

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



**DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA RODALES  
NATURALES DEL EJIDO EL LARGO, CHIHUAHUA.**

**ANA SOCORRO ESCOBEDO SOTO**

**T E S I S**

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**LINARES, NUEVO LEÓN**

**SEPTIEMBRE 2014**

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

**DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA RODALES  
NATURALES DEL EJIDO EL LARGO, CHIHUAHUA.**

**T E S I S**

**Para obtener el grado de:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**Presentada por:**

**ING. ANA SOCORRO ESCOBEDO SOTO**

**COMITÉ DE TESIS**



---

**Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón**  
**DIRECTOR**



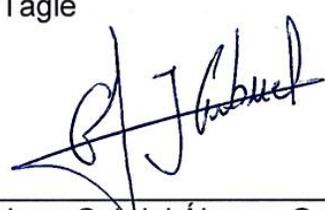
---

**Dr. Marco Aurelio González Tagle**  
**ASESOR**



---

**Dr. Eduardo Alanís Rodríguez**  
**ASESOR**



---

**Dr. Juan Gabriel Álvarez González**  
**ASESOR EXTERNO**

Espero que este trabajo de tesis sirva como consulta para otros investigadores interesados en el tema del manejo de la densidad de los bosques y de mejorar la productividad de los mismos.

Agradezco al Ejido El Largo Chihuahua y en particular al Ing. Santos Gregorio Rodríguez, por la confianza brinda al proporcionar la base de datos y la información necesaria para realizar este trabajo de Tesis.

*“Dedico este trabajo a mi hija Anna Florentina, quien es el combustible de mi vida con cada sonrisa, mirada tierna y suaves palabras que me da.*

*Quien me ínsita a ser mejor, personal y profesionalmente, cada vez que me cuestiona.*

*Y a quien espero que esta tesis, sirva como ejemplo de tenacidad en el futuro.”*

## DEDICATORIA

A mis padres Florentino Escobedo y Socorruto Soto, a mis hermanos Lety, Rosy y Martin<sup>†</sup>, a mi tío Fedito<sup>†</sup> y a mi nana Domis<sup>†</sup>, quienes a lo largo de mi vida me han apoyado y amado incondicionalmente, me han enseñado que la grandeza de un hombre no se mide por sus posesiones, títulos o logros obtenidos sino por sus valores. Me han inculcado el ser humilde, honrada, responsable y justa, más con su ejemplo que con sus consejos.

A mi esposo Miguel González, a nuestra hija Anna Florentina y a nuestros canes Samantha y Rufo, quienes son mi pequeña, adora y singular familia, que día a día me nutren de amor y nuevas experiencias, que me han enseñado el sentido de la vida y que son mis compañeros de viaje en este tren.

Este trabajo de tesis, que es la culminación de más de dos años de esfuerzo, de aprendizaje y de en ocasiones de ir contra reloj, se lo dedico especialmente a mi esposo y a mi madre, ya que sin su apoyo, paciencia y colaboración no lo hubiera podido llevar a cabo. Amor te agradezco todas las veces que aun cuando no me lo dices, antepones mi bienestar al tuyo propio. Madre gracias por siempre apoyarme y confiar en mí.

## AGRADECIMIENTOS

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de grado de maestría.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por aceptarme como estudiante de su programa de posgrado, al personal de la misma por sus excelentes atenciones, facilidades otorgadas y trato fraternal.

A la plantilla de profesores de la FCF, gracias por los conocimientos transmitidos y por su amable trato.

A mi querido director de tesis el Dr. Oscar Aguirre, por su apoyo profesional, académico y moral, pero sobre todo por la confianza que me ha tenido.

Al Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Santiago de Compostela, campus Lugo, España, por haberme aceptado como estudiante de intercambio durante mi estancia de Investigación.

Al grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la EPS de la USC, en particular a Ulises Diéguez, Manuel Arias, Alberto Rojo, Almudena, Juan Daniel, Ivonne, Vasco y Sacra Corral, por hacerme sentir parte del equipo, por compartir sus conocimientos, por el trato tan cálido, la amistad y por haber nutrido esta estancia de una riqueza inigualable.

A mi asesor externo el Dr. Juan Gabriel Álvarez, gracias por el interés prestado a mi trabajo de tesis, además por ilustrarme con su experiencia y conocimiento, en particular por su sincera preocupación por mi entendimiento del tema.

A mis padres Florentino y Socorrito, a mi esposo Miguel, a nuestra hija Anna y a mi tío Fedito<sup>†</sup> por su apoyo incondicional para la realización de esta tesis y por ser mi fuente de inspiración personal.

A mis compañeros de cursos de la maestría, por las agradables pláticas y aportaciones.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES DEL MANEJO DEL BOSQUE EN EL EJIDO EL LARGO Y ANEXOS. ....	2
1.2 MARCO DE REFERENCIA .....	3
1.3 HIPÓTESIS GENERAL .....	8
1.4 OBJETIVOS.....	8
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	9
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS.....	10
2.2.1 <i>Estimaciones por árbol</i> .....	11
2.2.2 <i>Parámetros dasométricos</i> .....	12
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>15</b>
3.1 ELABORACIÓN DE UN DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA RODALES NATURALES DEL EJIDO EL LARGO, CHIHUAHUA. ....	15
3.1.1 <i>Ecuaciones de ajuste del modelo</i> .....	15
3.1.2 <i>Construcción del diagrama de manejo de densidad</i> .....	16
3.2 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE SUPERIOR DE DENSIDAD.....	17
3.2.1 <i>Descripción de los datos</i> .....	17
3.2.2 <i>Índice de Densidad de Rodales de Reineke (IDRR)</i> .....	17
3.2.3 <i>Ajuste de la ecuación</i> .....	18
3.2.4 <i>Incorporación de la línea de máxima densidad al DMD</i> .....	18
3.3 USO DEL DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD EN RODALES NATURALES .....	19
3.3.1 <i>Estimación del crecimiento y la producción</i> .....	19
3.3.2 <i>Planteamiento del esquema de cortas</i> .....	20
3.4 ELABORACIÓN DE UNA TABLA NUMÉRICA PARA EL ESQUEMA DE CORTAS .....	21
3.5 ESTIMACIÓN DEL ESPACIAMIENTO RELATIVO .....	22
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>24</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DE AJUSTE Y DE RODAL .....	24

4.2	PARÁMETROS Y ECUACIONES DE AJUSTE DEL MODELO.....	25
4.3	DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD.....	27
4.4	DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES DASOMÉTRICAS DE LOS SITIOS DE MÁXIMA DENSIDAD.....	28
4.5	AJUSTE DEL MODELO DE REINEKE (1933) .....	29
4.6	LÍMITE SUPERIOR DE DENSIDAD EN EL DMD.....	30
4.7	FRECUENCIA DE LAS CORTAS .....	32
4.8	ESQUEMA DE CORTAS EN BASE AL LÍMITE SUPERIOR DE DENSIDAD DE REINEKE .....	33
4.9	TABLA NUMÉRICA ESPECÍFICA PARA EL ESQUEMA DE CLARAS.....	35
4.10	TABLA DE ESPACIAMIENTO RELATIVO EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE HART-BECKING Y REINEKE .....	37
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>38</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>42</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización área de estudio. ....	10
Figura 3.1. Ejemplo de estimación del crecimiento y la producción. ....	20
Figura 3.2. Gráfico de dispersión de los sitios de máxima densidad. ....	17
Figura 4.1. Gráfico de dispersión de los datos. ....	24
Figura 4.2. Gráfico de valores observados y predichos de la variable diámetro medio cuadrático $dg$ en centímetros, donde la línea discontinua corresponde al modelo y la continua a la recta 1:1. ....	27
Figura 4.3. Gráfico de valores observados y predichos de la variable volumen $V$ en $m^3$ /ha, donde la línea discontinua corresponde al modelo y la continua a la recta 1:1 ....	27
Figura 4.4. Diagrama de manejo de densidad (DMD) Ejido El Largo. ....	28
Figura 4.5. Ajuste del modelo de Reineke (1933). Línea de color rojo: densidad máxima (ecuación) . ....	30
Figura 4.6. Diagrama de manejo de densidad con límite máximo de densidad incorporado. ....	32
Figura 4.7. Estimación de la altura dominante y la edad, a partir del IS. ....	33
Figura 4.8. Esquema de cortas con referencia al límite de máxima densidad. ....	34

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Proporción de mezcla de géneros.....	10
Tabla 2.2. Proporción de mezcla de especies. ....	11
Tabla 3.1. Sitio de referencia para ejemplificación.....	20
Tabla 3.2. Forma de estimación de las variables dasométricas del rodal antes y después de la corta. ....	22
Tabla 4.1. Estadísticos descriptivos de las variables dasométricas. ....	25
Tabla 4.2. Parámetros de ajuste del modelo.....	25
Tabla 4.3. Estadísticos descriptivos de los sitios de máxima densidad.....	29
Tabla 4.4. Máxima de densidad del rodal .....	31
Tabla 4.5. Principales variables del rodal antes y después de las cortas.....	36
Tabla 4.6. Tabla de masa extraída. ....	36
Tabla 4.7. Espaciamiento relativo.....	37

## RESUMEN

El presente trabajo consistió en la elaboración de un diagrama de manejo de densidad (DMD), basado en el índice de Hart-Becking, para rodales naturales del Ejido El Largo, Chihuahua, con la intención de generar una herramienta gráfica de uso simple, rápida y de estimaciones precisas, que contribuya en la toma de decisiones silvícolas y que eficiente el manejo forestal de los bosques naturales. Para ello se utilizaron los datos provenientes de 181 sitios de muestreo, de los cuales se obtuvieron variables dasométricas de estado: número de árboles por hectárea  $N$ , altura dominante  $H_0$ , diámetro medio cuadrático  $dg$  y volumen  $V$ . El DMD se modelizó a partir de un sistema de dos ecuaciones, una que calcula el  $dg$  en función de la densidad y la altura dominante y la segunda que estima la productividad del rodal expresada como volumen por hectárea. El diagrama es bidimensional y representa tres grupos de isolíneas, las generadas para el índice de espaciamiento relativo, las del diámetro medio cuadrático y las del volumen. Se seleccionaron 34 sitios, cuya principal característica es máxima densidad, mismos que fueron utilizados para ajustar la ecuación del índice de densidad del rodal de Reineke (IDRR). Esta ecuación sirvió para establecer el límite superior de densidad, representada gráficamente en el diagrama de manejo de densidad. Este límite máximo es relacionado con el rango de oscilación del índice de Hart-Becking, lo que permite estimar el espaciamiento relativo que existe en rodales de máxima densidad. Como parte del contexto se ejemplifica el uso del diagrama de manejo de densidad, ya sea para conocer el estado de un rodal como para simular un plan de cortas, aunado a esto se crea una tabla numérica correspondiente a cada uno de los casos. Se sugiere la utilización del diagrama en rodales naturales, cuyo  $dg$  sea superior a 15 centímetros.

## ABSTRACT

This project involves the development of a density management diagram (DMD), based on the Hart-Becking index for natural stands of Ejido El Largo, Chihuahua. Data from 181 sites were used, and the main dasometric variables were obtained: number of trees by hectare  $N$ , dominant height  $H_o$ , quadratic mean diameter  $dg$  and volume  $V$ .

The DMD was developed, based on a system of two equations, the first one related the  $dg$  as a function of number of trees per hectare and dominant height and the second one related the productivity, expressed as the volume by hectare with number of stems per hectare, quadratic mean diameter and dominant height. The diagram is two-dimensional and shows three different groups of isolines: those generated to represent the relative spacing index, the quadratic mean and the stand volume.

Selected 34 sites of maximum density, which were used for adjusting the index equation Reineke stand density (IDRR). This equation was used to set upper limit of density, represented graphically in the density management diagram.

This limit is related to range of oscillation of Hart-Becking index, which allows estimating the relative spacing that exists in high density stands.

As part of the context of the diagram illustrates the use management density either to know the state of a stand as to simulate a cut plan, coupled to a corresponding number table that is created for each of the cases.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ejido El Largo y Anexos ubicado en el municipio de Madera, del estado de Chihuahua, México, es considerado el más grande del país por su superficie, tiene como principal actividad económica la forestal, ya que casi en su totalidad está cubierto de bosques de pino y encino. El volumen de madera que el ejido aporta a la economía regional y estatal, es alrededor del 25% del total del estado, (SmartWood & FCS, 2004). Los datos analizados corresponden a sitios permanentes de muestreo, restablecidos en el año 2006, cabe mencionar que estos sitios no están exentos de aprovechamiento.

En la determinación de la productividad de un rodal, uno de los factores más importantes además del índice de sitio, es la densidad; motivo por el cual es utilizada como una variable de decisión y control en las intervenciones silvícolas (Daniel *et al.*, 1982). El manejo de la densidad del rodal consiste en el control del espacio disponible para el crecimiento de los árboles a través de las cortas, con la finalidad de lograr diferentes objetivos de manejo. Sin embargo la determinación de los niveles adecuados de densidad para una masa forestal, es un proceso complejo que depende de factores biológicos, tecnológicos, económicos y operacionales (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Desde el punto de vista de producción maderable, el silvicultor busca aprovechar al máximo los recursos de una determinada calidad de estación. Un diagrama de manejo de densidad basado en el índice de Hart-Becking, proporciona un abanico de espesuras del rodal, en el cual se pueden establecer límites. El límite superior corresponde con la máxima densidad que es capaz de soportar el sitio, de modo que todos sus recursos sean aprovechados por el rodal aunque cada árbol sólo podría obtener lo imprescindible para sobrevivir. Cuando una masa supera este límite, se inicia el autoaclareo o mortalidad natural, lo que posibilita la existencia de recursos que permite el crecimiento de los árboles restantes (Barrio-Anta y Álvarez, 2005). Este límite se puede establecer utilizando la ecuación del índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR). Por su parte una menor densidad y mayor espaciamiento puede significar el desaprovechamiento del espacio y los recursos del sitio, por lo cual es necesario fijar un límite inferior de densidad.

Los diagramas de manejo de densidad son modelos estáticos de rodal en los que se representa gráficamente la relación entre producción y densidad para los distintos estados de desarrollo del rodal. Su utilidad radica en que permiten realizar de forma rápida y sencilla la comparación entre diferentes alternativas silvícolas (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).

## **1.1 Antecedentes del manejo del bosque en El Ejido El Largo y Anexos.**

Los antecedentes expuestos a continuación son los presentados en el resumen público de certificación del programa Smart Wood de la organización Rainforest Alliance, en colaboración con Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS), actualizado en el 2004. Su importancia radica en comprender la estructura actual del bosque.

El antecedente más antiguo de uso de los bosques del ejido El Largo inició desde 1882 con los aprovechamientos forestales realizados por parte de una compañía de ferrocarriles canadiense. En el periodo 1925-1938 los aprovechamientos forestales se realizaron por parte de la misma compañía y estuvieron limitados por la Revolución Mexicana. Durante el periodo 1939-1942 los aprovechamientos se realizaron utilizando un Estudio Forestal.

En el periodo 1942-1962 los aprovechamientos fueron realizados con base a estudios de incremento, consideraban al incremento corriente anual en volumen como factor de productividad maderable. De 1963-1975 los aprovechamientos forestales se realizaron utilizando la metodología del denominado Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM), el cual consistía en extraer selectivamente el arbolado sobremaduro y definir un diámetro mínimo de corta, con lo cual se provocaron estructuras irregulares en los bosques. De 1976-1987 se estableció la aplicación del Método de Desarrollo Silvícola (MDS), el cual conduce al bosque a la formación de masas regulares aplicando como método de tratamiento el de Árboles Padres. La regulación se hizo a través de superficie considerando la capacidad productiva del suelo (calidad de estación), con la alternativa de hacerlo por área-

volumen, el turno se definió considerando el turno técnico y el fisiológico, estimado en 70 años y el ciclo de corta de 10 años. A partir del año 1978 se definió un plan de cortas para la superficie total aprovechable del ejido, mediante el cual se pretendía aprovechar anualmente un volumen sensiblemente igual en una superficie similar.

En el año de 1987 se inició la elaboración del Estudio Dasonómico para manejar los bosques del "Ejido El Largo y Anexos", en el cual se propuso utilizar técnicas de manejo tradicionales como el Método de Desarrollo Silvícola y Método de Control, correspondiendo a las dos condiciones silvícolas que presentan estos bosques. Se realizó una separación de las áreas aprovechables consideradas como bosque irregular, de las que anteriormente se venían manejando como bosque regular. Este plan de cortas es el que actualmente se sigue utilizando.

## **1.2 Marco de referencia**

### **Productividad Forestal**

La productividad de las áreas forestales se define en gran parte por la calidad de estación, que se estima mediante la máxima cosecha de madera que un bosque produce en un tiempo determinado (Aguirre, 1996).

La productividad para una especie dada, para una estación concreta depende de su índice de sitio y esta se mantiene constante para un amplio rango de densidades. Se puede alcanzar un nivel máximo de volumen para un sitio dado; este volumen puede consistir en un número grande de árboles pequeños, en un número pequeño de árboles grandes o en varias combinaciones intermedias.

El crecimiento en diámetro es especialmente sensible a cambios en la densidad. Para una misma calidad de estación y edad de la masa, el diámetro es mayor en rodales con poca densidad y menor en altas densidades. Esto se ve reflejado significativamente en el volumen del bosque y su productividad, motivo por el cual el control de la densidad en el manejo de las masas forestales es un aspecto de importancia (Gadow, 2007).

Se sabe que las plantaciones densas producen biomasa en menor tiempo, si el objetivo prioritario de la masa es éste, la alternativa de mayor densidad es adecuada; sin embargo, biológicamente los árboles que crecen en masas menos densas tienen mayor crecimiento en diámetro, que los que crecen en masas densas, esto les permite alcanzar piezas comerciales antes, convirtiendo la masa económicamente rentable en menor tiempo. La rentabilidad de la masa es una determinación económica (no biológica) que depende básicamente del diámetro mínimo de los árboles y volumen comercial por hectárea requerido (Barrio-Anta y Álvarez, s.f).

### **Densidad**

La densidad de un rodal ha sido definida de varias maneras por ejemplo Curtis (1970), la definió como el número de individuos, área basal o volumen por unidad de superficie, Gingrich (1967) señaló que la densidad involucra el espaciamiento y la evaluación de la competencia, posteriormente Zepeda (1983) mencionó el factor tiempo, especificando la densidad como el grado de ocupación real, en un momento dado, de un área, sitio o lugar.

Prodan *et al.* (1997), menciona que bajo el término densidad se incluyen tres conceptos:

1. Cantidad de vegetación en crecimiento
2. Grado de ocupación del sitio (stocking), referente a la densidad presente con relación a una condición de referencia normal.
3. Grado de competencia entre los árboles, es decir la restricción impuesta por los vecinos al libre desarrollo.

La densidad es utilizada como una variable de decisión o de control en las intervenciones silvícolas, en los modelos de desarrollo y crecimiento, y es considerada como una variable predictora. Al utilizar la densidad como medida, ésta debe ser clara, consistente, objetiva y fácil de aplicar, conviene que tenga relación con el volumen, pero no con la edad de la masa ni con el sitio (Prodan *et al.*, 1997).

El segundo factor de importancia, después de la calidad del sitio, en la determinación de la productividad de un rodal es la densidad, en cambio es el principal factor que el silvicultor puede manejar durante el desarrollo de la masa (Daniel *et al.*, 1982).

## **Espaciamiento**

La significación de la densidad se manifiesta sobre el crecimiento del rodal y se basa en la postulación de que cuanto más amplio sea el espaciamiento del árbol, más rápido será su crecimiento. El espacio de crecimiento es el factor que controla la producción de los árboles. La competencia inicia cuando este espacio disponible en el rodal es igual al espacio que requieren todos los árboles para crecer sin dificultad, comparando éste con aquellos árboles que crecieron aislados (Gingrich, 1967).

El espaciamiento se induce en función del sitio, de la especie y sus requerimientos biológicos, así como del uso final que se le va a dar a la madera.

## **Índices de densidad**

La densidad se puede expresar en términos relativos o absolutos. En términos absolutos se encuentran los índices que involucran el número de árboles y el área basal por hectárea; un índice relativo, en cambio, podría ser el cociente del área basal actual y el área basal de un rodal considerado de densidad normal (Quiñones, 2000).

Existen algunos requisitos básicos que los índices deben cumplir (Corvalán & Hernández, 2006):

1. Que sea simple de utilizar, fácil de medir y ofrezca información práctica.
2. Que tenga el mismo significado para todos los usuarios y que represente bien el concepto de densidad que se pretende utilizar.
3. Debe ser independiente del sitio y la edad. La correlación que pueda existir entre estos factores puede anular la capacidad de predicción en términos de volumen.
4. Las variaciones en el índice se deben reflejar en la forma del crecimiento, es decir a partir de la densidad actual, el índice debería tener la capacidad de estimar la densidad futura.
5. Idealmente el índice debería ser aplicable a cualquier rodal, coetáneo o multietáneo, simple o mixto.

El índice de Hart-Becking, conocido también como índice de espaciamiento relativo o factor de espaciamiento, se define como la razón entre el espaciamiento medio de los árboles de una masa y su altura dominante, expresada en porcentaje. Este índice es útil para caracterizar la densidad de una masa por ser independiente de la calidad de estación y de la edad (excepto para rodales muy jóvenes). La altura dominante, incluida en su formulación, es el mejor índice para establecer los intervalos de claras para una determinada especie desde un punto de vista biológico (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).

Un índice de densidad de rodales, es considerado como un indicador del número de árboles por unidad de superficie que un rodal podría tener a un diámetro cuadrático de referencia. El más conocido es el propuesto por Reineke (1933), cuyo objetivo fue medir la espesura de una masa forestal, estableciendo un índice “basado en la relación entre el número de árboles por acre y su diámetro promedio, considerando las características de distribución de los árboles en masas coetáneas”. El índice de Reineke (*Stand density index*) es la base para la elaboración de diagramas de manejo de densidad de masa (*Stand density management diagrams*). Reineke postuló que el valor de la pendiente de la recta que relaciona el logaritmo de la densidad con el logaritmo del diámetro medio cuadrático era relativamente independiente de la especie y se situaba en el alrededor de -1.605. Estudios posteriores han comprobado que esta pendiente puede variar según la especie, aunque se admite el propuesto por Reineke como valor por defecto cuando se carece de información detallada.

### **Diagramas de manejo de densidad**

Los diagramas de manejo de densidad, son modelos estáticos de rodal en los que se representa gráficamente la relación entre producción y densidad para los distintos estados de desarrollo de la masa (Newton, 1997).

### **Límites de densidad**

La determinación de los niveles adecuados de densidad de una masa forestal es un proceso complejo que depende de diversos factores: biológicos, tecnológicos, económicos u operacionales, entre otros. Las alternativas de manejo de densidad, desde el punto de vista productivo, se deben basar en el máximo aprovechamiento de los recursos del sitio (Barrio-Anta & Álvarez). El máximo aprovechamiento de los recursos de un sitio no se limita a una densidad ( $N$ ) específica, sino que existen varias posibilidades, dentro de las cuales se debe escoger la que mejor convenga a los objetivos de manejo, sin embargo es importante fijar límites.

El límite superior corresponde a la máxima densidad capaz de soportar por sitio, de modo que todos los recursos son aprovechados por la masa, pero cada árbol solo obtiene lo imprescindible para sobrevivir, sin que exista mortalidad natural. Esta situación corresponde con la definición de bosque normal, donde se consigue la máxima producción de biomasa. En contraparte el límite inferior se establece cuando los recursos de la estación son utilizados por la masa de modo que cada uno de los árboles que la constituye asimila todo lo que su condición genética y edad le permite, es decir desarrolla su máxima capacidad de crecimiento, por debajo de esta densidad mínima los recursos de la estación no son aprovechados en su totalidad, por lo tanto se pierde capacidad productiva (Álvarez, 1999).

### **1.3 Hipótesis general**

La evolución de las principales variables dasométricas que definen el estado de una masa forestal en un determinado momento en el tiempo, pueden modelarse con un sistema de dos ecuaciones representables gráficamente mediante un diagrama de manejo de densidad, que permita la toma de decisiones silvícolas de forma rápida, sencilla y precisa.

### **1.4 Objetivos**

#### **General**

Crear una herramienta gráfica de uso sencillo, de estimaciones rápidas y precisas, que contribuya en la toma de decisiones silvícolas, haciendo eficiente el manejo forestal de los bosques naturales.

#### **Objetivos Específicos**

1. Elaborar un diagrama de manejo de densidad, basado en el índice de Hart-Becking, para aplicación en los rodales del Ejido El Largo Chihuahua.
2. Representar gráficamente el límite superior de densidad de una masa forestal, a través de la altura dominante, el diámetro medio cuadrático y el número de árboles por hectárea.
3. Utilizar el diagrama de manejo de densidad, basado en el índice de Hart-Becking, como una herramienta que permita conocer el estado del bosque y plantear esquemas de cortas en forma rápida y sencilla.
4. Generar en una tabla numérica, tipo tabla de producción, la información sugerida en el planteamiento de las cortas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del área de estudio

El Ejido El Largo y Anexos, se encuentra ubicado en el municipio de Madera, al norte del Estado de Chihuahua, en la Sierra Madre Occidental, entre los meridianos 108° 03´ y 108° 45´N de latitud y los paralelos 28° 45´ y 30° 01´ W de longitud y cuenta con una superficie de 261,960 hectáreas (Hernandez, 2012). El rango altitudinal va desde 1,400 msnm en la parte más baja, hasta 2,800 msnm en la elevación superior, observándose una altitud media de 2,200 a 2,400 msnm (FSC, 2005). La temperatura media máxima es de 10.4 °C y la mínima de 2.0 °C, cuenta con 152 días, en promedio, libres de heladas. El régimen de lluvias presenta una precipitación media anual de 813 mm, con una mínima extrema de 402 y una máxima extrema de 1441 mm. El promedio de días con lluvia en la zona es de 89.1, con precipitación media de 9.1 mm por día (Zepeda, 1998).

La vocación del uso del suelo es forestal; el bosque de esta región está compuesto por vegetación arbórea principalmente de las regiones de clima templado y semifrío con diferentes grados de humedad; por lo común los géneros presentes son: *Pinus*, *Quercus*, *Pseudotsuga* y *Juniperus*, entre otros (SEMARNAT, 2005).

El tipo de vegetación predominante en el ejido corresponde al bosque de coníferas, predominando el género *Pinus*, mezclado en ocasiones con otras especies de bajo valor comercial como encinos (*Quercus spp.*), táscate (*Juniperus spp.*) y madroño (*Arbutus spp.*). Las principales especies de pino son: *Pinus engelmannii*, *Pinus durangensis*, *Pinus arizonica*, *Pinus leiophylla*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus herrerae* (FSC, 2004).

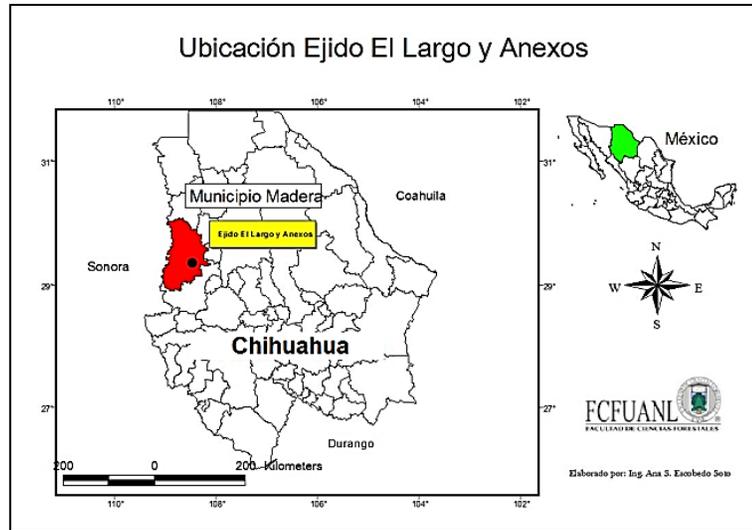


Figura 2.1. Localización área de estudio.

## 2.2 Descripción de los datos

Los datos considerados en el presente trabajo provienen del Proyecto de Inventario Forestal Continuo que realizó el ejido El Largo, los cuales fueron medidos en el año 2006. La base de datos corresponde a 181 sitios de muestreo que cumplen con una densidad mínima de 100 árboles por hectárea. Estos sitios corresponden a una masa mezclada de pino-encino (ver Tabla 2.1), sin embargo sólo se consideraron los datos de árboles del género *Pinus*. Las especies presentes en el área son *Pinus durangensis*, *Pinus arizonica*, *Pinus engelmannii*, *Pinus leiophylla*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus herrerae*, siguiendo de igual orden la representatividad en el sitio, tal como se muestra en la Tabla 2.2 .

Tabla 2.1. Proporción de mezcla de géneros.

Género	%N	%AB	%VT
<i>Pinus</i>	90.56	88.74	88.54
<i>Quercus</i>	8.20	9.95	10.29
Otras	1.24	1.31	1.17

Tabla 2.2. Proporción de mezcla de especies.

Especie	%N	%AB	%VT
<i>P. engelmannii</i>	12.63	16.37	17.76
<i>P. durangensis</i>	45.66	39.87	38.96
<i>P. arizonica</i>	35.78	37.91	37.63
<i>P. leiophylla</i>	3.32	3.97	4.06
<i>P. ayacahuite</i>	1.40	1.00	0.82
<i>P. herrerae</i>	1.22	0.90	0.77

Dónde: %N es la proporción de número de árboles según la especie, % AB es la proporción de área basal según la especie y %VT es la proporción del volumen total estimado por especie.

Las parcelas de muestreo son de forma circular, tienen una dimensión de 1000 m<sup>2</sup>; en ellas se consideró todo arbolado cuyo diámetro normal es igual o superior a 10 cm.

### 2.2.1 Estimaciones por árbol

A cada árbol se le estimó el área basal y volumen.

$$g_i = \frac{\pi}{4} (dn/100)^2 \quad [2-1]$$

$$VTA = 0.000074986 (dn^2h)^{0.956224} \quad [2-2]$$

Dónde:  $g_i$ , es el área basal (m<sup>2</sup>) de un árbol dado ( $i$ );  $dn$ , el diámetro (cm) con corteza a 1.3 m de altura;  $h$ , altura total de un árbol dado;  $VTA$ , volumen total con corteza de un determinado árbol (m<sup>3</sup>).

### 2.2.2 Parámetros dasométricos

Para cada parcela se calcularon las siguientes variables dasométricas: número de árboles por hectárea (N), diámetro medio (DN) y altura media (H), diámetro medio cuadrático ( $d_g$ ), altura dominante ( $H_o$ ), área basal (G), volumen total (VT) e índice de Hart-Becking (IH).

*Número de árboles*

$$N = \sum n \cdot 10 \quad [2-3]$$

Dónde:  $N$  es el número de árboles por hectárea y  $n$  corresponde a cada uno de los árboles del sitio de muestreo.

*Diámetro (DN) y Altura media (H)*

$$DN = \frac{\sum dn}{n} \quad H = \frac{\sum h}{n} \quad [2-4] \text{ y } [2-5]$$

Dónde:  $DN$  y  $H$  corresponden al promedio obtenido a partir de los diámetros normales ( $dn$ ) medidos por sitio y a las alturas totales ( $h$ ) estimadas por parcela de muestreo.

*Altura dominante ( $H_o$ )*

La altura dominante, se calculó como la altura media de los 100 árboles más gruesos por hectárea.

$$H_o = \frac{\sum H_{dmax}}{100} \quad [2-6]$$

### Área basal (G) y volumen (V)

El área basal o basimétrica (G) es la suma de las secciones transversales (*g*) del fuste a la altura del diámetro normal, de todos los árboles de la parcela de muestreo. El volumen (V) corresponde a la sumatoria del volumen total (VTA) por sitio. Para el caso las áreas basales y volúmenes son requeridos y comúnmente representados por hectárea por lo que se extrapolaron.

$$G = \sum gi \cdot 10 \qquad V = \sum VTA \cdot 10 \qquad [2-7] \text{ y } [2-8]$$

### Diámetro medio cuadrático (dg)

El diámetro medio cuadrático (*dg*) se obtiene a partir del área basimétrica (G) y del número de árboles por hectárea (N).

$$dg = \sqrt{\frac{40000}{\pi} \cdot \frac{G}{N}} \quad [2-9]$$

### Índice de Hart-Becking (IH)

El Índice de Hart-Becking es el cociente entre el espaciamiento promedio de los árboles de un rodal (*a*) y su altura dominante (*H<sub>o</sub>*).

$$IH = \frac{a}{H_o} 100 \quad [2-10]$$

El espaciamiento medio de la masa se calculó a partir de la densidad  $N$ . Un bosque natural tiene una distribución similar a tres bolillos, donde cada árbol ocupa un tercio de 6 triángulos equiláteros que le sean vecinos; por tanto el cálculo del espaciamiento para un bosque natural sería:

$$a = \frac{\sqrt{2000}}{\sqrt{(N \cdot \sqrt{3})}} = \frac{107.5}{\sqrt{N}}$$

[2-11]

$$a = \frac{(4/3)^{0.25}}{\sqrt{N}} = \frac{K}{\sqrt{N}}$$

Lo anterior genera la ecuación [2-12] que se utilizó para el cálculo del índice de espaciamiento para cada sitio, donde la constante  $K$  corresponde a  $(4/3)^{0.25}$ ,  $N$  al número de árboles por hectárea y  $H_0$  a la altura dominante.

$$IH(\%) = K \cdot \frac{100}{\sqrt{N \cdot H_0}} \quad [2-12]$$

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Elaboración de un diagrama de manejo de densidad para rodales naturales del ejido El Largo, chihuahua.

##### 3.1.1 Ecuaciones de ajuste del modelo

Para la construcción del diagrama de densidad y el ajuste de ecuaciones se utilizó el software estadístico R, versión 3.0.2. (R, 2013)

El DMD se construyó a partir de dos funciones base. La primera relaciona el diámetro medio cuadrático  $dg$  con el número de árboles por hectárea  $N$  y la altura dominante  $H_0$  del rodal.

$$dg = B_0 \cdot N^{B_1} \cdot H_0^{B_2} \quad [3-1]$$

La segunda de las funciones estima la productividad del rodal, expresada como el volumen por unidad de superficie, a partir del diámetro medio cuadrático  $dg$ , la altura dominante  $H_0$  y el número de árboles por hectárea  $N$ .

$$V = B_3 \cdot dg^{B_4} \cdot H_0^{B_5} \cdot N^{B_6} \quad [3-2]$$

Las ecuaciones [3-1] y [3-2] son linealizadas, cuyas expresiones son las ecuaciones [3-3] y [3-4]. Estas ecuaciones son ajustadas mediante regresión lineal, estimando parámetros que posteriormente se utilizan como valores de partida de los procesos iterativos del ajuste no lineal de las ecuaciones alométricas [3-1] y [3-2].

$$\ln dg = \ln B_0 + B_1 \cdot \ln N + B_2 \cdot \ln H_0 \quad [3-3]$$

$$\ln V = \ln B_3 + B_4 \cdot \ln dg + B_5 \cdot \ln H_0 + B_6 \cdot \ln N \quad [3-4]$$

Debido a que el diámetro medio cuadrático  $dg$  es una variable dependiente en la ecuación [3-1] y en la ecuación [3-2] es una variable independiente, es decir funciona

como variable instrumental, el ajuste no lineal de las ecuaciones [3-1] y [3-2] se realizó de forma simultánea mediante el proceso de mínimos cuadrados en dos pasos (2SLS), utilizando la librería “systemfit” del programa R (Henningsen, 2007).

### 3.1.2 Construcción del diagrama de manejo de densidad

El DMD se construyó a partir de dos ejes de coordenadas, en el eje de las abscisas se sitúa la altura dominante  $H_0$  y en el de las ordenadas el número de árboles por hectárea  $N$ , este último en escala logarítmica para facilitar el uso del diagrama.

Despejando la variable  $N$  de las ecuaciones [2-12], [3-1] y [3-2] se calculan las isolíneas que se superponen en el diagrama.

$$N = \left( K \cdot \frac{100 \cdot 100}{IH \cdot H_0} \right)^2 \quad [3-5]$$

$$N = \left( \frac{d_g}{B_0 \cdot H_0^{B_2}} \right)^{1/B_1} \quad [3-6]$$

$$N = \left( \frac{V}{B_3 \cdot B_0^{B_4} \cdot H_0^{(B_2 \cdot B_4 + B_5)}} \right)^{1/(B_1 \cdot B_4 + B_6)} \quad [3-7]$$

La ecuación [3-5], expresa el nivel de densidad del rodal mediante el índice de Hart-Becking  $IH$ . La isolínea se crea dando valores a la altura dominante para cada valor del índice que se va representar. La isolínea que representa el diámetro cuadrático  $d_g$ , se crea a partir de la ecuación [3-6] y el volumen se representa gracias a la ecuación [3-7], que se ha obtenido despejando la densidad en la ecuación [3-2] después de sustituir en ella el valor de  $d_g$  por el resultado de la ecuación [3-1].

## 3.2 Determinación del límite superior de densidad

### 3.2.1 Descripción de los datos

Para determinar del límite superior de densidad del diagrama de manejo, fueron seleccionados 34 sitios de los 181 utilizados en la elaboración del DMD (Anexo 1). La información dasométrica de los sitios se encuentra en el Anexo 2. Estos sitios cumplen con la característica de ser los valores de máxima densidad ( $N$ ) para cada diámetro medio cuadrático ( $dg$ ). En la Figura 32 se observa la distribución de los valores del diámetro medio cuadrático de los sitios de máxima densidad, frente a los valores de altura dominante y se puede apreciar una cierta correlación positiva.

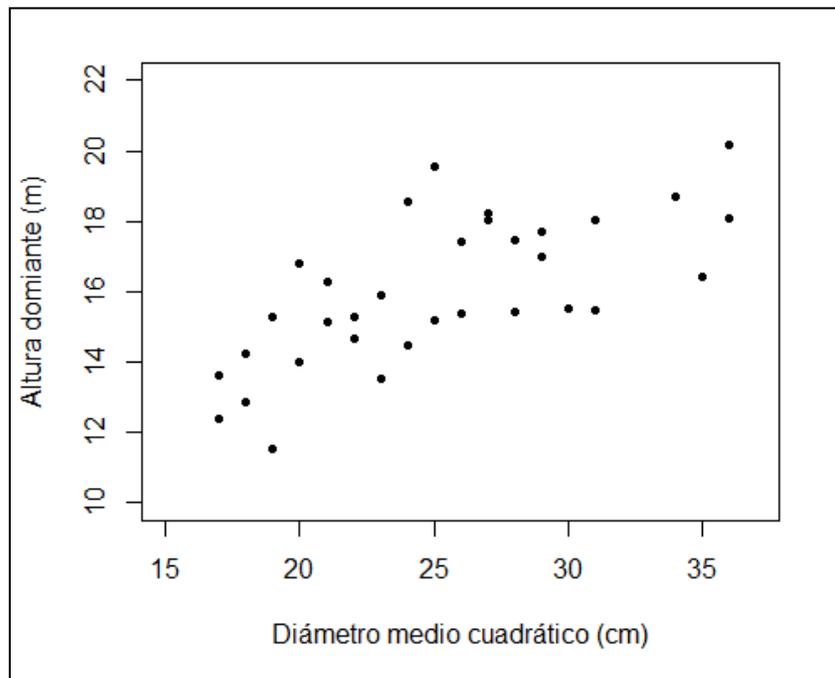


Figura 3.2 Gráfico de dispersión de los sitios de máxima densidad.

### 3.2.2 Índice de Densidad de Rodales de Reineke (IDRR)

La ecuación utilizada por Reineke (1933) para la obtención del índice de densidad de rodales, es la base en este trabajo para definir la línea de referencia, que representa

el comportamiento de la máxima densidad del rodal, cuya relación funcional se expresa por la ecuación [3-8] y su forma linealizada en la ecuación [3-9].

$$N = a_1 \cdot dg^{a_2} \quad [3-8]$$

$$\ln N = \ln a_1 + a_2 \cdot \ln dg \quad [3-9]$$

Dónde:  $N$  es el número de árboles por hectárea,  $dg$  diámetro medio cuadrático,  $\ln$  logaritmo natural;  $a_1$ (intercepto al origen) y  $a_2$ (pendiente de la curva de referencia) son los parámetros.

### 3.2.3 Ajuste de la ecuación

Las ecuaciones [3-8] y [3-9], fueron ajustadas mediante mínimos cuadrados, utilizando el programa estadístico R (R, 2013). Para lo que se realizó en primer término el ajuste por regresión lineal de la ecuación [3-9], estimando parámetros que posteriormente fueron utilizados como valores de partida en el proceso iterativo del ajuste no lineal de la ecuación [3-8].

### 3.2.4 Incorporación de la línea de máxima densidad al DMD

Debido a que el DMD se construyó a partir de dos ejes de coordenadas que corresponden con la altura dominante  $H_o$  (eje X) y el número de árboles por hectárea  $N$  (eje Y), es necesario sustituir en la ecuación [3-8] el valor del diámetro medio cuadrático por la expresión de la ecuación [3-1], obteniendo de esta manera la ecuación [3-10]. Con esta última ecuación se genera la isolínea que representa el grado de densidad máximo ( $N$ ) que existe en un rodal, a partir de la altura dominante ( $H_o$ ) del mismo.

$$N = \left[ a_1 \cdot B1^{a_2} \cdot H_o^{B3 \cdot a_2} \right]^{1/(1-B2 \cdot a_2)} \quad [3-10]$$

### 3.3 Uso del diagrama de manejo de densidad en rodales naturales

#### 3.3.1 Estimación del crecimiento y la producción

La utilización del DMD en el sentido de estimar la producción de un rodal en un instante determinado es relativamente fácil. Para ello es necesario primero conocer el estado del rodal en ese instante, el cual debe estar definido por cualquier de las variables que se representan en el diagrama: número de árboles por hectárea, altura dominante, diámetro medio cuadrático y volumen, o en su caso la combinación de dos o tres de ellas, exceptuando tal vez el volumen, ya que es la variable que se pretende estimar. Después de tener las variables que definen el estado del rodal, como si fuera un sistema de coordenadas múltiple, éstas se ubican en forma de punto, permitiendo así seguir las isolíneas representadas en el diagrama y leer en los ejes los valores correspondientes al punto.

A continuación se ejemplifica en la Figura 3.1, tomando como referencia uno de los sitios de muestreo utilizados en este trabajo (ver Tabla 3.1), el cual corresponde a un rodal, cuya altura dominante  $H_0$  es de 16 metros y diámetro medio cuadrático  $d_g$  de 25 cm. Se fija esta información en el DMD (punto verde), a partir del cual se puede leer directamente las estimaciones de número de árboles por hectárea ( $N$ ), volumen ( $V$ ) e índice de Hart ( $IH$ ).

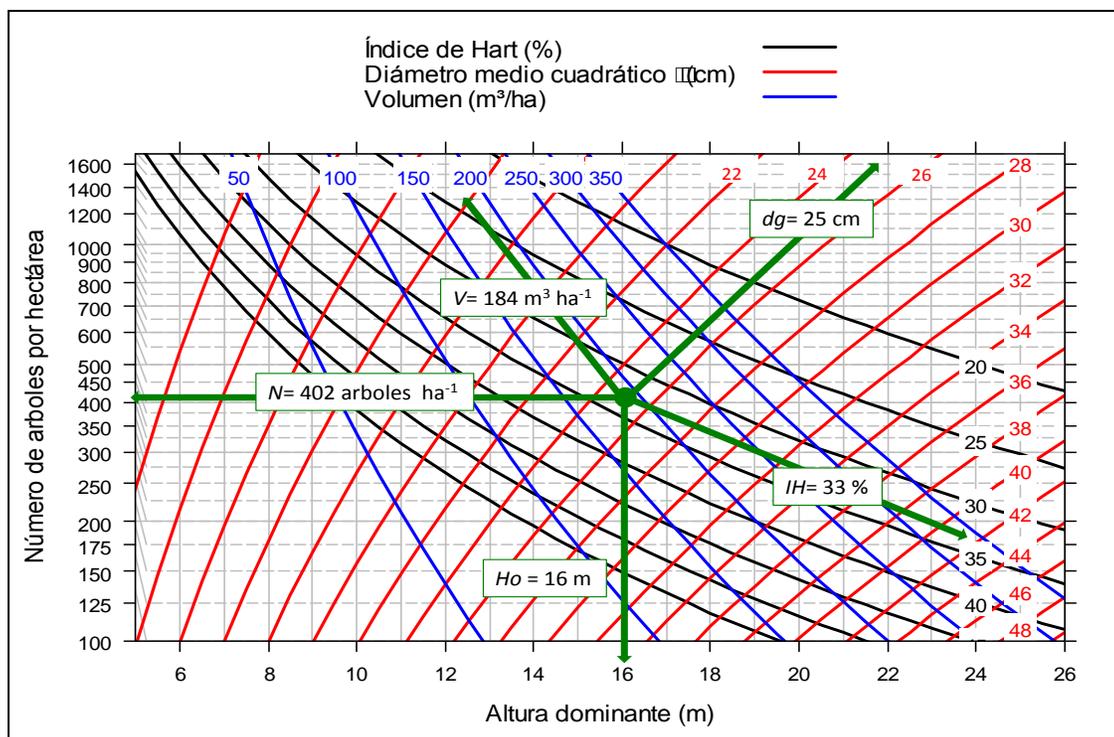


Figura 3.1 Ejemplo de estimación del crecimiento y la producción.

Tabla 3.1. Sitio de referencia para ejemplificación.

SITIO REFERENCIA	N (árboles $ha^{-1}$ )	DN (cm)	H (m)	G ( $m^2$ $ha^{-1}$ )	V ( $m^3$ $ha^{-1}$ )	dg (cm)	Ho (m)
20	340	23	13	16.146	151.443	25	16

### 3.3.2 Planteamiento del esquema de cortas

Diéguez-Aranda *et al.* (2009), mencionan que existen dos factores importantes a considerar en la determinación de un esquema de cortas:

1. El estado al que se quiere llevar al rodal a la edad de corta
2. La definición de los límites superior e inferior de la densidad del rodal.

El estado al que se quiere llevar al final del turno puede ser establecido en términos de dos de las variables que figuran en el diagrama: número de árboles por hectárea, altura dominante, índice de espacio de crecimiento relativo ( $IH$ ), diámetro medio

cuadrático y volumen, y por supuesto orientado al producto final propuesto en los objetivos de manejo.

La definición del límite superior del DMD, se fundamenta en evitar que los bosques naturales crucen la línea del autoaclareo, lo que, de suceder, representaría pérdidas por mortalidad natural. Por su parte el límite inferior estará determinado en función de los objetivos del manejo de las especies presentes en el rodal tratando de mantener siempre ocupado el espacio de crecimiento, considerando un nivel por arriba del cierre de copas.

Para el planteamiento del esquema de cortas se fijó el límite superior de dos maneras: en la primera se utilizó la curva de máxima densidad, ajustada mediante el índice de Reineke (Figura 4.4) y en la segunda fijando un valor constante del índice de Hart-Becking propuesto en el DMD (Figura 4.2), en función de las variables de estado del rodal.

La frecuencia de las cortas se definió en base a la altura dominante, estimada en función del índice de sitio y la edad base, calculado para la especie dominante (*Pinus durangensis*). Sin embargo para definir la frecuencia de las cortas también se puede utilizar solo el crecimiento de la altura, en función de los productos que se pretenda obtener.

### **3.4 Elaboración de una tabla numérica para el esquema de cortas**

Después de realizar el planteamiento del esquema de cortas, utilizando el índice de sitio del rodal, se generó un cuadro numérico, tipo una tabla de producción, donde se especifican los valores de las variables dasométrica antes y después de corta, así como la masa extraída.

El cálculo de las principales variables dasométricas se realizó utilizando las ecuaciones parametrizadas anteriormente mencionadas (Tabla 3.2.).

**Tabla 3.2. Forma de estimación de las variables dasométricas del rodal antes y después de la corta.**

VARIABLE DASOMÉTRICA	FORMA DE ESTIMACIÓN
<b>Ho</b>	$H_o = 120.095[IS/120.095]^{(Eb/E) \cdot 0.3257}$
<b>N (antes)</b>	$N = [7601.94 \cdot H_o^{-1.9963}]^{1.8313}$
<b>Dg (antes y después)</b>	$dg = 7.28 \cdot N^{-0.1991} \cdot H_o^{0.8756}$
<b>V (antes y después)</b>	$V = 0.000179 \cdot dg^{1.7728} \cdot H_o^{1.0217} \cdot N^{0.8851}$
<b>G (antes y después)</b>	$G = \frac{\pi}{4} (dg/100)^2$
<b>IH (antes y después)</b>	$IH(\%) = \left[ (4/3)^{0.25} \cdot \frac{100}{\sqrt{N \cdot H_o}} \right] 100$

En el cálculo de la masa extraída, el número de árboles por hectárea  $N_e$ , área basimétrica  $G_e$  y volumen  $V_e$  corresponden a la resta entre el antes y el después de cada una de las respectivas variables.

El diámetro medio cuadrático extraído  $dge$ , es obtenido directamente a través de su ecuación, utilizando los valores  $N_e$  y  $G_e$ .

El volumen acumulado  $V_{acum}$ , corresponde a la suma continua del volumen extraído  $V_e$ ; el volumen total  $V_{tot}$  a la suma del volumen después de corta y el volumen acumulado  $V_{acum}$ .

El crecimiento medio  $CM$  es el cociente del volumen total  $V_{tot}$  y la edad al momento del cálculo, por su parte el crecimiento corriente  $CC$  representa el incremento en volumen correspondiente a cada ciclo de corta.

### 3.5 Estimación del espaciamiento relativo

Se utilizó la ecuación [2-12] para conocer el índice de Hart-Becking, ésta se infirió con los valores de la curva de máxima densidad, ajustada mediante la ecuación del Índice de Densidad de Rodales de Reineke (IDRR), lo que sugiere un rango del índice de espaciamiento relativo, tal como se observa en la Figura 4.4; permitiendo

calcular el espaciamiento ( $a$ ) en metros y el número de árboles por hectárea ( $N$ ), que un rodal de determinada altura dominante ( $H_0$ ) debiese tener en un estado de máxima densidad.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Descripción de las variables de ajuste y de rodal

La Figura 4.1, muestra la distribución de los datos, a partir de la estimación de la altura dominante  $H_0$  y el diámetro medio cuadrático  $dg$ , en ella se aprecian los rangos de distribución para cada variable. De esta forma los modelos presentan datos de ajuste en  $dg$  que van de 15 a 37 centímetros y en altura dominante de 7 a 20 metros, como se presenta en la Tabla 4.1.

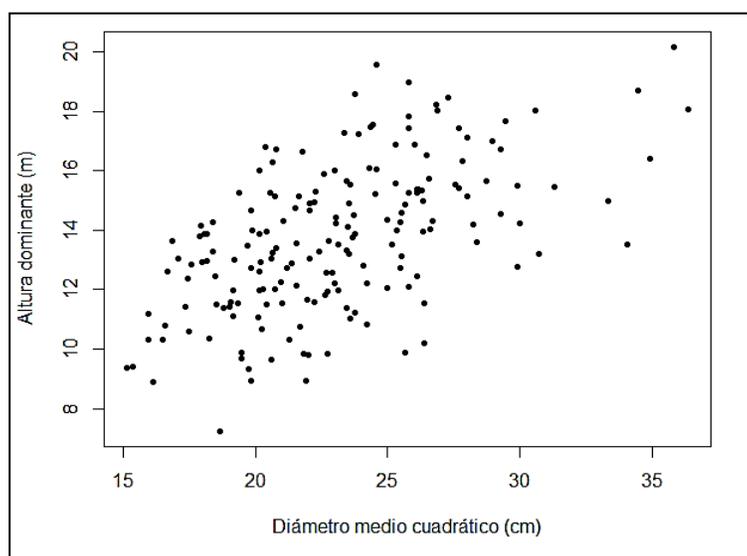


Figura 4.1. Gráfico de dispersión de los datos.

La Tabla 4.1, permite conocer los valores máximos, mínimos y medios de las variables de ajuste  $dg$ ,  $H_0$ ,  $N$  y  $V$  además de comparar  $dg$  y  $H_0$  con las variables promedio  $DN$  y  $H$  de la muestra. También incluye los valores respectivos al índice de Hart ( $IH$ ), calculados para cada uno de los sitios de muestreo.

**Tabla 4.1. Estadísticos descriptivos de las variables dasométricas.**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Desv. estándar</b>
<b>N</b> ( <i>árbol ha<sup>-1</sup></i> )	371.49	1060.00	100.00	202.05
<b>dg</b> ( <i>cm</i> )	23.06	36.39	15.13	4.15
<b>Ho</b> ( <i>m</i> )	13.74	20.15	7.25	2.47
<b>G</b> ( <i>m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup></i> )	14.25	28.53	3.33	5.88
<b>V</b> ( <i>m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup></i> )	122.21	254.38	24.99	56.79
<b>DN</b> ( <i>cm</i> )	21.77	33.98	14.98	3.78
<b>H</b> ( <i>m</i> )	11.46	17.30	7.44	1.98
<b>IH</b> (%)	47.35	111.24	23.67	17.94

## 4.2 Parámetros y ecuaciones de ajuste del modelo

El diagrama de manejo de densidad se construyó a partir de dos funciones, como ya se ha mencionado antes, una que predice el diámetro medio cuadrático *dg* y otra que estima el volumen *V* por unidad de superficie. El método de ajuste de las ecuaciones fue simultáneo por mínimos cuadrados en dos etapas.

En la Tabla 4.2, se muestran las estimaciones de los parámetros y los errores estándar aproximados para cada uno de ellos. Todos los parámetros resultaron ser altamente significativos, por lo que no se puede prescindir de ninguno.

**Tabla 4.2. Parámetros de ajuste del modelo.**

<b>Parámetro</b>	<b>Estimación</b>	<b>Std.Error</b>	<b>t value</b>	<b>Pr(&gt;  t )</b>
<b>b0</b>	7.2829	0.8431	8.63	***
<b>b1</b>	-0.1991	0.0130	-15.32	***
<b>b2</b>	0.8756	0.0367	23.84	***
<b>b3</b>	0.0002	0.0000	5.42	***
<b>b4</b>	1.7728	0.0578	30.65	***
<b>b5</b>	1.0217	0.0443	23.04	***
<b>b6</b>	0.8851	0.0144	61.35	***

Código de significancia: 0 \*\*\*; 0.001 \*\*; 0.01 \*; 0.05

El sistema de funciones [3-1] y [3-2], se expresa parametrizado en las ecuaciones [4-1] y [4-2], acompañado por sus respectivos estadísticos de bondad de ajuste.

$$dg = 7.28 \cdot N^{-0.1991} \cdot Ho^{0.8756} \quad [4-1]$$

$$R^2= 0.7259 \quad REMC=2.19 \text{ cm}$$

[4-2]

$$V = 0.000179 \cdot dg^{1.7728} \cdot Ho^{1.0217} \cdot N^{0.8851}$$

$$R^2=0.9859 \quad REMC=6.77 \text{ m}^3/\text{ha}$$

En el ajuste de los modelos se utilizaron dos criterios estadísticos: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error medio cuadrático (REMC).  $R^2$  permite establecer el grado en que la variable dependiente se encuentra explicada por las variables independientes, al momento de predecirla en resultados futuros. En base a lo anterior la ecuación de volumen presentó un mejor ajuste a los datos que la del diámetro medio cuadrático, cuyos valores de  $R^2$  fueron 0.73 y 0.98, respectivamente. Por su parte el REMC se expresa en las mismas unidades que la variable dependiente, y es un estimador de la desviación típica del error del modelo.

En la Figura 4. se representan los pares de datos  $dg$  estimado -  $dg$  observado, sobrepuesta se encuentra la línea discontinua correspondiente a la regresión lineal de los predichos en función de los observados, asistida con la recta continua de la tendencia central. En base al comportamiento de la recta discontinua de la Figura 4., se observa como el modelo de la ecuación [4-1] , tiende a subestimar en  $dg$  inferiores a 18 cm y a sobreestimar cuando son superiores a 28 cm, haciendo referencia óptima al valor medio de  $dg$  23.

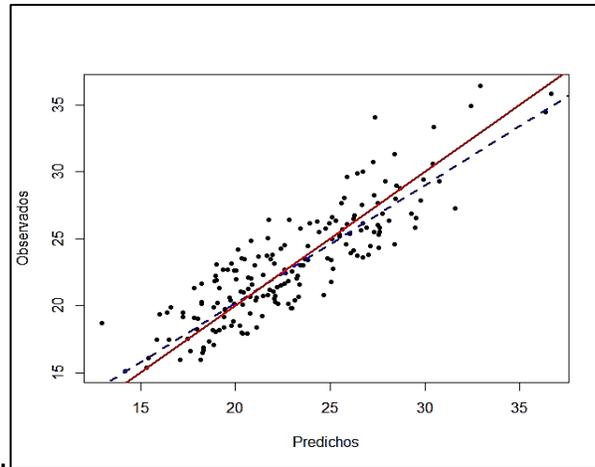


Figura 4.2. Gráfico de valores observados y predichos de la variable diámetro medio cuadrático  $d_g$  en centímetros, donde la línea discontinua corresponde al modelo y la continua a la recta 1:1.

La Figura 4., está representada de igual forma que la Figura 4., pero con los datos correspondientes a la ecuación [4-2], en la gráfica se observa como ambas rectas siguen un comportamiento similar, tal como sugiere el coeficiente de determinación  $R^2$ .

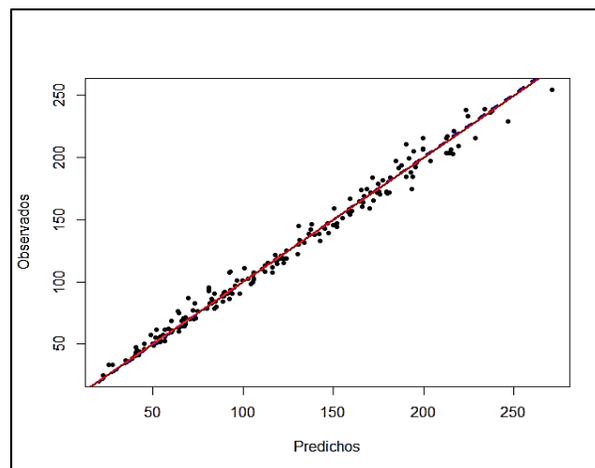


Figura 4.3. Gráfico de valores observados y predichos de la variable volumen  $V$  en  $m^3/ha$ , donde la línea discontinua corresponde al modelo y la continua a la recta 1:1

### 4.3 Diagrama de manejo de densidad

La Figura 4.2. corresponde a la representación gráfica bidimensional del DMD obtenido. En el eje de las abscisas se representa la altura dominante  $H_0$  y en el eje de las ordenadas la densidad del rodal expresada como número de árboles por

hectárea y en escala logarítmica. Sobre esta base se han añadido las tres categorías de isolíneas: del índice de espaciamiento relativo  $IH$ , del diámetro medio cuadrático  $dg$  y del volumen del rodal  $V$ , generadas a partir de las ecuaciones [3-5], [3-6] y [3-7].

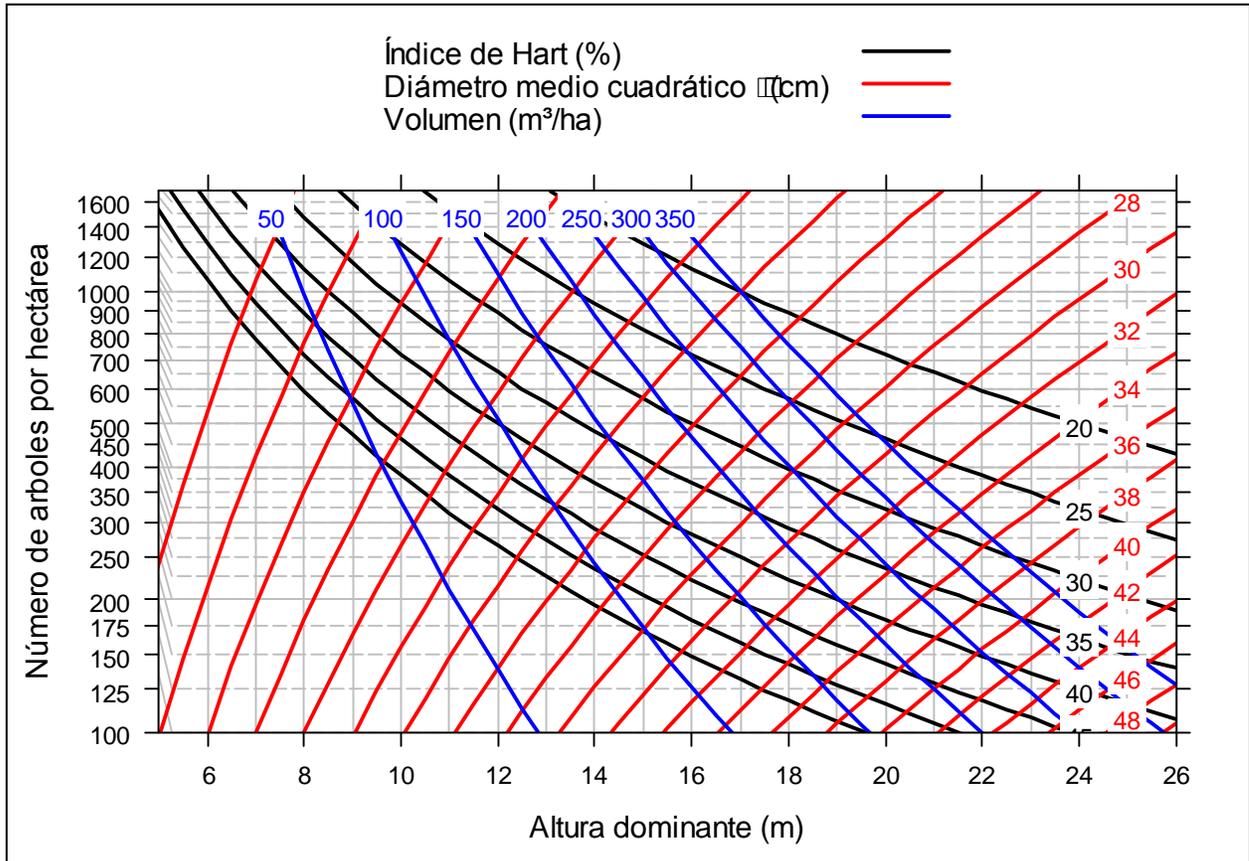


Figura 4.2. Diagrama de manejo de densidad (DMD) Ejido El Largo.

#### 4.4 Descripción de las variables dasométricas de los sitios de máxima densidad.

La Tabla 4.3. muestra los valores máximos, mínimos y medios de las variables dasométricas de los 34 sitios utilizados en el ajuste de la ecuación del IDRR. Dentro de los valores a destacar se encuentran los promedios del número de árboles por hectárea (509), diámetro medio cuadrático (25 cm), altura dominante (16 metros) e índice de Hart (34%). Los valores máximos y mínimos del  $dg$  y del  $H_o$  indican los límites dentro de los cuales se puede utilizar el modelo de Reineke estimado. (Figura 4.2.)

Tabla 4.3. Estadísticos descriptivos de los sitios de máxima densidad.

Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desv. Estandar
<b>N</b> ( <i>árboles ha<sup>-1</sup></i> )	509	1060	120	279.82
<b>dg</b> ( <i>cm</i> )	25.44	36.00	17.00	5.67
<b>Ho</b> ( <i>m</i> )	15.94	20.15	11.54	2.10
<b>G</b> ( <i>m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup></i> )	21.11	28.53	10.94	4.66
<b>V</b> ( <i>m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup></i> )	194.24	254.38	107.78	34.15
<b>DN</b> ( <i>cm</i> )	24.12	34.00	16.00	5.08
<b>H</b> ( <i>m</i> )	13.03	17.00	10.00	1.85
<b>IH</b> (%)	34.41	72.50	23.67	11.16

#### 4.5 Ajuste del modelo de Reineke (1933)

El modelo de Reineke ajustado con los datos de máxima densidad ( $N$ ) para un determinado diámetro medio cuadrático, generó la ecuación [4-3] lo que permitió obtener la línea de referencia promedio, que determina el límite superior de densidad.

$$N = 702400 \cdot dg^{-2.28} \quad [4-3]$$

$$R^2 = 0.93 \quad REMC = 71.22 \text{ árboles ha}^{-1}$$

Utilizando como criterios estadísticos de ajuste del modelo: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), se considera que esté ajusta apropiadamente. El  $R^2$  indica que el 93% de la variación en el número de árboles es atribuible al diámetro medio cuadrático promedio. Por otra parte el valor de REMC de 71 árboles por hectárea, considerándolo como medida de precisión, el cual es un estimador de la desviación típica del error del modelo, se puede considerar aceptable.

Para el diámetro cuadrático promedio de referencia de 25 cm, el índice de densidad de rodales de Reineke fue:

$$N = 702400 \cdot (25)^{-2.28}$$

$$N = 456$$

La ecuación ajustada del IDRR, se presenta gráficamente en la Figura 4.3, donde se muestra la curva de máxima densidad, obtenida por la ecuación [4-3]. Ésta describe la relación teórica de la trayectoria que debiera de seguir como máximo el número de árboles por hectárea, en comparación con los demás sitios, para cada  $dg$  correspondiente.

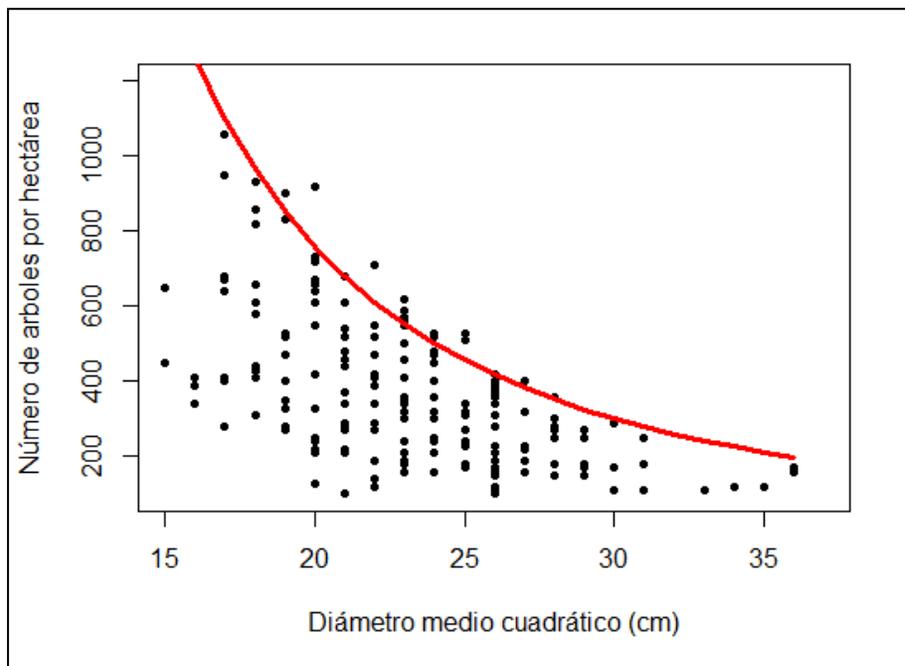


Figura 4.3 Ajuste del modelo de Reineke (1933). Línea de color rojo: densidad máxima (ecuación).

#### 4.6 Límite superior de densidad en el DMD

La ecuación [3-10], se expresa parametrizada en la ecuación [4-4], la cual permite estimar el número máximo de árboles por hectárea que un rodal natural bajo aprovechamiento forestal pudiera llegar a tener, para una determinada altura dominante.

$$N = [7601.94 \cdot H_0^{-1.9963}]^{1.8313} \quad [4-4]$$

La Tabla 4.4, muestre los valores estimados de máxima densidad ( $N$ ) de un rodal, a partir de la ecuación [4-4] al asignarle una altura dominante. Presenta también el índice de Hart ( $IH$ ) que toma el rodal según disminuye la densidad y aumenta la altura. Se calcula además el espaciamiento promedio del rodal ( $a$ ), el cual aumenta a medida que disminuye la densidad.

**Tabla 4.4 Máxima de densidad del rodal**

<b>H<sub>0</sub></b> (m)	<b>N</b> (árboles ha <sup>-1</sup> )	<b>IH</b> (%)	<b>a</b> (m)
8	6390	17	1.32
10	2826	20	1.99
12	1451	23	2.78
14	826	26	3.68
16	507	29	4.70
18	330	32	5.82
20	224	35	7.06
22	158	38	8.41
24	115	41	9.85

La información de la Tabla 4.4, se representa gráficamente en la Figura 4.4 mediante la isólinea de máxima densidad de color verde. A diferencia de la tabla, el DMD permite observar las intersecciones del límite de máxima densidad con el diámetro medio cuadrático y el volumen del rodal.

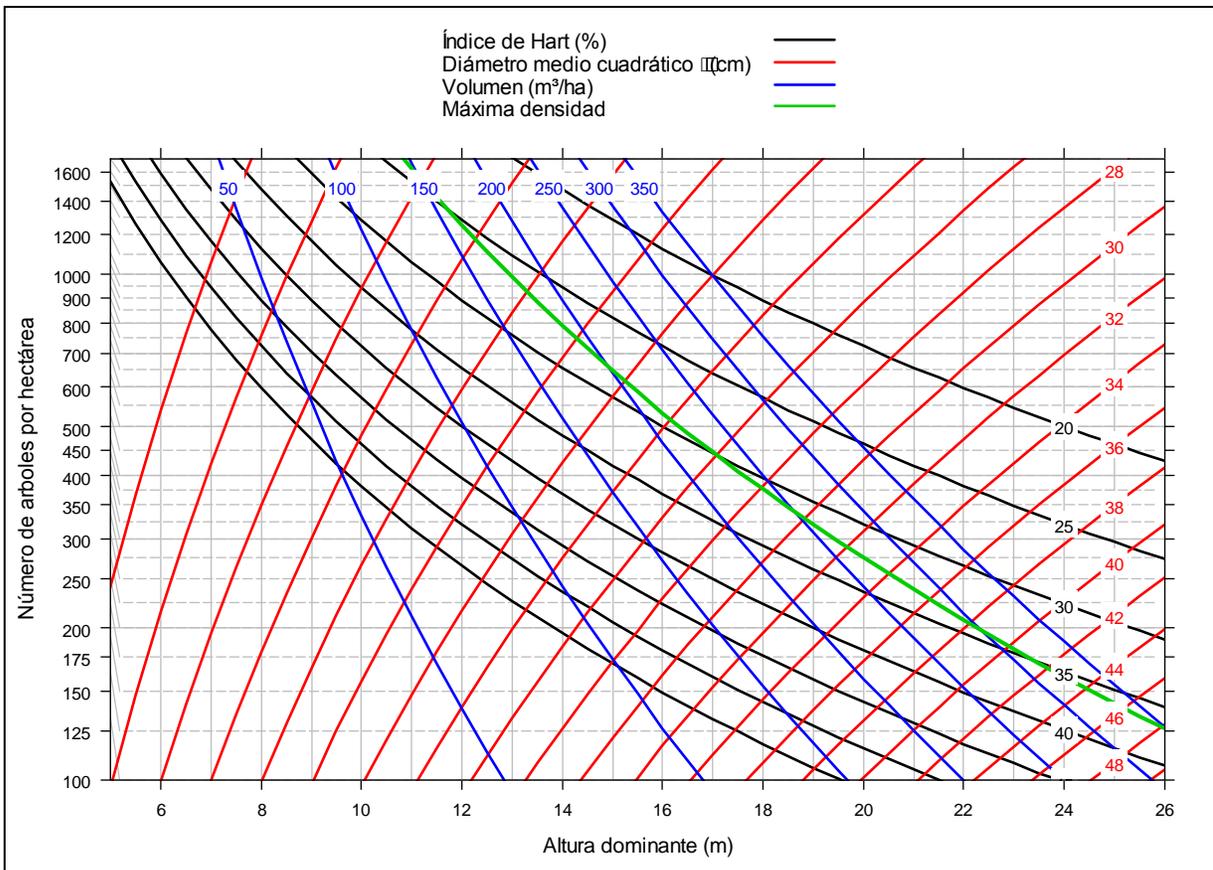


Figura 4.4 Diagrama de manejo de densidad con límite máximo de densidad incorporado.

## 4.7 Frecuencia de las cortas

El ejido definió el turno técnico en 70 años y un ciclo de corta de 10 años. En el diagrama de manejo no figura la variable tiempo. Para estimar la altura dominante a la que se pretende hacer la corta final se utiliza la ecuación [4-5] estimada para un determinado IS (Zepeda, 1990).

$$H_o = 120.095[IS/120.095]^{(Eb/E) \cdot 0.3257} \quad [4-5]$$

Dónde:  $H_o$  es la altura dominante a estimar,  $IS$  el índice de sitio,  $Eb$  la edad base,  $E$  la edad,  $120.095$  y  $0.3257$  son los parámetros estimados para *Pinus durangensis*.

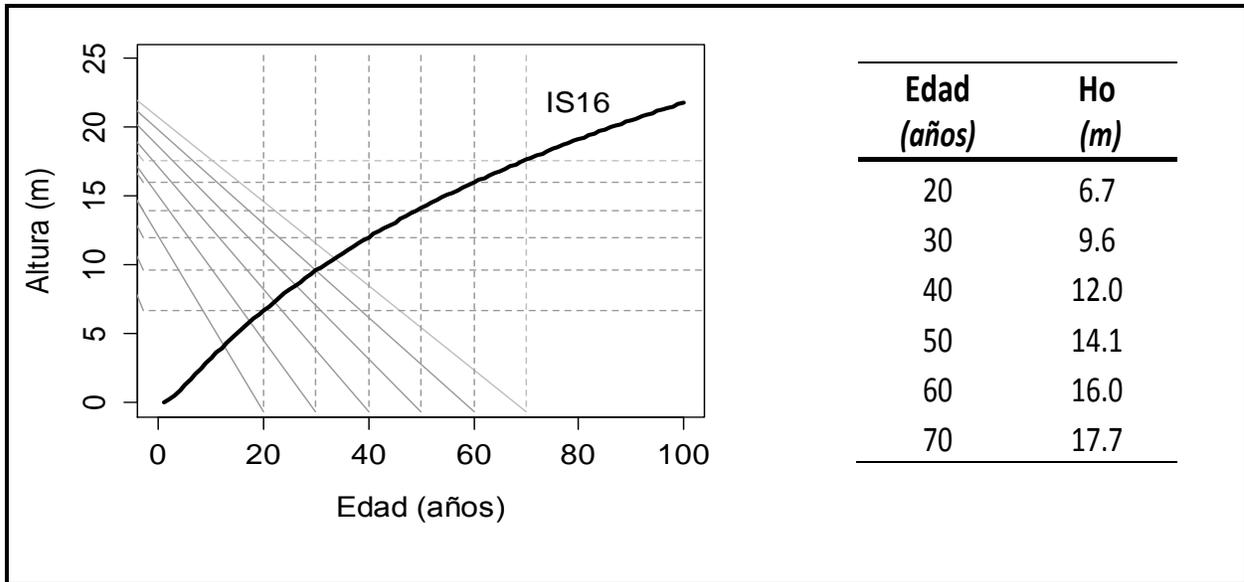


Figura 4.5. Estimación de la altura dominante y la edad, a partir del IS.

#### 4.8 Esquema de cortas en base al límite superior de densidad de Reineke

La determinación de las cortas lleva una secuencia similar a una escalera ascendente hacia atrás, que la Figura 4.6 muestra con una línea de color verde. Los segmentos verticales, referenciados con las letras: “ab”, “cd” y “ef”, representan la realización de las cortas, mientras que los segmentos horizontales: “bc”, “de” y “fg”, manifiestan el intervalo entre las cortas, considerando que después de la corta no existe mortalidad, ya que se encuentran por debajo de la línea de máxima densidad, por consiguiente se mantiene constante el número de árboles por hectárea.

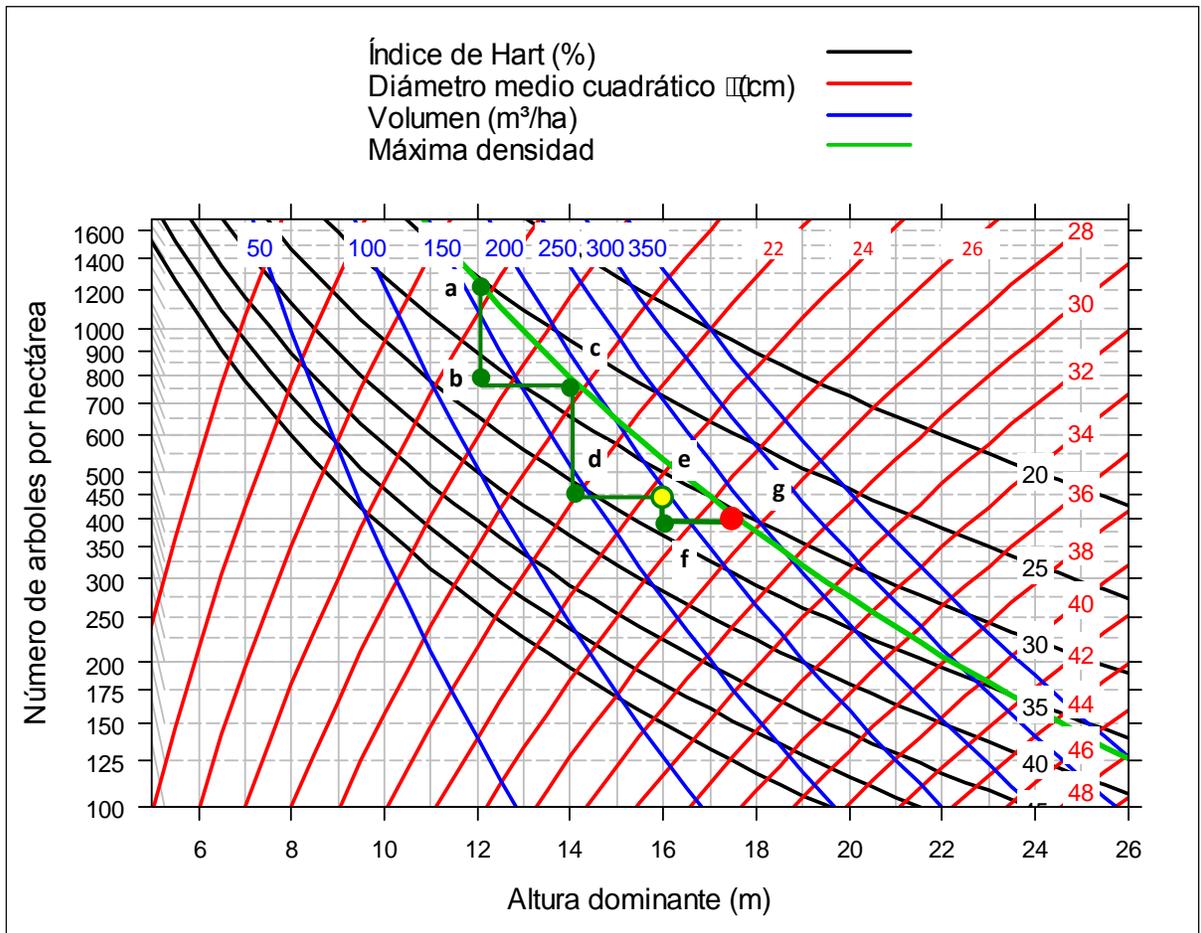


Figura 4.6. Esquema de cortas con referencia al límite de máxima densidad.

En la Figura 4.6 se muestra la escalera trazada hacia atrás, teniendo como punto de partida el punto “e”, que era el sitio conocido de referencia. Utilizando la tabla de la Figura 4.5 se estima la edad a partir de la altura dominante. El sitio tiene una edad de 60 años, sabiendo que las cortas en el ejido se realizan cada 10 años, calculamos que la masa tenía una  $H_o$  de 14 metros a la edad de 50, eso coloca el punto “d” del diagrama. Este punto traza una línea horizontal, que indica la misma densidad que el punto “e”, partiendo del supuesto que no ha habido intervenciones silvícolas. Se observa gráficamente el incremento en volumen y  $dg$ , durante los últimos 10 años, además del cambio con respecto al índice de Hart-Becking que ha experimentado el rodal. Al trazar una línea vertical del punto “d” al “c”, se puede estimar el número de árboles convenientes a extraer y por consecuencia calcular el volumen extraído. De

la misma manera pero en forma ascendente es decir del punto “e” al “f” y al “g” se puede estimar cual será el volumen extraído al final del turno.

#### **4.9 Tabla numérica específica para el esquema de claras**

Tabla 4.5. comprende los valores de las variables dasométricas del rodal de referencia en base al esquema de cortas sugerido en la Figura 4.6. En él se especifican los valores correspondientes a antes y después de la corta, siguiendo las operaciones señaladas por los puntos “a-b”, “b-c”, “c-d” y “e”, calculados como indica la Tabla 3.2. Forma de estimación de las variables dasométricas del rodal antes y después de la corta. (pág. 22) En la parte inferior se encuentra la tabla correspondiente a la masa extraída según el esquema planteado (Tabla 4.6.).

Tabla 4.5. Principales variables del rodal antes y después de las cortas.

Operación	Edad	Ho	N		dg		V		G		IH	
			Antes	Después								
<b>Corta (a-b)</b>	40	12.04	1435	796	15.1	17.0	174.7	127.7	25.8	18.1	24	32
<b>Corta (c-d)</b>	50	14.14	796	507	19.6	21.4	193.4	152.1	24.0	18.3	27	34
<b>Corta (e-f)</b>	60	16.00	507	353	23.9	25.7	208.9	172.4	22.7	18.3	30	36
<b>Corta final</b>	70	17.66	353	0	28.0	0.0	222.3	0.0	21.7	0.0	32	0

Dónde: *Edad* (años), *Ho* altura dominante (m), *N* árboles ha<sup>-1</sup>, *dg* diámetro medio cuadrático (cm), *V* volumen (m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>), *G* área basimétrica (m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>) e *IH* Índice de Hart-Becking (%)

Tabla 4.6. Tabla de masa extraída.

Operación	Edad	Ho	Ne	dge	Ge	Ve	Vacum	Vtot	CM	CC
<b>Corta (a-b)</b>	40	12.04	639	12.4	7.7	47.0	47.0	174.7	4.4	
<b>Corta (c-d)</b>	50	14.14	289	15.9	5.7	41.2	88.3	240.4	4.8	6.6
<b>Corta (e-f)</b>	60	16.00	154	19.2	4.4	36.5	124.8	297.2	5.0	5.7
<b>Corta final</b>	70	17.66	353	28.0	21.7	222.3	347.1	347.1	5.0	5.0

Dónde: *Edad* (años), *Ho* altura dominante (m), *Ne* árboles extraídos ha<sup>-1</sup>, *dge* diámetro medio cuadrático extraído (cm), *Ge* área basimétrica extraída (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), *Ve* volumen extraído (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), *Vacum* volumen extraído acumulado en las cortas (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), *Vtot* volumen total de la masa (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), *CM* crecimiento medio anual (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>año) y *CC* crecimiento corriente anual (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

#### 4.10 Tabla de espaciamiento relativo en función del índice de Hart-Becking y Reineke

En el diagrama de la Figura 4.4, se observa cómo la curva de máxima densidad abarca un rango del índice de Hart-Becking 25 a 35%. La Tabla 4.7. muestra el número de árboles por hectárea ( $N$ ) y el espaciamiento relativo ( $a$ ) entre ellos, para una determinada altura dominante  $H_o$ . Esta tabla proporciona una idea del espaciamiento y la densidad que debe existir en rodales de máxima densidad. Se observa cómo a medida que la altura dominante aumenta, el espaciamiento también lo hace, en cambio el rango de densidad disminuye.

Tabla 4.7. Espaciamiento relativo.

$N$ (árboles hectárea)	$a$ (metros)	$H_o$ (metros)					
		8	10	12	14	16	18
100	10.8	134	108	90	77	67	60
200	7.6	95	76	63	54	48	42
300	6.2	78	62	52	44	39	34
400	5.4	67	54	45	38	34	30
500	4.8	60	48	40	34	30	27
600	4.4	55	44	37	31	27	24
700	4.1	51	41	34	29	25	23
800	3.8	48	38	32	27	24	21
900	3.6	45	36	30	26	22	20
1000	3.4	42	34	28	24	21	19
1100	3.2	41	32	27	23	20	18
1200	3.1	39	31	26	22	19	17
1300	3.0	37	30	25	21	19	17
1400	2.9	36	29	24	21	18	16
1500	2.8	35	28	23	20	17	15
1600	2.7	34	27	22	19	17	15
1700	2.6	33	26	22	19	16	14
1800	2.5	32	25	21	18	16	14
1900	2.5	31	25	21	18	15	14
2000	2.4	30	24	20	17	15	13
2100	2.3	29	23	20	17	15	13
2200	2.3	29	23	19	16	14	13
2300	2.2	28	22	19	16	14	12
2400	2.2	27	22	18	16	14	12
2500	2.2	27	22	18	15	13	12
2600	2.1	26	21	18	15	13	12
2700	2.1	26	21	17	15	13	11
2800	2.0	25	20	17	15	13	11
2900	2.0	25	20	17	14	12	11
3000	2.0	25	20	16	14	12	11

Dónde:  $N$  es el número de árboles por hectárea,  $a$  el espaciamiento medio entre arboles medido en metros y  $H_o$  corresponde a la altura dominante del rodal.

## 5. CONCLUSIONES GENERALES

El diagrama de manejo de densidad basado en el índice de Hart-Becking realizado para aplicación en los rodales naturales del Ejido El Largo y Anexos, es una herramienta gráfica y tabular, útil en la planificación de cortas y la evaluación de los tratamientos silvícolas realizados.

Mediante la utilización de las variables dasométricas: diámetro cuadrático ( $dg$ ), número de árboles por hectárea ( $N$ ), altura dominante ( $Ho$ ), se puede estimar de forma rápida y sencilla el volumen total de la masa, la altura dominante y el crecimiento potencial, así como la especulación del desarrollo futuro de la masa.

Las ecuaciones modelizadas y de base, utilizadas en la realización del diagrama de manejo de densidad, permitieron generar una tabla numérica que aporta mayor información para la toma de decisiones, como son los valores correspondientes a la masa extraída (número de árboles por hectárea, área basal, volumen, crecimiento medio anual y crecimiento corriente anual).

La línea de máxima densidad resulto ser un punto clave para conocer el espaciamiento relativo entre los árboles de rodales naturales de máxima densidad, el cual oscila entre 25 a 35% según el índice de Hart-Becking.

El diagrama de manejo de densidad aunado a la tabla numérica son herramientas que permiten conocer el estado de un rodal, así como el planteamiento de distintos esquemas de cortas.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, C. O. (1995). *Guía de densidad para Pinus teocote Schl. et Cham.* Texcoco. México.: Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.
- Aguirre, C. O. (1996). *Manejo Forestal.* Universidad Autonoma de Nuevo Leon. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo Leon, Mexico.
- Álvarez, G. J. (1999). Estudio de la densidad: Determinacion de los valores maximo y minimo. *Documento interno, Departamento de Ingenieria Agroforestal. Escuela Politecnica Superior. USC.*, 14.
- Arias, M. R. (2009). *Desarrollo de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para Pinus pinaster en Asturias. Trabajo de Investigación Fin de Carrera.* USC-Escuela Politécnica Superior.
- Barrio, A. M., & Álvarez, G. J. (s.f.). Diagramas de manejo de la densidad: una herramienta para la evaluacion de regimenes selvícolas. *Departamento de Ingenieria Agroforestal. Escuela Politecnica Superior. USC.*
- Corvalán, V. P., & Hernández, P. J. (2006). *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.*,. (C. d. Depto. Manejo de Recursos Forestales, Ed.) Recuperado el 5 de octubre de 2013, de <http://ftp.forestaluchile.cl/dasometria/4.-%20DENSIDAD%20DE%20RODAL.pdf>
- Curtis, R. O. (1970). Stand density measures. An interpretation. *For. Sci.*
- Daniel, T. W., Helms, J. A., & Baker, F. S. (1982). *Principios de Silvicultura.* (Primera edición en español ed.). México: Mcgraw-Hill.
- Diéguez-Aranda, U. A. (2012). *Prácticas de Ampliación de Dasometría con R.* Lugo, España: Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior.

- Diéguez-Aranda, U., Rojo, A., Castedo, J., Álvarez, J., Barrio, M., Crecente, F., Gonzalez, J., Perez, C., Rodriguez, R., Lopez, C., Balboa, M., Gorgoso, J., & Sanchez, f. (2009). *Herramientas selvícolas para la gestion forestal sostenible en Galicia* (ISBN: 978-84-692-7395-1 ed.). Xunta de Galicia.
- Gadow, K. v. (2007). *Estructura y crecimiento del bosque*.
- Gingrich, S. F. (1967). En *Measuring and evaluating stocking and density in upland hardwood forest in the Central States* (págs. 69-80). For. Sci.
- Henningsen, A. (2007). *Systemfit: Un paquete para sistemas de estimación de Ecuaciones simultáneas en R*. Revista de Software Estadístico. Volumen 23. Numero 4. 40 p. Recuperado el 12 de enero de 2014, de <http://www.jstatsoft.org/v23/i04/>
- Hernandez, S. J. (2012). *Efecto del manejo forestal en la diversidad, composicion y estructura de un bosque de Pinus arizonica Engelm. en el ejido El Largo, Chihuahua, Mexico. Tesis de doctorado*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon. Linares, N. L. Mexico.
- Newton P. (1997) *Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning*. Forest Ecology and Management 98: 251-265.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Quiñones B, M. A. (2000). *Caracterización Silvícola y Estructural de Rodales de Pinus pseudostrobus Lindl. en el Sur de Nuevo León, México*. Tesis de maestria. Universidad Autonoma de Nuevo Leon, Facultad de Ciencias Forestales. Linares, N. L.
- R Core Team (2013). *R: A language and environment for statistical. Computing, R Foundation for Statistical*. Obtenido de <http://www.R-project.org/>

- Reineke, L. (1933). *Perfecting a stand-density index for even-aged forest*. . Journal of Agricultural Research.
- Romahn, C. (2010). *Dendrometría*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- SEMARNAT. (2005) *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México.
- SmartWood, & FCS. (2004). *Resumen Publico de Certificacion de Ejido El Largo y Anexos*. Recuperado el 15 de 12 de 2013, de <http://www.rainforest-alliance.org/forestry/documents/ejidoellargofmpubsum04.pdf>
- Vargas, L. B. (1999). *Caracterizacion de la productividad y estructura de Pinus hartweggi Lindl. en tres gradientes altitudinales en el cerro El Potosi, Galeana, Nuevo Leon. Tesis de maestria*. Linares, N.L. Mexico: Univesidad Autonoma de Nuevo Leon.
- Zepeda, B. E. (1983). *Análisis de diez procedimientos para estimar incrementos volumétricos de coníferas*. Tesis Ing. Agr. Esp. Bosques. Univ. Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Zepeda, B. E. (1990). *Curvas polimórficas de índice de sitio de edad base invariante, para tres especies de pino del noroeste de Chihuahua*. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Serie técnica Bol. Téc. No. 25.
- Zepeda, B. E. (1998). Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El poleo. *Madera y Bosques*(<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61740104>> ISSN 1405-0471)).

## 7. ANEXOS

Anexo 1. Variables dasométricas de los sitios de muestreo.

No.	N (arboles ha <sup>-1</sup> )	DN (cm)	H (m)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	dg (cm)	Ho (m)	IH (%)
1	390	24	14	20.38	203.61	25.8	17.8	30
2	680	20	13	22.95	206.95	20.7	15.2	27
3	520	19	13	17.62	172.07	20.8	16.7	28
4	320	26	16	18.10	192.35	26.8	18.2	32
5	230	25	14	13.44	144.39	27.3	18.5	38
6	270	20	10	9.37	65.98	21.0	11.5	56
7	120	33	15	11.49	121.47	34.9	16.4	59
8	330	20	9	10.62	69.66	20.2	10.7	54
9	400	23	14	18.77	184.60	24.4	17.6	30
10	110	28	13	8.15	86.84	30.7	13.2	76
11	180	28	12	13.87	144.84	31.3	15.5	51
12	250	28	14	17.02	171.59	29.4	17.7	38
13	320	20	8	12.89	108.00	22.6	11.8	50
14	150	25	10	8.21	60.60	26.4	11.6	75
15	170	28	12	12.02	102.77	30.0	14.2	57
16	120	31	12	10.94	107.78	34.1	13.5	71
17	360	26	15	19.85	199.70	26.5	16.5	34
18	480	20	11	17.41	146.79	21.5	14.7	33
19	360	22	13	16.76	179.18	24.3	17.5	32
20	340	23	13	16.15	151.44	24.6	16.0	36
21	340	25	13	18.27	160.18	26.2	15.4	37
22	270	24	12	13.76	117.96	25.5	14.3	45
23	320	24	12	16.11	145.85	25.3	15.6	38
24	430	17	9	11.53	88.04	18.5	12.5	41
25	360	26	13	21.67	209.16	27.7	17.5	32
26	560	22	12	23.26	203.80	23.0	16.0	28
27	220	19	9	6.98	48.78	20.1	11.1	64
28	100	25	13	5.11	45.60	25.5	13.1	81
29	370	20	10	12.54	102.16	20.8	13.4	41
30	660	18	11	17.08	130.35	18.2	13.0	32
31	610	19	10	20.41	174.79	20.6	16.3	26
32	730	19	12	23.79	215.37	20.4	16.8	23
33	340	22	11	14.15	125.46	23.0	14.4	40
34	230	24	12	12.34	111.44	26.1	15.3	46
35	680	16	10	15.58	118.86	17.1	13.1	31
36	450	23	14	20.21	197.45	23.9	17.3	29
37	400	19	10	11.55	80.19	19.2	12.0	44
38	820	18	11	21.25	171.78	18.2	13.9	27
39	640	17	10	15.34	101.17	17.5	10.6	40
40	540	19	11	17.99	146.11	20.6	13.0	35
41	420	20	11	16.31	142.51	22.2	14.9	35
42	170	23	11	8.47	82.81	25.2	13.5	60
43	280	18	9	8.34	54.88	19.5	9.7	65
44	400	16	9	9.45	71.69	17.3	11.4	46
45	170	32	14	17.68	210.60	36.4	18.1	45
46	180	22	10	7.29	55.55	22.7	11.9	66
47	170	23	13	8.69	95.18	25.5	14.6	56
48	220	19	10	6.80	52.15	19.8	12.7	56
49	270	21	11	9.85	78.58	21.5	13.6	47
50	180	22	11	9.09	92.82	25.4	14.0	56
51	190	25	12	10.64	96.54	26.7	14.3	54
52	720	20	12	23.54	193.67	20.4	14.0	28
53	670	16	11	14.58	110.30	16.6	12.6	32
54	280	25	14	15.23	142.20	26.3	15.0	42
55	460	19	11	15.99	138.44	21.0	14.3	34
56	650	15	9	11.69	70.71	15.1	9.4	44
57	290	20	11	10.22	82.95	21.2	12.7	49
58	950	16	11	21.20	168.85	16.9	13.6	25
59	280	19	9	10.02	94.22	21.3	12.9	49
60	670	19	10	20.37	154.14	19.7	13.5	30

**Anexo 1. Variables dasométricas de los sitios de muestreo. (continuación)**

<b>No.</b>	<b>N</b> <b>(arboles ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>DN</b> <b>(cm)</b>	<b>H</b> <b>(m)</b>	<b>G</b> <b>(m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>V</b> <b>(m3 ha-1)</b>	<b>dg</b> <b>(cm)</b>	<b>Ho</b> <b>(m)</b>	<b>IH</b> <b>(%)</b>
61	410	15	10	8.21	62.32	16.0	11.2	47
62	410	17	11	10.86	92.22	18.4	13.3	39
63	530	18	8	15.16	99.90	19.1	11.6	40
64	860	18	12	22.79	191.63	18.4	14.3	25
65	450	15	9	8.33	50.26	15.4	9.4	53
66	340	16	8	6.93	40.05	16.1	8.9	65
67	220	19	9	7.83	61.35	21.3	10.3	69
68	420	19	12	12.98	107.46	19.8	14.7	35
69	210	19	10	7.08	56.94	20.7	12.0	61
70	120	20	8	4.52	33.27	21.9	8.9	108
71	290	21	10	10.59	78.34	21.6	12.1	51
72	250	22	13	10.92	107.74	23.6	15.5	43
73	120	24	13	6.55	68.44	26.4	13.9	69
74	350	18	11	10.13	85.89	19.2	13.0	43
75	190	21	11	7.74	67.97	22.8	13.6	56
76	410	16	9	8.86	59.66	16.6	10.8	48
77	390	16	9	7.77	50.54	15.9	10.3	52
78	240	22	11	10.92	88.55	24.1	12.8	53
79	140	20	9	5.32	36.72	22.0	9.8	91
80	280	16	9	5.99	43.12	16.5	10.3	61
81	470	20	13	17.48	165.73	21.8	16.6	29
82	210	22	10	8.82	64.00	23.1	12.0	61
83	360	21	10	14.81	111.47	22.9	12.6	44
84	900	19	10	26.42	183.62	19.3	11.5	31
85	320	23	10	13.99	94.17	23.6	11.0	54
86	210	19	11	6.78	53.58	20.3	12.0	61
87	280	27	15	17.23	172.48	28.0	17.1	37
88	640	19	12	20.44	184.42	20.2	16.0	26
89	920	19	12	28.53	238.19	19.9	14.0	25
90	440	19	10	14.76	117.20	20.7	13.3	38
91	340	20	9	11.75	84.27	21.0	12.3	47
92	410	22	10	17.00	121.24	23.0	12.2	43
93	480	23	12	20.86	167.10	23.5	13.2	37
94	400	18	8	11.91	77.07	19.5	9.9	53
95	470	18	9	13.33	86.48	19.0	11.4	43
96	510	22	13	24.16	254.38	24.6	19.6	24
97	120	25	10	6.21	40.03	25.7	9.9	97
98	610	19	11	20.24	171.15	20.6	15.3	28
99	240	24	12	11.77	98.21	25.0	14.3	48
100	340	24	12	17.76	156.63	25.8	15.3	38
101	300	25	11	18.05	164.60	27.7	15.4	40
102	520	19	10	15.01	100.95	19.2	11.1	42
103	210	23	10	9.69	76.18	24.2	12.2	60
104	400	26	15	22.73	236.00	26.9	18.0	29
105	860	18	11	22.04	170.41	18.1	13.9	26
106	210	23	10	9.67	68.81	24.2	10.8	67
107	400	25	15	20.94	215.90	25.8	17.4	30
108	210	23	12	10.85	111.04	25.7	14.9	49
109	190	20	8	7.10	50.10	21.8	9.8	78
110	230	23	10	11.30	90.42	25.0	12.0	58
111	310	23	13	15.61	156.56	25.3	16.9	36
112	160	22	9	6.48	41.26	22.7	9.9	85
113	320	23	13	14.86	138.93	24.3	16.1	37
114	550	19	9	17.54	118.74	20.1	12.0	38
115	460	22	14	19.83	183.96	23.4	15.7	32
116	350	23	12	15.14	120.80	23.5	13.3	42
117	340	21	9	12.53	82.60	21.7	10.8	53
118	100	20	10	3.33	24.99	20.6	9.7	109
119	530	24	13	25.04	221.00	24.5	15.2	30
120	520	20	11	19.16	159.07	21.7	15.2	31

**Anexo 1. Variables dasométricas de los sitios de muestreo. (continuación)**

<b>No.</b>	<b>N</b> <b>(arboles ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>DN</b> <b>(cm)</b>	<b>H</b> <b>(m)</b>	<b>G</b> <b>(m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>V</b> <b>(m3 ha-1)</b>	<b>dg</b> <b>(cm)</b>	<b>Ho</b> <b>(m)</b>	<b>IH</b> <b>(%)</b>
121	530	23	13	23.39	205.10	23.7	14.5	32
122	420	26	14	22.52	206.30	26.1	15.4	34
123	590	22	13	23.61	206.54	22.6	15.9	27
124	500	21	9	20.20	139.49	22.7	12.6	38
125	570	22	11	23.73	188.27	23.0	14.2	31
126	550	21	9	20.86	139.39	22.0	11.7	39
127	250	27	14	14.91	137.63	27.6	15.5	43
128	330	18	7	9.04	45.23	18.7	7.3	80
129	1060	17	10	25.38	181.57	17.5	12.4	26
130	240	19	9	7.43	43.80	19.8	8.9	76
131	550	23	15	23.61	238.97	23.4	17.3	26
132	290	21	11	11.44	90.63	22.4	13.3	47
133	710	22	13	27.15	233.25	22.1	14.7	27
134	620	23	12	26.10	215.75	23.2	13.5	31
135	270	27	14	17.79	172.71	29.0	17.0	38
136	270	26	14	16.64	158.96	28.0	15.2	42
137	520	22	13	23.10	229.32	23.8	18.6	25
138	290	28	12	20.39	174.46	29.9	15.5	40
139	470	23	12	20.70	174.18	23.7	13.8	35
140	410	21	10	15.67	115.02	22.1	13.1	40
141	380	26	15	20.65	196.89	26.3	15.3	35
142	370	25	15	19.35	202.96	25.8	19.0	29
143	710	21	12	27.64	237.55	22.3	15.3	26
144	300	22	10	13.00	108.19	23.5	14.1	43
145	420	21	11	16.02	132.66	22.0	14.9	35
146	930	17	11	22.51	174.04	17.6	12.9	27
147	610	19	11	19.53	146.94	20.2	12.9	33
148	390	21	10	15.16	104.72	22.2	11.6	46
149	660	20	12	21.02	174.66	20.1	13.9	30
150	830	19	13	24.53	217.16	19.4	15.3	24
151	240	23	10	10.38	70.41	23.5	11.4	60
152	160	21	13	7.09	74.97	23.8	13.9	60
153	310	17	9	8.13	53.91	18.3	10.4	58
154	270	17	9	7.27	55.65	18.5	11.5	56
155	250	19	10	7.97	60.36	20.2	12.6	53
156	130	17	9	3.99	32.92	19.8	9.3	100
157	280	17	9	7.77	61.45	18.8	11.4	56
158	610	17	11	15.42	122.07	17.9	14.1	30
159	300	22	13	13.04	114.74	23.5	14.9	41
160	440	17	11	11.18	91.23	18.0	12.9	39
161	180	25	13	10.97	112.92	27.9	16.3	48
162	110	24	12	5.89	56.99	26.1	12.5	81
163	580	18	12	14.60	119.20	17.9	13.8	32
164	180	26	13	11.68	115.00	28.7	15.7	50
165	250	30	16	18.38	195.53	30.6	18.0	37
166	150	28	13	10.11	93.03	29.3	14.5	59
167	150	27	12	9.50	81.96	28.4	13.6	63
168	220	25	11	12.23	102.04	26.6	14.0	51
169	190	24	11	9.70	75.19	25.5	12.7	60
170	110	24	11	6.01	47.16	26.4	10.2	99
171	160	24	13	8.86	88.32	26.6	15.7	53
172	220	19	9	7.19	51.58	20.4	11.5	62
173	310	24	13	16.50	163.88	26.0	16.9	36
174	160	34	17	16.12	192.50	35.8	20.2	41
175	160	25	11	8.35	62.63	25.8	12.1	69
176	170	28	16	11.46	118.72	29.3	16.7	49
177	160	23	10	7.11	50.68	23.8	11.2	74
178	110	33	14	9.61	90.41	33.4	15.0	67
179	120	33	17	11.20	133.41	34.5	18.7	52
180	150	27	13	9.41	84.41	28.3	14.2	61
181	110	27	12	7.73	76.13	29.9	12.8	79

**Anexo 2. Información dasométricas de los sitios de muestreo utilizados en el ajuste de la ecuación de IDRR.**

<b>No.</b>	<b>SITIO REFERENCIA</b>	<b>N</b> <i>(arboles ha<sup>-1</sup>)</i>	<b>DN</b> <i>(cm)</i>	<b>H</b> <i>(m)</i>	<b>G</b> <i>(m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)</i>	<b>V</b> <i>(m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)</i>	<b>dg</b> <i>(cm)</i>	<b>Ho</b> <i>(m)</i>	<b>IHB(%)</b>
1	2	680	20	13	22.95	206.95	21	15.2	27
2	4	320	26	16	18.10	192.35	27	18.2	33
3	7	120	33	15	11.49	121.47	35	16.4	60
4	11	180	28	12	13.87	144.84	31	15.5	52
5	12	250	28	14	17.02	171.59	29	17.7	38
6	16	120	31	12	10.94	107.78	34	13.5	73
7	25	360	26	13	21.67	209.16	28	17.5	32
8	31	610	19	10	20.41	174.79	21	16.3	27
9	32	730	19	12	23.79	215.37	20	16.8	24
10	45	170	32	14	17.68	210.60	36	18.1	46
11	58	950	16	11	21.20	168.85	17	13.6	26
12	64	860	18	12	22.79	191.63	18	14.3	26
13	84	900	19	10	26.42	183.62	19	11.5	31
14	89	920	19	12	28.53	238.19	20	14.0	25
15	96	510	22	13	24.16	254.38	25	19.6	24
16	101	300	25	11	18.05	164.60	28	15.4	40
17	104	400	26	15	22.73	236.00	27	18.0	30
18	107	400	25	15	20.94	215.90	26	17.4	31
19	119	530	24	13	25.04	221.00	25	15.2	31
20	121	530	23	13	23.39	205.10	24	14.5	32
21	122	420	26	14	22.52	206.30	26	15.4	34
22	123	590	22	13	23.61	206.54	23	15.9	28
23	129	1060	17	10	25.38	181.57	17	12.4	27
24	133	710	22	13	27.15	233.25	22	14.7	27
25	134	620	23	12	26.10	215.75	23	13.5	32
26	135	270	27	14	17.79	172.71	29	17.0	38
27	137	520	22	13	23.10	229.32	24	18.6	25
28	138	290	28	12	20.39	174.46	30	15.5	41
29	143	710	21	12	27.64	237.55	22	15.3	26
30	146	930	17	11	22.51	174.04	18	12.9	27
31	150	830	19	13	24.53	217.16	19	15.3	24
32	165	250	30	16	18.38	195.53	31	18.0	38
33	174	160	34	17	16.12	192.50	36	20.2	42
34	179	120	33	17	11.20	133.41	34	18.7	52

### Anexo 3. Script para la creación del diagrama de manejo de densidad.

```
# Contrucción Diagrama Densidad (DMD) -----
# 1.Representar la altura dominante H0 en el eje X y el número de arb por hectárea
N en el eje Y, este último en escala logarítmica para facilitar el uso del diagrama.
# data.frame de H0 y IH
H0<- seq(4, 45, 0.5)
IH<- seq(20, 55, 5)
f00<- merge(H0, IH)
names(f00)<- c("H0", "IH")
f00$valor.ih<- ((4/3)^0.25*(10000/(f00$H0*f00$IH)))^2 # N=f(Indice de Hart)
f00$valor.ih

# 2.Expresar el nivel de densidad del rodal mediante el índice de Hart-Becking IH.
Las isolíneas para este índice se obtienen despejando N y dando valores a la altura
dominante para cada valor del índice.K=1 o (3/4)^0.25
# VALORES EJE y
N <- c(seq(100, 400, 25), seq(450, 950, 50), seq(1000, 1700, 100))
Nn <- c(100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1700)

# 3.Representar las isolíneas del diámetro medio cuadrático a partir de la ecuación
alometrica(dg), para ello se despeja el valor de N, y se van dando valores a la altura
dominante para cada valor del dg.
# AGRUPACIÓN DE PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES
parm <- data.frame(b0=7.2828745201, b1=-0.1991426587, b2=0.8756233365,
b3=0.0001790569, b4=1.7727916269, b5=1.0217350290, b6=0.8850908258)
parm$b304 <- parm$b3*parm$b0^parm$b4
parm$b245 <- parm$b2*parm$b4+parm$b5
parm$b146 <- parm$b1*parm$b4+parm$b6

##Diagrama simple
# 4.Representar las isolíneas del volumen del rodal, sustituyendo la ecuación (3.6)
alometrica del dg en la 3.7 alometrica de V, despejando el valor de N y dando valores
a la altura dominante para cada valor de V.
#Diagrama de Manejo de la Densidad
library(lattice)
#win.graph()
xyplot(log10(valor.ih)~H0, data=f00, groups=IH, type="l", col=1, lwd=2, xlim=c(5, 26),
ylim=c(min(log10(N)), max(log10(N))),
scales=list(y=list(
at=log10(c(seq(50, 80, 20), seq(100, 200, 25), seq(250, 450, 50), seq(500, 900,
100), seq(1000, 1600, 200))),
labels= c(seq(50, 80, 20), seq(100, 200, 25), seq(250, 450, 50), seq(500, 900, 100),
seq(1000, 1600, 200)))
, x = list(at = seq(2, 36, 2), label = seq(2, 36, 2))),
```

```

key=list(text=list(c("Índice de Hart (%)", "Diámetro medio cuadrático (cm)", "Volumen
(m³/ha)")), lines=list(lwd=2.5, col=c("black", "red", "blue"), type="l")), xlab="Altura
dominante (m)", ylab="Número de arboles por hectárea",
panel=function(x, y, ...){
for(i in 5:35)
panel.abline(v=i, col="grey", lty=1, lwd=0.5) # Isolíneas de H0
for(i in log10(N))
panel.abline(h=i, col="grey", lty=5, lwd=0.5) # Isolíneas secundarias de N
for(i in log10(Nn))
panel.abline(h=i, col="grey", lty=1, lwd=1) # Isolíneas principales de N
panel.xyplot(x, y, ...) # Isolíneas de IH
for(i in seq(10, 50, 2)){
panel.lines(log10((i/(parm$b0*H0^parm$b2))^(1/parm$b1))~H0, col=2,
lwd=2)
} # Isolíneas de dg
for(i in seq(50, 350, 50)){
panel.lines(log10((i/(parm$b304*(H0^parm$b245))^(1/parm$b146))~H0,
col=4, lwd=2)

} # Isolíneas de V

for(i in seq(50, 350, 50)){
panel.points(x=(i/(parm$b304*(1500^parm$b146)))^(1/parm$b245),
y=log10(1500), pch=15, col="white", cex=3)
panel.text(x=(i/(parm$b304*(1500^parm$b146)))^(1/parm$b245),
y=log10(1500), labels=i, cex=0.8, col=4)
} # Etiquetas de V
for(i in seq(20, 55, 5)){
panel.points(x=24, y=log10(((4/3)^0.25*(10000/(24*i)))^2), pch=15, col="white",
cex=2.5)
panel.text(x=24, y=log10(((4/3)^0.25*(10000/(24*i)))^2), labels=i, cex=0.8, col=1)
} # Etiquetas de IH
for(i in seq(10, 50, 2)){
panel.points(x=25, y=log10((i/(parm$b0*25^parm$b2))^(1/parm$b1)),
pch=15, col="white", cex=2.5)
panel.text(x=25, y=log10((i/(parm$b0*25^parm$b2))^(1/parm$b1)),
labels=i, cex=0.8, col=2)
} #Etiquetas de dg
}
)

```