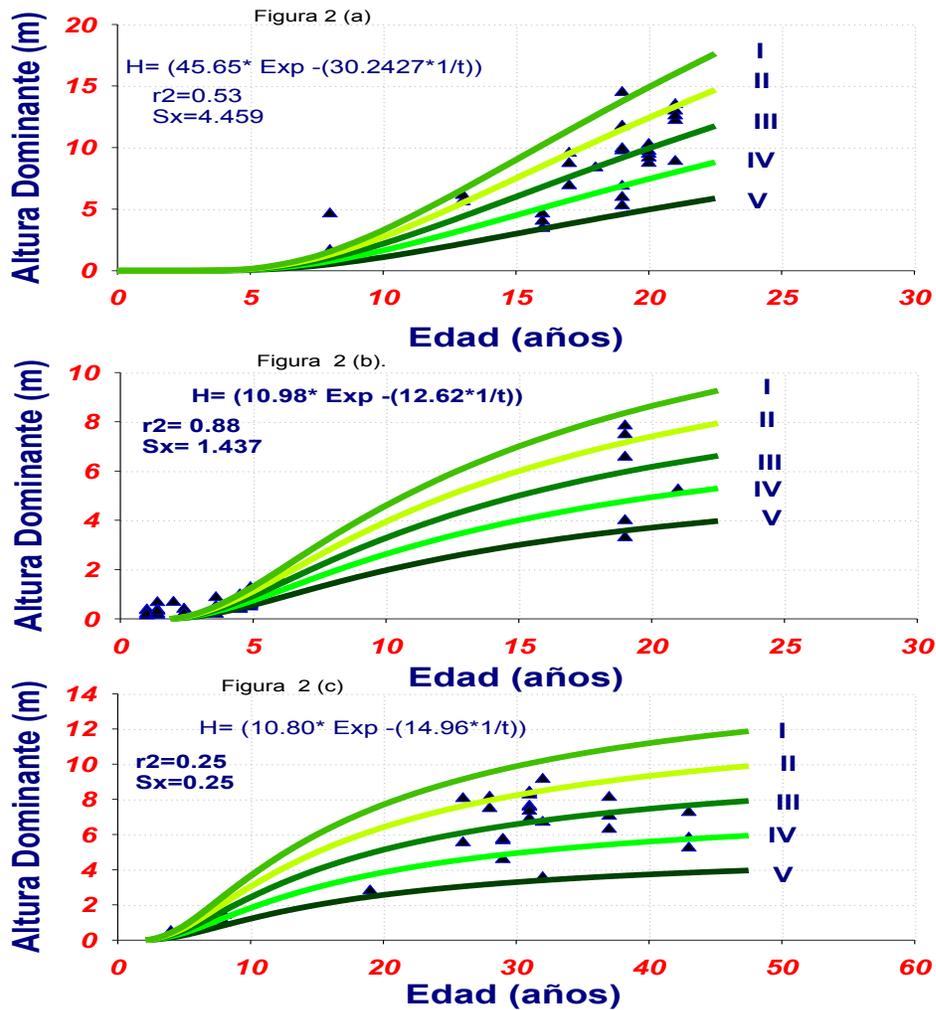


Figura 2. Estimaciones de curvas de índices de sitio para las áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila (c) del Norte de México.

Los estadísticos de bondad de ajuste de  $r^2$  y  $S_x$  de las ecuaciones para cada región muestran diferencias importantes. La diversidad de condiciones, de especies, suelos y otros factores genera mayores desviaciones y tendencias diferentes en los sitios reforestados en Durango y Coahuila, en contraste con Nuevo León.

En la Figura 3 se muestran las áreas basales muestreadas y estimadas para las áreas reforestadas de Durango (2a), Nuevo León (2b) y Coahuila (2c). La Figura 3 también muestra los estadísticos de ajuste y validación de cada modelo. Se

observa que el modelo se encuentra correctamente validado para cada uno de los estados. A la edad base de 15 años, las curvas alcanzan un área basal promedio de 18 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en Durango, 4 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en Nuevo León y 5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en Coahuila.

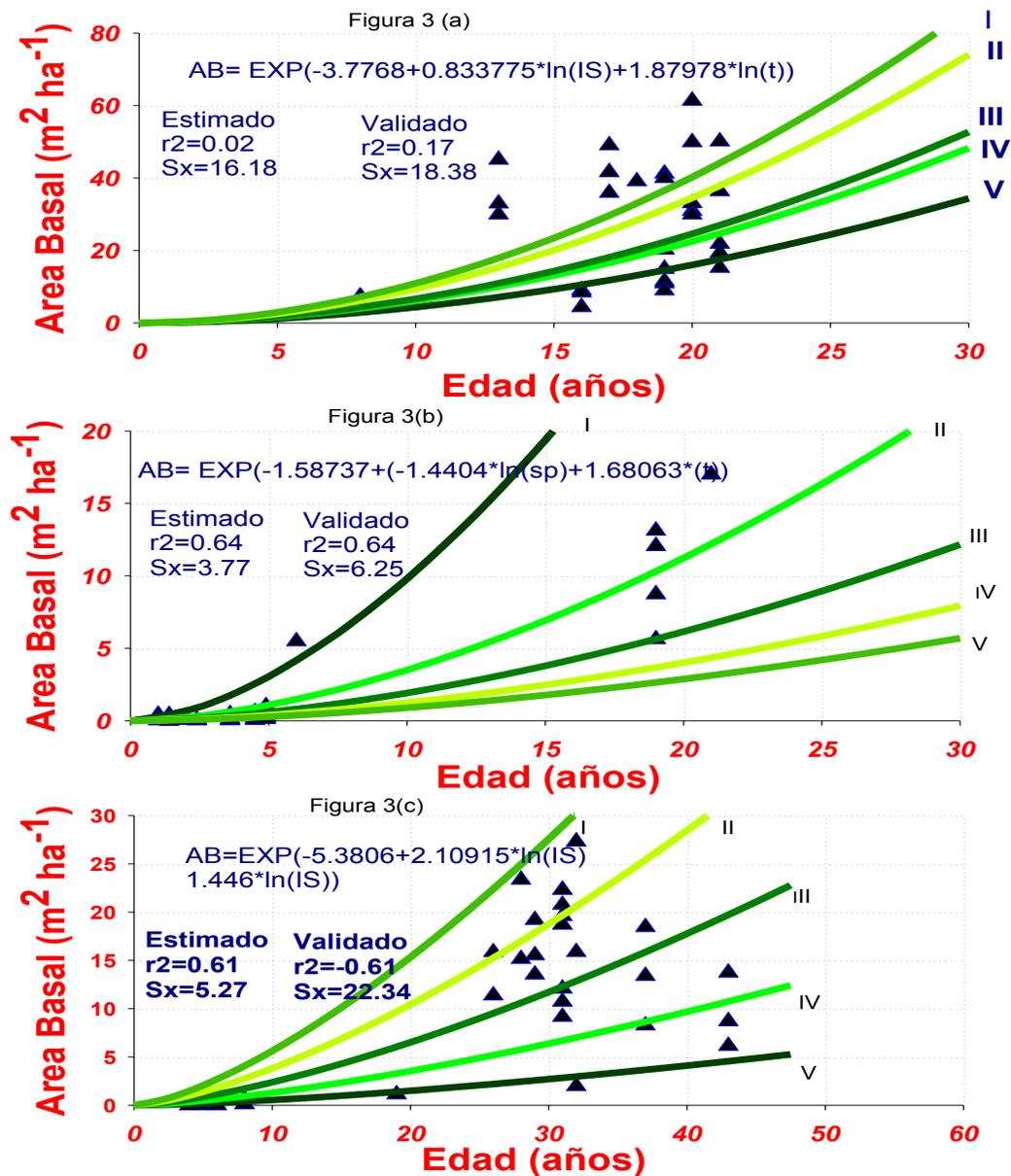


Figura 3. Áreas basales muestreadas y estimadas para áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila (c) del Norte de México .

Los estadísticos de bondad de ajuste de r<sup>2</sup> y Sx de las ecuaciones para cada región muestran diferencias importantes. Para Nuevo León, las áreas basales fueron

ponderadas por la especie en lugar de por índice de sitio. Para Coahuila, el modelo muestra una buena predicción, pero para Durango, las proyecciones no pudieron ser mejoradas. En este último estado, parece ser que la densidad inicial de la plantación y algunos aclareos voluntarios e involuntarios han modificado substancialmente el área basal (González, 2001). La predicción del área basal con la edad, como ha sido descrito por Clutter *et al.*, (1983) y Wenger, (1984) no resultan en proyecciones precisas.

El modelo de incremento y rendimiento en forma gráfica y en forma matemática se presenta en la Figura 4., la cual también muestra los estadísticos de ajuste y validación de cada modelo. Se observa que el modelo se encuentra correctamente validado para cada uno de los estados. Los estadísticos de predicción y validación mejoraron substancialmente en contraste con los modelos de área basal e índice de sitio. Estos nuevos modelos explican más del 97% de la variación total en el volumen y las variables explicatorias convencionalmente descritas (Clutter, 1980; Clutter *et al.*, 1983; Wenger, 1984; Zepeda y Domínguez, 1998; González, 2001; Návar *et al.*, 2005) fueron el recíproco de la edad, el área basal y el índice de sitio transformados todos al logaritmo natural.

Los modelos proyectan, en promedio, a una edad de 25 años,  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para Durango,  $22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para Nuevo León y  $12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para Coahuila. Esto indica que los incrementos medios anuales serían de 6.00, 0.95 y  $0.48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , respectivamente. Las variaciones son de nuevo mayores en Durango, después en Nuevo Leon y por último en Coahuila.

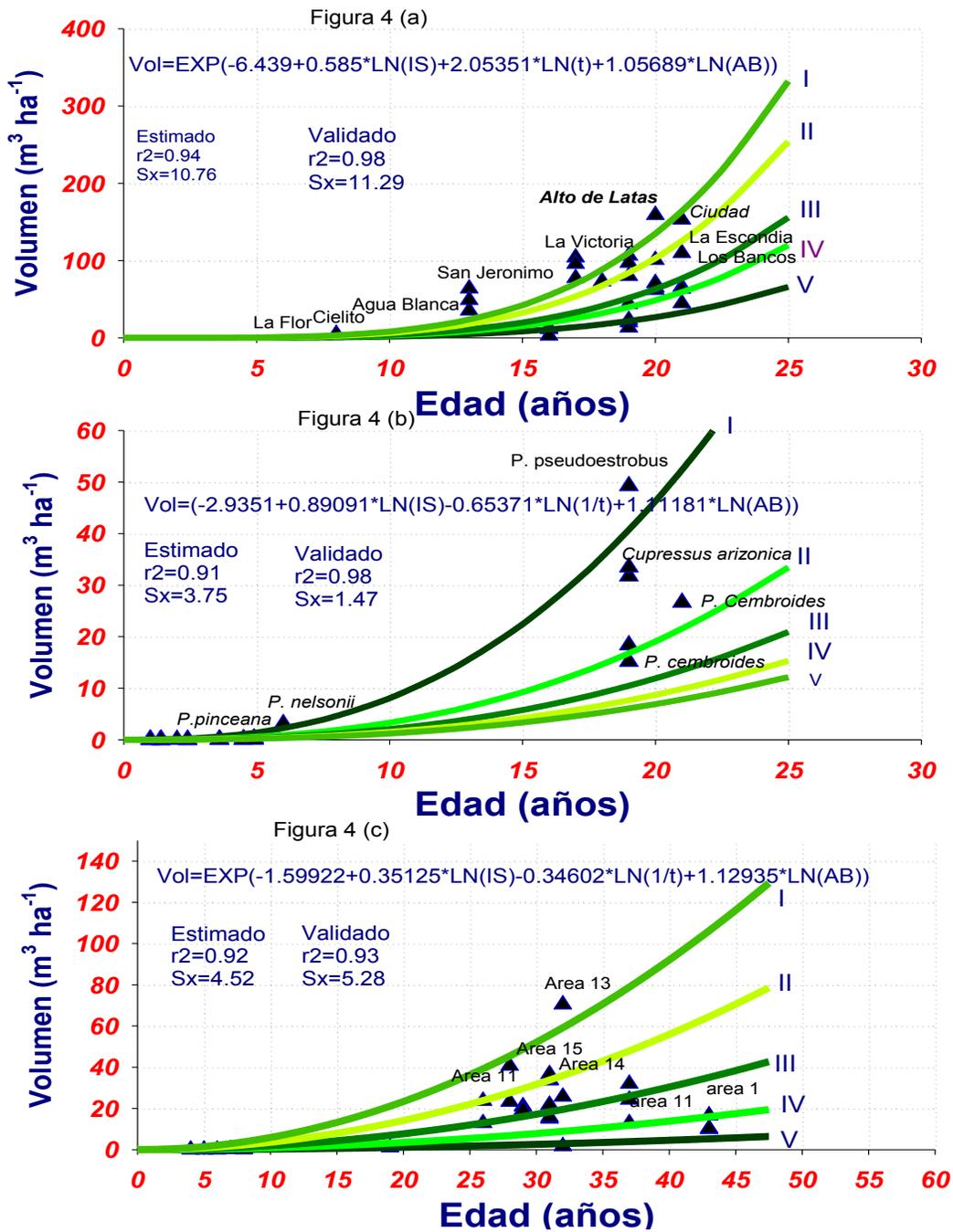


Figura 4. Volumen muestreado y estimado para áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila (c) del Norte de México.

La biomasa calculada con los factores de expansión se muestra en la Figura 5. La biomasa acumulada en los árboles, a los 25 años de edad, alcanza  $190 \text{ Mg ha}^{-1}$  en promedio para Durango,  $27 \text{ Mg ha}^{-1}$  en Nuevo León y  $13 \text{ Mg ha}^{-1}$  en Coahuila. Estos datos indican valores de almacenamiento de biomasa de aproximadamente  $7.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en Durango,  $1.08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en Nuevo León y  $0.52 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en Coahuila.

Los factores de expansión mostraron promedios de 1.19, 2.00 y 1.12 para Durango, Nuevo León y Coahuila, respectivamente, indicando que existe mayor proporción de otros componentes de biomasa en vegetación de Nuevo León y aproximadamente la misma en Durango y Coahuila. Los factores de expansión también mostraron ser estadísticamente dependientes de la altura promedio, el diámetro promedio y la cobertura promedio para los tres estados. Se recomienda tener cuidado en el uso o extrapolación de estos factores de expansión para otras comunidades vegetales.

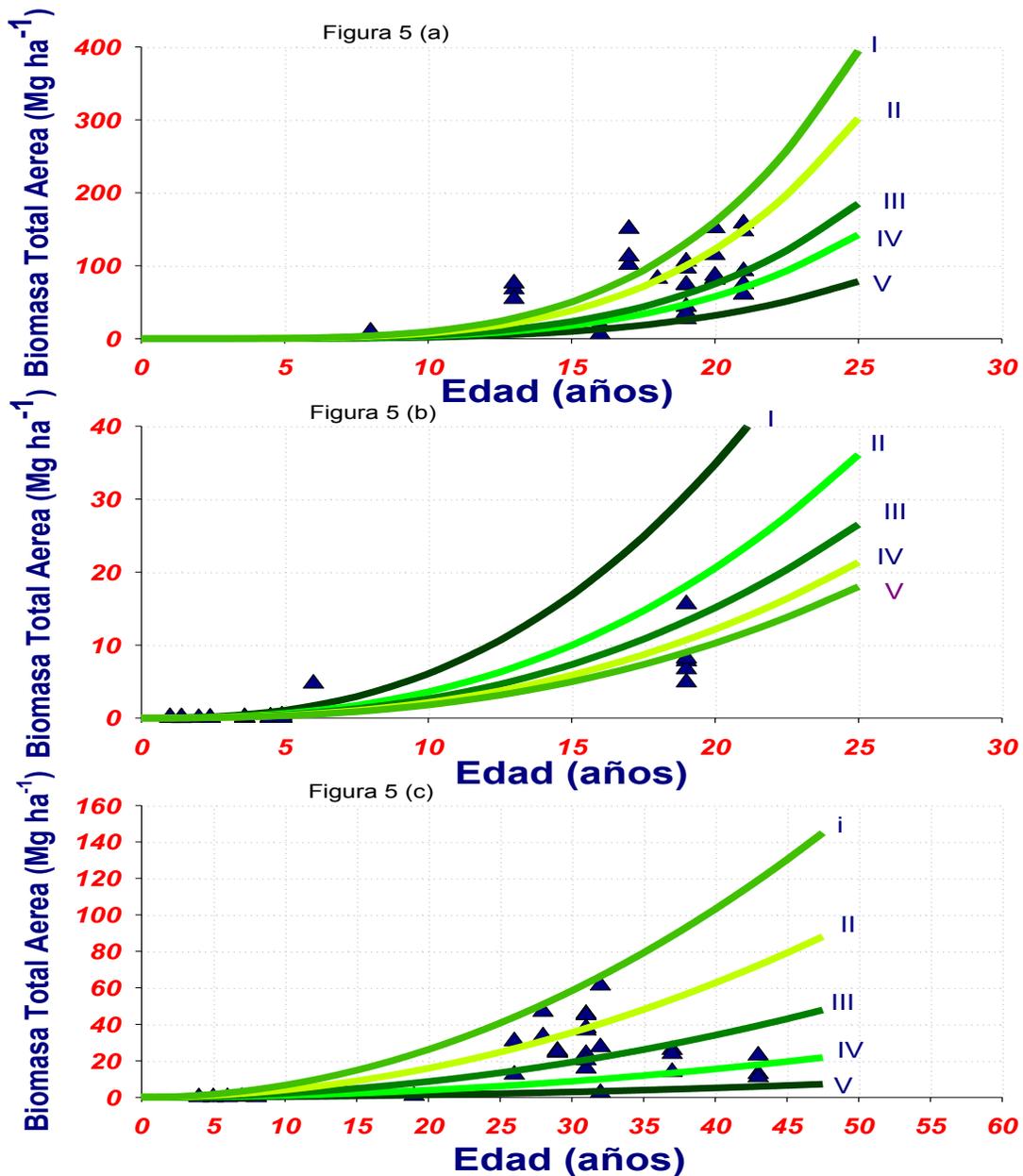


Figura 5. Biomasa muestreada y estimada para áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila (c) del Norte de México.

El carbono almacenado estimado y proyectado se muestra en la Figura 6. Las proyecciones indican tasas promedio de secuestro de carbono de 3.9 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para Durango, 0.9 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para Nuevo León y 0.45 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para

Coahuila. Estos resultados muestran el potencial promedio, pero existen especies en Nuevo León como *P. pseudostrobus* que alcanzarían las tasas de secuestro de carbono promedio para Durango. Sin embargo, las tasas de secuestro menores de las especies de pino de Durango son mucho mayores que las tasas de secuestro promedio de las especies de Nuevo León.

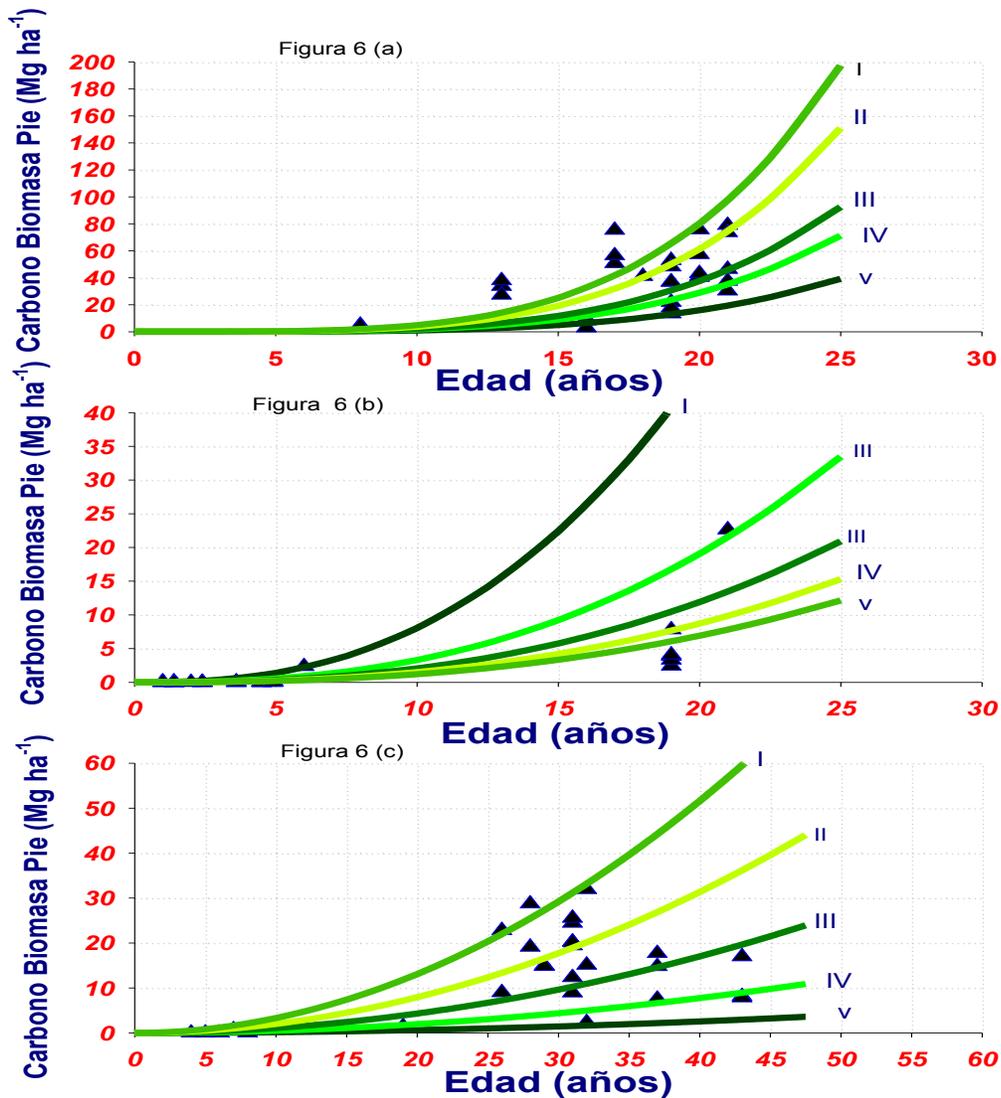


Figura 6. Carbono muestreado y estimado para áreas reforestadas de Durango (a), Nuevo León (b) y Coahuila (c) del Norte de México.

## 2. 6 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se desarrolló un modelo de incremento y rendimiento al nivel del rodal para especies de coníferas plantadas en sitios degradados de tres estados del norte de México. El modelo se expandió para el cálculo de la biomasa y el carbono contenido en la vegetación en pie. Las proyecciones de captura de carbono indican que las áreas reforestadas en el Estado de Durango secuestran una tasa promedio anual de  $3.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mientras que la vegetación de los estados de Nuevo León y Coahuila secuestran una tasa promedio de  $0.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $0.45 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , respectivamente. Los resultados de esta investigación reflejan el potencial que existe para desarrollar proyectos ambientales que permitan restaurar los ecosistemas forestales de las vertientes montañosas de Durango, Nuevo León y Coahuila.

## 2. 7 BIBLIOGRAFÍA

- Brown S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. *In: Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Arbores. Vol 1. Antalya Turkia 13-22 October of 1997.*
- Clutter J. L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *For. Sci.* 9: 354-371.
- Clutter J. L., J.C. Forston L., Pienaar G.H. Brister and Bailey R. L 1983. Timber management: A quantitative approach. Wiley, New York. 333 p.
- González B., N. 2001. Ajuste y validación de modelos para estimar biomasa y rendimiento e incremento en biomasa en plantaciones forestales del estado de Durango. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. U. A. N. L, Linares, Nuevo León. Pp. 38-50
- Návar J., González N., Maldonado D., Graciano J., Dale, V. 2001. Carbon sequestration by forest plantations of Durango, México. *Enviado a Biomasa & Bioenergy.* 35 p.

- Návar J., González N., Maldonado D., Graciano J., Dale, V. and Parresol, B. 2004a. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10(2): 17-28
- Návar J., Méndez E., Nájera A. Graciano J., Dale V. and Parresol B, 2004b. Biomasa equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern México. Press in *Journal of Arid Environments*. 59(4) 657-674
- Návar J., González N., Graciano J., 2001. Carbon sequestration by forest in reforested sites of Durango, México. Enviado a *Madera y Biomasa & Bioenergy*. 35 p.
- Návar J., González N. y Graciano J. 2005. Sequestration in reforested sites of Durango, México. Enviado a la *Revista Maderas y Bosques*. 29 p.
- Nabururs, G.J, and Mohren G. 1993. Carbon Fixation through forestation activities. A study of the carbon sequestering potential of selected forest types Commissioned by the foundation Face Report. IBN 93/4. Institute for Forest Absorbing Carbon dioxide Emission. Holanda. P. 206
- Oviedo R, J, L. 1980. Inventario de las alternativas de transformación de especies forestales de la Sierra de Zapalinamé en Saltillo, Coahuila. Tesis de Ingeniero Agrónomo Forestal, Universidad Autónoma Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. pp. 4-58.
- SEMARNAT. Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales. 2001. Estadísticas de deforestación en México 1993-2000, México, D. F
- Zepeda B., M., y Domínguez-Pereda A. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engelm., de El Poleo, Chihuahua. *Madera y Bosques* 4(1)27-39
- Wenger K., F. 1984. *Forestry Handbook*. Second Edition. Society of American Foresters. John Wiley & Sons. New York. 1335 p.