



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
CARRERA DE BIOLOGÍA

**ESTIMACIÓN DASOMÉTRICA DE CARBONO  
ALMACENADO EN UN BOSQUE DE *Abies religiosa*  
(H.B.K.) Schl. et Cham. DEL PARAJE EL CEDRAL  
DEL PARQUE NACIONAL “EL CHICO”, HIDALGO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**B I Ó L O G A**

PRESENTA A:

**VERÓNICA MONSERRAT RODRÍGUEZ SÁNCHEZ**

DIRECTOR:

M. en C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ



*Septiembre de 2013*



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
P R E S E N T E.

Comunico a usted que la alumna **RODRÍGUEZ SÁNCHEZ VERÓNICA MONSERRAT**, con número de cuenta **409087813**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **3** del mes de **septiembre** de 2013 a las **12:00 hrs.** para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE M. en C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS

VOCAL M. en C. GERMÁN CALVA VASQUEZ

SECRETARIO DR. EFRAÍN R. ÁNGELES CERVANTES

SUPLENTE BIÓL. MARÍA DE LOS ÁNGELES GALVÁN VILLANUEVA

SUPLENTE M. en C. FAUSTINO LÓPEZ BARRERA

*[Handwritten signatures and lines for the jury members]*

El título de la tesis que presenta es: **Estimación dasométrica de carbono almacenado en un bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. del paraje El Cedral del Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo.**

Opción de titulación: tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE  
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”  
México, D. F., a 18 de junio de 2013.

Dr. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ  
DIRECTOR  
ZARAGOZA  
DIRECCION



RECIBÍ  
OFICINA DE EXÁMENES  
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.  
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL  
JEFE DE CARRERA



## *Dedicatoria*

*A Dios, por ponerme en este tiempo y lugar, con los seres queridos que me rodean, pero sobretodo por jamás dejar de iluminar mi camino por más adverso y peligroso que sea, junto a la madre amorosa y sus custodios que me guían.*

*A mi Toñita donde sea que te encuentres, porque tu inculcaste en mí el gusto por amar a la naturaleza.*

*A los cuatro pilares que sostienen mi vida, que son lo que más amo, por ser mi brújula y guía además del impulso a seguir cada día.*



## *Agradecimientos*

*A María Luisa, mi madre, por tu apoyo incondicional, tu amor y cariño, tus llamadas de atención, instruirme a ser una mujer que no se deja vencer por oscuro que se vea el camino, a no temerle a nada y ser entregada en lo que haga. ¡Gracias!, todo ello me ha forjado lo que soy hasta el día de hoy. Por ser la razón de mí existir, mi amiga con la que siempre voy a contar y a la cual jamás en la vida voy a dejar de lado. Además de enseñarme que si estudias algo que te gusta, a pesar del tiempo lo que bien se aprende jamás se olvida.*

*Gustavo, mi hermano, por ser mi ejemplo de vida, enseñarme a no rendirme jamás, y que aunque la vida te golpeé muy duro uno tiene levantarse como un guerrero a seguir hasta el final de la batalla, aferrarse a tus sueños hasta hacerlos realidad, por ser un excelente ser humano que siempre se preocupa por el bienestar de todos los que amas; por todo tu apoyo en todos los aspectos hasta el final de este peldaño, gracias por hacerme más ligera la carga y siempre pasar buenos momentos a tu lado desde que éramos niños.*

*Jesús, mi padre, por tu amor, los momentos de risas, enojos y alegrías; por tus mimos cuando era niña, tus regaños y enseñanzas a formarme el carácter, porque a la vida hay que verle el lado bueno a pesar que no sea como uno lo planeo, siempre con la frente en alto y la humildad en el corazón. Gracias, por dejarme ser tu muñeca a la que cuidas y celas, por ser uno de esos pilares de mi vida y que si no estuvieran allí probablemente yo no sería como soy.*

*Esteban, el último de mis pilares que le pone luz a mi camino, infinitas ¡Gracias! por todo tu apoyo desde el día en que te conocí hasta este día, siempre has estado allí para apoyarme en el instante que sea y es algo que valoro y valoraré toda la vida. Por ti he aprendido muchas cosas, entre ellas a conocerme mejor, aceptarme y dejar de lado muchos complejos. Crecer y madurar a tu lado ha sido un proceso muy grato, con sus buenos y malos ratos de los cuales no cambiaría ninguno pues eso lo hace especial. Sabes lo más importante es que seguimos juntos, le agradezco a Dios y la vida por ponerte en mi camino, espero me permitas seguir a tu lado por mucho tiempo más, porque el estar contigo me hace sentir plena, espero nunca olvides que te amo demasiado y siempre voy a procurar tu bienestar como hasta ahora.*

*Jenny, por ser esa segunda madre con la que siempre cuento y a la cual también amo con mucho fervor, por todas tus atenciones y dedicación, no tienes idea de cuánto de agradezco las cosas lindas que has hecho por mí y mi familia, se que Dios te lo ha de recompensar. Ojalá este esfuerzo obtenido sea significativo y te llene de satisfacción, gracias por estar allí y no olvides que siempre estaré junto a ti.*



*A Samy y Jonathan, pues son parte de ese gran motor que me inspira a luchar por conseguirles un mundo mejor, les prometo no rendirme hasta lograr algo al respecto. Al abuelo Félix, a mis tías Rebeca y Celia, al tío Javier y a Memo; pues de alguna manera también ayudaron a que esta meta fuera posible alcanzar; les agradezco de todo corazón su apoyo como una familia unida que siempre se apoya, por inspirarme a ser mejor cada día y aferrarme a seguir ante cualquier adversidad.*

*Al M. en C. Germán Calva Vásquez por brindarme un espacio en su laboratorio, por su gran apoyo y asesoría en la elaboración de este trabajo; por esas sacudidas mentales y golpes de realidad, que me abrieron más los ojos para hacer algo por esta humanidad, pero sobretodo su calidad humana, las risas, enojos y consejos; cada uno fue muy significativo e hicieron de mi última estancia una de las más placenteras en esta Facultad, mis más sinceros agradecimientos.*

*Al M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, por ser mi asesor en el último año de laboratorio con una cálida y grata convivencia, además de abrir mis expectativas profesionales y hacerme ver lo importante que es compartir los conocimientos con cualquier persona y obtener un provecho donde otros ven un desperdicio.*

*A la Bióloga María de los Ángeles Galván Villanueva, pues sus clases me reafirmaron el camino, lo mío son las ciencias ambientales, gracias por sus consejos y oportunas observaciones a este trabajo.*

*A mis revisores Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes y al M. en C. Faustino López Barrera, por sus recomendaciones y aportaciones a este trabajo.*

*A la Maestra Dora A. Pérez González, por enseñarme que el trabajo interdisciplinario es muy enriquecedor, además de transmitirme técnicas y conocimientos adicionales a mi profesión siempre de una forma alegre.*

*Al M. en C. Jorge Antonio Valdivia Anistro, por las enseñanzas básicas al laboratorio ya que fueron excelentes herramientas para la carrera. A todos mis docentes que me formaron desde el inicio a esta familia Zaragozana, gracias por compartir su sabiduría, prometo no defraudarlos y hacer algo provechoso por nuestra sociedad.*

*Pero ante todo a nuestra máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de estudiar en sus recintos del saber y poder darme la dicha de conocer magníficas personas.*

*A mis niñas, casi hermanas Yuri, Daniela e Isabel, por todos esos momentos de risas, preocupación, histeria, incertidumbre, llantos, alegría siempre era y será un placer pasar momentos junto a ustedes, por esos bellos recuerdos de los mejores años de vida hasta ahora, saben que son parte de mi tesoro especial, las quiero mucho.*



*A mis amigos Arturo, Noé y José Luis, por hacerme reír, cuidarme en las prácticas de campo y hacerme pasar momentos muy agradables en la Facultad; su amistad es muy valiosa y especial. También a Giovanni, por soportar mis pesadeces y dejarme mostrarte que las apariencias engañan y no todo es cómo parece, fue ameno el tiempo que pasamos juntos, ten presente que se te quiere y aprecia.*

*A mis estimados colegas y amigos del Laboratorio de Contaminación Atmosférica, Neto, Anayeli, Yareli, Ivonne, Elías y Yesenia porque sin ustedes este trabajo no podía haberse llevado a cabo; además que este año me la pase muy bien, pues somos una pequeña y unida familia que jamás para de reír aunque a veces hagamos enojar al jefe, espero en un futuro cercano poder realizar proyectos junto a ustedes, así que a tupirle y titularse pronto, ¡los quiero un montón!*

*Infinitas gracias a todos los que creen en mí y demostrarme que nunca he estado sola...*

*[...]Daylight, I must wait for the sunrise*

*I must think of a new life*

*And I mustn't give in*

*When the dawn comes, tonight will be a memory too*

*And a new day will begin [...]*

*Letra Memory (Cats) - Andrew Lloyd Webber*

*“Cuando un sueño muere es porque se ha hecho verdad”*

*Letra Hoy toca ser feliz ( Mago de Oz) -Thux Di Felliato*



**Pale**

*The world seems not the same  
Though I know nothing has changed.  
It's all my state of mind; I can leave it all  
behind. I have to stand up to be  
stronger.*

*I have to try  
to break free from the thoughts in my  
mind.*

*Use the time that I have  
I can't say goodbye  
Have to make it right  
Have to fight, because I know In the  
end it's worthwhile  
That the pain I feel slowly fades away, It  
will be alright.*

*I know, should realize  
Time is precious, it is worthwhile  
Despite how I feel inside have to trust it  
will be alright, have to stand up to be  
stronger.*

*I have to try  
to break free from the thoughts in my  
mind.  
Use the time that I have  
I can't say goodbye  
Have to make it right  
Have to fight, because I know In the  
end it's worthwhile  
That the pain I feel slowly fades away, It  
will be alright.*

*Oh this night is too long  
I have no strength to go on  
No more pain, I'm floating away  
Through the mist I see the face  
Of an angel, who calls my name  
I remember you're the reason I have to  
stay.*

*I have to try  
to break free from the thoughts in my  
mind.  
Use the time that I have  
I can't say goodbye  
Have to make it right  
Have to fight, because I know In the  
end it's worthwhile  
That the pain I feel slowly fades away, It  
will be alright.*

**Pálido**

*El mundo no parece el mismo, a través  
de lo que sé nada ha cambiado.  
Todo está en mi estado de ánimo,  
Debo dejar todo atrás, Tengo que  
levantarme y ser fuerte.*

*Debo liberarme de los pensamientos de  
mi mente.*

*Usar el tiempo que tengo, no puedo  
decir adiós,  
Tengo que hacerlo bien.  
Tengo que luchar, porque sé que al final  
valdrá la pena.*

*Que el dolor que siento suavemente  
desaparecerá, todo estará bien.*

*Sé que debo darme cuenta que el  
tiempo es precioso y vale la pena.  
A pesar de cómo me sienta por dentro  
tengo que confiar en que todo va a estar  
bien, debo levantarme y ser más fuerte.*

*Debo liberarme de los pensamientos de  
mi mente.*

*Usar el tiempo que tengo, no puedo  
decir adiós,  
Tengo que hacerlo bien.  
Tengo que luchar, porque sé que al final  
valdrá la pena.*

*Que el dolor que siento suavemente  
desaparecerá, todo estará bien.*

*Oh, esta noche es tan larga.  
No tengo fuerzas para seguir.  
No hay más dolor, me voy flotando.  
A través de la niebla veo la cara de un  
ángel que me llama.  
Recuerdo que ustedes son la razón por  
la cual debo quedarme.*

*Debo liberarme de los pensamientos de  
mi mente.*

*Usar el tiempo que tengo, no puedo  
decir adiós,  
Tengo que hacerlo bien.  
Tengo que luchar, porque sé que al final  
valdrá la pena.*

*Que el dolor que siento suavemente  
desaparecerá, todo estará bien.*

*Whitin temptation, The Silent Force  
2004.*



## Contenido

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>XI</b>     |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>1</b>      |
| <b>II. ANTECEDENTES</b> .....   | <b>6</b>      |
| <b>III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....  | <b>13</b>     |
| <b>IV. HIPÓTESIS</b> .....  | <b>14</b>     |
| <b>V. OBJETIVOS</b> .....   | <b>15</b>     |
| <b>VI. MARCO TEÓRICO</b> .....  | <b>16</b>     |
| 1. EL CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES.....  | 16            |
| 2. CONCEPTOS FORESTALES .....   | 19            |
| 2.1 <i>El bosque</i> .....  | 19            |
| 2.2 <i>Estructura de un rodal</i> .....   | 20            |
| 2.3 <i>El árbol</i> .....   | 21            |
| 2.4 <i>Crecimiento de los árboles</i> .....   | 24            |
| 3. BIOMASA FORESTAL .....   | 29            |
| 4. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA BIOMASA .....   | 31            |
| 5. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO.....   | 33            |
| 6. ECUACIONES ALOMÉTRICAS.....  | 35            |
| 6.1 <i>Modelo potencial</i> .....   | 37            |
| 6.2 <i>Coficiente de correlación</i> .....  | 40            |
| 7. DEL MODELO ALOMÉTRICO A LA CAPTURA DE CARBONO .....                                      | 42            |
| <b>VII. MÉTODO</b> .....  | <b>43</b>     |
| 7.1.1 <i>Descripción de la zona de estudio</i> .....  | 43            |
| 7.1.2 <i>Fase de campo</i> .....  | 47            |
| 7.2.1 <i>Variables dasométricas</i> .....   | 50            |
| 7.2.2 <i>Estimación de la Biomasa aérea</i> .....   | 51            |
| 7.2.3 <i>Estimación del Contenido de Carbono</i> .....                                      | 53            |
| 7.2.4 <i>Determinación de ecuaciones alométricas para Biomasa y Contenido de Carbono</i> .. | 54            |
| 7.2.5 <i>Edad cronológica del bosque</i> .....  | 54            |
| 7.2.6 <i>Análisis retrospectivo del contenido de carbono</i> .....                          | 55            |
| <b>VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....   | <b>56</b>     |
| <b>IX. CONCLUSIONES</b> .....   | <b>82</b>     |
| <b>X. RECOMENDACIONES</b> .....   | <b>84</b>     |
| <b>XI. LITERATURA CONSULTADA</b> .....  | <b>85</b>     |
| ANEXO 1. DENDROFLEXÓMETRO© MEDICIÓN DE ALTURA (ESCALA 1/10). .....                          | 98            |
| ANEXO 2. FORMATO DE REGISTRO EN CAMPO PARA INVENTARIO FORESTAL .....                        | 100           |



## Índice de Figuras

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Figura 1.</b> Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Modificado de Fragoso, 2003).  | 16            |
| <b>Figura 2.</b> Depósitos de carbono en un ecosistema forestal (Modificado de Rodríguez, 2007).   | 17            |
| <b>Figura 4.</b> Anatomía de un árbol.   | 22            |
| <b>Figura 5.</b> Corte transversal de un tronco de árbol.  | 23            |
| <b>Figura 6.</b> Curva sigmoidea típica de tamaño acumulado tomada de Cancino, 2006.   | 26            |
| <b>Figura 7.</b> El máximo crecimiento corriente anual (ICA) coincide con el punto de inflexión de la curva de crecimiento acumulado; el máximo incremento medio anual (IMA) se obtiene en el punto en que se iguala con el ica; también corresponde al máximo ángulo que puede trazarse en la curva de tamaño acumulado, con vértice en el origen del sistema de coordenadas. | 27            |
| <b>Figura 8.</b> Modelo potencial tomado de Colegio de Posgraduados, 2001.   | 39            |
| <b>Figura 9.</b> Modelo linealizado tomado de Colegio de Posgraduados, 2001.   | 40            |
| <b>Figura 10.</b> Diversos tipos de correlación.   | 41            |
| <b>Figura 11.</b> Mapa de Zonificación del Parque Nacional El Chico, Hgo. (Tomado de CONANP, 2005) el punto rojo representa la zona del parque muestreada.   | 46            |
| <b>Figura 12.</b> Porciones del bosque de Oyamel muestreadas.  | 47            |
| <b>Figura 13.</b> Método de muestreo de conglomerado de 4 sitios circulares.   | 48            |
| <b>Figura 14.</b> Medición de Circunferencia Basal (CB) y Circunferencia Normal (CN) en un bosque de Abies religiosa, para la posterior obtención del Diámetro basal y normal.   | 49            |
| <b>Figura 15.</b> a) DendroFlexómetro, b) la medición con la escala 1/10. Tomado de DendroFlexómetro, ceseFOR, 2009.   | 49            |
| <b>Figura 16.</b> Cuadrante de 1ha. para la densidad del bosque de Oyamel.   | 49            |
| <b>Figura 17.</b> Medición de la albura en la viruta extraída.   | 50            |
| <b>Figura 18.</b> Sitios de muestreo, a) Paraje el Cedral, b) Caseta experimental del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.   | 57            |
| <b>Figura 19.</b> Software WinDendro que muestra los Path para la cuenta de anillos en los núcleos extraídos.  | 58            |
| <b>Figura 20.</b> Categorías diamétricas vs número de observaciones.   | 60            |
| <b>Figura 21.</b> Porcentajes por etapas de vida en ambos sitios de muestreo.  | 62            |
| <b>Figura 22.</b> Etapa de edad vs Número de Observaciones.  | 62            |
| <b>Figura 23.</b> Vista de la altura de árboles en el bosque de oyamel en el paraje “Estación Experimental”.   | 64            |
| <b>Figura 24.</b> Curva de ajuste para alturas medias por categoría diamétrica. La línea verde representa la curva obtenida, las líneas paralelas (azul) representan el intervalo de confianza del 95% de ajuste de la regresión, las líneas moradas representan el límite del intervalo donde pueden encontrarse los datos.   | 65            |



- Figura 25.** Diferencias entre la estimación de alturas. H OBS=Altura observada, H CAL=altura calculada por el modelo  $y = 8.13391 \cdot \ln(x) - 8.81774$ . 66
- Figura 26.** Alturas promedio vs Categorías Diamétricas obtenidas por Manzanilla, (1974). La línea verde representa la curva obtenida, las líneas paralelas (azul) representan el intervalo de confianza del 95% de ajuste de la regresión, las líneas moradas representan el modelo teórico, es decir, el límite del intervalo donde pueden encontrarse los datos. 69
- Figura 27.** Modelo obtenido para estimación de Biomasa (MgB). La línea rosa representa la curva obtenida. 71
- Figura 28.** Modelo obtenido para el contenido de carbono (MgC). La línea azul representa la curva generada. 74
- Figura 29.** Contenido de carbono desde hace 50 años por quinquenios. 76
- Figura 30.** Matriz de variables. La cruz roja indica el valor promedio en cada caso. 79



## Cuadros

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Cuadro 1.</b> Cuadro resumen sobre la estimación de biomasa y carbono en especies de bosques templados de altura.   | 12            |
| <b>Cuadro 2.</b> Categorías diamétricas para <i>Abies religiosa</i> .  | 60            |
| <b>Cuadro 3.</b> Categorías diamétricas vs altura promedio.  | 66            |
| <b>Cuadro 4.</b> Categorías diamétricas según Manzanilla (1974) vs altura promedio.  | 68            |
| <b>Cuadro 5.</b> Ajuste de modelos obtenidos para DN vs Biomasa, donde $x$ =Diámetro Normal (cm), $a$ y $b$ = constantes de la ecuación.   | 71            |
| <b>Cuadro 6.</b> Estimadores estadísticos de biomasa vs diámetro normal para la regresión alométrica. *El valor de la ordenada al origen es el $\ln$ de $a$ .                                | 72            |
| <b>Cuadro 7.</b> Análisis de Varianza entre biomasa y DN.  | 72            |
| <b>Cuadro 8.</b> Ajuste de modelos obtenidos para DN vs Contenido de Carbono, donde $x$ =Diámetro Normal (cm), $a$ y $b$ = constantes de la ecuación.  | 73            |
| <b>Cuadro 9.</b> Estimadores estadísticos de contenido de carbono vs diámetro normal para la regresión alométrica.   | 73            |
| <b>Cuadro 10.</b> Análisis de Varianza entre contenido de carbono y DN.  | 74            |
| <b>Cuadro 11.</b> Estimación del contenido de carbono por quinquenios a través del modelo $CC=1.8933 \times 10^{-5} \times DN^{2.62221}$ con diámetros obtenidos en las lecturas de anillos. | 75            |
| <b>Cuadro 10.</b> Resumen de promedio y desviación estándar de las variables.  | 77            |
| <b>Cuadro 11.</b> Análisis de Varianza de las variables.   | 78            |
| <b>Cuadro 12.</b> Comprobación de Varianza.  | 78            |



## Resumen

En el ámbito internacional y México se han iniciado estrategias para la captura de CO<sub>2</sub> como forma de mitigar su incremento en la atmósfera. Una forma eficiente y natural es por medio de los bosques, ya que capturan, fijan y almacenan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre. Para generar prácticas en proyectos de conservación y manejo forestales, es necesario medir y monitorear el carbono almacenado, especialmente en el estrato aéreo que es el más fácil de manipular. Las ecuaciones alométricas son empleadas para calcular la biomasa y el contenido de carbono en los bosques templados; los estimadores para generar las ecuaciones se obtienen a partir de la biomasa seca aérea. En el análisis de regresión se relacionan dos o más variables (diámetro normal, altura, biomasa, contenido de carbono). En el presente estudio se generaron dos modelos para determinar la biomasa y el contenido de carbono en una porción del bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo a partir de inventarios forestales con registros del Diámetro Normal (DN), Área Basal y Altura de 250 árboles. La biomasa y el contenido de carbono se determinaron a través del análisis dimensional de las variables referidas con el empleo de ecuaciones establecidas previamente para la cubicación de la biomasa leñosa. Las ecuaciones obtenidas siguen un modelo potencial,  $Y = b \cdot X^k$ , donde  $Y$ , es el contenido de biomasa y carbono,  $X$  es el DN y  $b$ ,  $k$  son los estimadores de la ecuación. Para establecer los modelos predictivos de biomasa y carbono, se empleó el DN registrado en campo y se obtuvo el ajuste de los parámetros  $b$  y  $k$  de los modelos propuestos,  $B = 3 \times 10^{-5} \cdot DN^{2.6225}$  y  $C = 2 \times 10^{-5} \cdot DN^{2.6225}$ . Los parámetros para ambas ecuaciones fueron estimados con un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 1. Los resultados permiten concluir que el rodal muestreado de 1.34 ha contiene 239.74 Mg de biomasa (MgB) y 143.36 Mg de carbono (MgC) almacenado en el estrato aéreo, para la porción del bosque de oyamel y el cálculo para todo el parque, la cantidad extrapolada es de



308,692.09 MgB, 184,592.05 MgC; finalmente se encuentran 178.91 MgB\*ha<sup>-1</sup> y 106.98 MgC\*ha<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** Biomasa, variables dasométricas, ecuaciones alométricas, modelo potencial.



## I. Introducción

Desde la década de los 70's se observaron los primeros impactos derivados del cambio climático a través de los ecosistemas terrestres, como la alteración en el estado de salud de los bosques, su crecimiento y composición; todo ello originó una preocupación en la comunidad científica. Desde la creación en 1988 de el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), se han generado diversos Protocolos y conferencias internacionales (Kolshus, 2001) para contrarrestar los efectos del cambio climático, por medio de estrategias que ayuden a la preservación de los recursos naturales a través de un manejo sustentable a través de tres ejes: 1) disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI), 2) El aumento del secuestro de CO<sub>2</sub> por efecto de la fotosíntesis, y 3) detención de la deforestación (cambio y uso del paisaje ecológico y aumento de la capa forestal).

El aumento en la concentración de los GEI es el resultado de 200 años de desarrollo industrial basado en el uso de combustibles fósiles (ONU, 1992). El CO<sub>2</sub> es el gas más importante de los GEI y representa el 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos ellos. El ritmo de incremento en la concentración de este gas fue de 1.5 ppm por año en los últimos dos decenios del siglo XX; en los años noventa la tasa de incremento anual varió de 0.9 ppm a 2.8 ppm (IPCC, 2001). La concentración en 2005 fue de 379ppm (IPCC, 2008), actualmente se han alcanzado las 400ppm



(Maser, 2013) razón por la cual es de suma importancia generar acciones que mitiguen este gas de la atmósfera.

Todos los reservorios de carbono tienen un flujo continuo por lo que se han buscado o estudiado los medios para capturarlo, y reducir su existencia en la atmósfera por procesos abióticos y bióticos.

Los bosques del mundo (templado, boreal y tropical) capturan, fijan y almacenan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre, aproximadamente con  $900 \text{ GtC} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Gigatoneladas de carbono por hectárea) que participan en flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Apps *et al.*, 1993; Malhi *et al.*, 2002; Ordóñez *et al.*, 2001). El carbono se acumula en la biomasa del ecosistema forestal a través de la fotosíntesis y en términos generales, es aproximadamente el 50 % de ella (en relación al peso seco). Este proceso ha hecho que los bosques se consideren “sumideros de carbono” que permite equilibrar la concentración de este elemento (Torres y Guevara, 2005; Breymer *et al.*, 1996; Shaver y Aber, 1996).

La FAO estudió que 15.7 millones de hectáreas se deforestaron entre 1990 y 1995 en países del tercer mundo. Así, por ejemplo nueve países de economía emergente: Brasil, Indonesia, República del Congo, Bolivia, México, Venezuela, Malasia, República de la Unión de Myanmar, Sudán y Tailandia; los cuales son responsables de la pérdida de 4-7 millones de ha. de bosque, aproximado al 50% de toda la deforestación anual. México por su parte reportó a la FAO en el 2000 que la tasa de deforestación de 1991 al 2000 fue de  $630.6 \text{ mil ha} \cdot \text{año}^{-1}$ . Sin embargo, en Informe del Proceso de Montreal se



reporto una tasa simple de deforestación de 769 mil ha\*año<sup>-1</sup> en virtud de haber estandarizado la cobertura de los bosques (templado, tropicales y matorrales).

De allí la relevancia en estimar la biomasa de un rodal forestal; Garzuglia y Sacket (2003), la definen como “la cantidad total de materia orgánica aérea presente en los árboles, como las hojas, ramas, tronco principal y corteza”, el método más común es una estimación por regresión. Este procedimiento es conocido como el análisis dimensional o alometría, basado en el estudio del cambio de proporción de varias partes involucrados en su crecimiento (López, 1988).

Los estudios forestales emplean la alometría para relacionar variables, que representan el crecimiento en altura y diámetro normal, con la estimación métrica y la cubicación de su masa, se obtiene su biomasa, ello permite cuantificar el conjunto de árboles denominado rodal. Las variables empleadas son: la altura, el diámetro normal, área basal y área de albura, para estimar otras variables difíciles de medir como la biomasa y área foliar.

Los modelos matemáticos son el método más habitual para estimar la biomasa forestal. Las ecuaciones estiman el peso seco y cubicación de las diferentes fracciones arbóreas (hojas, ramas, tronco, corteza y/o raíces) a partir del Diámetro Normal (DN) y altura; basado en la obtención de factores de proporcionalidad entre dos o más partes del árbol que darán como resultado el modelo que relaciona las variables, se debe determinar el error



estándar y el ajuste del mismo para asegurar un alto nivel de confiabilidad de la ecuación generada.

Se han realizado diversos estudios a escala mundial sobre las estimaciones del carbono acumulado en la biomasa de los bosques (Álvarez, 2008; Breugel *et al.*, 2011; Dietz y Kuyah, 2011; Gasparri y Manghi, 2004; Keller *et al.*, 2001; Nogueira *et al.*, 2008; Nogueira *et al.*, 2012; Schlegel, 2001; Watzlawick *et al.*, 2001; Zians y Mencuccini, 2004). Sin embargo, la mayoría de ellos se llevaron a cabo en bosques tropicales, manglares, zonas semiáridas y áridas; existen muy pocos para ecosistemas templados (Newton y Amponsah, 2007; Vann *et al.*, 1998; Vidal *et al.*, 2003).

En México, las investigaciones en su mayoría se enfocan a los bosques templados, con importancia económica (Avendaño *et al.*, 2009; Díaz *et al.*, 2007; Etchervers, 2001; Figueroa, 2010; García y Sánchez, 2009; Gutiérrez y Lopera, 2001; Vigil, 2010; Zamora, 2003) y en algunos casos Parques Nacionales (Acosta *et al.*, 2009; García, 2011; Jiménez, 2010; Návar, 2009; PAOT, 2010; Rodríguez, 2007; Rodríguez *et al.*, 2009; Rojas 2004; Rojas y Villers, 2005).

A pesar de existir una gran cantidad de publicaciones referentes a la cuantificación sobre la fijación de carbono por parte de pino y oyamel, aún existen muchos sitios donde no se han llevado a cabo una investigación de este tipo. Y dado que no se puede ignorar el potencial que los bosques tienen para asegurar la permanencia del carbono reservado en ellos. El trabajo



justifica la estimación de biomasa y el contenido de C en el estrato arbóreo del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) presente en el Parque Nacional “El Chico”, Hgo. por medio de modelos alométricos a partir de las relaciones de proporcionalidad a partir de censos forestales.



## II. Antecedentes

*Breve reseña histórica sobre la línea de investigación.*

Desde 1972, en la Cumbre de Estocolmo se comenzaron a tratar asuntos ambientales a nivel mundial, pero fue hasta 1982 en la Cumbre de Rio de Janeiro, que se dieron una serie de documentos encaminados a la protección y cuidado del Medio ambiente; de los cuales destacan la Declaración de los bosques y masas forestales y la Agenda 21. La primera menciona que debería reconocerse la función vital que cumplen los bosques, pues en ellos se entrañan procesos ecológicos complejos y singulares que constituyen la base de la capacidad, actual o potencial, de los de proporcionar recursos para satisfacer las necesidades humanas, además de los valores ambientales que estos tienen a escala local, nacional, regional y mundial. La Agenda 21 propone el desarrollo de medidas para la evaluación de la contaminación, con el fin de reducir las emisiones, conservar los recursos naturales para llevar a cabo una gestión sostenible de los sumideros y reservas de GEI's; al mismo tiempo establecer o reforzar sistemas nacionales de evaluación y monitoreo de recursos forestales. A partir de ello, comenzaron a generarse estudios y algunas bases de datos que contribuyeron a conocer un poco sobre el estado en el que se encontraban las masas forestales.



Los primeros estudios sobre la estimación de biomasa se llevaron a cabo en plantas herbáceas y arbustivas (Brown, 1976; Brad & Brand 1983; Grigal y Ohmann, 1977) de Norteamérica. En 1984, Brown y Lugo estimaron por primera vez la biomasa de bosques tropicales basada en el volumen forestal; Brown *et al.*, (1989) nuevamente realizaron una estimación en bosques tropicales y esta ocasión incluyeron datos de inventarios forestales. Para su desarrollo se tomaron 5 300 árboles en 43 parcelas de muestreo y 101 tablas de inventarios a gran escala de cuatro países. Ellos desarrollaron ecuaciones de regresión para estimar la biomasa promedio y comercial por árbol en función del diámetro normal, altura total, densidad de la madera. Esta aportación sentó las bases para la construcción de modelos de regresión que relacionan dos o más variables dasométricas de un árbol.

A este tipo de modelos que contrastan los cambios en las dimensiones de las partes de un organismo y que se correlacionan con los cambios en el tamaño total, se le conocen como modelos alométricos, es decir, aquellos que relacionan los cambios existentes en la forma y tamaño total. La primera investigación reconocida es la que llevo a cabo Eugène Dubois en 1897, en la que explica la relación entre el peso del cerebro y el peso del cuerpo en los mamíferos. Este y otros estudios influenció a muchos investigadores que trabajaban en una amplia gama de áreas: la fisiología del sexo embriología, endocrinología, paleontología y biometría a desarrollar diversas ecuaciones que relacionaban sus variables de estudio basándose en la ley de crecimiento de un organismo (Gayon, 2000).



### Casos de estudio en México

En México las investigaciones sobre la estimación y captura de carbono son escasas para los bosques templados de altura. Entre ellas pueden mencionarse la de Acosta *et al.*, (2009) que determinaron el carbono en la parte aérea y el suelo, en rodales de especies arbóreas (*Pinus*, *Abies*, *Quercus* y latifoliadas como *Agnus sp.* *Arbutus sp.*). Se estimó el carbono a través de la biomasa de cada componente; el pino y oyamel registraron las cantidades más altas de carbono  $301.9 \text{ Mg*ha}^{-1}$  y  $183.2 \text{ Mg*ha}^{-1}$  respectivamente.

Avendaño *et al.*, (2009) generaron dos ecuaciones para la especie *Abies religiosa* de la forma  $Y = b * X^k$ , donde  $Y$ , es el contenido de biomasa y carbono,  $X$  es el DN y  $b$ ,  $k$  son los estimadores de la ecuación. Utilizando 26 árboles en un área de aprovechamiento forestal. Los rangos de biomasa (Kg) fueron de 7.28-3,600.77; la concentración de carbono para el fuste de 46.6%, ramas 46% y follaje 46.1%; con un promedio general de 46.5%. Los rangos obtenidos en sus datos para los diámetros 5.9-79cm., en alturas de 6.8-45.5m.

Flores, (2011) determinó la PNN (Productividad Primaria Neta) del Oyamel a partir de la biomasa en un bosque en proceso de declinación cercano al Valle de México, su modelo estuvo en función del diámetro normal de árboles completos y en el caso de las ramas fue el DB (Diámetro Basal). Los modelos obtenidos para ramas y follaje son de tipo exponencial y para el



fuste un modelo potencial. La biomasa se distribuye de forma atípica con un 97% en fuste, 3% ramas y 0.07% Follaje. Recomienda el uso de sus modelos para árboles con diámetros entre 12-105 cm.; ramas de 1-120 mm.

La Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, (2010) realizó una investigación sobre el carbono almacenado en la vegetación del suelo de conservación de la Ciudad de México, para la estimación de carbono, biomasa y volumen utilizó modelos propuestos anteriormente; para *A. religiosa* reporta  $86.217 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Rojas, (2008) a través de la interpretación de 32 fotografías aéreas por medio de un SIG identificó 10 comunidades vegetales que fueron verificadas en campo a través de 15 parcelas de 1 ha cada una. Para la comunidad de *A. religiosa* se obtuvo un modelo de tipo potencial, con una biomasa de  $362.33 \text{ MgB}$  y  $265.6 \text{ MgB} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; para un bosque de Oyamel-Pino fue de  $269.138 \text{ MgB}$  y  $266 \text{ MgB} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Zamora, (2003) realizó la estimación del carbono en un ejido de Michoacán de Pino, Oyamel y latifoliadas. El género *Pinus* reporto  $22\,355 \text{ Mg}$ , *Quercus*  $1\,292 \text{ Mg}$ , para *A. religiosa*  $25\,304 \text{ Mg}$  en  $7\,215 \text{ ha}$ , es decir,  $3.5 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Esta última especie es la que cuenta con mayor número de extensión. Su investigación no generó ningún modelo pues empleó ecuaciones ya generadas para el cálculo de volumen, biomasa y carbono.

La comunidad arbórea donde se desarrolla el bosque de Oyamel se encuentran poblaciones de pino y encino, también se han desarrollado



algunos modelos alométricos de estas poblaciones entre los pueden mencionarse a:

Díaz *et al.*, (2007) seleccionaron 25 árboles de *Pinus patula* y para ajustar un modelo de tipo potencial; tomaron muestras de 5 árboles para determinar el carbono en sus diferentes componentes. Encontraron 52.21% en follaje, 49.47% en ramas y 49.26% en fuste; con un promedio para todo el árbol de 50.31%.

Figueroa, (2010) estimó la biomasa y carbono en *P. patula* a través de ecuaciones simultáneas para cada componente estructural (Fuste, ramas, follaje, corteza) de 18 árboles. La cantidad de carbono se obtuvo aplicando ecuaciones generadas y datos de un rodal de 25 años, la cantidad de carbono reportado para este estudio fue de 86.40 MgC\*ha<sup>-1</sup>.

Jiménez, (2010) dio a conocer el contenido de biomasa y carbono aéreo de *Pinus hartwegii* por medio de secado en invernadero y estufa, a su vez se determinó el contenido de carbono por el método de combustión seca. El promedio de la biomasa en el árbol es de 57.95 %, para el fuste 65.31%, en ramas del 23.79% y follaje 10.89%. Para el contenido de carbono el promedio fue de 48.55%, y un 64.91%; 24.19% y 10.90% respectivamente para cada componente.

En el cuadro 1 se expresan detalladamente los modelos, el coeficiente de regresión, las cantidades de biomasa y/o carbono obtenidas así como las variables dasométricas evaluadas. Se puede ver que en todos los modelos se emplea el diámetro normal (DN) ya que es una variable fácil de medir (altura



de 1.30 m. desde el nivel del suelo), es sensitiva a los cambios ambientales y a la densidad del rodal; y está estrechamente relacionada con la altura total del árbol, el volumen del fuste, biomasa del árbol y tamaño de la copa, variables importantes y de difícil medición en árboles en pie (Cancino, 2006).



**Cuadro 1.** Cuadro resumen sobre la estimación de biomasa y carbono en especies de bosques templados de altura.

| AUTOR                        | MODELO Y AJUSTE   | VARIABLES DASOMÉTRICAS                                 | CANTIDAD DE CARBONO Y/O BIOMASA  |
|------------------------------|---|--|--|
| <b>Acosta et al., 2009</b>   | Para <i>A. religiosa</i><br>$B=0.0754*DN^{2.513}$<br>Factor de expansión 0.4648   | DN >7.5cm<br>Área basal                                | Biomasa= 89.5% del peso total<br>Carbono= 301.9Mg*ha <sup>-1</sup>   |
| <b>Avendaño et al., 2009</b> | $B=0.0713*DN^{2.5104}$<br>$C=0.0332*DN^{2.5104}$<br>$R^2=0.99$ en ambos casos   | DN<br>Altura   | Carbono= 46.5% del peso total<br>Biomasa: Fuste=84.7%,<br>Ramas=6.95 y Follaje 08.16%  |
| <b>Díaz et al., 2007</b>     | $B=0.0357*DN^{2.6916}$<br>$C=0.021*DN^{2.6484}$<br>$R^2=0.98$ en ambos casos<br>$Bt=5.338.610+18.634DAP^2*H$<br>$R^2=0.974$   | DN   | Concentración promedio de carbono por árbol=50.31%   |
| <b>Figueroa, 2010</b>        | $BR=0.095Bt, R^2=0.992$<br>$Bft=0.777Bt, R^2=0.994$<br>$BC=0.115Bt, R^2=0.772$<br>$BF=240.890exp^{-25.519/DAP}$<br>$R^2=0.901$  | DN<br>Altura   | Biomasa ramas(BR)= 50.40%<br>Biomasa fuste (Bf)=49.66%<br>Biomasa corteza(BC)=51.87%<br>Biomasa follaje(BF)=51.88%<br>C= 86 MgC*ha <sup>-1</sup> |
| <b>Flores, 2011</b>          | $Bf = 0.0173Dn^{2.7459}, R^2 = 0.928$<br>$Bmr = 1.5842e^{0.044Dn}, R^2 = 0.6176$<br>$Ba = 0.8413e^{0.0398Dn}, R^2 = 0.588$<br>Bf = Biomasa de fuste (kg)<br>DN = Diámetro normal (cm)<br>Bmr = Biomasa de madera de las ramas (kg)<br>Ba = Biomasa de acículas (kg) | DN<br>Altura   | C=4680 Kg*ha <sup>-1</sup> *año <sup>1</sup>   |
| <b>Jiménez, 2010</b>         | $C=0.0309*DN^{2.4722}$<br>$R^2=0.98$<br>$B=0.0635*DN^{2.4725}$<br>$R^2=0.98$  | DN   | C= 48.55% del peso total<br>Biomasa:<br>Fuste= 64.91%,<br>Ramas=24.19%,<br>Follaje=10.9%   |
| <b>PAOT, 2010</b>            | $C=0.033*DN^{2.51}$<br>No se presenta $R^2$   | DN >7.5cm<br>Altura                                    | 86.217 MgC*ha <sup>-1</sup>  |
| <b>Rojas, 2008</b>           | Para <i>Abies religiosa</i><br>$B=V*Db*FE$  | Densidad básica<br>DN<br>Factor de expansión de fustes | 4 881, 685Mg de biomasa en todo el parque, de las cuales <i>Abies religiosa</i> representa 531.12MgB*ha <sup>-1</sup>                            |
| <b>Zamora, 2003</b>          | No se mencionan las ecuaciones para calcular el volumen, solo se reportan las cantidades  | DN<br>Altura<br>Área basal                             | 3.5 MgC*ha <sup>-1</sup>   |



### III. Planteamiento del problema

La herramienta más usada en investigaciones ecológicas para determinar la biomasa y contenido de carbono es por medio de modelos alométricos; éstos generalmente relacionan el diámetro normal con otros atributos, tales como altura, volumen, área foliar. La influencia de cada árbol sobre su ambiente depende de la especie y tamaño, razón por la que estos modelos usan relaciones alométricas propias de cada especie y lugar.

En México, las ecuaciones de este tipo para el caso *Abies religiosa* son muy pocas (Avendaño *et al.*, 2009; Flores *et al.*, 2011; García, 2011; Rojas, 2008) y ninguna de ellas está enfocada al bosque natural de Oyamel perteneciente del estado de Hidalgo, además de no saber cuánto carbono es capturado por estos bosques. Por tal razón, el presente estudio estableció una ecuación alométrica para estimar la biomasa y contenido de carbono, en una porción del bosque de oyamel presente en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo a través de la relación de variables dasométricas obtenidas en censos forestales y poder realizar una comparación con respecto a la captura de carbono con los modelos ya existentes.



## IV. Hipótesis

En un hábitat sin perturbación el crecimiento ocurre a una velocidad constante, uniforme y específica; el modelo dendrométrico que describe esta proporcionalidad es de tipo multiplicativo, por lo tanto, el mismo modelo podría explicar la fijación de carbono.



## V. Objetivos

### General

- ❖ Estimar el contenido de carbono en  $\text{GgC} \cdot \text{año}^{-1}$  en el estrato arbóreo de un bosque de *A. religiosa* del Parque Nacional “El Chico”, Hgo.

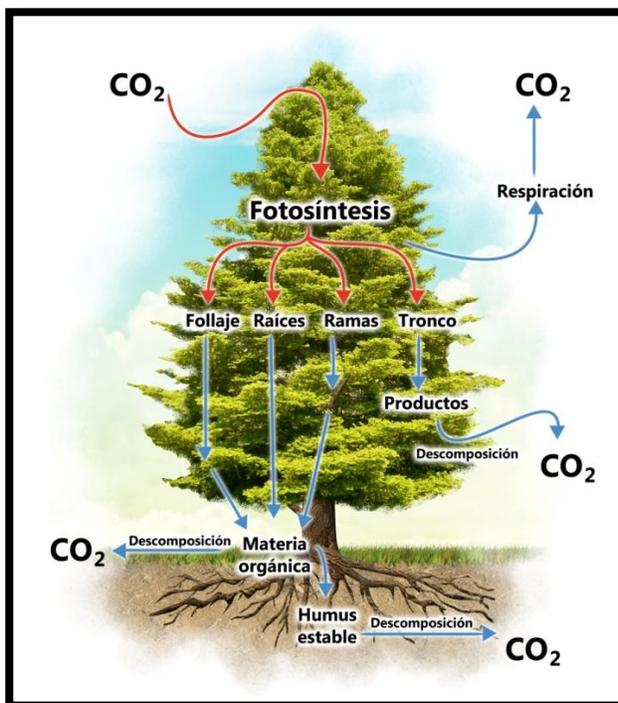
### Particulares

- ❖ Obtener la biomasa por árbol mediante una ecuación volumétrica.
- ❖ Estimar el contenido de carbono a partir de la biomasa a partir de constantes propias de la especie.
- ❖ Establecer un modelo alométrico para biomasa y contenido de carbono de *A. religiosa* con mayor nivel de ajuste y menor error estándar.
- ❖ Conocer la edad cronológica del bosque por conteo de anillos.
- ❖ Calcular el contenido de carbono desde hace 50 años.

## VI. Marco teórico

### 1. El carbono en ecosistemas forestales

La vegetación tiene la capacidad de asimilar el carbono a través de la fotosíntesis e incorporarlo a su estructura, es decir lo fija y lo mantiene almacenado por largos periodos. Este  $\text{CO}_2$  (Figura 1) participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse e incrementar su follaje, ramas el grosor de su tronco y la cantidad y grosor de sus raíces, es en estos elementos donde el árbol almacena carbono. Por esta razón los bosques son importantes sumideros de carbono y son de suma importancia en la mitigación de los gases de efecto invernadero (Avendaño, 2006).

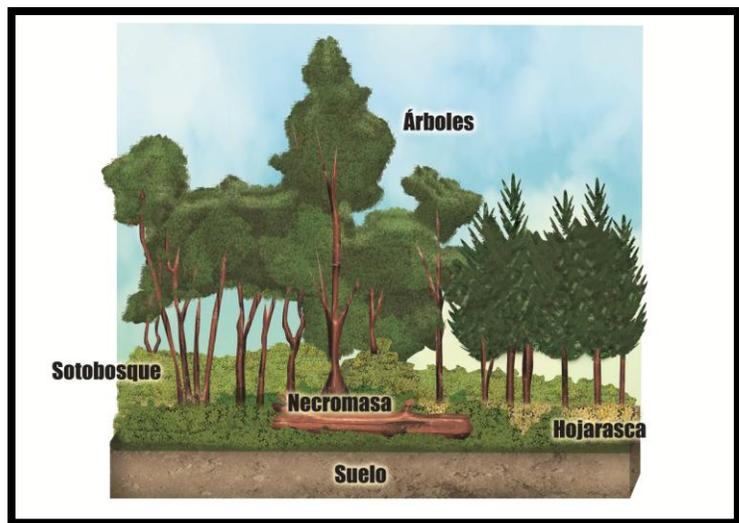


**Figura 1.** Flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Modificado de Frago, 2003).

Los ecosistemas forestales almacenan más del 80% de todo el carbono existente por encima de la superficie de la tierra y más del 70% del carbono orgánico en el sustrato (Isaza y Campos, 2007). La distribución del carbono en masas forestales puede diferenciarse en función del tipo de vegetación, así en un bosque tropical más del 80%

del carbono es almacenado en la parte aérea y cerca de 20% en el suelo. Respecto de un bosque de coníferas el carbono se distribuye a razón de 50% en parte aérea y en suelo, (Monterroso y Gómez, 2003). Sin embargo, esto aún se considera incierto, ya que la relación entre fijación y emisión de CO<sub>2</sub> no está del todo explicada en virtud de que son múltiples los factores que la modifican.

En un ecosistema forestal se reconocen cinco diferentes depósitos donde se acumula el carbono (Figura 2): a) biomasa sobre el suelo, que considera árboles, vegetación arbustiva y vegetación herbácea, b)



b) biomasa bajo el suelo, se refiere a las raíces de la vegetación del ecosistema, c) Hojarasca, que es la

capa de material orgánico (hojas, ramillas, semillas, etc.) no descompuesto y cuyas formas se pueden reconocer a simple vista, también llamado mantillo o liter, d) necromasa, que se refiere tanto a los árboles muertos en pie, como a los caídos, también troncos y todo el material muerto que se encuentra en el ecosistema, y e) suelo (Figuroa, 2010; Rodríguez, 2007).



Los componentes primarios de la dinámica del carbono en los bosques son la biomasa, producción y descomposición del mantillo en el piso forestal, y la materia orgánica del suelo mineral (Yarie y Billings, 2002). Los cambios en la dinámica de estos componentes es una función del clima, especies de plantas y la estructura de las capas de suelo orgánico y mineral (Houghton *et al.*, 2001). La relación entre producción y descomposición determina si un ecosistema es fuente o sumidero en relación al carbono atmosférico, aunque depende de las condiciones climáticas prevalecientes (Yarie y Billings, 2002). La proporción de absorción de carbono de los árboles y por ende de los bosques, es una función del índice de crecimiento y de la edad. En general, los árboles y bosques absorben grandes cantidades de carbono cuando son jóvenes y crecen rápidamente. A medida que los rodales se acercan a la madurez y los índices de crecimiento disminuyen, también la absorción neta de carbono disminuye. En teoría los bosques maduros alcanzan un nivel de equilibrio en lo que se refiere a la absorción de carbono (FAO, 1996) y representan verdaderos almacenes de C de mayor importancia (Bonilla, 2009). El carbono de la biomasa forestal es retenido de acuerdo a la longevidad de los árboles. Existe la creencia de que se requiere de un sumidero de carbono de 1.6 Pg/año para que pueda existir un balance en el ciclo global del carbono (Houghton *et al.*, 1998).



## **2. Conceptos forestales**

### **2.1 El bosque**

Es un conjunto de árboles que ocupa una extensión finita de terreno atribuible a factores ecológicos como: unidad taxonómica de suelo, pendiente, altitud o geoforma; al fenotipo de la comunidad arbórea o especie biológica en relación al los factores ecológicos conforman un rodal. Un rodal es un conjunto espacialmente continuo de árboles y otros vegetales asociados, suficientemente uniforme para constituir una unidad de manejo, la que puede diferenciarse claramente de rodales adyacentes por su edad, composición de especies, estructura, o por características fisiográficas o climáticas en el que crece. La caracterización del estado del rodal en un momento específico del tiempo se realiza a partir de mediciones en los árboles y observaciones en parcelas (Cancino, 2006).

Los bosques homogéneos están formados por especies adaptadas a condicione específicas del ambiente. Cuando el 80% o más de los árboles que forman el bosque pertenecen a una misma especie, se trata de un bosque homogéneo. El heterogéneo está formado por varias especies forestales y su máximo desarrollo se encuentra en la selva húmeda tropical. Debido a su alta temperatura y elevada precipitación, aquí se pueden encontrar hasta 250 especies por ha (Grijpma, 1982).

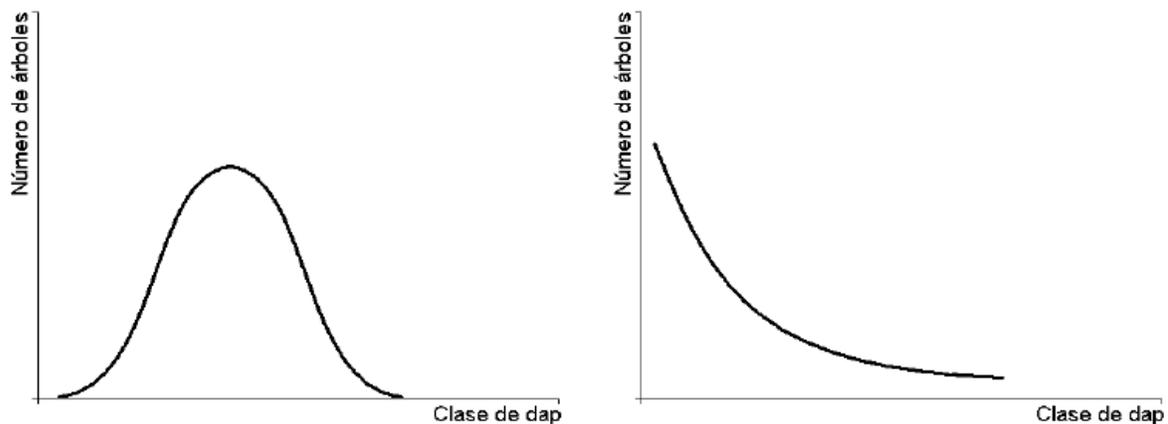


## 2.2 Estructura de un rodal

Desde un punto de vista clásico, los rodales se pueden distinguir de acuerdo a la composición de especies, edades, calidad de sitio e intervenciones silviculturales. Estas variables en conjunto definen lo que se puede denominar la estructura de un rodal, que intenta describir la ocupación espacial de los individuos tanto en el dosel, el sotobosque y el suelo (Donoso, 1993). La estructura de rodal también se refiere a la distribución de especies y tamaño de los árboles en un área del bosque. Habitualmente se evalúa a partir de la densidad, distribución y frecuencia por clase de edad, por distribución y frecuencia por clase diamétrica se le reconocen tres estructuras típicas (Cancino, 2006); brinzal, latizal y fustal.

La edad de un árbol corresponde generalmente a un diámetro. De acuerdo a la edad, los rodales se pueden agrupar en rodales coetáneos y multietáneos. Son rodales coetáneos aquellos que se han establecido en un período de tiempo relativamente breve, lo que permite que durante la rotación o período en que el rodal alcanza la madurez, es decir, los árboles alcancen tamaños relativamente uniformes. Los rodales multietáneos son aquellos en que los individuos se originan en distintos períodos de tiempo, razón por la cual presentan distintos tamaños. La distribución de los diámetros de los árboles de un bosque multietáneo es muy distinta a un coetáneo. El número de árboles es más elevado en un bosque multietáneo (Grijpma, 1982). Cuando hay manejo silvícola existen los rodales coetáneos,

formado por árboles de aproximadamente la misma edad; en estos rodales la distribución es aproximadamente normal (Figura 3). En el otro extremo están los rodales heterocoetáneos o multicoetáneos, conformados por árboles que varían ampliamente en edad y tamaño la forma de distribución diamétrica de un rodal multietáneo, esto es un rodal en que se entremezclan todas las edades posibles, es la exponencial negativa, que también suele llamarse *J-invertida* (Cancino, 2006).



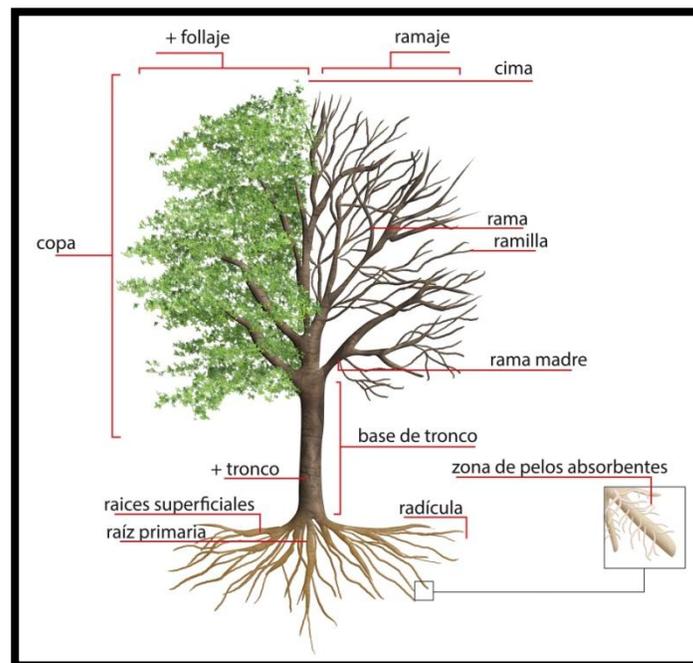
**Figura 3.** Distribuciones diamétricas típicas de rodales coetáneos (izquierda) y heterocoetáneos (derecha), tomado de Cancino, 2006.

### 2.3 El árbol

Un árbol (Figura, 4) es una planta de tallo leñoso, con una altura mínima de 3 a 6 metros. Existen árboles que pueden alcanzar 90 m. de altura y un diámetro de 3 m. Se considera árbol cuando una planta tiene un solo tronco o eje principal, y una copa bien definida, formada por tallos

secundarios o ramas (Botanical SL, 2013). Las partes que conforman a un árbol se distinguen en copa, tronco y raíces.

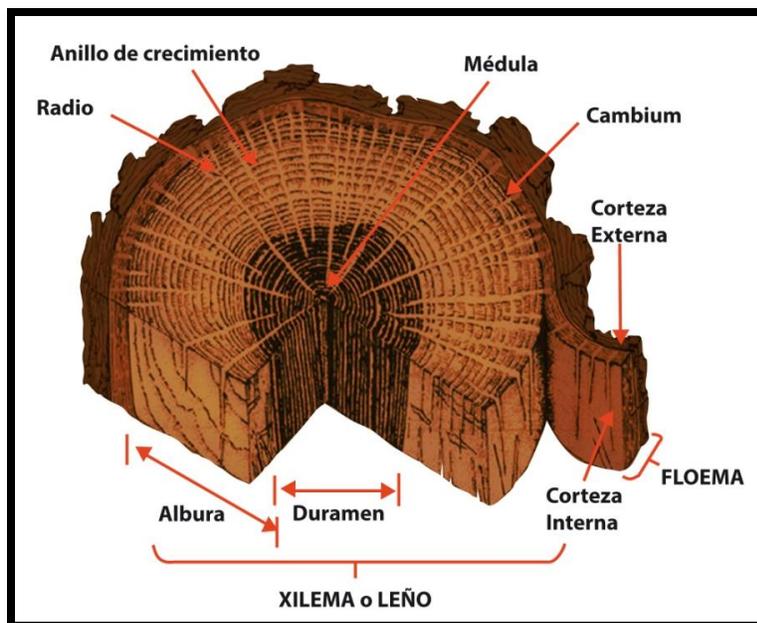
La copa incluye ramas, ramitas, hojas, flores, frutos y yemas. Su función principal es la fotosíntesis, respiración y la transpiración vegetal. El tronco es una columna leñosa que separa las raíces de la copa; su función es transportar la savia bruta desde el suelo hacia las hojas y la savia elaborada producto de la fotosíntesis (Grijpma, 1982). Está formado por dos tipos de tejidos conductores llamados haces vasculares. El primero de ellos es el xilema, que se encarga de transportar la savia originada por la evaporación del agua en hojas y la fuerza de succión que ejercen las raíces. El floema es el segundo tejido, el cual transporta la savia elaborada a todas las partes del árbol, este constituye la capa interior de la corteza (Botanical SL, 2013).



**Figura 4.** Anatomía de un árbol.

La madera se encuentra en el tronco o fuste, ramas y raíces; es un producto del árbol derivado de la actividad del cambium durante el periodo vegetativo. Este tejido meristemático genera cada año una capa de madera hacia el interior del fuste (tronco) y una capa de corteza al exterior (Cancino, 2006).

En un corte transversal del tronco (Figura 5) se distinguen dos secciones:



**Figura 5.** Corte transversal de un tronco de árbol.

*Duramen.* Cada anillo de xilema secundario permanece activo por uno o dos años, después las células del parénquima del xilema pierden su protoplasto y dejan de ser funcionales para la translocación. En los tubos de conducción se depositan diversas sustancias como aceites, resinas, gomas, taninos, fenoles, colorantes y otras. A esta parte se le denomina duramen y se ubica en el centro del tronco, constituyendo un conjunto de anillos de xilema secundario inactivos.

*Albura.* La parte activa del xilema secundario se llama albura, es el anillo más externo de reciente formación. Conforme la albura se vuelve inactiva y



pasa a ser duramen, el cambium forma nuevas capas de albura., por ello cada año aumenta el duramen y se forma nueva albura (López, 2005).

En regiones templadas, las células leñosas del xilema que se forman en el periodo vegetativo de crecimiento del árbol son de paredes más delgadas y lúmenes más grandes que las que se forman más tarde el mismo año. Se denomina como madera de primavera o ligera y madera de otoño o densa, respectivamente. Al observar el contraste entre las células grandes formadas al principio del periodo de crecimiento y las pequeñas formadas al final, es posible delimitar el incremento del anillo anual (López, 2005). De esta manera, el crecimiento de un árbol se puede reconstruir a partir de muestras de madera, identificando, contando y midiendo los anillos de crecimiento. Finalmente la raíz, es la parte que queda bajo tierra. Su función principal es dar soporte, absorber agua y minerales, así como órgano de almacenamiento de nutrientes que toma del suelo.

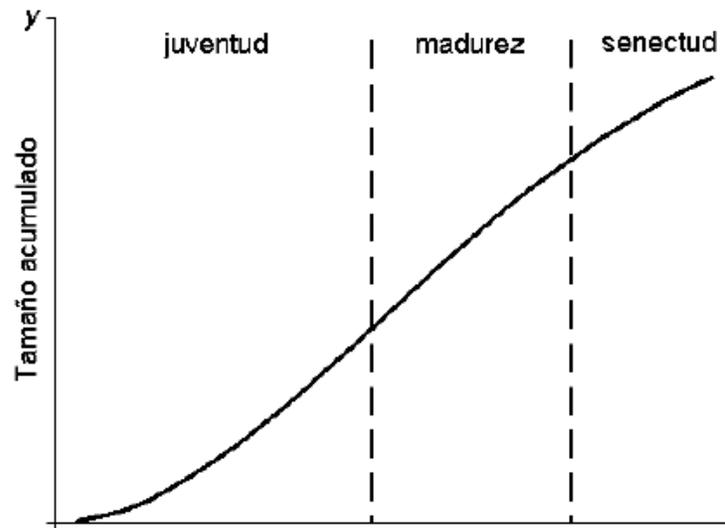
## **2.4 Crecimiento de los árboles**

El crecimiento en las mediciones forestales, señala el aumento de tamaño a nivel de árbol individual o a nivel de rodal; se expresa en un cambio en el número de los individuos en el transcurso del tiempo. La unidad de tiempo habitual para el estudio del crecimiento de un árbol o rodales un año. De aquí surge la definición del *Incremento Corriente Anual (ICA)*, que corresponde a la diferencia entre el tamaño al inicio y al final de un año de crecimiento. En un lapso de tiempo mayor un año se le denomina



*Incremento Periódico (IP)*, esto es; la diferencia entre el número de anillos al final del periodo menos el número de anillos al inicio del periodo; ese tamaño dividido por el número de años transcurridos se le denomina *Incremento Periódico Anual (IPA)*. Al dividir el tamaño total acumulado entre el número de años (edad) se obtiene el *Incremento Medio Anual (IMA)* (Cancino, 2006).

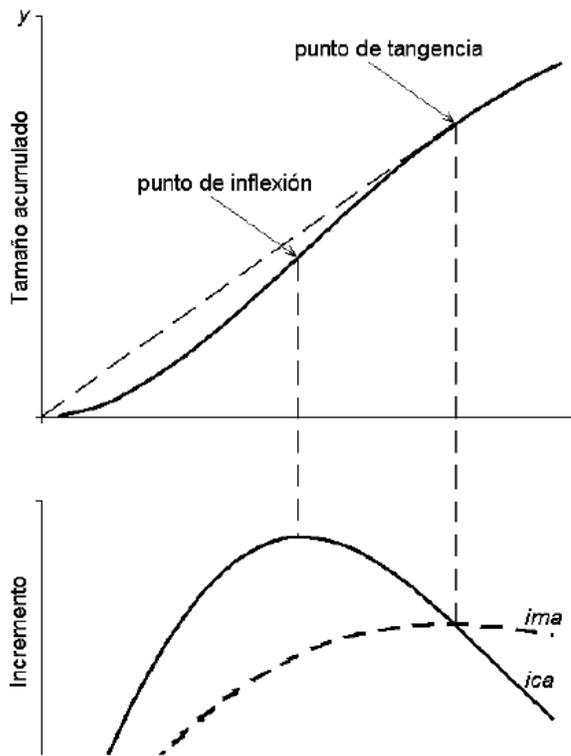
Al graficar los datos de tamaño acumulado en relación al tiempo se obtiene una curva de crecimiento de forma sigmoidea (Figura 6). La primera fase corresponde a la etapa juvenil, la segunda etapa es la madura o rectilínea y la tercera a la etapa senil. Cada fase mantiene una tasa de crecimiento característica de la vida total del árbol y juntos forman la curva de crecimiento. La etapa juvenil se caracteriza por una tasa de crecimiento rápido muchas veces de tipo exponencial, en la etapa madura, la tasa se vuelve regular presentando proporciones numéricas similiares, es decir, crecimiento semejante. La etapa senil se caracteriza por ser la de menor tasa de crecimiento respecto a las anteriores, pues es cada vez más insignificante, llegando a una asíntota al eje de las  $x$  en la curva (Imaña y Encinas, 2008). Esta forma típica es observable al considerar la vida completa del individuo, dentro de una estación de crecimiento, en células individuales, tejidos y órganos, y por unidad de superficie de rodal (Cancino, 2006).



**Figura 6.** Curva sigmoidea típica de tamaño acumulado tomada de Cancino, 2006.

La curva de crecimiento acumulado muestra el tamaño alcanzado en cada edad por el individuo. Las curvas de *ICA*, *IPA* e *IMA* presentan aproximadamente una forma parabólica convexa, con un valor máximo a alguna edad específica (Figura, 7). A ese punto se le denomina *edad de culminación del crecimiento*. En el caso de rodales y referido al volumen, a la edad de máximo *ima* se le denomina edad de rotación biológica (Cancino, 2006).

El crecimiento de los árboles puede ser medido a través de la modificación, a un mayor valor, de la magnitud de cualquier característica mensurable, como el diámetro, el área basimétrica, la altura, el volumen, el peso, la biomasa y otros.



**Figura 7.** El máximo crecimiento corriente anual (ICA) coincide con el punto de inflexión de la curva de crecimiento acumulado; el máximo incremento medio anual (IMA) se obtiene en el punto en que se iguala con el ICA; también corresponde al máximo ángulo que puede trazarse en la curva de tamaño acumulado, con vértice en el origen del sistema de coordenadas.

El crecimiento de los árboles individuales se refleja en el aumento de los tejidos (floema, xilema, tallo, parénquima) a través del tiempo, en el cual se produce la suma de la división celular, elongamiento del meristema primario y engrosamiento de las células del meristema secundario.

En consecuencia se puede definir al crecimiento de los árboles como el resultado de la modificación conjugada de diversas variables dendrométricas como el diámetro, altura, área basimétrica, forma del tronco y volumen (Imaña y Encinas, 2008).

#### 2.4.1 Crecimiento en altura

El crecimiento en altura es el resultado de la actividad de los tejidos meristemáticos primarios. La longitud de las fases de crecimiento juvenil, madurez y senectud como el tamaño acumulado varía ampliamente tanto



entre especies como dentro de una misma (Cancino, 2006). Esta variable, produce la modificación más notoria del crecimiento, especialmente en la edad juvenil en que es más fácil observar la rapidez de la modificación de la altura en periodos cortos de tiempo (Imaña y Encinas, 2008).

#### **2.4.2 Crecimiento en diámetro**

El crecimiento en diámetro o también llamado crecimiento secundario, se da en función de la actividad del cambium vascular. Generalmente el árbol primero crece en altura y después en diámetro. Las células formadas por el cambium vascular dan origen al leño, que a su vez, se diferencian en albura (parte más externa, con coloración más clara, con menor densidad y resistencia y con actividad fisiológica) y en duramen (parte más interna, coloración más oscura, de mayor densidad y resistencia y sin actividad fisiológica) (Imaña y Encinas, 2008).

El ambiente es determinante, pues la calidad del sitio y el manejo influyen en el incremento del diámetro. En general, a mejor calidad de sitio mayor es la tasa de incremento diametral y más rápido se alcanza la edad de culminación del crecimiento en esta variable. La densidad de rodal, está estrechamente ligada con el incremento en diámetro, pues a menor densidad mayor es el crecimiento de los árboles (Cancino, 2006).



### **2.4.3 Crecimiento en volumen**

El crecimiento en volumen es resultado del incremento en diámetro y altura del fuste del árbol. Es la variable más útil y más empleada en estudios de crecimiento. Es aquella con las fases de crecimiento de mayor longitud, con la culminación del *ICA* y del *IMA* a edades más avanzadas que el *DN* y la altura. Al igual que el crecimiento en altura y diámetro este se ve influenciado por los mismos factores además de la densidad del bosque. Los rodales forestales con mayor densidad de árboles por superficie, presentan mayores valores medios de diámetro y área basimétrica individual, resultan en menor producción que los bosques con menor densidad. Esto ocurre debido al mayor número de árboles por unidad de área (Cancino, 2006).

De manera general y tomando como base lo anterior, para la generación de modelos alométricos es necesario emplear los datos adecuados para la especie, y así poder estimar la biomasa y contenido de carbono en el rodal bajo estudio.

### **3. Biomasa forestal**

Garzuglia y Saket (2003) definen la biomasa aérea como la cantidad total de materia orgánica aérea presente en los árboles (hojas, ramas, tronco principal y corteza), expresada en toneladas de materia seca por hectárea. El uso del peso seco permite eliminar la variabilidad de la humedad en los



diferentes componentes de la biomasa y la cantidad de materia seca expresa el rendimiento de productividad del ecosistema (Cancino, 2006).

La biomasa de un bosque está conformada por componentes de variada complejidad y accesibilidad. La biomasa de los diferentes componentes arbóreos aumenta a través del tiempo, aunque el follaje es la excepción, porque éste no aumenta con la edad del rodal sino está más relacionada con la calidad de sitio y la especie de que se trata.

Respecto a la concentración de biomasa por cada componente arbóreo, según Gayoso (2002), el fuste principal es el que concentra mayor cantidad entre 55 y 70% del total, las ramas de 5 al 37%, el follaje de 1 al 15% y la corteza del 5 al 16%. La distribución de la biomasa en los componentes de un árbol permite conocer cómo se comporta la acumulación de nutrimentos y su reciclaje, los reservorios de carbono, la producción primaria neta y cómo es que algunos factores como la luz, el agua y la densidad influyen en el crecimiento (Colter *et al.*, 2003; Van Lear *et al.*, 1984; citados en Figueroa, 2010).

La determinación adecuada de la biomasa de un bosque, es de gran importancia debido a que ésta permite establecer los montos de carbono por unidad de superficie y tipo de bosques, además de los macro y microelementos.

La producción de biomasa está influenciada por diversos factores tales como el clima, especie, edad, calidad de sitio, fertilización, posición sobre la pendiente, elevación, exposición, densidad del rodal, sistema



silvícola aplicado, región geográfica, variación genética, año de muestreo, contaminación atmosférica, cambios estacionales, entre otros (Garcidueñas, 1987) y por consiguiente con el papel que éstos juegan como sumideros de carbono. Los árboles almacenan los fotoasimiladores en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les debe de considerar como reservas naturales de carbono (Avendaño, 2006).

#### **4. Métodos para determinar la biomasa**

La determinación de la biomasa puede realizarse dependiendo del componente involucrado y de la cantidad de información disponible. En los casos que no se dispone de información, el único camino es determinar directamente la biomasa, a partir del peso fresco y las proporciones de peso seco a partir del volumen y densidad del material. Es una labor lenta y costosa que se utilizan sólo en ocasiones específicas, puede involucrar cosecha completa, o parcial dependiendo del componente y tamaño de los individuos. En ambos casos se requiere la determinación del peso seco; para ello se seleccionan submuestras, las que posteriormente se secan en laboratorio (Cancino, 2006).

La obtención de información para la estimación directa de la biomasa, especialmente para la construcción de funciones de biomasa, requiere muestrear árboles en un rango amplio de tamaños, edades, sitios y manejo. También se utiliza en la construcción de razones, cocientes o fracciones de



biomasa, y en la corrección de estimaciones realizadas mediante regresión u otro método (Cancino, 2006).

La cosecha completa involucra un método destructivo, colecta y pesaje de todo el material en la parcela o en el árbol, según corresponda; este proceso consume gran cantidad de tiempo y recursos, con los datos que se obtienen se desarrollan ecuaciones de regresión que permitan relacionar la biomasa con variables de fácil acceso como lo es el diámetro y la altura (Castellanos, 1993; Brown, 1992). En algunos casos es difícil aplicar, por ejemplo en árboles grandes o cuando el acceso es difícil, o no se permite cortar, en este caso se emplean los métodos no destructivos, que no implican el derribo del árbol, son rápidos, por lo que se puede medir un mayor número de árboles, reduciendo así el error de muestreo, en comparación al muestreo destructivo (Hairiah *et al.*, 2001); el método indirecto implica el uso de ecuaciones y modelos matemáticos calculados en inventarios forestales (Brown, 1997) que relacionen variables dasométricas como DN, Área basal y Altura.

Un trabajo basado en inventarios forestales es el de Tritton y Hornberck, (1982), quienes determinaron modelos de regresión que se obtuvieron en bosques de *Abies balsamea*, a partir del DN y la altura en distintas localidades:

$$\text{Nebraska: } Pt: \log Pt = 0.86 + 2.53 * \log DN$$

$$\text{Nueva Escocia: } Pt: \ln Pt = 1.8337 + 2.1283 * \ln DN$$

$$\text{Maine: } Ft + Br: [\ln Pt = 0.0511 + 2.1679(\ln DN) + 0.4292(\ln Ht)] * 0.21$$



$$Pt: \ln Pt = 0.5958 + 2.4017 * \ln DN$$

Donde:  $Pt$  = peso total;  $DN$  = Diámetro Normal;  $Ht$  = Altura total;  $\log Pt$  = logaritmo del peso total;  $\ln DN$  = logaritmo natural del diámetro normal.

Cuando el número de individuos es grande, debe considerarse el muestreo estratificado. En los diseños estratificados se recomienda que aproximadamente cinco árboles de cada clase diamétrica sean muestreados. La biomasa de cada clase diamétrica se calcula por separado y después se hace la inferencia al rodal. Debido a que la intensidad del muestro es baja se requiere el uso de ecuaciones alométricas (Figueroa, 2010). Para calcular la biomasa de un rodal, el método más empleado es la realización de inventarios; en los cuales se cosechan cierto número de árboles de dimensiones representativas de toda la masa, posteriormente los datos generados se extrapolan por medio de alometría (de Vries, 1986; Brown *et al.*, 1999; Castellanos, 1993 citados en Figueroa, 2010).

## 5. Estimación del contenido de carbono

El contenido de carbono almacenado en un bosque está determinado por la cantidad de biomasa que posee dicho ecosistema. Cualquier cambio en la estructura del bosque, en su composición, densidad, sucesión natural y densidad, afectarán de manera directa la cantidad de biomasa y por ende, el contenido de carbono (Peña del Valle, 2003).

Para estimar el contenido de carbono almacenado en la biomasa forestal se han desarrollado métodos directos e indirectos. Los primeros,



consisten en un análisis destructivo para la estimación del peso verde y el peso seco de cada uno de los componentes del árbol seleccionado (Cruz, 2007). Los segundos, se basan en la utilización de modelos matemáticos que estiman el peso de las diferentes fracciones del árbol a partir de variables individuales (diámetro normal, área basal), sin embargo; para poder desarrollar los métodos indirectos es necesario contar con datos obtenidos de métodos directos.

De acuerdo a lo investigado por Garcidueñas (1987) y Cruz (2007) una de las primeras formas de estimar indirectamente el peso seco total de los fustes de árboles es multiplicando su volumen por la densidad básica de la madera y por constantes del contenido de humedad.

Husch, (2001) describe el método de estimación de carbono basado en un inventario forestal convencional de la siguiente manera:

*Conversión de volúmenes verdes a peso seco.* Se obtiene la densidad específica en  $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a distintos niveles de humedad para las especies de interés. Posteriormente, se obtienen los pesos secos con la expresión:

$$\text{Peso seco (ton}\cdot\text{m}^{-3}) = \text{peso verde (100)} / 100 + \% \text{ humedad}$$

*Estimación del peso de carbono en la biomasa.* Se multiplica el peso de la biomasa por un factor que varía entre 0.45 y 0.55. El valor indica la fracción de carbono en la materia vegetativa. A falta de información específica, generalmente se usa un valor de 0.50. Si se cuenta con información por especie, se calcula un promedio ponderado.



*Estimación de biomasa y carbono por hectárea y superficie total.* Se calculan los pesos por metro cúbico de madera y carbono según diferentes volúmenes por hectárea, con base en los datos de inventario se emplean dos métodos de estimación de biomasa: el primero, utilizando ecuaciones matemáticas y el segundo, basado en factores de expansión. El factor de expansión de biomasa se utiliza para calcular el peso de los demás componentes (ramas, follaje, raíces, otra vegetación y detritus sobre el suelo). Los factores de expansión de biomasa difieren en función de muchas variables como las especies que componen el bosque, la edad, la estructura del rodal y la estación, y son aplicables factores diferentes a las existencias, el crecimiento y la extracción. En el estudio de Domínguez *et al.* (2009) para las especies *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote* y *Quercus spp.*, los factores de expansión oscilaron de 1.185 a 1.912; Masera *et al.* (2000) en su estudio recomiendan utilizar el factor 1.3 para bosques templados.

## **6. Ecuaciones alométricas**

La alometría del griego “*alos*-otra y “*metria*”-medida, es la técnica usada para relacionar el cambio de un organismo como resultado del crecimiento y desarrollo de una de sus partes, determinando así una relación de proporción entre ellos (Baskerville 1972; Garcidueñas , 1987; Rodríguez y Leihner, 2006). Es un método numérico rápido, económico y no destructivo que consiste en desarrollar ecuaciones al relacionar diferentes dimensiones de un organismo (una planta, órgano vegetal o plantación).



En las ciencias forestales las relaciones entre el fuste y la cantidad de biomasa se han empleado para estimar la biomasa de los componentes de un árbol (Avendaño *et al.*, 2009; Garcidueñas, 1987; Díaz *et al.*, 2007) y el carbono presente en diferentes tipos de vegetación (Acosta *et al.*, 2002), usando el análisis dimensional de un gran número de mediciones del diámetro normal con sus correspondientes alturas. Se usa un modelo de regresión para estimar la relación entre una o más dimensiones del árbol. Las variables más empleadas son la altura, diámetro normal, albura, longitud de copa, edad, incremento en los anillos de crecimiento, relacionándose para obtener valores de volumen, biomasa aérea, área foliar, etc. (Grier *et al.*, 1984; Garcidueñas 1987). Además, constituyen una herramienta importante para construir modelos mecanicistas de crecimiento forestal (Acosta *et al.*, 2002). Estas ecuaciones permiten determinar la producción de biomasa de una plantación o bosque natural y así definir sus fases de crecimiento y patrones de reciclaje de nutrientes. Este método se ha aplicado en particular en el área de producción forestal, debido al elevado costo y dificultades logísticas involucradas en la recolección de la cosecha, los datos permiten calcular los tiempo y costos de corta; y más recientemente en estudios para estimar la fijación biológica de C a nivel global (Ares *et al.*, 2002).

En el 2001, se llevo realizó una compilación de un gran número de estudios en EE.UU. con el fin de establecer las tablas de cálculos de remoción de carbono a través de la biomasa en el Departamento de



Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), para ser usado el modelo computacional FORCARB para la estimación de biomasa en año 2003.

Finalmente, Jenkins *et al.*, (2001) como producto de haber trabajado con los metadatos para la estimación de la biomasa arbórea y con el fin de disminuir el error derivado de la estimación por las ecuaciones, obtuvieron:

- a) Un coeficiente para cada especie de árbol,
- b) Tamaño de muestra de árboles y su densidad por especie, y
- c) El modelo logarítmico general:  $bm = \exp(\beta_0 + \beta_1 * \ln DN)$ , donde:

$bm$ = biomasa total (Kg. de peso seco) para árboles de 2.5 de diámetro normal.

$DN$ =Diámetro Normal (cm.)

$exp$ = función exponencial.

$ln$ = logaritmo base  $e$  (2.718282).

### 6.1 Modelo potencial

En general, la relación entre dos partes de una planta (“X” y “Y”) puede ser expresada en la siguiente forma:

$$Y = b_0 * X^{b_1}$$

Donde: Y representa el tamaño total del organismo (o alguna parte distintiva de él) y X, es igual al tamaño de otro componente de la planta diferenciable en crecimiento;  $b_0$  y  $b_1$  son constantes particulares para cada caso, la segunda de las cuales recibe el nombre de constante alométrica (Rodríguez y Leihner, 2006), en la figura 8 se presenta la forma del modelo de



manera gráfica. Ambas constantes se pueden calcular a partir de aplicar el método de mínimos cuadrados. Las curvas descritas  $b_1 > 1$  y  $b_1 = 1$ , son para las especies de árboles de rápido crecimiento en sus etapas de desarrollo (meristemo primario y secundario), esta actividad fisiológica celular se expresa como elongamiento y grosor de las células meristemáticas. La tasa de crecimiento para árboles tropicales en etapa juvenil es aproximada a un metro de altura por un centímetro de diámetro normal, y se reduce en la etapa adulta con aproximadamente 0.40-0.5 m. de altura por 0.5 cm. de diámetro.

La utilización de este modelo de tipo potencial ha sido posible ya que describe la forma en que la proporción relativa de materia seca asignada a cada órgano de la planta cambia con el tamaño de la misma, de acuerdo a la teoría del crecimiento alométrico (Bailian *et al.*, 1991). Como modelo de regresión esta ecuación ha sido empleada en diversos campos de las ciencias naturales; sin embargo, generalmente en biología el procedimiento de ajuste para este modelo requiere aplicar logaritmos a fin de linealizarla, resultando en:

$$\ln Y = \ln b_0 + b_1 \ln X$$

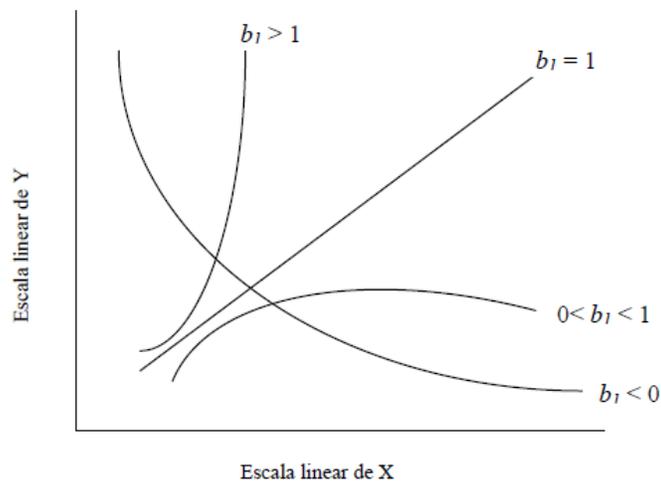
Que representa a una ecuación linear simple de la forma:

$$Z = b_0' + b_1 W$$

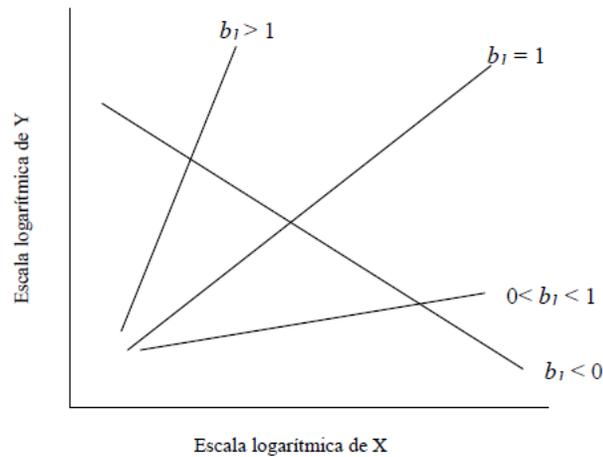
Donde,  $Z = \ln Y$ ;  $b_0' = \ln b_0$  y  $W = \ln X$ , por lo que los estimadores  $b_0$  y  $b_1$  pueden ser calculados por técnicas ordinarias de mínimos cuadrados. La figura 9 muestra la función original de manera lineal al ser transformadas las

variables X y Y en sus logaritmos, así se estabiliza la varianza del error (Zar, 1968; Baskerville, 1972 citados en Colegio de Posgraduados, 2001).

De esta manera, la materia seca puede ser evaluada mediante la función alométrica linearizada, donde Y es el peso seco de algún órgano de la planta (tronco, hojas o raíz), X es alguna variable dasométrica fácil de medir en la planta (diámetro normal), y  $b_0$  y  $b_1$  son los estimadores de regresión. En estudios comparativos, éstos estimadores cobran importancia, puesto que  $b_1$  describe la partición de biomasa entre Y y X, además de ser una medida de la proporción de su tasa de crecimiento relativo durante la fase exponencial de crecimiento que comúnmente exhiben las plántulas (Colegio de Posgraduados, 2001).



**Figura 8.** Modelo potencial tomado de Colegio de Posgraduados, 2001.

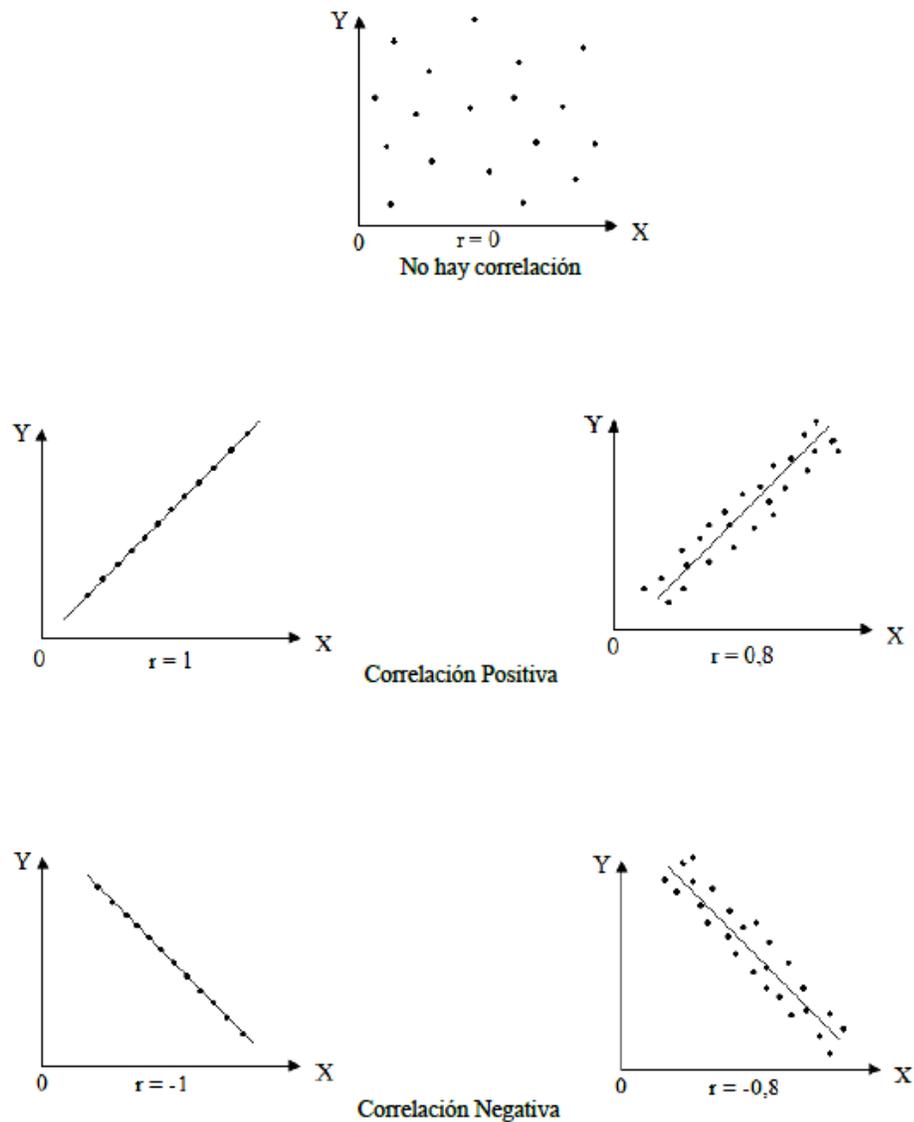


**Figura 9.** Modelo linealizado tomado de Colegio de Posgraduados, 2001.

## 6.2 Coeficiente de correlación

En los modelos lineales, la fracción de la variancia explicada es el coeficiente  $r$ . Los coeficientes de correlación son medidas que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, es decir, son la expresión numérica que nos indica el grado de relación existente entre las 2 variables y en qué medida se relacionan. Son números que varían entre los límites  $+1$  y  $-1$ . Su magnitud indica el grado de asociación entre las variables; el valor  $r=0$  indica que no existe relación entre las variables; los valores  $\pm 1$  son indicadores de una correlación perfecta positiva (al crecer o decrecer  $X$ , crece o decrece  $Y$ ) o negativa (Al crecer o decrecer  $X$ , decrece o crece  $Y$ ) en la figura 10 se observan las diversas clases de correlación (Marques Dos Santos, 2004).

Cuanto más alto es el porcentaje de la variancia explicada, mejor es el modelo de regresión (Ares *et al.*, 2002). El coeficiente de determinación  $r^2$  señala la proporción de la variabilidad de la variable dependiente ( $y$ ) que es explicada por la variable independiente ( $x$ ) en la regresión (Cancino, 2006).



**Figura 10.** Diversos tipos de correlación.



Sin embargo, el DN de los árboles contrastado con su masa seca genera un modelo con una tendencia no lineal, lo cual indica una relación alométrica. La mayoría de los trabajos que estudian el contenido de biomasa o carbono utilizan el método de una regresión lineal bajo escalas logarítmicas, estas transformaciones simplifican los cálculos. Con ello se logra la validación estadística del análisis al homogeneizar la varianza de los datos, porque la experiencia muestra un incremento de varianza con el aumento de diámetro, es decir, se promueve la heterocedasticidad.

## **7. Del modelo alométrico a la captura de carbono**

En este caso, al tener datos del inventario forestal se pudo emplear el método de ecuaciones alométricas, que son desarrolladas con el fin de poder estimar la biomasa y carbono contenido en la vegetación. Para construir dichas ecuaciones se organizaron los datos obtenidos en campo en base a su diámetro normal y la variable a estimar, con ello se obtuvo el modelo de regresión adecuado al comportamiento de las variables, que además describe el crecimiento que tienen los sitios de estudio por medio de la pendiente descrita por el mismo modelo (Masera *et al.*, 2000).



## VII. Método

### 7.1.1 Descripción de la zona de estudio

El estudio se realizó en el Parque Nacional “El Chico” geográficamente se ubica entre las coordenadas extremas de los 20°10’10” a 20°13’25” latitud Norte y los 98°41’50”a 98°46’02” de longitud Oeste (Figura 11), cuya extensión territorial es de 2 739.0263 ha.; se encuentra en el sector centro Sur-Oriente de la República Mexicana, que corresponde al extremo occidental del sistema orográfico Sierra de Pachuca, sus altitudes varían desde los 2 320 msnm en la porción Norte hasta los 3 090 msnm en la porción Sur (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2005).

#### *Edafología*

El origen volcánico terciario, su nivel altitudinal, la morfología del relieve y los procesos actuales, han formado gran homogeneidad de suelos, recientes y poco evolucionados, bajo condiciones templado-húmedas (Melo y López, 1993). Los tipos de suelo que se distinguen en el Parque Nacional de acuerdo a la clasificación de la FAO: Andosol húmico - Cambisol húmico; Cambisol húmico - Andosol ócrico – Litosol; Feozem háplico - Cambisol húmico; Cambisol húmico - Regosol eútrico; Andosol vítrico - Cambisol húmico; Feozem háplico (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2005) del cual este último pertenece a la zonas de estudio.



### *Climatología*

De acuerdo con Melo y López (1993), a nivel regional el parque está sujeto a la influencia del clima C (wo") (x') b (i'), condición genérica modificada localmente por factores de relieve y altitud que determinan un clima Cb (m) (w) (i') gw, según Enriqueta García (1973), basándose en la clasificación climática de Köppen, para la estación Mineral del Chico enclavada en el extremo Norte del parque, cuyas características son: templado-subhúmedo con verano fresco y largo; temperatura media anual entre 12 y 18°C; temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C, y la del mes más caliente superior a 26.5°C. Régimen de lluvias de verano con precipitación anual, por lo menos diez veces mayor volumen de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el mes más seco.

### *Características biológicas*

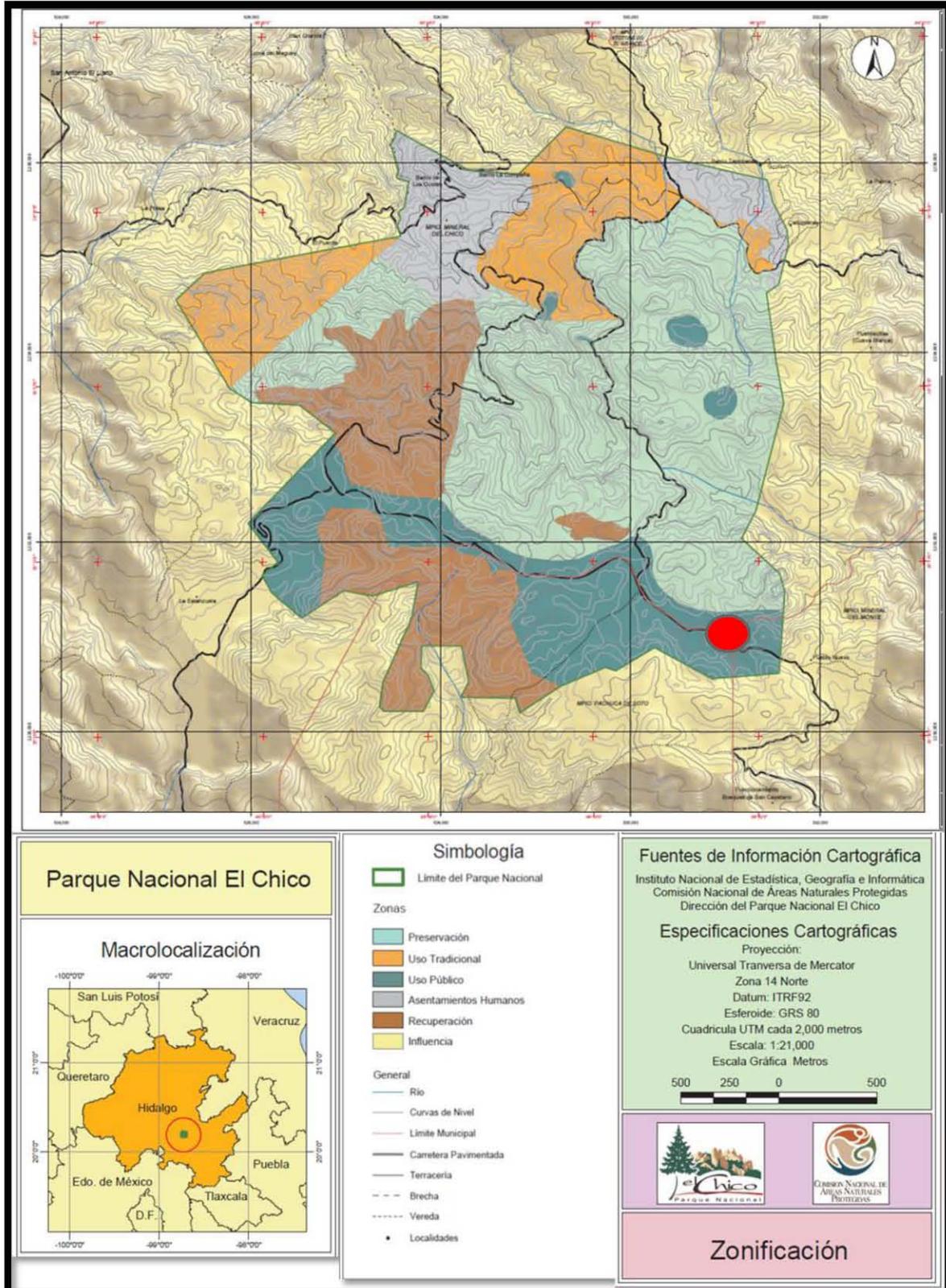
El área del Parque Nacional El Chico, de acuerdo con Rzedowsky (2006), pertenece a la Provincia Florística de las Serranías Meridionales de la Región Mesoamericana de Montaña. Dicha provincia se distingue por incluir las elevaciones más altas del país y por la predominancia de los bosques de oyamel, pino y encino en forma equiparable. Hernández (1995), señaló que la mayor riqueza de especies, se da en los bosques de *Abies*, de *Quercus* y de *Abies-Quercus*, y que esto posiblemente se deba a la gran extensión que ocupan estas comunidades con respecto a los otros tipos de vegetación. Estos bosques se mezclan con otras especies arbóreas formando bosques



mixtos, además de compartir especies de los estratos herbáceo y arbustivo de diversas familias (*Compositae*, *Graminae*, *Labiatacea*, *Fagaceae*, *Caryophyllaceae*, *Leguminosae*, *Rosaceae*, *Umbelliferae*, *Scrophullariaceae*, *Cyperaceae*, *Orchidaceae*, *Solanaceae*); ya que en algunas áreas del bosque de *Abies* se presenta formando masas puras, pero en otros sitios está sujeto a diversos grados y formas de disturbio lo cual puede ser en parte responsable de su variabilidad en composición florística. Con base en los trabajos de Gallina *et al.*, (1974), Medina y Rzedowski (1981) y Zavala (1995), se consideran los siguientes tipos de vegetación, atendiendo a su fisonomía y la proporción de su cobertura: Bosque de oyamel o abeto (*Abies religiosa*); Bosque de encino (*Quercus spp.*); Bosque de encino-oyamel (*Quercus-Abies*); Bosque de oyamel-encino (*Abies-Quercus*); Bosque de pino (*Pinus spp.*); Bosque de encino-pino (*Quercus-Pinus*); Bosque de pino-encino (*Pinus-Quercus*); Bosque de cedro (*Cupressus spp.*); Bosque de tascate o tlaxcal (*Juniperus monticola*); Pastizal.

El estudio se enfoco al bosque de oyamel o abeto (*Abies religiosa*), que ocupa la mayor superficie dentro del Parque Nacional. Su amplia cobertura tipifica a la vegetación del área, con 1 725.4 ha. equivalente al 62.9% respecto al área; se distribuye desde los 2 600 a los 3 086 msnm e indistintamente se establece en cualquier rango de inclinación, exposición de laderas, humedad edáfica, profundidad del suelo, etc. Sobresale por la forma cónica de sus árboles y sus alturas de 20 a 40 m, constituyendo una cobertura densa y siempre verde.

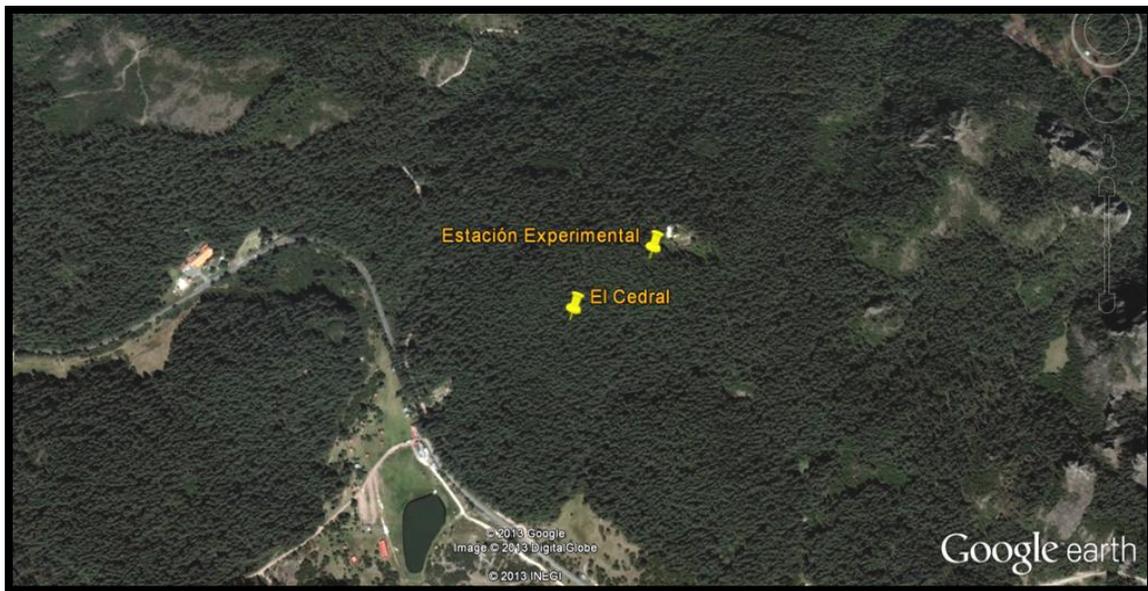
**Figura 11.** Mapa de Zonificación del Parque Nacional El Chico, Hgo. (Tomado de CONANP, 2005) el punto rojo representa la zona del parque muestreada.



### 7.1.2 Fase de campo

El trabajo en campo se llevó a cabo en los parajes El Cedral y La Estación Experimental que son porciones del bosque de oyamel ubicados en las coordenadas  $20^{\circ}10'55''\text{N}$ ,  $98^{\circ}42'32''\text{O}$  y  $20^{\circ}10'59''\text{N}$ ,  $98^{\circ}42'27''\text{O}$  respectivamente (Figura 12) con una elevación 3 376msnm.

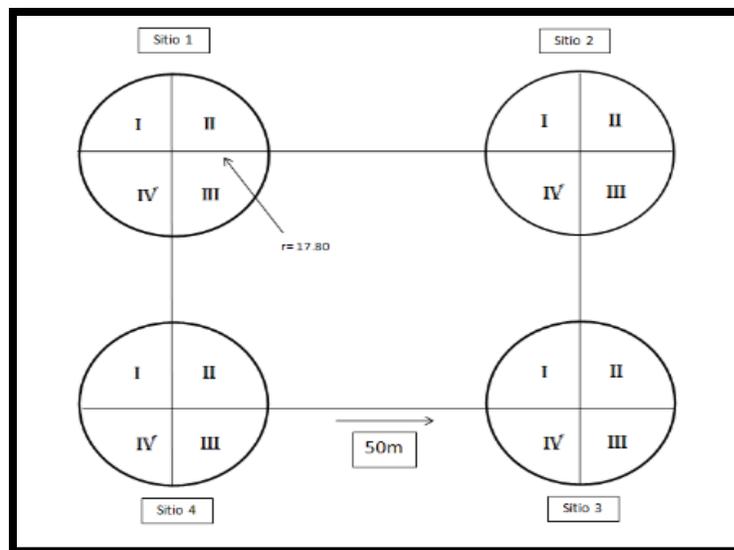
Dentro de los dos parajes se seleccionaron dos parcelas con cuadros de 50 x 50m. En los vértices de los cuadrantes se trazaron cuatro círculos, cada uno de ellos poseía un radio de 17.8 m., cada uno de ellos se subdividió (I, II, III, IV) facilitando el registro de todos los árboles (Figura 13).



**Figura 12.** Porciones del bosque de Oyamel muestreadas.

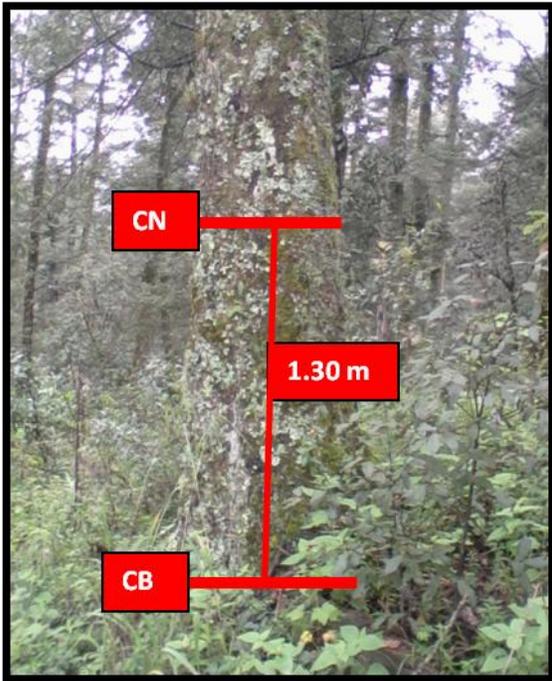
En cada cuadrante se realizó el levantamiento sistemático de todos los árboles, fueron marcados con banderines y al momento de ser censados se retiró, evitando registrar al mismo individuo en varias ocasiones. En cada

círculo se inventariaron solo los árboles de *Abies religiosa*, con altura mayor a 1.3m., de cada uno se registró con un flexometro su Circunferencia Basal (CB), Circunferencia Normal (CN, a 1.30 m. del suelo) como lo muestra la Figura 14 y la altura con el DendroFlexómetro© (Figura 15) utilizando la escala 1/10 (Anexo 1), todos los datos fueron capturados en un formato como aparece en el Anexo 2.



**Figura 13.** Método de muestreo de conglomerado de 4 sitios circulares.

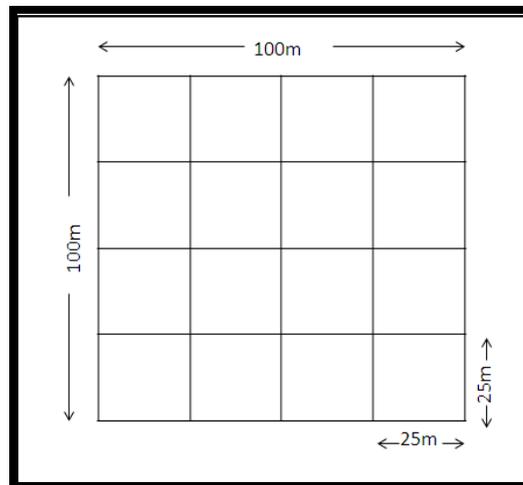
Además, se llevó a cabo un censo para obtener la densidad del bosque, por medio levantamiento en un cuadrante de 100 x 100 m. para evitar volver a contar individuos el área se dividió en cuadrantes de 25 x 25 m. como puede verse en la figura 16.



**Figura 14.** Medición de Circunferencia Basal (CB) y Circunferencia Normal (CN) en un bosque de *Abies religiosa*, para la posterior obtención del Diámetro basal y normal.



**Figura 15.** a) DendroFlexómetro, b) la medición con la escala 1/10. Tomado de DendroFlexómetro, ceseFOR, 2009.



**Figura 16.** Cuadrante de 1ha. para la densidad del bosque de Oyamel.

Para conocer la edad cronológica del bosque se extrajeron 10 pares de núcleos de árboles sanos con un Diámetro Normal mayor a 0.3m con la ayuda de un taladro Pressler (Figura, 17), fueron colocados en popotes de plástico para su conservación y se cubrió la herida con un taquete empapado en una solución de formol al 10% para evitar plagas o parásitos.



**Figura 17.** Medición de la albura en la viruta extraída.

### 7.2.1 Variables dasométricas

Se creó una base de datos en una hoja de Excel con 6 columnas (ID, Circunferencia basal, Diámetro Basal, Circunferencia Normal, Diámetro Normal en cm, y Altura en metros). Para el cálculo de los diámetros se empleo la formula siguiente:

$$d = C \div \pi$$

donde,  $d$ , es el diámetro,  $C$ , es la circunferencia y  $\pi$  es una constante



Posteriormente se establecieron las categorías diamétricas basándose en el DN en rangos de 5 cm, de esta manera se obtuvieron 20 categorías para todo el muestreo.

### 7.2.2 Estimación de la Biomasa aérea

Con los datos obtenidos en el inventario se calculo el volumen de cada árbol por medio de funciones que se enlistan a continuación:

#### Área basal

El área basal es una medida que sirve para estimar el volumen de especies arbóreas o arbustivas. Por definición, el área basal es la superficie de una sección transversal del tallo o tronco de un árbol por medio del diámetro (Mostacedo y Fredericksen, 2000), ésta se refiere al sitio donde se ubica el Diámetro Normal (1.30m). Se encuentra directamente relacionada con el volumen del fuste y es utilizada como indicador de la dominancia y cobertura de una especie (Galeana, 2008). El cálculo de esta se realizó con la siguiente fórmula:

$$AB = \pi \left( \frac{DN^2}{4} \right)$$

Donde:  $AB$ = área basal ( $m^2$ );  $\Pi$ = 3.1416;  $DN$ = diámetro normal (m).



## Calculo del volumen

Una función de volumen individual relaciona está con variables más fáciles de medir, como el DAP (Diámetro a la Altura del Pecho) o Diámetro Normal (DN) y la altura del árbol. En su construcción se utilizan datos (volumen, diámetro, altura, forma fustal) obtenidos directamente de los árboles.

Existe una variedad de modelos posibles para ajustar funciones de volumen individual; para decidir cuál de ellos usar deben considerarse aspectos de simplicidad, objetividad y precisión. En este caso se empleara la ecuación propuesta por Grijpma, 1982:

$$V = (AB)(h)(CM)$$

Donde:  $V$ = volumen ( $m^3$ ),  $AB$ = área basal ( $m^2$ ),  $h$ = altura (m),  $CM$ =Coeficiente mórfico forestal (0.75)

Debido a que algunos géneros portan formas irregulares, la estimación del volumen se corrige al multiplicarlo por 0.75 constante del coeficiente mórfico forestal, que se refiere a la relación entre el volumen de un árbol y el volumen de un cilindro tomado como base el área transversal del árbol a la altura del pecho (DAP) y la altura del propio árbol (Caballero, 1982 citado en Rojas, 2008).



Para calcular la biomasa se requiere conocer el volumen del árbol y la densidad de la madera, para estimar la biomasa de cada árbol de acuerdo a la fórmula propuesta por Brown y Lugo, (1984):

$$B = (V)(d)$$

donde,  $B$ = biomasa (g);  $d$ = densidad de la madera ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

La densidad de la madera expresa la relación entre la masa de distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan (Davel *et al.*, 2005 citado en Galeana, 2008). Los valores de la densidad básica encontrados en *Abies religiosa* fueron de  $0.14 \text{ gr}/\text{cm}^3$  como mínimo, un máximo de  $0.59 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$  y un promedio de  $0.36 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Goche *et al.*, 2000). Para fines del estudio se empleo la densidad reportada por Rojas, (2008),  $0.3874 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 7.2.3 Estimación del Contenido de Carbono

Para calcular el contenido de carbono, se procedió a multiplicar la biomasa por el factor de contenido de carbono promedio por árbol propuesto por Avendaño *et al.*, (2009), que es de  $0.46 \text{ KgC}$ . Para estimar la biomasa total se toma en cuenta la relación de biomasa que existe en las ramas y hojas con respecto al fuste; en este caso se empleo el valor de  $1.3$  propuesto por Brown y Lugo, (1984), la cual indica que a la biomasa fustal estimada, se le añade  $30$  por ciento que justifica el peso de las ramas y hojas.

$$CC = (B)(1.3)(0.46)$$



donde,  $CC$ = contenido de carbono (g);  $B$ = biomasa (g); 1.3= factor de expansión de fustes; 0.46= proporción de carbono por árbol.

Finalmente se obtiene el contenido de carbono de cada sitio, una vez calculado este dato por una hectárea se multiplica por la superficie total del Bosque de *Abies religiosa*, los resultados reportados de convirtieron en Megagramos de carbono contenido por hectárea (MgC/ha).

#### **7.2.4 Determinación de ecuaciones alométricas para Biomasa y Contenido de Carbono**

Los datos obtenidos de la biomasa aérea total y el diámetro normal de todos los árboles muestreados, se utilizaron para obtener la ecuación que permite estimar la biomasa y carbono de cada árbol de acuerdo a su diámetro normal, el modelo empleado fue (1) y (2), en su forma potencial y su expresión logarítmica, respectivamente.

El modelo potencial fue ajustado por mínimos cuadrados con el propósito de obtener los valores de los parámetros  $b$  y  $k$  que representan la ordenada al origen y la pendiente del modelo de regresión.

#### **7.2.5 Edad cronológica del bosque**

Una vez en el laboratorio los núcleos fueron secados a 38°C por 48 horas. A continuación las muestras se trasvasaron en bastidores de madera de 40cm de longitud, con un canal de 5 mm de ancho y 2mm de profundidad previamente etiquetados, y se orientaron dejando expuesta la cara



transversal del núcleo que reflejó luz; se adhirió al bastidor con pegamento especial para madera. Cuando seco, se recortó la cara expuesta con una navaja de acero inoxidable, obteniendo una superficie plana, y posteriormente se afinaron cada una de las muestras con lijas para madera de diversas medidas (300, 800 y 1200) y así facilitar la observación de los anillos.

Con el software WINDENDRO 2003 se midió el número de anillos de crecimiento (edad), las anchuras de los mismos, madera temprana y tardía en mm de esta manera se hizo una sincronización (*Cross-dated*). En una hoja de Excel se importaron los datos de salida sobre las lecturas hechas WINDENDRO 2003 para obtener las ganancias de cada año y poder estimar el carbono que se ha contenido desde hace 50 años.

#### **7.2.6 Análisis retrospectivo del contenido de carbono**

Una vez establecido el número de anillos de crecimiento del árbol, en base al diámetro registrado en el inventario, se determinó su diámetro hipotético de cada muestra a partir de las ganancias registradas desde hace 50 años, con el modelo obtenido se procedió a estimar el contenido de carbono en quinquenios, estableciendo las diferencias y afectaciones en su crecimiento por eventos ambientales a través del tiempo.



## VIII. Resultados y discusión

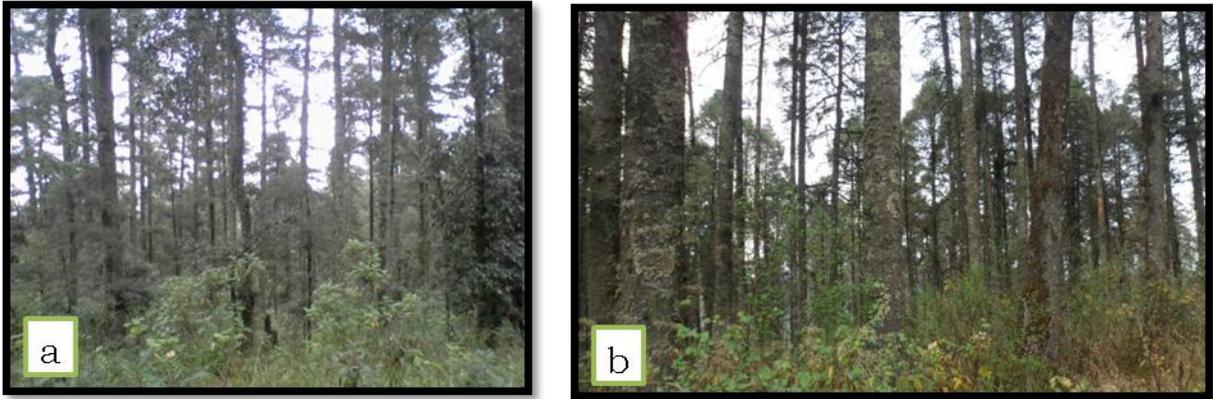
En un total de 1.34 ha de bosque muestreado se registraron 250 árboles para la generación de los modelos, el promedio de la variable diámetro normal fue de 43.22 cm, el menor registro fue de 2.86cm y el mayor de 100.59cm; las alturas se encuentran en un rango de 2.1-40.5m. con un promedio de 21.17m. La densidad del bosque de Oyamel muestreado es de 239árboles\*ha<sup>-1</sup>. En relación con el bosque de Oyamel del Parque Nacional Zoquiapan y anexas, su densidad es baja pues Rodríguez, (2013) reporta 751 árboles en 2.3 ha, es decir 326 árboles\*ha<sup>-1</sup>, en contraste en el bosque declinado de oyamel presente en el Parque Nacional Desierto de los Leones, Roman, (2012) encontró 38 árboles\*ha<sup>-1</sup>; Galeana, (2008) reporta para la Cuenca del Rio Magdalena una densidad de 205 árboles\*ha<sup>-1</sup>, por lo tanto, la densidad arbórea encontrada esta dentro de un intervalo adecuado para un bosque de oyamel.

### *Caracterización de los sitios de muestreo*

#### Paraje “El Cedral”

Este sitio (Figura 18a) era una ladera irregular con una exposición Noroeste, una pendiente de aproximadamente 72°, sin erosión ni incendios, pero con signos de actividades antropogénicas. La vegetación estaba representada en un 30% por el estrato arbóreo seguido con el 20% para el arbustivo y finalmente un 50% para el estrato herbáceo; parte de la

vegetación arbórea mostraba signos de daño como despunte, raíces expuestas y algunos tocones.



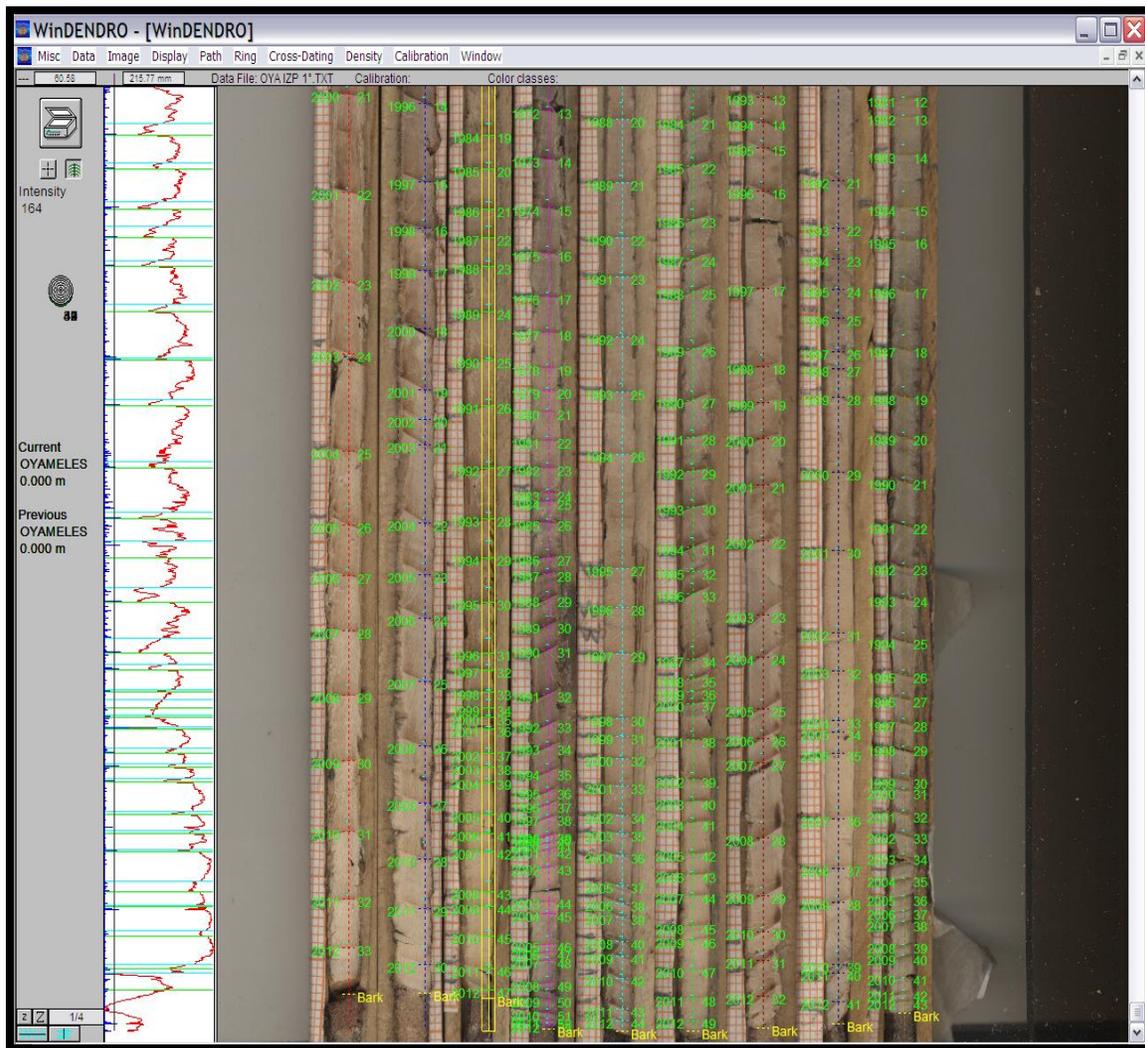
**Figura 18.** Sitios de muestreo, a) Paraje el Cedral, b) Caseta experimental del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

#### Paraje “Estación Experimental”

Este lugar (Figura 18b) también presentó una exposición Noroeste con una pendiente de  $65^\circ$ , al igual que el anterior no presentaba signos de erosión e incendio. Es una ladera irregular con una cobertura del 20% para el estrato arbóreo, 25% para el arbustivo al igual que el herbáceo. El daño en la vegetación arbórea fue más evidente en este lugar a pesar de encontrarse algunos metros arriba, se observaron árboles ocoteados, podridos, despuntados, tocones y con exudado.

### Edad cronológica del bosque

Con la lectura de anillos (Figura 19) de 10 pares de virutas, el bosque tiene una edad promedio de 93 años, cuyo árbol más longevo es de 122 y el menor de 61 años, es decir, que se trata de un bosque relativamente joven pues la longevidad de estos es de aproximadamente 200 años.



**Figura 19.** Software WinDendro que muestra los Path para la cuenta de anillos en los núcleos extraídos.



## Estructura por clase diamétrica

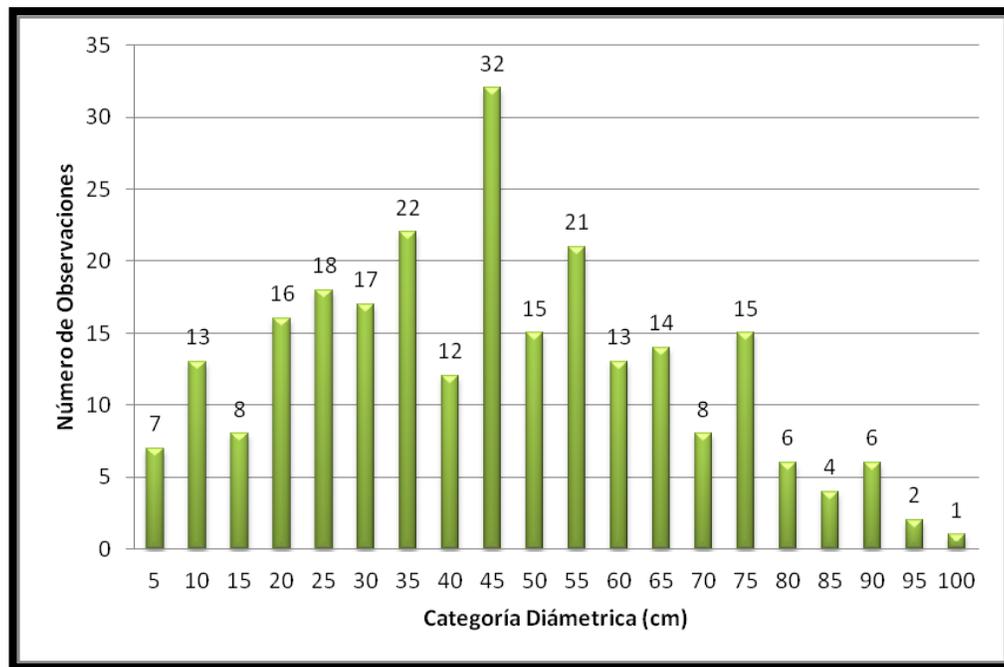
De las mediciones diamétricas en los 250 árboles del bosque de oyamel se obtuvo una distribución de 20 categorías (Cuadro 2). La mayoría de los diámetros se encuentran en la categoría 45 cm. siendo un 12.8% del total, cuyos diámetros miden entre 41-45.9 cm. Las categorías con dos o menos individuos son aquellos con un diámetro superior a los 91 cm, que juntas suman el 1.2% del total. La distribución de los diámetros representada en la figura 20 muestra una tendencia gaussina con un sesgo a la izquierda, lo que indica que la mayoría de los árboles tienen un diámetro normal <76 cm, es decir, el 92.4% del muestreo. En los trabajos hechos para el bosque de oyamel en la Cuenca del Río Magdalena; Nava, (2006) reporta que el mayor número de individuos se distribuye dentro sus dos primeras categorías diamétricas, con diámetros de 5 a 20 cm.; por su parte Galicia (2008) en este mismo bosque encontró que la mayoría de los diámetros de *A. religiosa* se encontraba entre 42.6-47.5 cm. En el Parque Nacional Nevado de Toluca, García (2011) reportó que la mayoría de los abetos se distribuían entre los diámetros de 7.5-12.4 cm. Esto refleja que los bosques de oyamel del centro del país son jóvenes pues sus diámetros se distribuyen en las primeras clases.

Ecológicamente se determinó que el bosque estudiado es maduro con presencia de árboles jóvenes y algunos seniles, por lo tanto, es considerado

multietáneo, ya que lo forma más de una cohorte y la madurez se alcanza en diferentes periodos de tiempo (Figuroa y Olvera, 2000).

**Cuadro 2.** Categorías diamétricas para Abies religiosa.

| Categoría diamétrica | Diametro Normal (cm) |     |          |
|----------------------|----------------------|-----|----------|
| 5                    | 0.1-5.9              | 60  | 56-60.9  |
| 10                   | 6-10.9               | 65  | 61-65.9  |
| 15                   | 11-15.9              | 70  | 66-70.9  |
| 20                   | 16-20.9              | 75  | 71-75.9  |
| 25                   | 21-25.9              | 80  | 76-80.9  |
| 30                   | 26-30.9              | 85  | 81-85.9  |
| 35                   | 31-35.9              | 90  | 86-90.9  |
| 40                   | 36-40.9              | 95  | 91-95.9  |
| 45                   | 41-45.9              | 100 | 96-100.9 |
| 50                   | 46-50.9              |     |          |
| 55                   | 51-55.9              |     |          |



**Figura 20.** Categorías diamétricas vs número de observaciones.

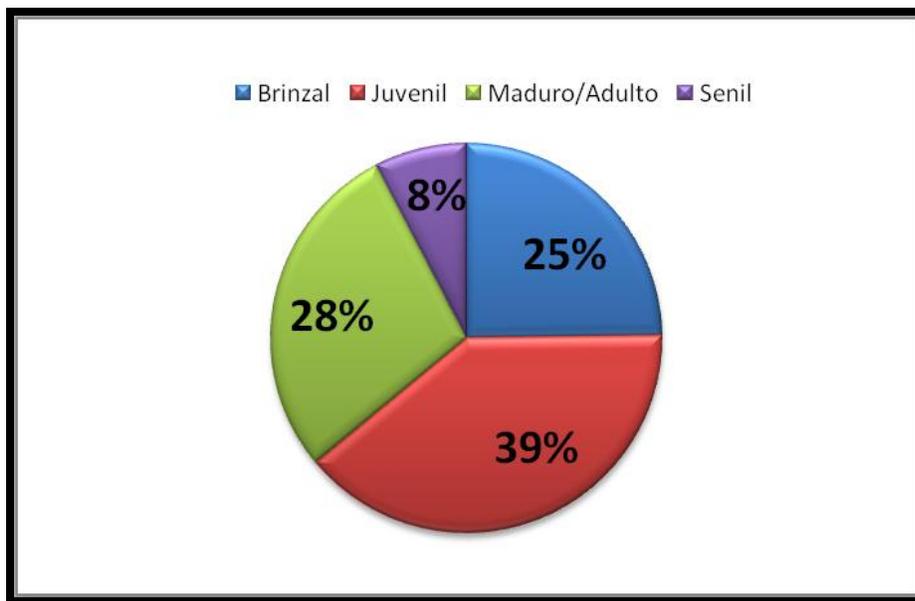


## Estructura por clases de edad

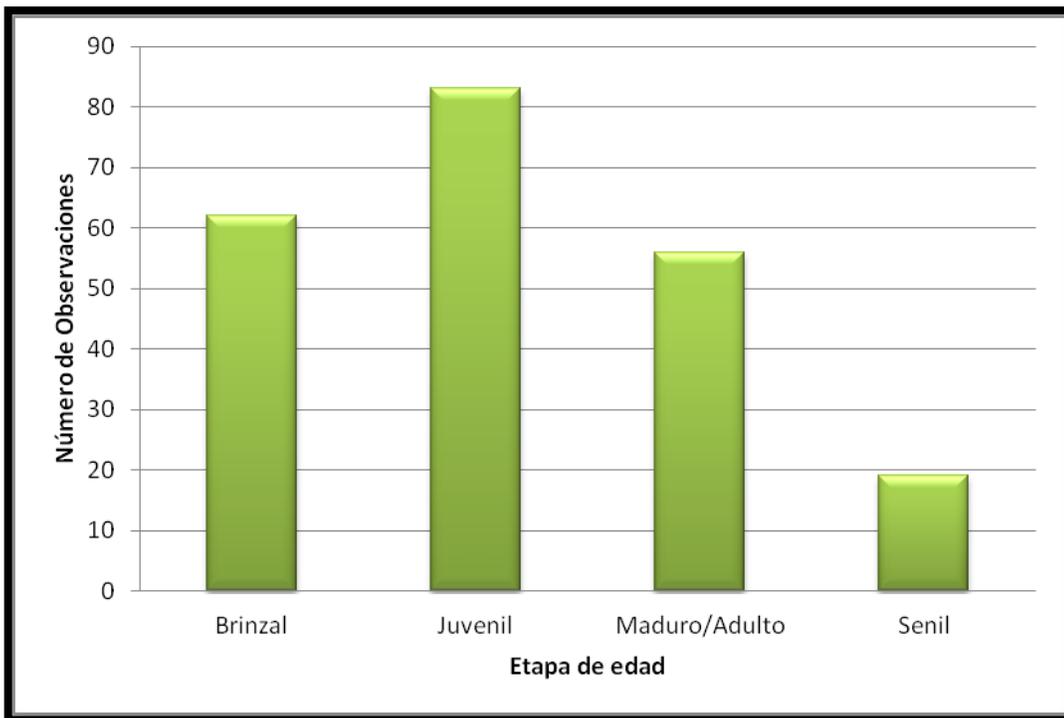
Para la generación de categorías por edad (Figura 21) se establecieron cuatro etapas de vida de acuerdo al Diámetro Normal, los brinzales son aquellos individuos con un diámetro normal  $30 > \text{cm}$  representado el 25% (Figura 21) del total de árboles muestreados, la categoría de juveniles es más representada con el 39% cuyos diámetros son  $66 > \text{cm}$ , la categoría siguiente (Maduro/Adulto) contiene al 28% del muestreo y finalmente con el 8% se representa a la categoría de árboles seniles (diámetros arriba de 90 cm).

En los árboles, el crecimiento consiste en la elongación y engrosamiento del fuste, ramas y raíces (meristema secundario). Ello implica cambios en el tamaño (peso, volumen) o forma del fuste. A partir de las variables como el diámetro o la altura se deriva el crecimiento en otras variables más complejas, como el volumen, biomasa y/o contenido de carbono. (Cancino, 2006).

En la figura 22 se observa que la sobrevivencia natural es del 60% es evidente que la población de brinzales que se suma a la siguiente etapa es pobre, y que, se suman pocos árboles a la etapa juvenil es bajo, aún cuando muestre una distribución parecida a una normal. La disminución en la siguiente etapa puede ser debida a la tala clandestina, ya que la tala de estos árboles es la adecuada para su explotación; lo mismo puede ocurrir en la etapa senil, que los pocos árboles existentes de esta clase sean derribados o por efectos de la edad del bosque que es relativamente joven.



**Figura 21.** Porcentajes por etapas de vida en ambos sitios de muestreo.



**Figura 22.** Etapa de edad vs Número de Observaciones.



Esto también puede derivarse a que el ritmo de crecimiento está influenciado tanto por factores externos (ecológicos) como internos (fisiológicos) como por el tiempo. En la vida del árbol se distinguen diversos comportamientos del crecimiento en diámetro, altura, área basimétrica y volumen. El comportamiento de cada una de las variables dendrométricas del árbol no siempre sigue con rigor la tendencia de la curva Sigmoidea, las proporciones relativas de esas variables dependen de la especie, calidad del sitio y factores ambientales, que no siempre pueden ser controlados o monitoreados, como los factores genéticos de la especie y sus interacciones con el medio ambiente (Imaña y Encinas, 2008).

### **Estimación de alturas**

En un rodal, para los mismos valores diamétricos, se presentan alturas distintas. Al contrastar las alturas con el DN se observó que existían árboles con el mismo diámetro pero diferentes alturas, o por el contrario árboles muy delgados pero bastante altos de donde se infiere una fuerte competencia de luz que existe entre todos los árboles, aun los más débiles se empeñan por alcanzar el estrato superior similar a lo descrito por Prodan *et al.*, (1997) y por factores ambientales.

En la figura 23 se muestra la fuerte competencia por espacio de copa y en consecuencia los diámetros son menores y las alturas máximas, desarrollando una fuerte competencia intraespecífica.



**Figura 23.** Vista de la altura de árboles en el bosque de oyamel en el paraje “Estación Experimental”.

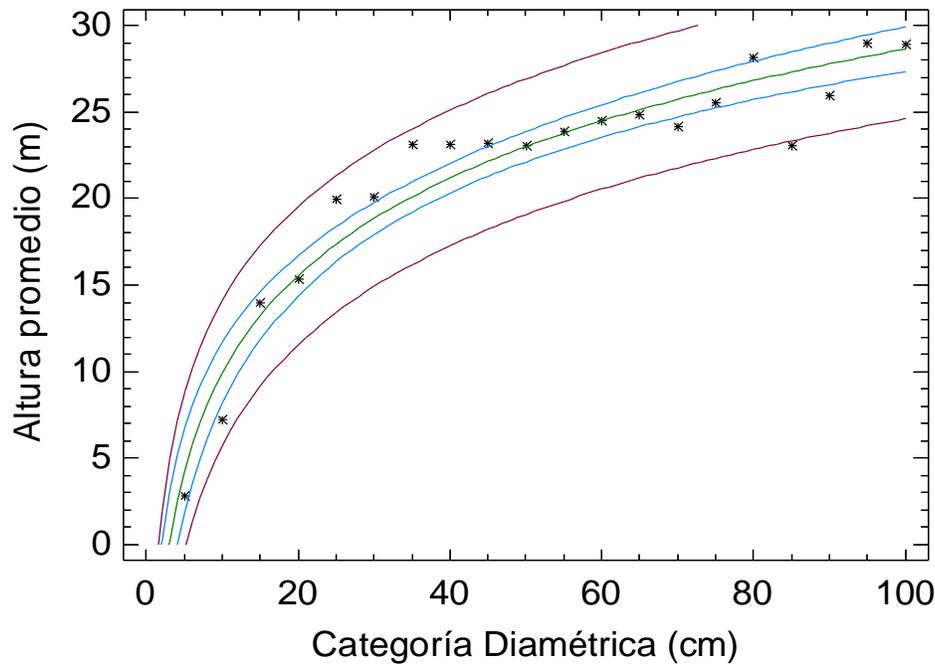
Esta competencia y la edad del bosque sesgan la relación de las variables DN y la altura vs edad, y por la ello, en los grupos de árboles de la edad juvenil-adulto se posee una tasa de crecimiento rápida.

La altura del arbolado es una variable muy importante pues está íntimamente relacionado con el DN y por consecuencia con el volumen. Para la caracterización de un rodal y cálculo del volumen es útil la determinación de alturas medias del mismo, para obtener una curva continua de estos promedios y reducir el margen de error producido por las mediciones *in situ* (Pimentel, 1979; Prodan *et al.*, 1997).

En la figura 24 se muestra la curva obtenida con las alturas medias por cada categoría diamétrica (Cuadro 3), la ecuación logarítmica de la curva fue:

$$y = 8.13391 \cdot \ln(DN) - 8.81774$$

Donde:  $y$ , es la altura (m) y  $x$ , es el DN (cm), con una  $r^2 = 0.933$ . La razón del desvío de los datos se debe a los factores de competencia por luz, especie de crecimiento y nutrimentos considerados en el error de la ecuación y a la varianza como lo explica detalladamente Jenkins *et al.*, 2004.

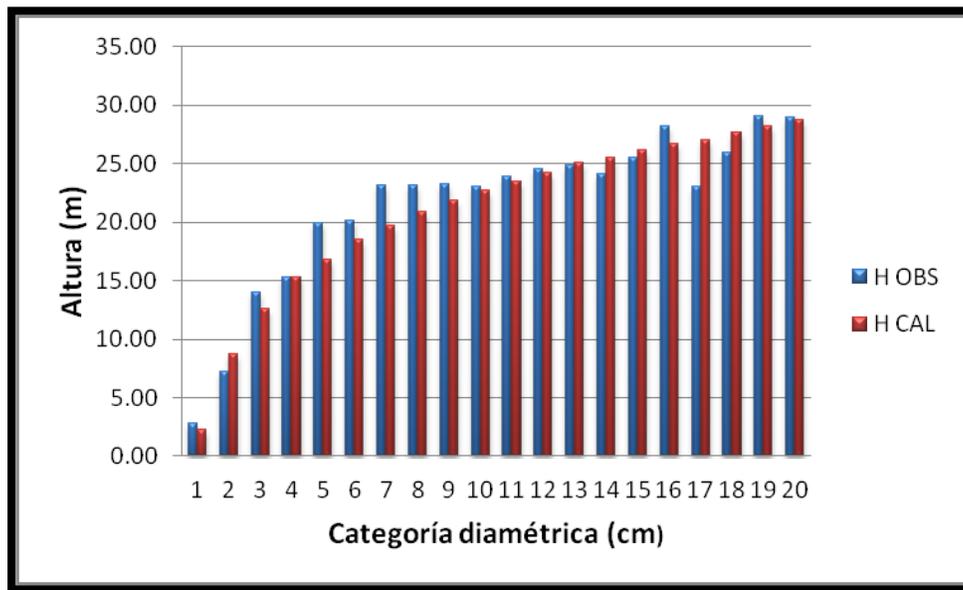


**Figura 24.** Curva de ajuste para alturas medias por categoría diamétrica. La línea verde representa la curva obtenida, las líneas paralelas (azul) representan el intervalo de confianza del 95% de ajuste de la regresión, las líneas moradas representan el límite del intervalo donde pueden encontrarse los datos.

**Cuadro 3.** Categorías diamétricas vs altura promedio

| Categoría diamétrica | Altura Promedio (m) |     |       |
|----------------------|---------------------|-----|-------|
| 5                    | 4.16                | 55  | 22.73 |
| 10                   | 7.35                | 60  | 24.02 |
| 15                   | 14.01               | 65  | 25.53 |
| 20                   | 12.10               | 70  | 26.45 |
| 25                   | 13.55               | 75  | 27.84 |
| 30                   | 15.57               | 80  | 28.97 |
| 35                   | 16.92               | 85  | 29.80 |
| 40                   | 18.60               | 90  | 31.27 |
| 45                   | 20.04               | 95  | 32.43 |
| 50                   | 21.37               | 100 | 33.81 |

Una vez obtenido el modelo para el cálculo de alturas se aplicó al DN de cada árbol y se hizo una comparación entre la altura observada y la altura calculada (Figura 25).



**Figura 25.** Diferencias entre la estimación de alturas. H OBS=Altura observada, H CAL=altura calculada por el modelo  $y = 8.13391 \cdot \ln(x) - 8.81774$ .



En general, las alturas aumentan con el diámetro; para las primeras categorías existe una divergencia muy pequeña entre la altura observada y la calculada, en las categorías intermedias de la curva se sobreestimó de acuerdo al modelo la altura, derivado de lo abrupto del terreno y el dosel tan cerrado que existía o bien los árboles de estas categorías tienen una mayor altura pues se encuentran en competencia por la luz, espacio o nutrientes. Para las últimas categorías sucedió el caso contrario, se subestimó su altura en base al modelo, pues al ser árboles tan altos el error de medición aumentó porque no era posible observar al cien por ciento la punta de la copa y debido a las causas antes mencionadas.

Los errores que se producen al medir la altura en campo pueden reducirse por mediciones cuidadosas o con instrumentos más precisos. Sin embargo, ello no afecta la dispersión de los valores en torno a la curva construida de los datos. La dispersión de los registros de altura ocasiona cierta imprecisión de la curva de alturas (Prodan *et al.*, 1997). La precisión de la curva de alturas tiene una desviación estándar de 3.34, valor cercano al obtenido por Pimentel, (1979) que fue de 3.12; por su parte Prodan *et al.*, (1997) reporta que los rodales de *Pinus y Picea* una desviación de  $\pm 1.3-1.9$ m, y 0.9-1.9m para los rodales de *Picea, Pinus, Abies y* pino de Oregón, las diferencias entre las desviaciones se debe a que la mayoría de estos bosques son plantaciones forestales, por lo tanto, se trata de rodales coetáneos en los que no existe variabilidad debida a la competencia porque están debidamente espaciados uno del otro.



## Clasificación de alturas en relación a las categorías diamétricas de Manzanilla.

Se realizó el mismo procedimiento, obteniendo las alturas promedio en base a categorías diamétricas reportadas por Manzanilla, (1974) (Cuadro 4), la ecuación obtenida fue:

$$y=9.32955*\ln(x)-15.4891$$

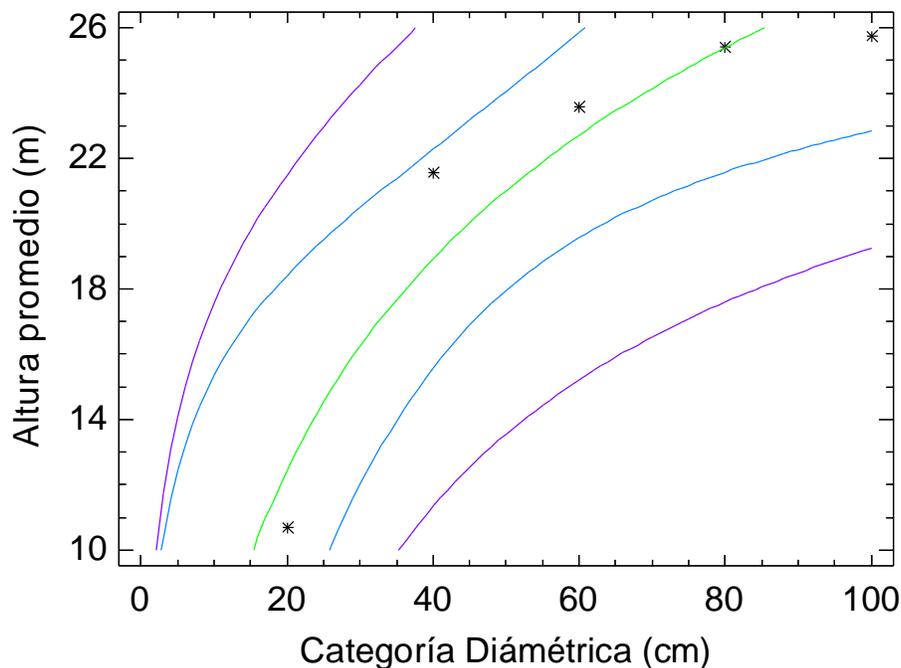
Donde,  $y$ , es la altura (m) y  $x$ , es el DN (cm).

**Cuadro 4.** Categorías diamétricas según Manzanilla (1974) vs altura promedio.

| Categoría diamétrica | Altura promedio (m)<br>( Manzanilla, 1974) |
|----------------------|--|
| 10-20                | 10.69                                      |
| 21-40                | 21.55                                      |
| 41-60                | 23.57                                      |
| 61-80                | 25.41                                      |
| 81-100               | 25.75                                      |
| 101-120              | 0  |
| 121-140              | 0  |
| >140                 | 0  |

Se observa en la figura 26, los datos correspondientes al muestreo solo abarcan cinco de las ocho categorías propuestas, su coeficiente de correlación es  $r^2=0.9111$ , que indica un mayor relación entre las categorías y las alturas promedio, sin embargo al aplicar la ecuación a los diámetros obtenidos en el Parque Nacional “El Chico”, los valores calculados subestiman a los observados, esto se explica porque el número de

observaciones es menor que los esperados. La gran mayoría de los datos reportados por Manzanilla, (1974) se encuentran en las primeras categorías (10-20cm y 21-40cm), es decir, árboles en etapa de brinzales y juveniles, además de no encontrarse individuos para las últimas categorías, por lo que, no se ajustara adecuadamente al muestreo.



**Figura 26.** Alturas promedio vs Categorías Diamétricas obtenidas por Manzanilla, (1974). La línea verde representa la curva obtenida, las líneas paralelas (azul) representan el intervalo de confianza del 95% de ajuste de la regresión, las líneas moradas representan el modelo teórico, es decir, el límite del intervalo donde pueden encontrarse los datos.

Otra explicación es que la influencia directa en el crecimiento por los factores climáticos (temperatura, precipitación, viento, insolación), pedológicos (características físicas, químicas y biológicas del suelo),



topográficos (inclinación, altitud y exposición del sitio), biológicos (fisiología, plagas, enfermedades) y por la propia competencia con otros árboles y otros tipos de vegetación (Imaña y Encinas, 2008) no es la misma que existía en los bosques durante los años 70's cuando se realizó el estudio, porque no se percibían la misma cantidad de estrés atmosférico como lo hace el rodal actualmente estudiado.

### **Determinación de ecuaciones alométricas para Biomasa y Contenido de Carbono.**

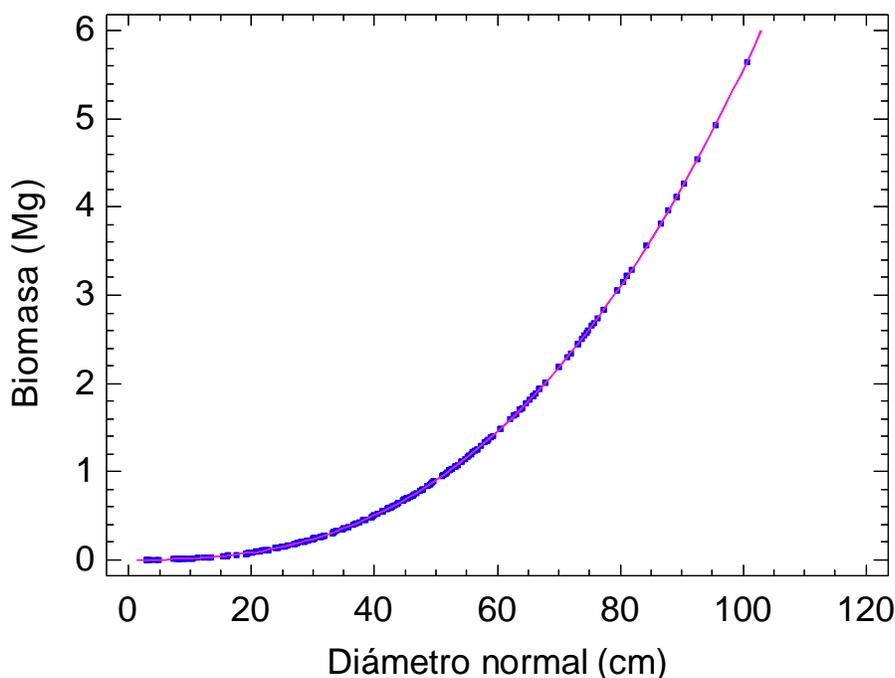
Una vez estimada la biomasa, se contrastó con su diámetro normal correspondiente para determinar la ecuación con mejor ajuste (Cuadro 5), el modelo elegido fue el de tipo potencial. La ecuación obtenida de la curva (Figura 27) para la biomasa es  $B=3.1661 \times 10^{-5} * DN^{2.62221}$  con un coeficiente de determinación  $R^2 = 1$ , lo que explica un ajuste del 100,0% entre las variables. El coeficiente de correlación es igual a 1,0, lo que indica una relación robusta entre las variables.

En el cuadro 6 se muestra los estadísticos para el análisis de regresión. En la tabla de ANOVA (Cuadro7), el valor de  $p$  es alto, y este representa la probabilidad de que ocurra el supuesto, es decir, que el diámetro expresa directamente la biomasa en un tamaño de muestra de 250 árboles; por lo tanto, al ser menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre la biomasa y el DN con un nivel de

confianza del 95.0%. Además de proyectar un error estándar muy bajo en la relación de ambas variables.

**Cuadro 5.** Ajuste de modelos obtenidos para DN vs Biomasa, donde x=Diámetro Normal (cm), a y b = constantes de la ecuación.

| Modelo                                | Ecuación   | Coefficiente de determinación (r <sup>2</sup> ) | Coefficiente de correlación (r) |
|---------------------------------------|--|---|---------------------------------|
| Lineal<br>y = a + b*x                 | B = -0.983409 + 0.0449449*DN                     | 0.853007  | 0.923584                        |
| Exponencial<br>y = a*e <sup>b*x</sup> | B=0.014061*e <sup>0.0762607</sup>                | 0.834449  | 0.913482                        |
| Logarítmico<br>y = a + b*ln(X)        | B= -2.97758 + 1.09908*ln(DN)                     | 0.517032  | 0.71905                         |
| Potencial<br>y = a*x <sup>b</sup>     | B=3.1661x10 <sup>-5</sup> *DN <sup>2.62221</sup> | 1.0   | 1.0                             |
| Sigmoideo<br>y =(a + b/X)             | B=(1.280917 -31.0682/DN)                         | 0.74675   | 0.864147                        |



**Figura 27.** Modelo obtenido para estimación de Biomasa (MgB). La línea rosa representa la curva obtenida.

**Cuadro 6.** Estimadores estadísticos de biomasa vs diámetro normal para la regresión alométrica. \*El valor de la ordenada al origen es el ln de  $a$ .

| Parámetro          | Estimador por Mínimos cuadrados | Error Estándar | Estadístico T | Valor de R <sup>2</sup> | Coefficiente de correlación | Error estándar de est. | Media del error absoluto |
|--------------------|---------------------------------|----------------|---------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Ordenada al origen | -10.3604*                       | 0.000193972    | -53411.8      | 100.00                  | 1.00                        | 0.000587716            | 0.00029889               |
| Pendiente          | 2.62221                         | 0.0000531536   | 49332.6       |                         |                             |                        |                          |

**Cuadro 7.** Análisis de Varianza entre biomasa y DN.

| Origen               | Suma de cuadrados | g.l        | Media cuadrática        | Proporción F  | Valor de $p$ |
|----------------------|-------------------|------------|-------------------------|---------------|--------------|
| Modelo               | 840.626           | 1          | 840.626                 | 2433707264.80 | 0.0000       |
| Residual             | 0.0000856616      | 248        | 3.4541X10 <sup>-7</sup> |               |              |
| <b>Total (Corr.)</b> | <b>840.626</b>    | <b>249</b> |                         |               |              |

Sin embargo, Zapata *et al.*, (2001) le atribuye un efecto de la potencia de la variable independiente (DN) con respecto al logaritmo de la masa seca; cuando se utilizan los estimadores de los mínimos cuadráticos la varianza es proporcional al DN.

Para la estimación del contenido de carbono al igual que la biomasa se contrastó con el diámetro normal y se eligió la ecuación con el mejor ajuste (Cuadro 8), el modelo con un coeficiente de determinación ( $r^2 = 1$ ) es el de tipo potencial, cuyo coeficiente de correlación es 1.0, que muestra una estrecha relación entre las variables; esto es debido a que el modelo se obtuvo con valores tomados en campo y obteniendo las ecuaciones. En la Figura 28 se encuentra la curva para estimar el contenido de carbono cuya



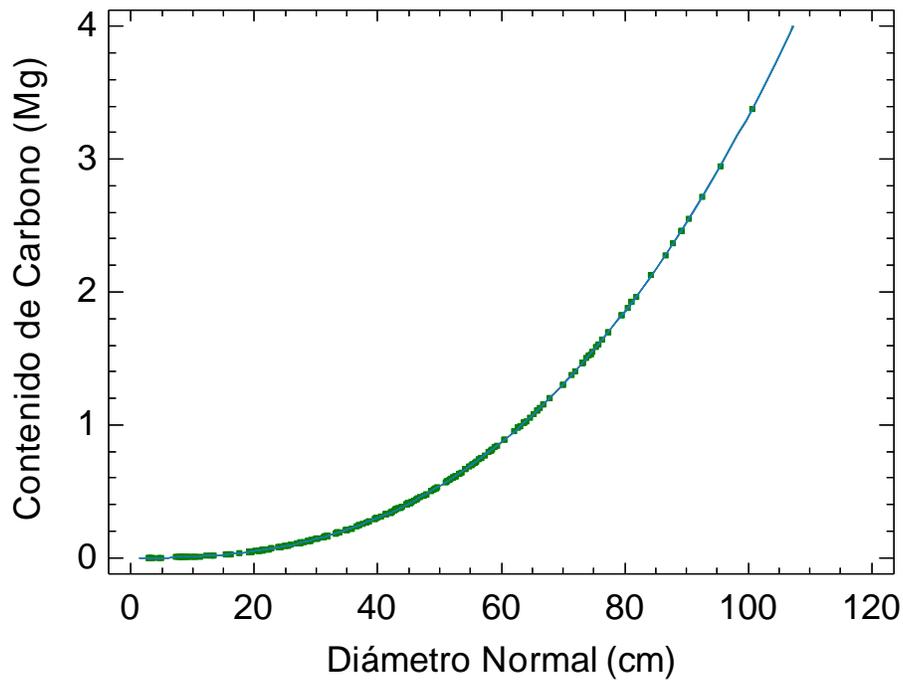
ecuación es  $CC=1.8933 \times 10^{-5} \cdot DN^{2.62221}$ . Los estadísticos probados en el análisis de regresión se muestran en el cuadro 9, con una relación significativa entre el contenido de carbono y DN con un nivel de confianza de 95.0% como puede verse en la tabla de ANOVA (Cuadro 10).

**Cuadro 8.** Ajuste de modelos obtenidos para DN vs Contenido de Carbono, donde  $x$ =Diámetro Normal (cm),  $a$  y  $b$  = constantes de la ecuación.

| Modelo                                     | Ecuación  | Coefficiente de determinación ( $r^2$ ) | Coefficiente de correlación ( $r$ ) |
|--|---|---|-------------------------------------|
| Lineal<br>$y = a + b \cdot x$              | $CC = -0.588079 + 0.028771 \cdot DN$                        | 0.853007                                | 0.923584                            |
| Exponencial<br>$y = a \cdot e^{b \cdot x}$ | $CC = 8.408938 \times 10^{-3} \cdot e^{0.0762607 \cdot DN}$ | 0.834449                                | 0.913482                            |
| Logarítmico<br>$y = a + b \cdot \ln(X)$    | $CC = -1.78059 + 0.65725 \cdot \ln(DN)$                     | 0.517032                                | 0.71905                             |
| Potencial<br>$y = a \cdot x^b$             | $CC = 1.8933 \times 10^{-5} \cdot DN^{2.62221}$             | 1.0                                     | 1.0                                 |
| Sigmoideo<br>$y = (a + b/X)$               | $CC = (0.76598 - 31.0682/DN)$                               | 0.74675                                 | 0.864147                            |

**Cuadro 9.** Estimadores estadísticos de contenido de carbono vs diámetro normal para la regresión alométrica.

| Parámetro          | Estimador por Mínimos cuadrados | Error Estándar | Estadístico t | Valor de $R^2$ | Coefficiente de correlación $r$ | Error estándar de est. | Media del error absoluto |
|--------------------|---------------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Ordenada al origen | -10.3604                        | 0.000193972    | -53411.8      | 100.00         | 1.00                            | 0.000587716            | 0.00029889               |
| Pendiente          | 2.62221                         | 0.000053153    | 49332.6       |                |                                 |                        | 6                        |



**Figura 28.** Modelo obtenido para el contenido de carbono (MgC). La línea azul representa la curva generada.

**Cuadro 10.** Análisis de Varianza entre contenido de carbono y DN.

| Origen               | Suma de cuadrados | g.l        | Media cuadrática | Proporción F  | Valor de $p$ |
|----------------------|-------------------|------------|------------------|---------------|--------------|
| Modelo               | 840.626           | 1          | 840.626          | 2433707264.80 | 0.0000       |
| Residual             | 0.0000856616      | 248        | 3.4541E-7        |               |              |
| <b>Total (Corr.)</b> | <b>840.626</b>    | <b>249</b> |                  |               |              |

### Estimación del contenido de carbono desde hace cincuenta años

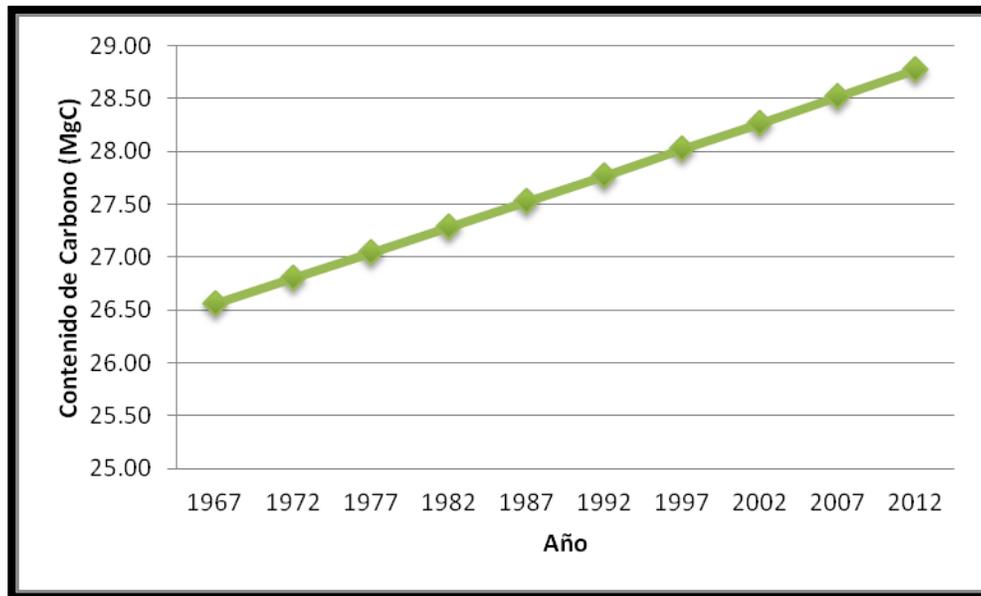
Partiendo del hecho que los últimos 50 años han existido de altos índices de contaminación en la Cuenca de México que someten a los bosques dentro de está a condiciones de estrés, y bajo la premisa de que el



bosque de oyamel del Parque Nacional “El Chico” no se encuentra bajo ese estrés con la extracción de 20 núcleos y su medición anillar, alimentó el modelo generado estimando el contenido de con los diámetros obtenidos por el conteo de anillos. En el cuadro 11 se muestran el total de carbono registrado y el promedio de captura de carbono por quinquenio desde hace 50 años. El contenido de carbono estimado por el modelo nos indica una tendencia lineal (Figura 29), es decir, que el aumento del contenido de carbono es proporcional al tiempo; como consecuencia del crecimiento en la etapa de vida del árbol, pues entre menor sea la talla de éste, más carbono captará porque es utilizado para su desarrollo, este aumento llegará a ser menos significativo cuando el árbol alcance su máximo crecimiento pues la mayoría del carbono capturado lo utilizará para realizar la fotosíntesis o reparar alguna estructura.

**Cuadro 11.** Estimación del contenido de carbono por quinquenios a través del modelo  $CC=1.8933 \times 10^{-5} \cdot DN^{2.62221}$  con diámetros obtenidos en las lecturas de anillos.

| <b>Año</b>  | <b>Total de Carbono capturado por año(MgC)</b> | <b>Promedio de Carbono capturado por año (MgC)</b> |
|-------------|--|--|
| <b>1967</b> | 26.55  | 1.40   |
| <b>1972</b> | 26.80  | 1.41   |
| <b>1977</b> | 27.04  | 1.42   |
| <b>1982</b> | 27.28  | 1.44   |
| <b>1987</b> | 27.52  | 1.45   |
| <b>1992</b> | 27.77  | 1.46   |
| <b>1997</b> | 28.02  | 1.47   |
| <b>2002</b> | 28.26  | 1.49   |
| <b>2007</b> | 28.51  | 1.50   |
| <b>2012</b> | 28.77  | 1.51   |



**Figura 29.** Contenido de carbono desde hace 50 años por quinquenios.

Los árboles muestreados, en su mayoría pertenecen a las categorías diamétricas de maduros y seniles, por lo que, son buenos indicadores sobre la captura de carbono pues demuestran que siempre ha ido en aumento constante, es decir, que las condiciones del bosque siempre han sido favorables para su crecimiento y desarrollo.

Además, se llevó a cabo una comparación del contenido de carbono obtenido por los cálculos de cubicación y con el modelo generado; existen diferencias entre 0.01-0.5 de MgC. Esto puede ser debido a que las categorías diamétricas tienen un ligero sesgo a la izquierda y la mayoría de los datos se encuentran en la etapa juvenil, por lo tanto, estos influyen



sobre el modelo y generan sobreestimación en los diámetros de tallas más grandes en los cuales el crecimiento y desarrollo es menor.

### **Análisis múltiple de variables**

Se realizó un análisis múltiple de comparación en las variables área basal, altura, biomasa y contenido de carbono, para determinar si existían diferencias significativas entre las medias y las desviaciones estándar (Cuadro 10, 11 y 12). Los promedios para cada variable son menos a uno a excepción del que corresponde a la altura, lo mismo ocurre con las desviaciones estándar; esto se debe a que las variables tienen distintas dimensiones, es decir, el área basal está dada en  $m^2$ , la biomasa y contenido de carbono en Megagramos (Mg) y la altura en m, por ello en el diagrama de dispersión múltiple se presentan las observaciones más altas para la altura.

En la prueba de varianza se muestra la variabilidad global entre el total de mediciones en dos componentes; entre el número de observaciones de la misma variable y entre cada una de ellas.

**Cuadro 10.** Resumen de promedio y desviación estándar de las variables.

| Muestra              | Total       | Promedio     | Desviación estándar |
|----------------------|-------------|--------------|---------------------|
| Contenido de carbono | 250         | 0.573451     | 0.640482            |
| Biomasa              | 250         | 0.958949     | 1.07104             |
| Altura               | 250         | 19.2747      | 6.67173             |
| Área basal           | 250         | 0.18492      | 0.164444            |
| <b>Total</b>         | <b>1000</b> | <b>5.428</b> | <b>8.78708</b>      |

**Cuadro 11.** Análisis de Varianza de las variables.

| Origen               | Suma de cuadrados | g.l        | Media cuadrática | Proporción F | Valor de $p$ |
|----------------------|-------------------|------------|------------------|--------------|--------------|
| Entre grupos         | 65657.5           | 3          | 21885.8          | 1899.13      | 0.000        |
| Dentro de los grupos | 11478             | 996        | 11.5241          |              |              |
| <b>Total (Corr.)</b> | <b>77135.5</b>    | <b>999</b> |                  |              |              |

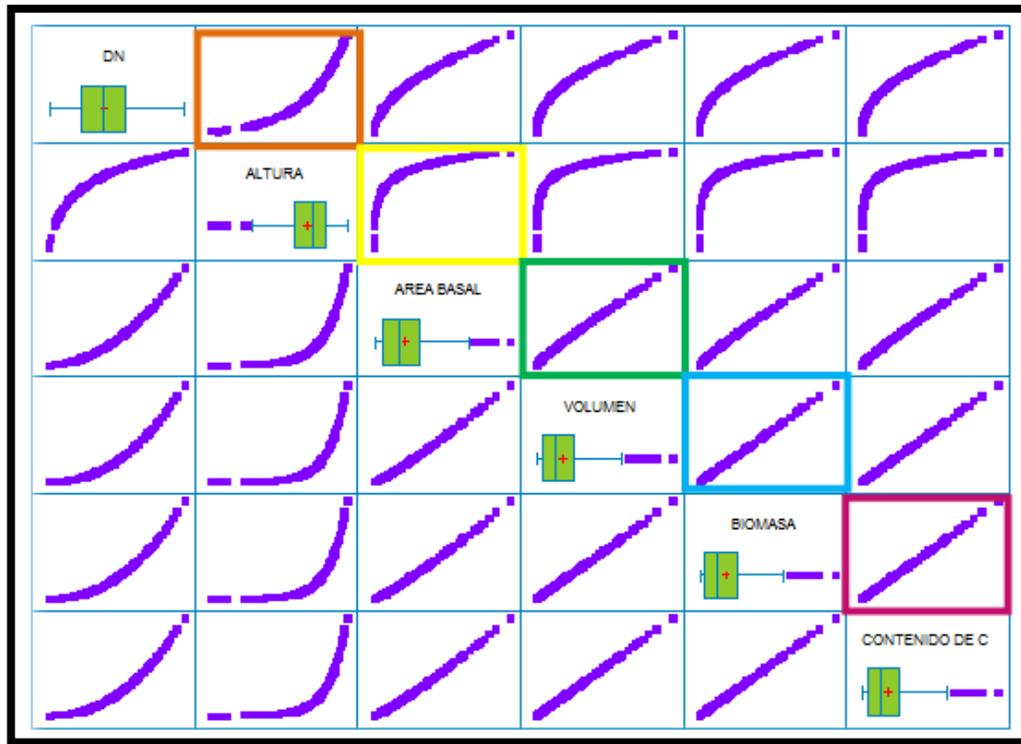
**Cuadro 12.** Comprobación de Varianza.

| Origen       | Valor   |
|--------------|---------|
| Levene's     | 369.588 |
| Valor de $p$ | 0.0000  |

Con el fin de indagar el efecto sobre la tasa de crecimiento con respecto al DN, Altura, Área Basal, Volumen, Biomasa y Contenido del Carbono, se realizó una matriz de variables (Figura 30) teniendo como primicia el conjunto de los árboles medio. Se encontró que la relación entre el DN y la altura (línea anaranjada) es de tipo potencial; entre la altura y el área basal la relación es logarítmica (línea amarilla); en cambio para las siguientes tres relaciones altura vs volumen (línea verde); volumen vs biomasa (línea azul); biomasa vs contenido de carbono (línea rosa).

El diagrama de caja y bigote para la variable DN, muestra gran dispersión de datos, pero no presenta valores atípicos; para el caso de la altura se encuentran valores atípicos, es decir, que se reportan pocos árboles

con alturas de grandes tallas. Para las siguientes cuatro variables sus valores fuera de la desviación son similares, pues están estrechamente relacionadas al ser empleadas para la cubicación de los árboles.



**Figura 30.** Matriz de variables. La cruz roja indica el valor promedio en cada caso.

Las primeras relaciones establecen una relación no lineal entre las variables alométricas a escala de la población arbórea, esto se debe a los valores atípicos en las alturas, por ello, el modelo tiene un ligero sesgo ya que esta variable influencia en el mismo. La relación entre la biomasa, el volumen y carbono cambia drásticamente, pues son de tipo lineal porque describen el crecimiento del oyamel en las porciones de bosque muestreado del Parque



Nacional “El Chico”, bajo las condiciones de su propio hábitat y del nicho hiperespacial (Whittaker *et al.*, 1973), éstas son las razones por las cuales las ecuaciones se vuelven específicas y no deben emplearse modelos generados en otras zonas.

### **Biomasa y contenido de carbono en distintos Bosques de Oyamel**

En 1.34ha del área de muestreo se reportan 239.74 MgB, 143.36 MgC; para la porción del bosque de oyamel para todo el parque las cantidades extrapoladas son de 308,692.09 MgB, 184,592.05 MgC; finalmente se encuentran 178.91 MgB\*ha<sup>-1</sup> y 106.98 MgC\*ha<sup>-1</sup>. En otros estudios hechos en plantaciones forestales para *Abies religiosa* como el de Acosta *et. al.*, (2009) en un bosque de Pino-oyamel existen 301.9 MgC\*ha<sup>-1</sup>; Fragoso, (2003) 15 800 MgC y 1 MgC\*ha<sup>-1</sup>; Para la Cuenca del Río Magdalena Galeana (2008) reporta que el bosque de oyamel captura 163 MgC\*ha<sup>-1</sup>; en contraste Nava, (2006) estimó 198 MgC\*ha<sup>-1</sup> para este mismo sitio.

Para el caso de zonas de reserva García, (2011) en el Nevado de Toluca encontró almacenados 156.23 MgC\*ha<sup>-1</sup> en un bosque de oyamel y 6 612 MgC\*ha<sup>-1</sup> en un bosque de Oyamel-Pino; Galeana; (2008) reporta 37.40 MgC\*ha<sup>-1</sup> en la cuenca del Río Magdalena en un bosque abierto; Rojas, (2008) en El cerro La Malinche, Tlaxcala para dos bosques de Oyamel reporta 134.62 MgB\*ha<sup>-1</sup> y 396.50 MgB\*ha<sup>-1</sup>, por lo tanto, el bosque de *Abies religiosa* estudiado se encuentra dentro del rango que corresponde a una



zona de reserva natural, por lo que es de suma importancia mantener este sitio en los años venideros para continuar almacenando el CO<sub>2</sub> atmosférico que cada día aumenta por las actividades antrópicas y al mismo tiempo generar más estudios que desarrollen estrategias para el manejo sustentable del bosque.



## IX. Conclusiones

- ⌘ Las porciones del bosque de oyamel muestreadas (1.34ha.) reportaron 239.74 MgB, 143.36 MgC.
- ⌘ Las cantidades obtenidas de la extrapolación de todo el bosque de oyamel presente en el Parque Nacional “El Chico” fueron 308,692.09 MgB, 184,592.05 MgC y 178.91 MgB\*ha<sup>-1</sup> y 106.98 MgC\*ha<sup>-1</sup>.
- ⌘ La generación de modelos alométricos basados en censos forestales son una herramienta para la predicción de biomasa y contenido de carbono.
- ⌘ A comparación del método destructivo, se abarca un mayor número de árboles para hacer más robusto el ajuste.
- ⌘ La variable DN vs Biomasa y/o Contenido de Carbono, es capaz de predecir la cantidad de la segunda bajo el supuesto de proporcionalidad alométrico.
- ⌘ El comportamiento potencial de los modelos propuestos se explica porque los árboles elegidos correspondieron a las primeras categorías diamétricas y etapas de vida.
- ⌘ El bosque se encuentra casi a la mitad de su vida, por lo que en los años consecuentes cambiara la estructura de edades y el comportamiento de la curva.



- ⌘ Las diferencias de alturas entre algunos árboles con el mismo diámetro son derivadas de las condiciones ecológicas intraespecíficas en las que se encuentra el rodal.
- ⌘ El contenido de carbono desde hace 50 años estimado por el modelo nos indica que el aumento de éste es proporcional al tiempo.
- ⌘ La mayoría de los datos registrados se encuentran en las primeras etapas de vida, por lo que se genera un sesgo en el modelo, el cual en diámetros mayores a 75 cm. comienza a sobreestimar las cantidades de contenido de carbono, pues la tasa de crecimiento en las primeras etapas (brinzal y juvenil) es alta a comparación de las etapas maduro y senil.



## X. Recomendaciones

- ♣ Aumentar el número de muestreos para generar un modelo aún más robusto en el que se traten de equiparar el número de individuos por clase diamétrica y no generar sesgos la curva, además de cubrir más porciones del bosque así como a las demás especies presentes en el Parque Nacional “El Chico”.
- ♣ Realizar un mayor número de inventarios y trabajos de este tipo, no solo para *Abies religiosa* sino todas las especies forestales del país, y al mismo tiempo generar bases de datos que nos proporcionen datos propios de las especies, sin tener que recurrir a datos del extranjero o propuestos internacionalmente que generan errores en la generación de modelos.
- ♣ Una vez cubiertas todas las zonas forestales, podrían generarse modelos a escala regional que describan un ecosistema (bosques templados, tropicales, de niebla, etc.), sin olvidar las condiciones específicas de cada sitio, con el fin de generar programas de conservación y manejo forestal que salvaguarden las masas forestales con un desarrollo sustentable.



## XI. Literatura consultada

- Acosta, M.; J. D. Etchevers; C. Monreal; K. Quednow; C. Hidalgo. 2001. Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. INIFAP, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 13 pp.
- Acosta, M.; J. Vargas; A. Velázquez; J. Etchevers. D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca. México. *Agrociencia* 36(6):725-736.
- Acosta, M.; F. Carrillo; M. Díaz. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. Et Cham. *TIERRA Latinoamericana* 27(2):105-114.
- Álvarez, G. 2008. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 89 pp.
- Apps, M. J.; W. A. Kurz; R. J. Luxmoore; L. O. Nilsson; R. A. Sedjo; R. Schmidt; L. G. Simpson & T. S. Vinson. 1993. Boreal forest tundra. In Wisniewski, J. & R. N. Sampson (eds) *Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO<sub>2</sub>*. Kluwer Academic Pub. 39-53 pp.
- Ares, A.; J. Boniche; J. P. Quesada; R. Yost; E. Molina; T. J. Smyth. 2002. Estimación de biomasa por métodos alométricos, nutrientes y carbono en plantaciones de palmito en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(2): 19-30.
- Avendaño, D. M. 2006. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham., en Tlaxcala, México. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. 66 pp.
- Avendaño, D. M.; M. Acosta; F. Carrillo y D. Etchevers. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 32(3):233-238.
- Bailian, L., H.L. Allen & S.E. McKeand. 1991. Nitrogen and family effects on biomass allocation of loblolly pine seedlings. *Forestal Science*. 37(1):271-283.



- Barskerville, G. L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Canadian. Journal Forest of Research. 2:49-53.
- Bonilla, E. 2009. Chapingo México, Enero de 2009. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* Lamb. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. México. 70 pp.
- Botanical SL, 2013. Los árboles. Internet. España. <http://www.botanical-online.com/arboles.htm> . 27 de Marzo 2013.
- Brad, W. and Brand, G. J.1983. Allometric biomass equations for 98 species of herbs, shrubs, and small trees. Reseacg Note NC-299. North Central Forest Experiment Station, Forest Service- USDA. 8p
- Breugel,M.; J. Ransijn; D. Craven; F. Bongers & J. S. Hall. 2011. Estimating carbon stock in secondary forest: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. Forest Ecology and Management (262): 1648-1657.
- Breymeyer, A. I.; B. Berg; S. T. Gower & D. Johnson. 1996. Carbon budget: temperate coniferous forests. pp. 41-67. In: A. I. Breymeyer, D. O. Hall, J. M. Melillo, and G. I. Agren. Global change: effects on coniferous forests and grasslands. John Wiley. Chichester, UK.
- Brown, J. 1976. Estimating shrub biomass from basal stem diameters. Canadian Journal of Forest Research 6(2): 153-158.
- Brown, H. 1992. Biomasa en bosques de Lengua (*Nothofagus pumilio* Krasser) en la provincia de la Última Esperanza, XII región. Tesis de Ingeniería Forestal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 63 pp.
- Brown, S. & A. Lugo. 1984. Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volumes. Science 223(4642): 1290-1293.
- Brown, S; A. J. R. Gillespie and A. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. Forest Science (35):881-902.



- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. In *FAO Forestry Papers 134*, 134, 55 pp. Rome, Italy., FAO. at [http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries\\_id=7736](http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries_id=7736). 25 de Marzo 2013.
- Brown, S. L.; P. Schoeder and J.S. Kern. 1999. Spatial distribution of biomass in forest of the easter USA. *Forest Ecology and Manage.* 123:81-90.
- Caballero, M. 1982. Empleo de coeficientes mórficos en la elaboración de tablas de volúmenes de cedro rojo. *Boletín Divulgativo No. 26B*, Abril 1982. 2°ed. INF-SARH. México. 27pp.
- Cancino, J. 2006. Dendrometría básica. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de manejo de bosques y medio ambiente. 171pp.
- Castellanos B., J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 75 pp.
- Causton, D. R. 1985. Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. *In: Attributes of trees as crop plants.* Cannell, M. G. R. and J. E. Jackson (eds). Institute Terrestrial Ecology, Huntingdon. pp. 137-159.
- Ciesla W., M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. FAO. Roma. 146 pp.
- COLPOS, Colegio de Posgraduados. 2004. Diagnóstico De La Cubierta Vegetal En El Suelo De Conservación Del Distrito Federal: Estimación De Biomasa Forestal. Secretaria Del Medio Ambiente – Gobierno del Distrito Federal. Montecillo, Texcoco, Estado De México. 52 pp.
- Colter B., E.; R. E. Will; G. A. Barron; R. O. Teskey & B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science.* 49(2):224-234.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2005. Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional El Chico. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México. 236 pp.



- Cruz M., Z. 2007. Sistema de ecuaciones para estimación y participación de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipan, Hidalgo. Tesis maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 39 pp.
- Davel, M.; A. Jovanovsky y B. Mohr. 2005. Densidad básica de la madera de pino Oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina-Argentina. *Bosques* (26):2-16.
- De Vries, P. 1986. *Sampling theory for forest inventory*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg. 399 pp.
- Díaz R., M. Acosta, F. Carrillo, E. Buendía, E. Flores, J. D. Etchevers .2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et. Cham. *Madera y Bosques* 13(1):25-34
- Dietz, J. & S. Kuyah. 2011. Guidelines for establishing regional allometric equations for biomass estimation through destructive sampling. World Agroforestry Centre. Kenya. 28 pp.
- Domínguez, G.; O. A. Aguirre; J. Jiménez; R. Rodríguez y J. A. Díaz. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 59-64.
- Donoso, C. 1993. *Bosques templados de Chile y Argentina: variación estricta y dinámica*. Segunda edición. Universidad de Texas. 483 pp.
- Etchevers, J.; M. Acosta; C. Monreal; K. Quednow; L. Jiménez.. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. En *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18-20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. Resumen No. 9.
- FAO. 1996. *Cambio climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto*. Roma, Italia. 146 pp.



- Figuroa, C. M. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 82 pp.
- Figuroa, B.L. y M. Olvera. 2000. Dinámica de la composición de especies en bosques de *Quercus crassipes* H. et B. en Cerro Grande, Sierra de Manantlán, México. *Agrociencia* (34):91-98.
- Flores, P.; M. A. López; G. Ángeles; M. L. de la Isla y G. Calva. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación
- Fragoso, P. I. 2003. Estimación y Captura De Carbono En Biomasa Aérea Del Predio “Cerro Grande” Municipio De Tacintaro Michoacán México. Tesis De Licenciatura. Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. Uruapan, Michoacán 77 pp.
- Galeana, P. M. 2008. Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica, en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de Licenciatura. UNAM. DF. 74p.
- Gallina, M.P., A. González; R. C, Moutal y G. C. Tello. 1974. Bases para la reestructuración del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. Tesis de Licenciatura. Fac. Ciencias. UNAM. México. 114 pp.
- García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen Instituto de Geografía, México. 246 pp.
- García, I. E. 2011. Estimación del contenido y captura potencial de carbono del bosque de *Pinus hartwegii* Lidl. *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en el Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura, UNAM, D.F. 73 pp.
- García, V y D. L. Sánchez. 2009. Estimación de carbono contenido en el bosque bajo manejo forestal del Ejido de Tlamanalco, Estado de México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México. 133 pp.



- Garcidueñas; A.R. 1987. Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 243 pp.
- Garzuglia, M. y M. Sacket. 2003. Wood volumen and woody biomass. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma pp.30.
- Gayon, J. 2000. History of the Concept of Allometry. *American Zoologist* 40:748-758.
- Gayoso, J. 2002. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 53pp.
- Gasparri, I. y E. Manghi. 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales Argentinas. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. República de Argentina, Ministerio de Salud y Ambiente. 26 pp.
- Goche, J.R.; M. Fuentes; A. Borja-de la Rosa y H. Ramírez. 2000. Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 6(1): 83-92.
- Grier, C.C.; Lee, K. M. and Archibald, R. M. 1984. Effect of urea fertilization on allometric relations in young Douglas-fir trees. *Canadian Journal Forest Research*. 14:900-904.
- Grigal, D. F.; Ohmann, L. F. 1977 Biomass estimation for some shrubs from northeastern Minnesota. Res. Note. NC-226. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.3 p.
- Grijpma, P.I. 1982. Producción Forestal. SEP. Trillas. México. 134 pp.
- Gutiérrez, V. H. y G. J. Lopera. 2001. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbón en plantaciones forestales. En: Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18-20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. Resumen No. 10
- Hairiah, K.; S. M. Sitompul & C. Van-Noodwick. 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. International Centre for Research in Agroforestry. Southeast Asian Regional Research Programme Boggor, Indonesia.



- Hernández, M. 1995. Estudio florístico-fanerogámico del Parque Nacional El Chico, Estado de Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala. UNAM. México. 73 pp.
- Houghton , R. A.; E. A. Davidson & G. M. Woodwell. 1998. Missing Sinks Feedbacks And Understanding Th Role Of Terrestrial Ecosystems In The Global Carbon Balance. *Global Biogeochemistry Cycles* 12:25-34.
- Houghton, J.T.; Y. Ding; D. J. Grings; M. Nogue; P. J. Van Der Linden; X. Dai; K. Maskell & C. A. Johnson (Eds.). 2001. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment* Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 94.
- Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en los ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 9 pp.
- Imaña, J y O. Encinas. 2008. *Epidometría Forestal*. Universidad de Brasilia. Dpto. De Engenharia Florestal-Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. 70pp.
- IPCC. 2001. Summary for policymakers. A report of working grupo I of the Intergovenamental Panel on Change Climate. <http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>. 12 de Marzo 2013.
- IPCC.2008. Report of the 29th session of the IPCC. Geneva, 31 August - 4 September. pp.53.
- Ordoñez, J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo Michoacán. INE-SEMARNAP. 72 pp.
- Isaza, J. F. y R. D. Campos. 2007. *Cambio Climático: Glaciaciones Y Calentamiento Global*. Fundación Universidad De Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia. 233-261 pp.
- Jenkins, J.; D. Chojnacky; L. Heath and R. Birdsey. 2003. National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. *Forest Science* 49(1):12-35.
- Jiménez, C. R. 2010. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl., en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis Profesional. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México. 65 pp.



- Keller, Michael; Palace. Michael; Hurt, George. 2001. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil Examination of sampling and allometric uncertainties. *Forest Ecology and Management* (154): 371-382.
- Kolshus, H.2001. Carbon sequestration in sinks an overview of potential and cost. CICERO Working Paper (11). Blindern, Norway.
- López, C. 1988. Modelos para estimación de biomasa de *Pinus cembroides* Zucc. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. México. 55 pp.
- López, G. F. 2005. Ecofisiología de árboles. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco Edo. México. 485 pp.
- Ludevid, M. 1998. El cambio global en el medio ambiente: Introducción a sus causas humanas. 2a edición. Alfaomega. México, Distrito Federal. 19-24 pp.
- Malhi, Y; P. Meir and S. Brown. 2002. Forest, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (360) 1567-1591.
- Manzanilla, H. 1974. Investigaciones Epidométricas y Silvícolas en bosques Mexicanos de *Abies religiosa*. 2° edición. Dirección General de Información y Relaciones Públicas de la SAG México, 165 pp.
- Marques Dos Santos, M. (2004). Probabilidad y estadística para las ciencias químico biológicas. Segunda edición. México: UNAM FES Zaragoza. 624 pp.
- Masera, O. 2013. Mitigación de carbono en bioenergía, agricultura y el sector forestal: perspectivas del quinto informe del IPCC. Conferencia Magistral en IV Simposio Internacional del Carbono en México, 20-24 de Mayo.
- Masera, O. R; B De Jong e I. Ricaldes. 2000. Consolidación de la Oficina Mexicana para la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero. Instituto de Ecología, UNAM. México. 197 pp.
- Medina J. M., J. Rzedowsky. 1981. Guía botánico-forestal de la parte alta de la Sierra de Pachuca. En: Guías Botánicas de Excursiones en México. Sociedad Botánica de México, (IV):1-19.



- Monterroso, A. I. y J. D. Gómez. 2003. Escenarios Climatológicos de La República Mexicana Ante El Cambio Climático. Comisión Nacional De Zonas Áridas-Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado De México. 20-24 pp.
- Mostacedo, B. y F. Todd. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz, Bolivia. 87 pp.
- Nava, M. Carbono almacenado como servicio ecosistémico y criterios de restauración, en el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca del Río Magdalena, D.F. Tesis de Maestría, UNAM. México, D.F. 70 pp.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forest of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* (257):427-434.
- Newton, P. F. y I. G. Amponsah. 2007. Comparative evaluation of five height-diameter models developed for black spruce and jack pine stand-types in terms of goodness-of-fit, lack-of-fit and predictive ability. *Forest Ecology and Management* (247):149-166.
- Nogueira, E. M.; P. M. Fearnside; B. W. Nelson Walker; R. I. Barbosa & E. W. H. Keizer. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management* (256):1853-1867.
- Nogueira, A. D.; R. Suwaei; G. H. Pires de Mello; T. Kahimoto; J. Dos Santos; R. Pereira da Silva; C. A. Sampaio de Souza; P. Castro de Barros; H. Noguchi; M. Ishizuka & N. Higuchi. 2012. Allometric models for estimating above-and below-ground biomass in Amazonian forest at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management* (277):136-172.
- ONU. 1992. Gases que producen el efecto invernadero (Cambio climático global). Universidad Autónoma Chapingo. 41 p.
- Ordoñez, J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: El caso de San Juan Nuevo Michoacán. INE- SEMARNAP. 72 pp.



- Ordoñez, J. A. B.; J de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento e carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus*, en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2):27-47.
- PAOT, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. 2010. Cuantificación del carbono almacenado en la vegetación del Suelo de conservación del Distrito Federal. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, México. 33 pp.
- Peña del Valle, A. E. 2003. Captura de carbono: un estudio en El Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.Puebla. Tesis de maestría, UNAM, DF. 85 pp.
- Pimentel B., L. 1979. Determinación del volumen óptimo de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Edo. México. 150 pp.
- Prodan, M.; R. Peters; F. Cox y P. Real. 1997. *Mensura Forestal*. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura. San José, Costa Rica. 561 pp.
- Ramírez, G. 1988. Análisis dasométrico de una plantación de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. y *Pinus patula* Schl. et Cham. en el campo experimental forestal. (C. E. F.) San Juan Tetla, Pue. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. 121 pp.
- Riebeek H., 2011. The Carbon Cycle. Internet. Earth Observatory, NASA. USA. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/> . 10 de Marzo 2013.
- Rodríguez, L. 2013. Determinación del estado de la copa de *Abies religiosa* y su variación en el Parque Nacional Zoquiapan. Inédito.
- Rodríguez, R. 2007. Capacidad de almacenamiento de carbono en tres ecosistemas de La Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. 110 pp.
- Rodríguez, R.; J. Jiménez; O. A. Aguirre; E. J. Treviño y R. Zárate. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque e Pino-Encino en la reserva La Reserva El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* Vol. 5 (3): 317-327.



- Rodríguez W., D. Leihner. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. Volumen 7 de la Serie: Fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Primera Edición. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 37 pp.
- Rojas, F. 2004. Contenido y captura potencial de carbón en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche: Tlaxcala-Puebla. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 68 pp.
- Rojas, F. y L. Villers. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. Del Volcán La Malinche. *Madera y Bosques* 11(1):63-71.
- Rojas, F. 2008. Consideraciones para el balance de carbono: Evaluación del movimiento de biomasa en el Parque Nacional Malinche. Tesis de Maestría, Instituto de Geología, UNAM. México DF. 83 pp.
- Roman, V. 2012. Determinación del carbono en la biomasa de *Abies religiosa* del Parque Recreativo y Cultural Desierto de los Leones para evaluar su capacidad como sumidero de carbono. Tesis de licenciatura, UNAM. México, 64 pp.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ª Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 504 pp.
- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbón en bosques del tipo forestal siempreverde . En: Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18-20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. Resumen No. 45
- Shaver, G. R. & J. D. Aber. 1996. Carbon and nutrient allocation in terrestrial ecosystems. In: *Global change: effects on coniferous forests and grasslands*. John Wiley. New York, NY, USA. pp. 183-198.
- Smith, R. L. y T. M. Smith. 2004. Ecología. Ed. Pearson. 4º edición. Madrid. 642 pp.
- Torres J. M. y S. A. Guevara. 2005. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta ecológica* (63): 40-59.



- Tritton, L. and J. Hornbeck. 1982. Biomass equations major trees species of the Northeast  
Bromall P.A. Northeast. For. Exp. Stn. USDA Service Gen. Tech. Rep. NE. 69-96pp.
- Van Lear, D. H.; J. B. Waide & M. J. Teuke. 1984. Biomass an nutrient content of a 41-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation on a poor site in South Carolina. Forest Science. 30(2):395-404.
- Vann, D. R.; P. A. Palmiotto & R. G. Strimbeck. 1998. Allometric equation for two South American conifers: Test of a non-destructive method. Forest Ecology and Management (106):55-71.
- Vidal, A.; J. Y. Benítez; J. Rodríguez; R. Carlos y H. Gra. 2003. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribea* var. *caribea* en la E.F.I. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. Quebracho (11):60-66.
- Vigil, N. 2010. Estimación de biomasa contenido de carbon en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. en el campo forestal experimental “Las Cruces”, Texcoco, México. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. 71 pp.
- Watzlawick, L. F.; C. R. Sanquetta; A. Aparecida de Mello y J. Eduardo. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea en plantaciones de *Aucaria angustifolia* en el sur del Estado de Paraná, Brasil. En: Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18-20 de Octubre del 2001. Valdivia, Chile. Resumen No. 41.
- Whittaker, R.; S. A. Levin and R. B. Root. 1973. Niche, Habitat and Ecotope. The American Naturalist. Vol. 107(955):321-338.
- Yarie, J. & S. Billings. 2002. Carbon Balance Of The Taiga Forest Within Alaska: Present And Future. Can. J. Forest Research. 32: 757-767.
- Zamora, J. C. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido “La Majada” municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan Michoacán. 59 pp.



- 
- Zapata, M., J. Del Valle y S. Orrego. 2001. Corrección por sesgos en modelos Log-normales alométricos linealizados utilizados para la estimación de la biomasa aérea. Simposio Internacional Medición y monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18-20 de Octubre, Valdivia, Chile.
- Zavala, F. 1995. Encinos Hidalguenses. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 133 pp.
- Zar, J.H. 1968. Calculation and miscalculation of the allometric equation as a model in biological data. *BioScience* 18(12):1118-1120.
- Zianis, D. & M. Mencuccini. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* (187):311-332.



## **Anexo 1. DendroFlexómetro© Medición de altura (escala 1/10).**

El DendroFlexómetro© es un instrumento que sirve para medir las principales variables dimensionales de un árbol y de una masa forestal. Sus principales ventajas se basan en que combina en un único instrumento (un flexómetro convencional) distintas técnicas clásicas de medición forestal (muestreo angular, stick de Biltmore, regla de Christen, etc.), posibilita que las mediciones la pueda realizar un único operario y es económico (el precio de una cinta métrica autoenrollable).

Este instrumento ha sido desarrollado por Reque y Fernández-Manso (2003) siguiendo el ideario de desarrollar un dendrómetro económico de libre utilización y construcción por parte del usuario que permite la realización de medidas forestales con un nivel de precisión suficiente para satisfacer las necesidades mínimas del silvicultor. La explotación comercial del DendroFlexómetro© está protegida por patente de la Universidad de Valladolid (número P- 200100767). Toda la documentación asociada al instrumento, así como las plantillas para poderlo construir libremente a partir de un flexómetro convencional, se encuentra en la página web de Cesefor (<http://www.cesefor.com/dendroflexometro>).

Medición de la altura (escala 1/10)

1. Seleccione el árbol a medir.
2. Aléjese del árbol. Sitúe la regla delante de la vista y paralela al eje del árbol.



3. Ajustar el árbol dentro de los límites de la regla
4. Replantar sobre el tronco la marca de 1/10 lanzando una visual sobre el árbol (en esta fase será muy útil el apoyo de un segundo operario).
5. Medir sobre el tronco el segmento replanteado. Este segmento será exactamente un décimo de la altura total.
6. Multiplique por 10 este valor y tendrá la altura total. Por ejemplo, si se ha medido sobre el árbol 0,95 m, su altura total es 9,5 m.

