

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SITIO EN TRES PLANTACIONES DE  
TECA (*Tectona grandis*) DE LA COMPAÑÍA REYBANPAC REYBANANO DEL  
PACIFICO C.A**

**MARIANA DE JESUS OJEDA MORENO**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE INGENIERA FORESTAL**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2011**

**HOJA DE CERTIFICACIÓN**

**EL TRIBUNAL DE TESIS CERTIFICA QUE: El trabajo de tesis titulado DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SITIO EN TRES PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis*) DE LA COMPAÑÍA REYBANPAC REYBANANO DEL PACIFICO C.A., de responsabilidad de la señorita egresada Mariana De Jesús Ojeda Moreno, ha sido prolijamente revisado, quedando autorizada su presentación.**

**TRIBUNAL DE TESIS**

**Ing. Eduardo Cevallos**

**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_

**Ing. Norma Lara**

**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**Riobamba, diciembre de 2011**

## **DEDICATORIA**

*A mis Padres Oswaldo y Enma que son mi mayor ejemplo a seguir, les debo todos mis logros ya que con su incondicional apoyo, amor y sacrificio han sido el pilar fundamental en todas las decisiones de mi vida.*

*A mis hermanos, Sonia, Lupe, Marcelo, y Martha que con sus consejos y apoyo, siempre estuvieron presentes en cada etapa de mi vida, en especial a mi hermano Marcelo a quien le considero como mi segundo padre.*

*A mis sobrinos Matías, Amalia, Andrés, Marco Antonio y Leandro que son una bendición para nuestra familia y que con su ternura e inocencia han venido a llenar nuestras vidas.*

*Mariana*

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por llenarme de bendiciones y por guiarme en mi camino porque se que gracias a el he conseguido todas mis metas.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Escuela de Ingeniería Forestal por haberme formado y por sus invaluable conocimientos que cada uno de mis maestros puso en mí.

Un agradecimiento muy profundo al Ing. Eduardo Cevallos e Ing. Norma Lara por su ayuda idónea durante el desarrollo de esta investigación.

A la empresa Reybanpac Reybanano del Pacifico C.A, por haberme dado la apertura para la realización de esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE GRÁFICOS	ix
LISTA DE MAPAS	xi
LISTA DE ANEXOS	xii

<b>CAPITULO</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>Pp.</b>
I.	TITULO.....	1
II.	INTRODUCCIÓN.....	1
III.	REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
VI.	CONCLUSIONES.....	54
VII.	RECOMENDACIONES .....	56
VIII.	RESUMEN .....	57
IX.	SUMMARY.....	58
X.	BIBLIOGRAFIA .....	59
XI.	ANEXOS .....	64

**LISTA DE TABLAS**

<b>No.</b>	<b>TITULO</b>	<b>Pp.</b>
1.	Ecuaciones de Incremento Corriente Anual e Incremento Medio Anual.....	34

**LISTA DE CUADROS**

<b>No.</b>	<b>TITULO</b>	<b>Pp.</b>
1.	Ubicación geográfica de las haciendas.....	29
2.	Características climáticas .....	29
3.	Comportamiento de la altura dominante (Ho) en función de las diferentes edades a las que fueron medidas las plantaciones.....	36
4.	Bondad de ajuste de los modelos analizados.....	38
5.	Relación significativa de las variables de los modelos analizados .....	39
6.	Significación de los coeficientes de regresión .....	40
7.	Valores de la constante u origen para cada IS .....	41
8.	Sistema de ecuaciones de IS para Ho .....	41
9.	Sistema de ecuaciones de IS para $\bar{h}$ .....	44
10.	Sistema de ecuaciones de IS para DAP.....	45
11.	Matriz de Correlación de Spearman .....	49
12.	Bondad de ajuste del modelo propuesto con factores ambientales. ....	49
13.	Significación del análisis de regresión en base a factores ambientales.....	50
14.	Significación de los coeficientes de regresión en base a factores ambientales .....	50
15.	Determinación de los coeficientes(a,b) .....	51
16.	Índice de sitio de las haciendas forestales analizadas .....	52
17.	Índice de sitio de las haciendas forestales con plantaciones de teca.....	53

**LISTA DE GRÁFICOS**

<b>No.</b>	<b>TITULO</b>	<b>Pp.</b>
1.	Comportamiento de la Ho en las mediciones efectuadas.....	37
2.	Histograma de calidades de sitios del área.....	38
3.	Haz de curvas de índices de sitios para la altura dominante.....	42
4.	Patrones de crecimiento e incremento para altura dominante.....	46
5.	Patrones de crecimiento e incremento para altura media.....	47
6.	Patrones de crecimiento e incremento para el DAP.....	48



**LISTA DE MAPAS**

<b>No.</b>	<b>TITULO</b>	<b>Pp.</b>
1.	Mapa de la ubicación geográfica del área de estudio .....	30

**LISTA DE ANEXOS**

<b>No.</b>	<b>TITULO</b>	<b>Pp.</b>
1.	Matriz de correlación de Pearson de las variables dasométricas.....	64
2.	Resumen del modelo (b) para la altura media .....	64
3.	Grafico de dispersión.....	65
4.	Resumen del modelo (b) para el DAP .....	66
5.	Descriptivos en base a factores ambientales .....	67
6.	Dispersión de los Residuos del modelo de IS en función de las variables ambientales. .....	77

# **I. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SITIO EN TRES PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis*) DE LA COMPAÑÍA REYBANPAC REYBANANO DEL PACIFICO C.A**

## **II. INTRODUCCIÓN**

En el área de silvicultura y manejo, el concepto de sitio, entendido como la interacción entre las distintas especies forestales y las condiciones edafoclimáticas que las rodean, ha permitido el desarrollo de técnicas orientadas a la estimación de la productividad forestal. Existen numerosos esfuerzos destinados a cuantificar el potencial productivo de especies y su relación con las zonas geográficas en que se desarrollan.

En efecto, las características geográficas definen en gran medida el potencial productivo de las especies forestales. En este contexto, se definen a sitio como un área considerada en términos de todo lo que la rodea o exista, particularmente determinada por el tipo y calidad de vegetación que ésta puede contener o soportar. Según esto, el estudio del crecimiento de una especie se traduce en la búsqueda de cuantificar la productividad que logra bajo los distintos sitios en que se desarrolla.

La productividad es un concepto biológico que puede expresarse matemáticamente. Es por ello que se ha optado por representar la calidad de sitio a través de un valor o índice, el cual es una expresión cuantitativa de la calidad de sitio. Es así como se señalan como el método más utilizado y que ha dado mejores resultados para estimar la calidad de un sitio, aquel que utiliza la altura de árboles dominantes y codominantes como índice, es decir, el conocido índice de sitio, aplicable sólo en rodales coetáneos, condición a la cual se acercan los renovales.

La introducción de *Tectona grandis* en el Ecuador, debido a factores económicos y de mercado, hace necesario conocer el potencial productivo de los diferentes sitios. Esta potencialidad, expresada en producción de madera para una especie particular o para un tipo forestal, en un tiempo dado, ha sido definida como calidad de sitio (Clutter, 1983). La zonificación del potencial forestal de los suelos para la planificación regional, resulta de

gran importancia con el fin de orientar a los productores en la selección de los sitios y especies mejor adaptadas.

## **A. JUSTIFICACION**

La clasificación de los sitios forestales es un aspecto importante para poder predecir con precisión el rendimiento y la producción futura de los rodales, por lo cual se debe considerar necesario contar con estos elementos para que en posteriores trabajos se pueda establecer las relaciones causales que determinan la productividad de un sitio dado basados en los factores del medio ambiente, ello permitirá extrapolar la información para el establecimiento de nuevas plantaciones de teca

Durante muchos años, la Compañía Reybanpac Reybanano del Pacífico C.A ha venido estableciendo plantaciones forestales de teca sin tener un conocimiento claro de las condiciones edáficas de la zona, lo cual ha significado obtener plantaciones de baja calidad y producción de madera perjudicando así a los intereses de la Compañía.

Por esta razón la Empresa ha creído conveniente se realice esta investigación que les permita a futuro planificar plantaciones de *Tectona grandis* en áreas que tengan las características adecuadas para el crecimiento de esta especie.

## **B. OBJETIVOS**

### **1. Objetivo General**

Determinar el índice de sitio en tres plantaciones de *Tectona grandis*, de la Compañía Reybanpac Reybanano del Pacífico C. A

### **2. Objetivo específicos**

a. Ajustar el modelo matemático idóneo para la obtención de las curvas del índice de sitio en *Tectona grandis*.

- b. Determinar los patrones de crecimiento en altura y diámetro de la especie para cada sitio.
- c. Definir dentro de la compañía los sitios mas aptos para la producción de *Tectona grandis* tomando como referencia los estudios realizados

## C. HIPOTESIS

### 1. Hipótesis nula

La calidad del sitio no influye en el crecimiento y desarrollo de los árboles de teca.

### 2. Hipótesis Alternante

La calidad del sitio influye en el crecimiento y desarrollo de los árboles de teca.

### **III. REVISION DE LITERATURA**

#### **A. DESCRIPCION DE LA ESPECIE.**

La *Tectona grandis* L., es una especie de la familia Verbenaceae. Se conoce con los nombres comunes de teca (India, Siam, Birmania, Indonesia), may sak (Laos), teck y giati (Vietnam), ojati (Java), teca (Cuba, España), teck (Francia), saca (sánscrito), sag (arábigo), mahrati (indio), sag y sagwan (lenguas derivadas del sancristo), teka (tamil y otras lenguas dravídicas), teck (Francés) (Betancourt, 1987).

##### **1. Distribución geográfica**

Se encuentra en estado natural en la India, Birmania, Tailandia, Indochina (especialmente en Jaba) y Malasia. No obstante ha sido plantada en Filipinas, África, Guyana Británica, Puerto Rico, Costa Rica, Cuba, Haití, Jamaica, Trinidad y Tobago, Honduras, Ecuador, Colombia, Venezuela, Brasil Camboya, Laos y en Vietnam (Norte y Sur) (Betancourt, 1987).

##### **2. Exigencias ecológicas**

*Tectona grandis*, forma parte en su área de distribución natural, de los bosques tropicales mixtos deciduos, aunque también se encuentra en los semideciduos, mezclada con especies siempre verdes (Sablón, 1980).

##### **3. Clima y temperatura**

Haig et al., (1959) informan que esta especie logra su máximo desarrollo y tamaño en un clima tropical cálido y húmedo, con precipitación pluvial de 1270 mm a 3800 mm, aunque puede existir en sitios donde las lluvias no pasen de 760 mm y en los que alcanzan más de 5000 mm anuales. En cuanto a la temperatura, los autores citados dicen que la teca se puede desarrollar en lugares donde las temperaturas mínimas bajen hasta 1,7 0C y en los que las máximas alcancen 46 0C.

Sobre los requisitos de humedad atmosférica, existen marcadas variaciones entre las diferentes procedencias de las especies.

Birmania y el norte de Tailandia requieren una humedad atmosférica, durante la estación seca, que no sea inferior a 60 %, mientras que las regiones secas de la India toleran que la humedad descienda hasta 30 %.

#### **4. Topografía y tipo de suelo**

Haig et al., (1959) informan que la teca se desarrolla en una gran variedad de suelos y de formaciones geológicas. En tanto el suelo posea una suficiente profundidad y fertilidad y cuente con humedad y avenamiento adecuados, el desarrollo de la teca será igualmente satisfactorio en aluvión o en suelos derivados de arenisca, arcilla pizarrosa, granito o esquisto. No soporta las inundaciones o el encharcamiento, y por eso no se desarrolla bien en suelos arcillosos rígidos.

Por tal razón, casi todos los bosques de teca se hallan situados en un terreno ondulado o montañoso.

### **B. ÍNDICE DE SITIO**

El índice de sitio se considera como la capacidad de producir de un bosque u otro tipo de vegetación, como producto de la interacción de los factores edáficos, bióticos y climáticos (Jadan, S 1972).

El índice de sitio indica la capacidad de producción de un área forestal para una especie o combinación de especies y esta determinada por la acción e interacción de los factores climatológicos, edáficos topográficos y bióticos.

La primera fase de un estudio de crecimiento y rendimiento es la elaboración de un sistema para la clasificación de la productividad de los sitios forestales los cuales constituyen el conjunto de factores edáficos y bióticos que determinan la permanencia y la productividad de biomasa de determinada comunidad forestal, sea esta natural o creada por el hombre (Álvarez y Varona, 1988).

La productividad es un concepto biológico y no puede expresarse matemáticamente. Por ello, se ha optado por representar la calidad de sitio a través de un índice denominado índice de sitio e índice de productividad, ambos muy populares porque son una expresión cuantitativa de la calidad de sitio (Prodan et al., 1997).

### **1. Factores fundamentales que determinan el crecimiento**

- a. Factores climáticos: La temperatura del aire, la humedad, la energía radiante, precipitación, viento, etc.
- b. Factores Edáficos: la profundidad efectiva, las propiedades físico químicas, la humedad el PH, los microorganismos etc.
- c. Factores topográficos: pendiente y forma de relieve altitud y exposición.
- d. Factores de competencia: Otros árboles, vegetación menor, animales etc.

Los factores anteriores pueden ser descritos en términos de ciertas características numéricas específicas. Por ejemplo oferta de agua disponible bajo el suelo, profundidad efectiva de la raíz, acumulación de humus en el horizonte A, nivel del fosforo disponible en el suelo y así sucesivamente para cada factor, en realidad todos los factores intervienen por si solos en una gran interacción dando como resultado un crecimiento potencial específico (LAVERY, 1986).

Si se intenta hacer la descripción de una área a través de un muestreo, se observara que probablemente no exista ningún punto igual a otro. La naturaleza se constituye a partir de cambios a veces graduales o a veces abruptos pero que con el correr del tiempo y los procesos de dinámica ambiental se suavizan espacialmente.

El patrón de variación espacial puede ser modelado como una gran tendencia de variaciones direccionales graduales y pequeñas perturbaciones de orden local, mas bien



aleatorias, las grandes tendencias surgen como respuesta al conjunto de interacciones más relevantes para explicar el fenómeno, en cambio los ruidos locales, obedecen a la presencia de otros factores, que se apartan de la gran tendencia y que gravitan en la respuesta específica en ese punto.

En general los factores de sitio pueden tener una variación espacial con un patrón característico que hace que existan interdependencias entre ellos, Cuando existen discontinuidades espaciales en uno o en varios de los factores de sitio, la dinámica natural se encarga de suavizar esos espacios creando zonas de transición entre un sitio y otro. (Corlovan, P., Gouet, R. y Reyes, C. 1998).

## **2. Métodos para la obtención del índice de sitio**

La construcción de modelos de curvas de índices de sitio puede obtenerse de forma gráfica o mediante un análisis de regresión (Alder, 1980).

Dentro de los Métodos de Regresión Estadísticos se encuentran:

- a. Método de la curva guía.
- b. Método de la regresión anidada.
- c. Método de la ecuación de diferencia.
- d. Métodos de construcción de curvas polimórficas.

Desde el punto de vista de la modelación matemática forestal se distinguen dos tipos de familias de curvas de índices de sitios, las anamórficas (de formas iguales o análogas, también isomórficas o proporcionales) y las polimórficas. Las anamórficas se construyen suponiendo que la relación altura-edad para los diferentes sitios tienen una tendencia constante, lo que se expresa también en una proporcionalidad constante. Vale decir que, la altura de un rodal en una cierta clase de sitio sería una proporción constante de la altura correspondiente a otra clase de sitio o independientemente de la edad. Las polimórficas por su parte, parten de que no existe tal proporcionalidad y que la forma de las curvas depende

de las particulares relaciones altura-edad observada en las diferentes clases de sitio (Prodan *et al.*, 1997).

Los indicadores de sitio son: Altura dominante y edad de la curva convencional de índice de sitio en rodales uniformes.

Factores ambientales como: altitud, tipo de suelo, precipitaciones o indicadores ambientales y directos como indicadores de especie o agrupamiento geográfico.

Una primera división que podría realizarse entre métodos de evaluación de la calidad de sitio es entre métodos de evaluación directos e indirectos.

### **3. Métodos de evaluación directos**

Los criterios de evaluación directos encontrados en la literatura y específicamente por Prodan *et al.*, (1997) quienes hacen un resumen detallado del tema se encuentran:

- a. Determinación de volumen o altura del rodal. Es difícil de interpretar, salvo que el rodal se encuentre cercano a una edad clave o de rotación usada como comparación.
- b. Registro histórico de desarrollo y rendimiento. Cada vez es más frecuente que las empresas conserven toda la información de inventarios sucesivos y también de las cosechas de los rodales. Estos datos están desprovistos de todo supuesto y su error es reducido.
- c. Interpretación, basada en la medición de longitudes internodales de un cierto número de años de crecimiento después de que el árbol haya alcanzado 1.30 m. Algunos autores recomiendan alturas mayores que 2m y 3 m.
- d. Análisis fitosociológico y/o fisionómico de la vegetación presente en el área.

Coincidiendo con estos criterios se encuentran Ortega y Montero (1988) quienes agregan que la capacidad productiva de un sitio poblado por una especie maderable dada y tratada a un turno conocido podría ser determinada directamente a través de mediciones repetidas a lo largo de todo el ciclo productivo fijado, contabilizando el e. e. volumen existente y los extraídos en las intervenciones silvícolas, así como la mortalidad natural que se produzca. Es evidente que el procedimiento anterior es lento y costoso por lo que en la práctica no es utilizado.

#### **4. Métodos de evaluación indirectos**

Estos métodos conducen a la obtención de índices de sitios o productividad a través de análisis de regresión en tres formas diferentes Prodan et al., (1997).

- a. Medición de uno o más factores del medio que se consideren íntimamente relacionados con el crecimiento de los árboles.
- b. Determinación de características propias de los árboles o de los rodales considerados sensibles a la calidad de sitio.
- c. Una combinación de las anteriores.

Por su parte Ortega y Montero (1988) explican más detalladamente estos tipos de métodos debido a la inoperatividad de los métodos directos, sobre todo en especies de turnos medios y largos, clasificándolos en función de la naturaleza de los estimadores indirectos en:

##### **1) Métodos basados en factores extrínsecos**

Los estimadores indirectos utilizados se corresponden con factores ecológicos abióticos (climáticos, edáficos, fisiográficos) o se basan en la vegetación existente en el lugar.

##### **2) Métodos basados en factores intrínsecos o Métodos dendrométricos**

Son aquellos que se basan en la medición de una serie de parámetros dendrométricos característicos de la masa forestal presente.

Cuando se utilizan los factores intrínsecos, la evaluación de la calidad de sitio se realiza normalmente a través del valor que adquiere un índice, que es el valor que toma el atributo o parámetro medido a una determinada edad de la masa, denominada edad típica. Los parámetros que se pueden utilizar para la evaluación dendrométrica son la altura, el área basimétrica o el índice de área foliar.

En este método, el empleo de la edad del arbolado y la altura es muy utilizado, sin embargo, a menudo se da las debilidades de la altura, consistentes en su poco valor biológico y principalmente a su sensibilidad a las intervenciones silviculturales como es el caso del raleo, el cual influye en el cambio de la densidad del rodal, actualmente lo que más se utiliza es la altura dominante, producto a que esta es casi insensible a diferencia de la densidad de los rodales. (Alder, 1980).

Como se ha indicado, estos métodos requieren la medición de una serie de parámetros sobre la masa principal establecida que reflejen la incidencia de los factores ecológicos, por lo que no permiten su utilización en aquellas localidades en las que falta la masa forestal o esta se encuentre muy deteriorada.

##### **5. Tipos de parcelas a emplear para la obtención de los datos**

El desarrollo de una masa se puede considerar como una sucesión de períodos de crecimiento natural separados por intermitentes modificaciones de densidad y estructura de la misma debida fundamentalmente a las claras. En consecuencia será necesario disponer de dos tipos distintos de datos empíricos para el desarrollo de un modelo: los que describen los cambios en las principales variables de la masa durante los períodos de claras y por otro, las modificaciones de esas variables respecto a las claras. Esta información se consigue a partir de parcelas de ensayo cuyas características varían según el objetivo de la investigación. Se pueden diferenciar tres tipos de parcelas: las parcelas permanentes, temporales y las de inventario. Las primeras se mantienen durante largos intervalos de

tiempo durante las cuales se realizan mediciones periódicas, hasta el momento la información derivada representa la base más importante para obtener resultados, sobre el crecimiento y la producción de las masas forestales.

Las parcelas temporales se miden una única vez y reducen el tiempo empleado en la toma de datos aunque a costa de limitar la información obtenida. Las parcelas de inventario se miden dos veces con una etapa de crecimiento entre ambas mediciones y tratan de anular las ventajas de otro tipo de parcelas evitando sus inconvenientes. El empleo de unas u otras depende de la finalidad de la investigación. (Gadow *et al.*, 2001 y Hufe, 2001).

## **6. La altura dominante, índice dendrométrico de productividad.**

La altura de un rodal uniforme a una edad dada, es un buen indicador del potencial productivo de ese tipo de bosque en ese sitio particular. Por eso, la construcción de curvas altura/edad para diferentes clases de sitio, es el primer paso en la construcción de modelos de crecimiento y rendimiento (Alder, 1980).

Según Halaj (1978), la altura es la magnitud que más se utiliza para referirse a la calidad del sitio en bosques homogéneos, según las siguientes razones:

- a. El crecimiento en la altura del rodal es prácticamente independiente del tipo de intervención a que sea sometida. Se puede decir que las diferencias de alturas son insignificantes para iguales edad y sitio, para rodales sometidos a distintas intervenciones de aclareo, a menos que sean extremadamente fuertes. Aún en los casos que esto sea un punto en discusión, puede asegurarse que es la magnitud que menos resulta influida por las intervenciones.
- b. La altura del rodal se relaciona muy estrechamente con la calidad de los sitios. Las curvas de crecimiento en altura de los rodales para los mejores (o peores) sitios, son sistemas de coordenadas con la edad, en los que la altura para determinada edad será la más alta o la más baja.

- c. La altura del rodal depende sólo de forma insignificante del estado de espesura, en comparación con otras magnitudes del rodal como el diámetro medio, el volumen y área basal por hectárea.
- d. La estrecha correlación de dependencia entre la altura y la producción total en volumen hacen de la altura el indicador más exacto de la calidad del sitio. Esta correlación es tan significativa que mediante la altura se puede hacer el cálculo indirecto de la producción en volumen, lo que no es posible con otros indicadores.
- e. La altura del rodal es una magnitud que se puede medir fácilmente.

Todos esos beneficios trae acarreado a la altura como indicador del índice de sitio, sin embargo, la altura promedio de un rodal es usualmente sensitiva no solo a la edad y a la clase de sitio, sino también a la densidad del rodal, por consiguiente, se usa normalmente la altura dominante en la definición de la altura del rodal. La altura del rodal es un caso insensible a las diferencias de densidad de los rodales (Alder, 1980).

La altura dominante llamada también altura tope puede definirse de varias maneras, pero la definición más ampliamente aceptada, es la de altura promedio de los 100 árboles más gruesos en una hectárea (Halmintont, 1975; Alder, 1980; Parde y Bouchon, 1988).

La altura dominante fue usada por primera vez como magnitud de la calidad de sitio por Baur (1879), con vistas a la construcción de tablas de producción, es desde este entonces que se usa como un requisito indispensable en la modelación del crecimiento y rendimiento.

Algunos autores como (Alder, 1980) han reportado que bajo algunas circunstancias en bosques uniformes de los trópicos la altura dominante deja de ser un buen indicador de la clase de sitio, esto ocurre en rodales jóvenes de especies de muy rápido crecimiento, y también con cierta especie que varía notablemente en su crecimiento de altura.

Por su parte Prodan *et al.*, (1997) da como una de las desventajas del uso de la altura dominante, la existencia de desarrollos en área basal muy diferentes para iguales índices

de sitio, por ello, ha recomendando frente a esto, conveniente zonificar primeramente por algún índice de productividad de área basal y, dentro de cada zona, utilizar el índice de sitio como indicador fino de productividad.

En rodales multietáneos, el concepto tradicional de índice de sitio no es aplicable, ya que la relación altura-edad no es estrecha.

### **C. CALIDAD DE SITIO**

La calidad de sitio es uno de los factores más importantes que determinan el crecimiento de los árboles y de las masas forestales, así como la producción de los terrenos. Durante muchos años, el establecimiento de plantaciones forestales ha sido realizado sin tener un conocimiento claro y adecuado de la capacidad productiva de los lugares, ocupando en ocasiones sitios inadecuados.

Como es lógico suponer, en el caso de los terrenos forestales al igual que en los agrícolas, la cantidad y la calidad de los rendimientos producidos depende estrechamente de la capacidad productiva del lugar. En consecuencia, uno de los primeros pasos necesarios para el manejo forestal intensivo es poder determinar la capacidad productiva de los terrenos, (esto es, la calidad de sitio), para diferentes especies alternativas. Esto permitirá establecer, sin lugar a dudas, una comparación de los rendimientos y de su valor potencial, de tal manera que se podrá seleccionar la especie más productiva y valiosa para cada situación. Así, la información del sitio y de los rendimientos permitirá al técnico forestal estimar la cantidad y el tipo de productos a obtener y, además, llevar a cabo decisiones más realistas acerca de las intervenciones que requiere la masa y del momento más oportuno para efectuarlas. Por otra parte, esta información también le permitirá prever los futuros gastos y ganancias asociadas con el manejo intensivo de los rodales.

De acuerdo con Carmean (1975), las ventajas de concentrar el manejo intensivo en los sitios más productivos son:

- Los buenos sitios producen rendimientos más altos y de mejor calidad (Carmean y Boyce, (1974), esto es, una mayor cantidad y una mejor calidad de los productos.
- Los sitios buenos producen árboles de tamaño comercial más rápidamente, acortando las rotaciones y minimizando el interés compuesto de la inversión.
- Las especies maderables más valiosas con frecuencia requieren buenos sitios para su desarrollo.
- Los sitios buenos pueden responder mejor a las prácticas silviculturales intensivas (tales como entresacas, fertilización y drenajes).

De esta manera, los estudios sobre la calidad de sitio, que permitan definir los mejores lugares para una determinada especie y las mejores especies para un determinado lugar, resultan ser un primer paso indispensable para la previsión de los futuros rendimientos y un requisito obligado para el manejo forestal.

La calidad de sitio forestal se entiende como la capacidad productiva de dicho lugar y habitualmente se refiere al volumen de madera producido por una masa forestal cuando llega a la edad del turno. La calidad del sitio tiene entonces una doble utilidad práctica: como herramienta para estimar la producción y como base para construir instrumentos prácticos de gestión de plantaciones forestales comerciales.

El crecimiento de un árbol o de una masa forestal está representado por su respectivo desarrollo, es decir, por el aumento en sus dimensiones: altura, diámetro, área basal y volumen. Este crecimiento, considerado en un período de tiempo determinado se denomina incremento, el cual representa un aumento en la cantidad de tejido acumulado de floema y xilema en forma de corteza y madera respectivamente (Klepac, 1983).

En general, los modelos de crecimiento y rendimiento son modelos simbólicos que representan procesos de la realidad. En manejo forestal, se elaboran con la finalidad de estimar la producción futura, determinar el turno óptimo, realizar análisis financieros, estimar el crecimiento bajo condiciones donde no existen datos, comparar alternativas de



manejo para analizar las mejores opciones de uso de la tierra, simular prácticas silviculturales y sintetizar hipótesis, conocimientos y datos experimentales a una expresión entendible del comportamiento de los bosques (Dykstra, 1984).

Para modelar el crecimiento de árboles y masas forestales, en la actualidad se consideran dos métodos de construcción: los modelos de proceso y los empíricos. Los primeros simulan los procesos biológicos mediante los cuales se elabora la biomasa del organismo, y los segundos, basados en la experiencia. El crecimiento es considerado como la respuesta de un sistema complejo, sobre el que actúa un gran número de variables, pero en pocas de ellas, frecuentemente sólo la edad se considera para el modelaje (Ramírez y Zepeda, 1994). Los modelos de crecimiento y de rendimiento constituyen una herramienta de gran valor para la planificación de las actividades de manejo forestal. El concepto básico del bosque o de una plantación forestal comercial, como fuentes continuas de productos forestales descansa en la capacidad que se tiene para crecer. Los bosques o plantaciones usualmente son manejados para obtener un rendimiento sostenido de productos. Un rendimiento sostenido requiere un nivel de producción constante para una intensidad de manejo particular, lo cual implica que el crecimiento del bosque o plantación debe ser estimado y balanceado con la cosecha. De esta manera el rendimiento sostenido se refiere al rendimiento potencial del bosque o plantaciones (Ramírez y Zepeda, 1994).

Cualquier planeación de la producción forestal debe involucrar la predicción del rendimiento futuro. Las empresas forestales deben saber cuáles son los rendimientos futuros esperados en sus áreas forestales, con el fin de planear la producción de la planta y examinar las posibilidades de expansión (Meyer et al., 1961).

En general, estos modelos se elaboran para efectuar estimaciones confiables del crecimiento y del rendimiento futuro; para generar la información necesaria que permita mantener las cosechas dentro de la capacidad sustentable de los rodales; para comparar alternativas de manejo que permitan analizar las mejores opciones de uso de la tierra; para determinar la edad óptima de cosecha, la programación de las cortas intermedias, la estimación de la producción anual, periódica o total durante el período de rotación y las clases de productos a obtener; para realizar análisis financieros, para explorar opciones de

manejo y alternativas silviculturales; para examinar los impactos del manejo forestal y de la cosecha sobre otros valores del bosque; y, para determinar un régimen de manejo que maximice el volumen maderable o el valor de la producción (Klepac, 1983).

#### **D. GENERALIDADES SOBRE MODELOS DE CRECIMIENTO**

De acuerdo con Zeide (1993), el crecimiento resulta de la interacción de dos fuerzas opositoras: un componente positivo manifestado por la expansión de un organismo que tiende hacia la multiplicación exponencial, este componente está asociado con el metabolismo constructivo o anabolismo. Un componente opositor que representa las restricciones impuestas por factores externos como la competencia por recursos, respiración, estrés, es decir el catabolismo.

En el ámbito forestal, el crecimiento es considerado como una función que depende directamente de los factores del sitio que se encuentran interactuando en el rodal, formulado en términos de tasa de crecimiento e integrada en el tiempo. La forma general de dicha función en un tiempo dado es:

Crecimiento = f (especie, edad, densidad, calidad de sitio).

Alder (1980), considera que el crecimiento es un proceso biológico que involucra dos procesos: uno que impulsa al organismo a aumentar de tamaño mediante la acumulación de la energía bioquímica y, el otro, que frena el crecimiento mediante el gasto de energía para realizar sus funciones fisiológicas. Estos dos procesos son conocidos como los procesos anabólicos y catabólicos respectivamente. Estos procesos se expresan con la relación siguiente:

Crecimiento =  $\frac{1}{t} \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$  o (superficie)-  $\frac{1}{t} \ln \left( \frac{A_2}{A_1} \right)$  (volumen)

Si se conoce la función para determinar la superficie de un organismo (conocer la magnitud de los procesos anabólicos) y la del volumen o biomasa (conocer la magnitud de los procesos catabólicos), es posible obtener la ecuación específica del crecimiento (incremento corriente anual). Bertalanffy en 1957 fue el primero en desarrollar esta

ecuación, la cual, generalmente, se presenta en la forma siguiente (Ramírez y Zepeda, 1994):

$$ICA = \alpha W^m - \beta W$$

Donde:

ICA: Incremento corriente anual

W: Volumen

m: 2/3 y

$\alpha$ ,  $\beta$  : Parámetros a ser estimados.

Desde el punto de vista biológico, el crecimiento de los árboles es resultado de un proceso biológico muy complejo que intercala con la herencia, los factores ambientales y con las prácticas de cultivo, resultando un desarrollo en tamaño de los árboles, como producto de la división y expansión celular.

Aunque varios autores piensan que un proceso tan complejo como el crecimiento, difícilmente puede ser expresado por una ecuación matemática que refleje el fenómeno biológico del árbol; pero visto del manejo silvícola, los resultados son de extremo valor (Amo y Nieto, 1983).

VARIABLES DASOMÉTRICAS COMO LA ALTURA, EL DIÁMETRO NORMAL O EL VOLUMEN, COMO UNA FUNCIÓN DE LA EDAD DEL ÁRBOL, ES UNA RELACIÓN QUE SIGUE UN PATRÓN QUE PUEDE SER REPRESENTADA POR UNA CURVA LOGÍSTICA, QUE A SU VEZ ES DESCRITA POR UNA ECUACIÓN. ESTA CURVA TIENE UN CRECIMIENTO INICIAL LENTO, SEGUIDO DE UNA FASE DE CRECIMIENTO ACCELERADA; OTRA ETAPA EN QUE ESE CRECIMIENTO SE DESACELERA GRADUALMENTE, HASTA QUE EL ORGANISMO DEJA DE CRECER, PERMANECE DE UN MISMO TAMAÑO DURANTE ALGÚN TIEMPO Y FINALMENTE MUERE. A LA PRIMERA DERIVADA DE LA CURVA DE CRECIMIENTO SE LE CONOCE COMO INCREMENTO CORRIENTE Y, A LA RAZÓN ENTRE LA ORDENADA Y LA ABCISA DE LA CURVA DE CRECIMIENTO INCREMENTO SE LE LLAMA INCREMENTO MEDIO. LA CULMINACIÓN DEL INCREMENTO CORRIENTE COINCIDE CON EL PUNTO DE INFLEXIÓN DE LA CURVA DE CRECIMIENTO, MIENTRAS QUE LA CULMINACIÓN DEL INCREMENTO MEDIO OCURRE SIEMPRE DESPUÉS Y CORRESPONDE AL PUNTO DONDE LA TANGENTE DEL ÁNGULO MÁXIMO TRAZADO DESDE EL ORIGEN DE LOS EJES COORDENADOS TOCA A LA CURVA DE CRECIMIENTO; EL INCREMENTO CORRIENTE ES

igual al incremento medio cuando este último culmina (Davis y Johnson, 1987; Ramírez y Zepeda, 1994).

La predicción del rendimiento, es una aplicación importante de los modelos de crecimiento, pero el rendimiento también puede ser estimado por técnicas de simulación. Los modelos de crecimiento facilitan la estimación del rendimiento en rodales homogéneos en varios regímenes de manejo, pero la estimación del estado del bosque, también debe involucrar el espacio y distribución temporal de los rendimientos, por lo que, la estimación del rendimiento puede apoyarse en las técnicas de programación matemática para encontrar la ruta óptima, que maximice el rendimiento sustentable y flujo declinante de la corta (Klepac, 1983).

El crecimiento y rendimiento de un bosque, puede ser modelado a tres niveles básicos (Zepeda, 1990):

- Con modelos de totalidad del rodal
- Con modelos de distribuciones por clases de tamaño
- Con modelos para árboles individuales

Los modelos de totalidad del rodal, se caracterizan porque la solución de las ecuaciones que comprende el sistema, proporcionan la estimación del volumen por unidad de área y la predicción puede ser para estimar el rendimiento actual, el cual no considera la densidad de la proyección futura o rendimiento futuro. Los modelos por clases de tamaños aportan más detalles por simular varias clases dentro del rodal por ejemplo: proyección de tablas a nivel rodal. La aproximación es una premisa en los modelos para el rodal (una clase simple para todos los árboles) y un modelo de árboles individuales (una clase para cada árbol). La mínima entrada requerida para modelos de árboles individuales es una cantidad de árboles dentro del mismo rodal (Klepac, 1983).

Para el manejo del bosque, se requiere además de ecuaciones de crecimiento simples como el volumen, modelos para predecir tamaños; por ejemplo, la altura y el volumen pueden ser

expresados como funciones alométricas del diámetro, y su distribución en tamaños, puede ser estimada con la distribución Weibull (Vanclay, 1995).

Un modelo de crecimiento se considera efectivo si está expresado en función de variables predictoras fáciles de medir, con un coeficiente de determinación relativamente alto, por arriba de 0.8. Mientras menor número de variables predictoras estén implicadas en un modelo, más apropiado es para ser usado; con muchas variables predictoras, el modelo se vuelve muy sensible a las relaciones entre ellas, especialmente, si algunas de esas variables están altamente correlacionadas (Alder, 1980).

Los métodos estáticos de predicción de rendimiento, son aquellos en los cuales el rendimiento se predice directamente como una función de la edad, clase de sitio e historia de la densidad del rodal. Los métodos se consideran estáticos porque las funciones resultantes del rendimiento no permiten variación alguna en la historia de los tratamientos del rodal, excepto dentro de amplias clases de tratamientos de aclareos implícitos en los datos. Los componentes del rendimiento de mayor interés para el administrador forestal son: el volumen y el diámetro promedio. Para conocer el volumen de los rodales, es necesario conocer su número de árboles, la altura y el diámetro promedio (Alder, 1980).

En cuanto al modelaje del crecimiento de especies forestales, (Zepeda, 1990), efectuó una revisión muy completa de las técnicas aplicadas al modelaje, principalmente para árboles de clima templado; siendo escasa su aplicación en la predicción de crecimiento en árboles tropicales.

De acuerdo con Clutter et al. (1983), el modelo de Schumacher es muy utilizado para generar curvas anamórficas de índice de sitio. Este modelo inicialmente se desarrolló para relacionar el volumen con la edad, y parte del supuesto que el crecimiento relativo varíe inversamente con el cuadrado de la edad, que para la altura queda expresado de la forma siguiente:

$$H = \frac{V}{A} * e^{-k * E^2}$$

Donde:

H: Altura de los árboles dominantes y codominates (m)

E: Edad (años)

e: Base de logaritmos naturales

$\square$  o: Parámetro del valor asintótico y

$\square$  l: Parámetro de la tasa de cambio.

## 1. Curvas de crecimiento

Una curva de crecimiento es una representación gráfica de tamaños acumulados, ésta representa la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el período de observación. Así, el crecimiento puede ser considerado como la suma de los incrementos anuales, y el incremento, como la tasa de cambio de ese crecimiento. Debido a lo anterior, la función del incremento corriente anual puede ser obtenida tomando la primera derivada de la función del crecimiento con respecto a la edad. De igual forma, la función del crecimiento puede generarse mediante integración matemática de la función del incremento corriente (Zeide, 1993).

Una curva de crecimiento típica toma generalmente una forma sigmoidea. Empieza en el origen o en un punto fijo, sube lentamente al principio y luego con mayor velocidad. Posteriormente hay un cambio del gradiente (punto de inflexión) de la curva, disminuyendo el incremento, para después moverse asintóticamente hacia adelante a algún valor final, determinado por la naturaleza genética del organismo y de sus limitaciones ambientales (Klepac, 1983).

La curva del incremento corriente inicia en el valor de cero, aumenta lentamente al principio y después rápidamente. Después de un máximo, el incremento disminuye, para posteriormente acercarse asintóticamente a cero. La culminación del incremento en esta curva coincide con el punto de inflexión de la curva de crecimiento (Klepac, 1983).

El rendimiento, por otra parte, se refiere a la cantidad total de madera susceptible de ser cosechada (o realmente cosechada) en un tiempo y en un sitio dado. A diferencia de la

producción, que representa toda la madera inventariable producida en un sitio (sea bruta o neta), el rendimiento es la cantidad total efectiva de producto útil, por eso, el rendimiento de un rodal, puede ser menor o igual que su producción (Zeide, 1993).

La información para generar estos modelos generalmente se obtiene a través de parcelas permanentes ubicadas en los rodales, evaluados desde su establecimiento hasta su cosecha; pero en la práctica tradicional, la información puede ser obtenida a partir de parcelas temporales ubicadas en los rodales de modo tal que se cubra un rango amplio de edades y calidades de sitio (Zeide, 1993).

Las mejores variables independientes para predecir el crecimiento, ya sea en volumen, altura, diámetro o área basal, deben ser seleccionadas mediante un análisis estadístico objetivo, a través del cual se determine que estas variables estén relacionadas individualmente y en forma conjunta con la variable dependiente de interés (Klepac, 1983). El manejo actual de las plantaciones forestales comerciales ha obligado a los especialistas en el tema a generar modelos matemáticos para estimar los índices de sitio (Klepac, 1983).

Las ecuaciones de índice de sitio son herramientas útiles que permiten predecir con bastante exactitud los volúmenes de las especies forestales en función de un número más o menos reducido de parámetros obtenidos de árboles en pie. Sin embargo, la disponibilidad de las mismas para especies latifoliadas es muy reducida (Alder, 1980).

## 2. Curvas de índice de sitio

La metodología utilizada para la construcción de las curvas de índice de sitio consiste en la construcción de series edad-altura dominante construida a partir de los registros dasométricos y dendrométricos obtenidos en terreno. Posteriormente se ajusta la función matemática de Bertalanffy-Richards, denominada corrientemente Chapman-Richards. Para el ajuste, García (1983) propone un método que se basa en el planteamiento de un modelo de ecuaciones diferenciales estocásticas, donde la altura dominante es modelada por una ecuación diferencial a la que se le adiciona una estructura estocástica que representa perturbaciones ambientales y errores de medición. Para el ajuste se utiliza el software

HTMOD, o en su defecto puede utilizarse el SPS.V12.0 que permite el ajuste de cuatro versiones de este modelo.

La característica principal del método radica en que no es necesario que las series de datos pasen por la edad clave, permitiendo así determinar el índice de sitio a partir de árboles jóvenes, lo que genera una buena estimación de la asíntota. Ello se ajusta a la base de datos obtenida, permitiendo probar diferentes formas del modelo, tales como asíntota común para todas las parcelas o asíntotas independientes por parcela, con las curvas pasando por el origen o bien libres, requiriendo como mínimo series de tres mediciones consecutivas para la estimación de los parámetros del modelo de altura. El modelo de Chapman-Richards se muestra en la ecuación [1]:

$$H = a ( 1 - e^{-bt} )^{1/c} \quad [1]$$

Donde:

H = altura dominante (m);

a= parámetro de la asíntota;

b = factor de escala que modifica la tasa de crecimiento;

t = edad (años)

c = parámetro que determina la forma de la curva.

Este modelo, al ser ajustado por la metodología propuesta por García (1983), produce cuatro variaciones. Real (1990) indica que el método presenta una importante ventaja sobre la metodología de regresión no lineal tradicional, ya que permite incluir en el ajuste toda la información de series de crecimiento que cuenten con a lo menos dos observaciones.

### 3. Evaluación y selección de los modelos

Para evaluar las capacidades predictivas de los modelos se realizan pruebas las mismas que consisten en índices de error y sesgo, método de máxima verosimilitud y análisis gráfico de residuos. Así se logra seleccionar el modelo que mejor representa la relación entre



altura dominante y edad en cada sitio forestal. Los errores se obtienen a partir de la raíz cuadrada del error medio cuadrático (ecuación [2]), el error medio absoluto (ecuación [3]), desviación estándar de los residuos (ecuación [4]) y para el sesgo se utiliza la diferencia agregada (ecuación [5]):

$$\text{REMC} = \text{RAIZ} \sum (O_i - E_i)^2 / n \quad [2]$$

$$\text{EMA} = \sum O_i - E_i / n \quad [3]$$

$$\text{DSR} = \sum (R_i - R_{\text{med}})^2 / n \quad [4]$$

$$\text{DIFA} = \sum (O_i - E_i) / n \quad [5]$$

Donde:

$O_i$  = es un valor observado,

$E_i$  = valor estimado

$N$  = es el número total de observaciones.

Una de las metodologías más usadas para clasificar sitios en plantaciones forestales mono específicas, coetáneas, es el 'índice de sitio' (IS) definido, de manera general, como la 'altura mayor' alcanzada por un rodal a una edad predeterminada, llamada edad base (Carmean, 1975, Clutter *et al.*, 1983). La altura mayor del rodal se define como la altura total promedio de una muestra representativa de los árboles más altos (dominantes y codominantes) del rodal, aunque existen otros criterios, tomando en cuenta su distribución espacial en el rodal. Se considera que esta altura es un buen indicador de la productividad potencial de una especie para un sitio en particular. Esta afirmación se basa en la hipótesis de Eichhorn (Fontes *et al.*, 2003) la cual establece que la producción total de un rodal (volumen en pie + volumen extraído en cortas intermedias) óptimamente ocupado es una función de la altura del rodal. Para diferenciar calidades de sitio para una especie dada se debe definir una familia de curvas de IS a partir de la altura dominante observada para una variedad de sitios tan amplia como sea posible.

Tradicionalmente las curvas de IS se han ajustado usando modelos de regresión lineal y no lineal clásicos que asumen normalidad, igualdad de varianzas e independencia de los errores. Tales supuestos pueden ser violados cuando se analizan datos longitudinales. Los modelos mixtos permiten representar apropiadamente la estructura de varianzas-covarianzas asociadas con datos de medidas repetidas (Davidian y Giltinan, 1995; Gregoire *et al.*, 1995; Verbeke y Molenberghs, 2000; Diggle *et al.*, 2002; Littell *et al.*, 2006). Tales modelos mixtos han sido poco utilizados en el área forestal, a pesar de que permiten modelar la estructura de varianzas-covarianzas y así realizar inferencias más precisas.

#### 4. Calidad de sitio

En las ciencias forestales el término ‘sitio’ se utiliza para designar la influencia del ambiente sobre la producción de un bien o servicio del bosque, ya sea madera, forraje o frutos. La calidad de sitio es la capacidad intrínseca que tiene para la producción de un bien y se expresa en términos de la producción de dicho bien (Torres y Magaña, 2001). En plantaciones forestales cuyo propósito es la explotación maderera, la calidad de sitio se define como su potencial para la producción de madera de una especie o un tipo de bosque, considerando que mejores calidades tendrán mayor producción (Clutter *et al.*, 1983). Existen varias técnicas para la clasificación de los sitios. Clutter *et al.* (1983) las dividen en métodos directos y métodos indirectos; para los primeros es necesario que la especie de interés exista o haya existido en esa localidad y se basa en las características propias de la masa forestal de dicha especie.

El segundo grupo relaciona el sitio con características como clima, suelo, topografía, y factores bióticos (Mora y Meza, 2004). Dentro de la primera clasificación, se considera el método conocido como ‘Índice de Sitio’ (IS), donde la altura mayor promedio del rodal es usualmente una medida derivada a partir de la altura total de un número representativo de árboles por unidad de área. La definición más utilizada asume que la altura mayor es la altura promedio de los 100 árboles dominantes y codominantes bien distribuidos espacialmente por ha (Clutter *et al.*, 1983). El método del IS ha sido el más utilizado para determinar la calidad de sitio en plantaciones forestales coetáneas y se basa en los siguientes supuestos: 1) la altura mayor, en un rodal monoespecífico y coetáneo es poco

influenciada por la densidad de la plantación; 2) el crecimiento en altura mayor del rodal sigue un patrón predeterminado; y 3) la altura mayor se correlaciona bien con la producción volumétrica (Clutter *et al.* 1983).

La edad base ( $E_b$ ) es un criterio subjetivo que puede depender de la rapidez de crecimiento de la especie y/o el turno de aprovechamiento. Usualmente se escogen edades próximas al turno (Clutter *et al.*, 1983) o cuando se alcanza el máximo crecimiento medio en altura para la especie (Andenmatten y Letourneau, 1998). Este método implica el desarrollo de un conjunto de curvas que representan patrones de crecimiento en altura en función de la edad, cada una con un valor numérico o cuantitativo asignado, de acuerdo a la altura alcanzada a la  $E_b$ . Dichos patrones se pueden representar con modelos matemáticos flexibles (Grey, 1989). Para ser confiables como instrumentos de predicción, estos modelos deben poseer las siguientes propiedades: a) dar estimaciones no sesgadas del IS con la misma precisión, independientemente de la edad considerada; b) ser invariantes a la edad base y con altura cero a la edad cero; c) la altura a la  $E_b$  debe ser igual a IS; y d) las curvas correspondientes a cada calidad de sitio deberían tener asíntotas estimadas independientemente (Grey, 1989). Este último requisito, aunque se basa en que algunas especies pueden alcanzar diferentes alturas máximas absolutas dependiendo del sitio (p.ej. si los sitios difieren en altitud). Existen tres estrategias o métodos para modelar estas curvas: a) el de la curva guía, b) el de la diferencia algebraica y c) el de predicción de parámetros (Grey, 1989; Clutter *et al.*, 1983).

Los modelos pueden desarrollarse a partir de mediciones de la altura mayor de árboles a diversas edades provenientes de redes de parcelas permanentes, parcelas temporales, o de análisis troncales (Torres y Magaña, 2001; Clutter *et al.*, 1983). El ajuste se hace mediante regresión, donde la altura mayor o una transformación de la misma es la variable dependiente, mientras que la edad (y a veces otras variables) es la independiente. Se selecciona el modelo con mejor ajuste y se usa para generar una familia de curvas que define las categorías de calidad de sitio. Las curvas de la familia pueden ser proporcionales entre sí (anamórficas), poseer diferente forma para cada calidad de sitio pero sin intersectarse (polimórficas disjuntas) o intersectarse (polimórficas no disjuntas; Clutter *et al.*, 1983, Grey, 1989; Avery y Burkhart, 1994). En cualquiera de las formas es posible

reparametrizar los modelos (Scolforo, 1992, García, 2005). Adicionalmente, estos modelos pueden tratarse como determinísticos. El primer caso corresponde a la definición clásica en la que el IS es entendido como la altura observada a la edad base, la cual es una propiedad particular del rodal y es llamada ‘índice de sitio del rodal’. En el segundo caso, se toma en cuenta la variabilidad debida a condiciones climáticas y/o errores de muestreo y medición, que pueden afectar la altura; interpretándose en este caso, el IS, como la altura esperada o más probable a la edad base, considerando todos los rodales hipotéticos que podrían crecer en ese sitio. Según este enfoque, se hablaría del ‘índice de sitio del sitio’ (García, 2005).

Los modelos de índice de sitio incluyen uno o más parámetros a estimar. Puede haber parámetros globales comunes a todos los rodales o parcelas, y parámetros locales específicos para cada rodal o parcela que dependen del sitio en particular (García, 2005). Dichos parámetros pueden estimarse con técnicas como la predicción de parámetros (Clutter *et al.*, 1983), el método de las ecuaciones diferenciales (García, 2005) y el ajuste de modelos lineales y no lineales con efectos mixtos (Hall y Bailey, 2001; Gregoire *et al.*, 1995). Este último es el enfoque adoptado en este trabajo.

#### a. Modelos Mixtos

Los estudios de índice de sitio para especies forestales se han basado en el ajuste de observaciones repetidas provenientes de parcelas permanentes de crecimiento o de análisis troncales, a partir de las cuales se han generado curvas mediante análisis de regresión utilizando como base modelos del tipo

$$y = f(X, \beta, \epsilon) \quad (1)$$

Donde:

$y$ : vector de observaciones (variable dependiente)

$f$ : una función lineal o no lineal en los parámetros

$X$ : matriz de diseño (variables independientes)

$\beta$  : vector de parámetros de efectos fijos

$\epsilon$  : vector de errores.

El uso de funciones no lineales tiene la ventaja de que pueden ser derivadas de consideraciones teóricas y sus parámetros pueden reflejar aspectos de interés para el modelador o usuario, pues permiten parametrizar mejor las distintas etapas del crecimiento (Schabenberger y Pierce, 2002). En ambos casos, se asume que se distribuye normal e independientemente con media de 0 y matriz de varianzas constantes  $\Sigma$  (Draper y Smith, 1981; Kuehl, 2001; Balzarini et al., 2005). Las aplicaciones de estos modelos con supuestos simplistas para la componente de error, no tienen en cuenta que en el caso de medidas longitudinales (repetidas en tiempo sobre una misma unidad experimental), la estructura de la matriz de varianzas y covarianzas de los errores no se corresponde con tales asunciones. El hecho de realizar mediciones repetidas sobre el mismo sujeto implica que no es posible aleatorizar el factor tiempo, por lo que las medidas tomadas sobre un mismo individuo están autocorrelacionadas y, por tanto, no se cumple el supuesto de independencia de los errores (Schabenberger y Pierce, 2002). Asimismo, los modelos de crecimiento en altura se caracterizan por un incremento de las varianzas de los errores con la edad. Estos problemas conllevan deficiencias en la precisión y capacidad de predicción de los modelos ajustados bajo los supuestos clásicos.

Los modelos lineales y no lineales mixtos surgen de incorporar efectos aleatorios, diferentes de los asociados con el término de error, por lo que podrían estar representados por

$$y = f(X, \beta, b, \epsilon) \quad (2)$$

donde  $y, f, X, \beta$  y  $\epsilon$  son como en la Ec. 1, y  $b$ : vector de efectos aleatorios que modela la heterogeneidad entre sujetos.

A diferencia de los modelos lineales y no lineales clásicos, los modelos de efectos mixtos permiten modelar la estructura de los errores en datos provenientes de mediciones longitudinales. La modelización considera al efecto local ( $q$ ) como una variable aleatoria que varía dentro de poblaciones de rodales (efectos aleatorios de rodal).

Se asume que  $q$  tiene una cierta distribución de probabilidad en la población y que el valor observado del parámetro en la muestra proviene de esa distribución; sin embargo en ocasiones, cuando tiene una varianza grande, el valor del parámetro puede estar muy alejado (García, 2005). Varios problemas de estimación del crecimiento de árboles y rodales han sido tratados empleando modelos mixtos (Lappi y Bailey, 1988; Hall y Bailey 2001; Durán *et al.*, 2002; Hall, 2004; Calegario *et al.*, 2005; Gregoire *et al.*, 1995). La mayor ventaja de los modelos mixtos es la generalidad en la inferencia, así como la posibilidad de modelar la correlación entre observaciones del mismo rodal (Calegario *et al.*, 2005). La estimación de parámetros en estos modelos se hace por métodos de verosimilitud.

#### **b. Criterios de selección de modelos**

Los modelos mixtos se ajustan por máxima verosimilitud (MV) ó máxima verosimilitud restringida (MVR), por lo que la comparación de los modelos se puede realizar con la prueba de razón de máxima verosimilitud (PRMV) definida como

$$\text{PRMV} = -2\log \text{Verosimilitud (MR)}$$

$$-2\log \text{Verosimilitud (MC)}$$

Donde:

MR: modelo reducido y MC: modelo completo. El valor calculado de PMV se compara con una  $\chi^2_{(k_{mc}-k_{mr}, \alpha)}$ , donde  $k_{mc}$ : número de parámetros del modelo completo,  $k_{mr}$ : número de parámetros del modelo reducido, y  $\alpha$ : nivel de significación. Si  $\text{PMV} > \chi^2_{(k_{mc}-k_{mr}, \alpha)}$  entonces el modelo correcto es el completo, en caso contrario debe seleccionarse el reducido (Schabenberger y Pierce, 2002; Balzarini *et al.*, 2005; Calegario *et al.*, 2005). Otros criterios utilizados son el criterio de información de Akaike [AIC=  $-2\log (MV) + 2(q+p)$ ], el criterio de información de Akaike corregido [AICC=  $-2\log (MV) + 2n(p+q+1)/(n-(p+q)-2)$ ] y el criterio de información bayesiano de Schwartz (BIC=  $-2\log (MV) + 2(p+q) \log (n)$ ), donde MV: máxima verosimilitud,  $q$ : número de parámetros de la estructura de covarianza,  $p$ : rango de la matriz de diseño X, y  $n$ : número de observaciones. En todos estos criterios, a menor valor, mejor será el ajuste (Calegario *et al.*, 2005).

#### **IV. MATERIALES Y METODOS**

##### **A. CARACTERISTICAS DEL LUGAR**

###### **1. Localización**

La investigación se realizo en tres haciendas: Mireya del Pilar del cantón Valencia de la provincia de los Ríos, hacienda Zulema del cantón Buena Fe provincia de los Ríos y en la hacienda Santa Elena cantón Santa Rosa provincia de Santa Elena.

###### **2. Ubicación geográfica (Cuadro 1)**

Hacienda	Altitud msnm	Latitud	Longitud
Mireya del Pilar	500-650	93184756	694768
Zulema	450-600	99258558	665876
S Elena	100-300	9616823	884568

###### **3. Características climáticas (Cuadro 2)**

Hacienda	T media anual °c	P media anual mm	H relativa %	Clasificación Ecológica (según Holbrigge)
M del Pilar	21-22	2000-2500	75	bh_T
Zulema	22-24	2590-2630	70	bh_T
S Elena	24	800-1200	85	bms_T

##### **B. MATERIALES Y EQUIPOS**

###### **1. Materiales**

Hipsómetro, GPS, brújula, cinta métrica, pala, pico, fundas plásticas, etiquetas, lápiz, libreta de apuntes, cámara fotográfica, calculadora, computadora, papel de impresión, pintura spray.

## 2. **Materiales de oficina**

Calculadora, computadora, escuadras, reglas, lápiz, cinta, carta topográfica.

## C. **METODOLOGIA**

### 1. **Ajustar el modelo matemático idóneo para la obtención de las curvas del índice de sitio en *Tectona grandis***

Se procedió de la siguiente manera.

#### a. **Selección de Parcelas**

Se utilizó el registro de 87 parcelas de muestreo permanente, ubicadas en las tres haciendas de las cuales 49 parcelas están asentadas en la hacienda Santa Elena, 16 de la hacienda Zulema y 22 de la hacienda Mirella Del Pilar. Estas unidades son circulares de 500 m<sup>2</sup>, Estas haciendas fueron escogidas por tener mayor área de teca sembrada, las que fueron establecidas en el año 1997 y cuentan actualmente con 5 mediciones realizadas en los años 2004, 2006, 2007, 2009 y 2010.

#### b. **Información dasométrica**

La información se recopiló de la base de datos que tiene la empresa, a través de los trabajos de monitoreo realizados por técnicos forestales en donde las variables medidas son el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura (h) de los árboles.





### c. Información ecológica

#### 1) Profundidad efectiva(PE)

Se construyó calicatas de 1m cuadrado de superficie, de profundidad variable, el indicador de límite de profundidad fueron las raíces del árbol, se lo midió con cinta métrica, y sus resultados están dados en cm.



#### 2) Espesor del horizonte (EH)

Esta variable se determinó mediante observación del cambio de color de la capa de materia orgánica presente en los sitios de muestreo. Para la determinación de esta variable nos valimos de las calicatas realizadas.



### 3) Pedregosidad del terreno

Se determino de forma visual la una en el exterior y la otra en el interior del perfil los resultados obtenidos se expresaron en porcentajes.

#### **d. Elaboración de mapas**

1) Con el fin de ubicar las parcelas dentro de las haciendas se elaboro un mapa con la ayuda del GPS.

#### **e. Análisis del suelo**

1) La caracterización física y química de los suelos se realizo en el laboratorio de la FRN de la ESPOCH, donde previo a la recolección de muestras en las respectivas haciendas, se determino parámetros como: textura, densidad aparente, porosidad y pH del suelo.

#### **f. Construcción de curvas de índices de sitio**

El método de construcción de curvas de índice de sitio empleado fue el de regresión anidada Bailey y Cluster (1974) y descrito por (Alder, 1980) como método de regresión jerárquica con estimador de pendiente (intercepto) común donde la ordenada en origen es diferente para cada parcela.

Utilizando dos modelos denominados con restricciones en los que se fuerza a que la altura dominante coincida con el índice de calidad de estación a la edad de referencia más empleados en la literatura. Los modelos empleados son los que aparecen a continuación:

$$y = \beta_0 e^{(\beta_1/t^{\beta_2})} \quad (\text{Schumacher, 1965}) \quad [\text{Ecuación 1}]$$

$$y = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 t)}]^{\beta_2} \quad (\text{Chapman, 1959; Richards, 1961}) \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde:

y: variable dependiente que en nuestro caso sería la altura dominante ( $H_0$ )

e: base del logaritmo neperiano constante  $e=2.71828$

$\beta_1, \beta_2$  y  $\beta_0$  parámetros a ser ajustados

t: variable independiente edad

Para usar regresión lineal fue necesario linealizar estas ecuaciones multiplicando en ambos lados de la ecuación logaritmos de base e (ln) resultando:

$$\text{Schumacher: } \ln H_0 = \ln \beta_0 + \beta_1 / t^{\beta_2} \quad [\text{ecuación 3}]$$

$$\text{Chapman-Richards: } \ln H_0 = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln(1 - e^{(-\beta_2 * t)}) \quad [\text{ecuación 4}]$$

Una vez que la curva de crecimiento de la altura promedio ha sido ajustada, pueden trazarse curvas de la misma forma que pasen por diferentes valores del índice de sitio; si este índice de sitio IS se define como la altura dominante del rodal a una edad  $t_i$ , el parámetro  $\beta_{0i}$  de la curva que pase por este sitio,  $\beta_{0i}$  estará dado por:

$$\text{Schumacher: } \beta_{0i} = \ln IS - \frac{\beta_1}{t_i^{\beta_2}}$$

$$\text{Chapman-Richards: } \beta_{0i} = \ln IS - \beta_1 \ln[1 - e^{(-\beta_2 * t)}]$$

## **2. Determinación de los patrones de crecimiento e incremento en altura y diámetro de la especie para cada sitio.**

### **a. Modelación del crecimiento**

La ecuación que genera la curva de crecimiento, es la función integral, de tal manera que la curva del incremento corriente anual (ICA), se obtiene tomando la primera derivada de las funciones originales con respecto a la edad. Para generar la curva del incremento medio anual (IMA), se dividió la ecuación integral entre la edad (Tabla.1).

Tabla. 1- Ecuaciones de Incremento Corriente Anual e Incremento Medio Anual.

Modelo	Incremento corriente anual (ICA)	Incremento medio anual (IMA)
Schumacher	$ICA = \beta_2 \beta_1 t^{(-\beta_1 - 1)} * y$	$IMA = \frac{y}{t}$
Chapman-Richards	$ICA = \frac{\beta_1 \beta_2 e^{-\beta_1 t}}{(1 - e^{-\beta_1 t})} y$	$IMA = \frac{y}{t}$

Donde: y= Función integral; ICA= Incremento Corriente Anual; IMA= Incremento Medio Anual; t = Edad (años);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  parámetros de regresión.

El punto de culminación del ICA, se obtiene tomando la segunda derivada de la función original con respecto a la edad, o bien, obteniendo la primera derivada de la función del ICA con respecto a la edad, igualando respectivamente a cero y despejando la edad, por su parte el punto de culminación del IMA, se obtuvo tomando la primera derivada de la función del IMA con respecto a la edad, igualando a cero y despejando la edad.

Para el procesamiento de la información y presentación de los resultados se emplean las facilidades del siguiente software:

Tabulador electrónico Microsoft Excel

Procesador de texto Microsoft Word

Procesador estadístico SPSS 15.para Windows

Procesador matemático Derive 5.02.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. MODELO MATEMÁTICO IDÓNEO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DEL ÍNDICE DE SITIO EN TECA

Del análisis descriptivo de la altura dominante seccionando la última medición realizada se obtiene el siguiente cuadro.

**Cuadro 3.** Comportamiento de la altura dominante ( $H_0$ ) en función de las diferentes edades a las que fueron medidas las plantaciones.

Hacienda	Estadísticos		Error típ.
Santa Elena	Media	15,87	0,47
	Mediana	16,40	
	Varianza	10,59	
	Desv. típ.	3,25	
	Mínimo	9,00	
	Máximo	21,80	
Zulema	Media	23,00	1,06
	Mediana	22,75	
	Varianza	17,93	
	Desv. típ.	4,23	
	Mínimo	14,80	
	Máximo	31,35	
Mireya del Pilar	Media	20,70	0,57
	Mediana	20,05	
	Varianza	7,21	
	Desv. típ.	2,69	
	Mínimo	16,50	
	Máximo	25,40	

Como se constata en el cuadro 3, el mejor comportamiento en relación a calidad de sitio lo presentan los sitios de la hacienda Zulema con los valores superiores de las medidas de tendencia central tales como el máximo, la media y la mediana.

Estos resultados mostrados en este cuadro, se encuentran en correspondencia con lo reportado para la especie en plantaciones por Keogh, (1980) para el área del Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia; por Henao (1982) también en Colombia; Pérez (2005) en Costa Rica y por Jaca y García (2005) en Cuba.

Una representación del comportamiento de la altura dominante para las 5 mediciones efectuadas se muestra en el gráfico 1.

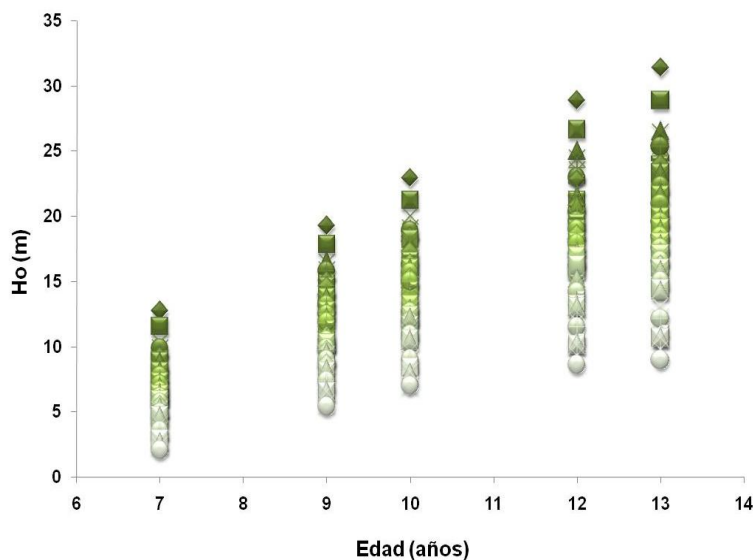


Gráfico 1. Comportamiento de la Ho en las mediciones efectuadas.

Así se puede identificar tres calidades de sitios a partir de la obtención de los rangos de Ho, seleccionando la última medición, con un rango de 22,4 m el que se divide entre tres, permitiendo los intervalos en los cuales se pueden agrupar los sitios en tres calidades inicialmente; así la calidad de sitio I estaría en el intervalo de 9 - 16,42 m, la calidad de

sitio II de 16,5 - 23,9 m y la calidad de sitio III de 24 - 31,4 m, mediante esta información se obtiene el histograma por calidad de sitio el cual se muestra en la grafico 2.

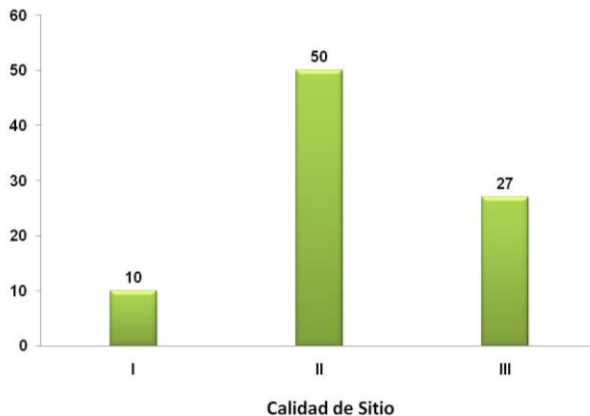


Gráfico 2. Histograma de calidades de sitios del área.

### 1. Curvas de índice de sitio anamórficas

Como resultado del ajuste de los modelos seleccionados Schumacher y Chapman-Richards con diferentes valores tentativos de  $\beta_2$ , se obtuvo que los modelos a los que les corresponde el menor valor de la suma de cuadrados de los residuos o desviaciones (SCE) son: Schumacher con  $\beta_2=2$  y Chapman-Richard con  $\beta_2=0,291$ . Comparando la bondad de ajuste para cada uno de ellos se obtiene el cuadro 4.

**Cuadro 4.** Bondad de ajuste de los modelos analizados

No	Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> corr	Sx
1	Schumacher $\beta_2=2$	,864	,747	,746	,22201
2	Chapman-Richard $\beta_2=0,291$	,865	,747	,747	,22185

Ambos modelos presentaron un comportamiento más que considerable de su coeficiente de correlación de Pearson según lo descrito por Hernández (1997), así como de sus estadísticos de ajuste como la varianza de factores comunes o coeficiente de determinación



( $R^2$ ). Estos valores son superiores a los encontrados por otros autores empleando el método de regresión jerárquica con pendiente común, Bailey y Cluster (1974) y el modelo de Schumacher utilizado en este estudio, dentro de los cuales se encuentran los trabajos de Greijmans y Lammens (1992) con un cociente de determinación  $R^2 = 0,62$  (62,66 %) y por Vallejos (1996) de  $R^2 = 0.8732$  (87,32 %) ambos en Costa Rica.

Pareciese que ambos modelos pueden hasta el momento ser utilizados por su similitud en relación a los valores de la bondad de ajuste; a partir de la siguiente etapa se puede definir claramente el de mejor comportamiento predictivo.

En el cuadro 5 se representa la relación entre las variables de los dos modelos como resultado del análisis de varianza.

**Cuadro 5.** Relación significativa de las variables de los modelos analizados

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	57,231	1	57,231	1162,859	,000
	Residual	19,342	393	,049		
	Total	76,572	394			
2	Regresión	57,202	1	57,202	1160,520	,000
	Residual	19,371	393	,049		
	Total	76,572	394			

Se puede apreciar en el cuadro 5 la existencia de una relación significativa entre las variables ( $\alpha < 0,05$ ), el estadístico F contrasta la hipótesis nula de que el valor poblacional de R es cero.

Continuando con el análisis, ahora con los coeficientes de la regresión se representa su significancia estadística para cada modelo en el cuadro 6.

**Cuadro 6.** Significación de los coeficientes de regresión

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta	B	Error típ.
1	$\ln \beta_0$	3,127	,021		151,199	,000
	$\beta_1$	9,122	,268	,865	34,101	,000
2	$\ln \beta_0$	3,352	,027		126,436	,000
	$\beta_1$	-73,637	2,162	-,864	-34,066	,000

El valor t y sus niveles críticos (sig) en esta tabla contrastan la hipótesis nula de que los coeficientes valen cero en la población  $\alpha < 0,05$ , la pendiente poblacional de la recta de regresión es significativamente distinta de cero lo que nos permite concluir que entre la altura dominante y la edad existe una relación lineal significativa.

Deteniéndose en el análisis del comportamiento de la pendiente del modelo de Schumacher  $\beta_1$ , posee un valor muy grande lo cual eleva la curva mucho más abruptamente que las curvas de los valores reales, esto está dado a que este valor  $\beta_1$  es demasiado grande para las mediciones obtenidas en este trabajo, pero además este valor no corresponde con lo reportado en la literatura para la especie, aun cuando haya presentado el menor valor de la suma de cuadrado de los residuales. Según Alder (1980) debe encontrarse normalmente entre 2 y 7 y refiere comprobar si difiere ampliamente de estos valores como es el caso para la corrección del error. Siendo así se selecciona el modelo de Chapman-Richard por ser más conservador en relación al ajuste de los datos analizados. Sustituyendo los coeficientes no estandarizados en la ecuación se obtuvo:

$$\ln H_0 = \ln 3,104 + 9,288 * \ln (1 - e^{(-0,291 * t)}) \quad \text{o} \quad H_0 = 22,295 * [1 - e^{(-0,291 * t)}]^{9,288}$$

Después del ajuste de la ecuación media se determinan las curvas para cada índice de sitio, al tener como pendiente común  $\beta_2 = 9,288$  se define el índice de sitio como la altura dominante de la masa a una edad índice de 25 años, esto se encuentra en correspondencia

con la tendencia de el incremento experimentado por la especie y con lo reportado por la literatura sobre los turnos para la especie por Jaca y García (2005) y Pérez (2005).

Se propone además diferenciar las calidades de sitio con intervalos de 3 metros, lo que coincide con los empleados para la especie por Miller (1969) para Trinidad y Tobago; por Keogh (1980) para toda la Cuenca del Caribe, Centro América, Colombia y Venezuela. Los índices de sitio propuestos en las condiciones de estudio son los siguientes: 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33; para los que se obtienen los siguientes valores de  $\beta_0$  en el cuadro 7.

**Cuadro 7.** Valores de la constante u origen para cada IS

IS	Ln ( $\beta_0$ )
15	2,70
18	2,88
21	3,04
24	3,17
27	3,29
30	3,4
33	3,49

Sustituyendo los valores de  $\beta_0$  en la ecuación para cada curva de índice de sitio, puede calcularse los valores de  $H_0$  para valores seleccionados de edad, resultando el siguiente sistema de ecuaciones para la calidad de sitio:

**Cuadro 8.** Sistema de ecuaciones de IS para  $H_0$

Calidad de sitio	IS	Ecuación
VII	15 m	$H_0=14,9*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$
VI	18 m	$H_0=17,88*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$
V	21 m	$H_0=20,87*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$

IV	24 m	$Ho=23,85*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$
III	27 m	$Ho=26,83*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$
II	30 m	$Ho=29,81*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$
I	33 m	$Ho=32,79*[1-e^{(-0,291*t)}]^{9,288}$

Estas ecuaciones quedan representadas en el haz de curvas de índices de sitios del gráfico 3

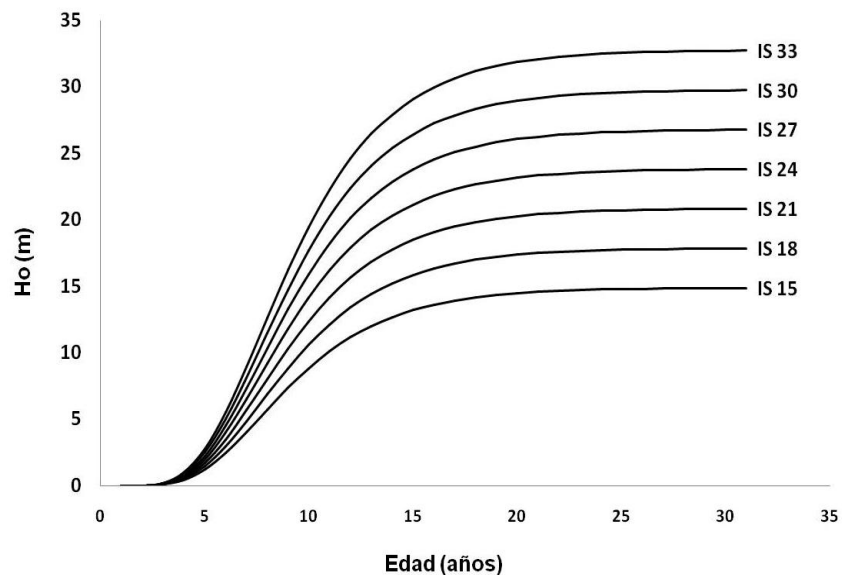


Gráfico 3. Haz de curvas de índices de sitios para la altura dominante

Una vez elaborado este sistema de ecuaciones, el índice de sitio para una observación seleccionada de altura-edad viene dado por la siguiente ecuación en correspondencia con lo descrito por Alder (1980) y Barrero (2010):

$$IS = Ho * \left[ \frac{1 - e^{-0,291 * ti}}{1 - e^{-0,291 * t}} \right]^{9,288}$$

Esta ecuación permite conocer para una observación dada de altura dominante-edad con un  $t_i$  fijado, el índice de sitio al cual pertenece el área, facilitando el trabajo de ordenación para la clasificación de los sitios.

La tendencia del crecimiento mostrada en estas curvas es similar a los reportados para la especie por Miller (1969) para Trinidad y Tobago; por Keogh (1980) para toda la Cuenca del Caribe, Centro América, Colombia y Venezuela; por Friday (1990) en Puerto Rico; por Mora y Meza (2003) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica y por Jaca y García (2005) en Cuba, lo cual justifica el modelo escogido y garantiza el resultado obtenido. Este sistema permite la comparación con otras especies y dentro de la misma especie para otras regiones.

Las curvas de crecimiento obtenidas permiten clasificar las plantaciones en su productividad potencial y diferenciar claramente 6 calidades por lo que se considera que este estudio es de utilidad en la aplicación de los manejos silvícolas así como en el establecimiento del turno para el aprovechamiento final.

El (anexo 1) muestra la correlación existente entre las diferentes variables a través de la matriz de correlación de Pearson, donde se observa una correlación aceptable entre las variables altura dominante ( $H_0$ ), con el resto de las variables dasométricas, lo que deja demostrado el supuesto de que  $H_0$  para *Tectona grandis* en plantación es el indicador más efectivo de la calidad de sitio, este resultado concuerda con el obtenido por Keogh (1980) para toda la Cuenca del Caribe, Centro América, Colombia y Venezuela; por Friday (1990) en Puerto Rico; por Mora y Meza (2003) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica y por Jaca y García (2005) en Cuba. Se observa una correlación de la edad, con el  $\bar{d}_{1.30}$ , N/ha y  $\bar{h}$  favorecida por las características de la muestra, de poseer series de crecimiento provenientes de parcelas permanentes. Así resultó que para la variable  $\bar{h}$  el modelo con mejor ajuste fue el lineal, en función de la altura dominante. Al analizar el supuesto de independencia serial se obtuvo un valor del estadístico de Durbin-Watson de 1,697, lo cual significa que los residuos son independientes entre sí para una mayor confiabilidad de los datos y del modelo; en relación a la bondad de ajuste se acepta la significancia estadística

de los coeficientes no estandarizados (anexo 2), además de poseer los mayores valores de los coeficientes de correlación  $R=0,867$  de determinación  $R^2=0,753$  y el menor error típico de la estimación  $S_x=0,2341$  representado por la siguiente ecuación:

$$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * H_0} \right)^{1,928}$$

Luego se sustituyó el modelo de crecimiento de la altura dominante en este modelo siguiendo la metodología propuesta por Barrero (2010), donde las ecuaciones resultantes para cada índice de sitio quedan de la siguiente manera:

**Cuadro 9.** Sistema de ecuaciones de IS para h

IS	Ecuación
15 m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 4,9 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$
18 m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 7,88 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$
21m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 10,87 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$
24 m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 13,85 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$
27 m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 16,83 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$
30 m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 19,81 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$
33 m	$\bar{h} = 20,7 * \left( -e^{-0.1 * \left( 22,79 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288 \right)} \right)^{1,928}$

Para el caso específico del diámetro del árbol medio el modelo obtenido tuvo como bondad de ajuste un coeficiente de determinación  $R^2=0,913$  y los menores valores de errores

típicos de los coeficientes estimados (anexo 4), se sustituyeron los coeficientes estimados y la ecuación queda representada de la manera siguiente:

$$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * Ho} \right)^{1,82}$$

Analizando el comportamiento de los residuos se obtuvo (anexo 3) donde no se percibe tendencia alguna de asociación de los mismos, pudiéndose agrupar perfectamente entre paralelas lo que indica homogeneidad de varianza validado su utilización; el modelo obtenido emplea solamente una variable predictora  $H_o$ , con la cual se encuentra fuertemente correlacionada, la misma es fácil de obtener al contar ya con un modelo en función de la edad dependiente del sitio. Al sustituir la ecuación de la altura dominante para un índice de sitio el sistema de ecuaciones queda representado de la forma siguiente:

**Cuadro 10.** Sistema de ecuaciones de IS para DAP

IS	Ecuación
15 m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (4,9 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$
18 m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (7,88 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$
21m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (10,87 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$
24 m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (13,85 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$
27 m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (16,83 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$
30 m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (19,81 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$
33 m	$DAP = 22,47 * \left( -e^{-0.1 * (22,79 * [1 - e(-0,291 * t)]9,288} \right)^{1,82}$

Este sistema de ecuación para el DAP, permite tener un conocimiento para cada índice de sitio del diámetro del árbol medio, lo cual favorecerá tomar decisiones acerca del manejo forestal, ya sea en la aplicación de tratamientos silviculturales como raleo, así como establecer turnos forestales obteniendo de esta forma una alta rentabilidad en la especie.

## B. DETERMINACIÓN DE LOS PATRONES DE CRECIMIENTO E INCREMENTO EN ALTURA Y DIÁMETRO DE LA ESPECIE PARA CADA SITIO.

Sustituyendo los coeficientes no estandarizados  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , las ecuaciones obtenidas del incremento medio anual y del incremento corriente anual para el modelo de Chapman-Richards emanado, se obtiene el Gráfico 4.

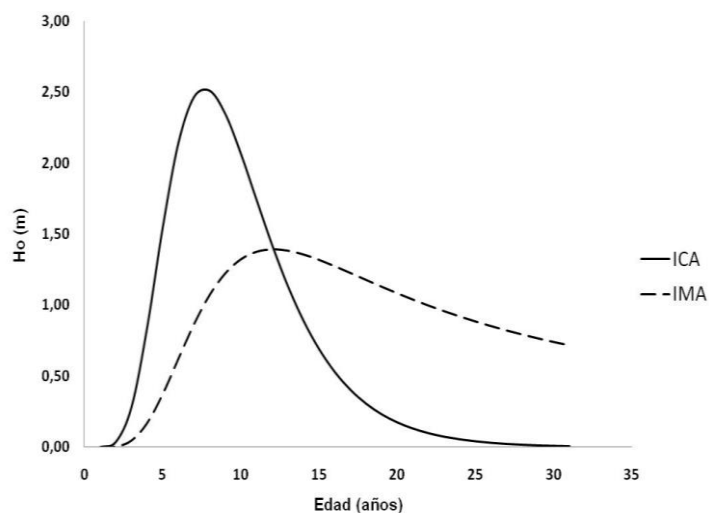


Gráfico 4. Patrones de crecimiento e incremento de altura dominante.

Como se observa en la gráfico 4 el punto del máximo incremento medio anual en altura dominante que experimenta la especie es de 1,39 cm y lo logra a los 12 años de edad, así como el punto de máximo incremento periódico anual es de 2,51cm a los 8 años de edad.



Este comportamiento de los incrementos medio anual (IMA) y corriente anual (ICA) representados en esta figura, es el resultado de solo contar con mediciones hasta los trece años de edad, por lo que no se puede ser concluyente en este resultado hasta obtener mediciones superior a esta edad, solo se recomienda analizar esta tendencia hasta los 13 años de edad. Así estos resultados se corresponden con los encontrados por Miller (1969), Friday (1990) y Mora y Meza (2003).

De la misma forma se obtuvo el gráfico del incremento medio anual y del incremento corriente anual para el modelo de Chapman-Richards con la altura media.

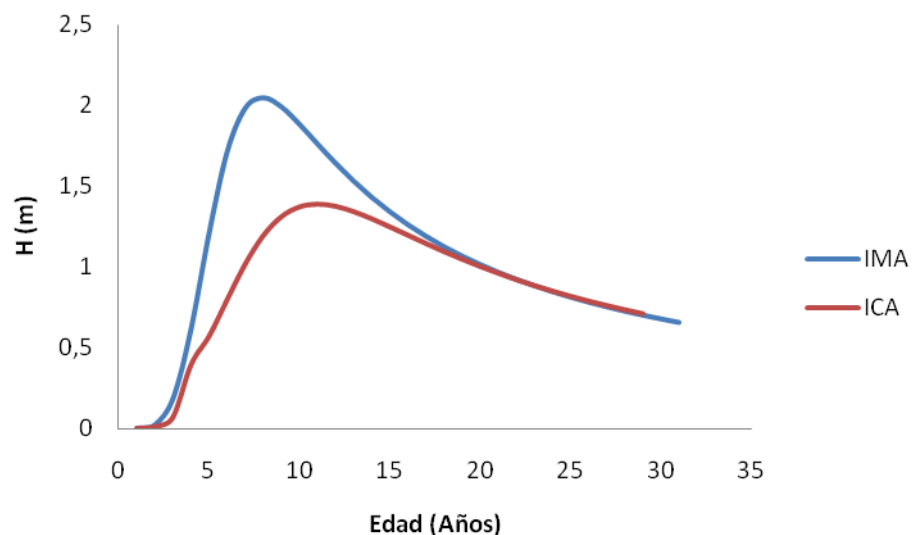


Gráfico 5. Patrones de crecimiento e incremento de altura media.

Como se observa en la gráfico 5, el punto del máximo incremento medio anual en altura media de la especie es de 2,04 cm y lo alcanza a los 8 años de edad, así como el punto de máximo incremento corriente anual es de 1,37 cm a los 12 años de edad.

Para el caso del DAP del árbol el comportamiento del IMA y del ICA se representa en el gráfico 6.

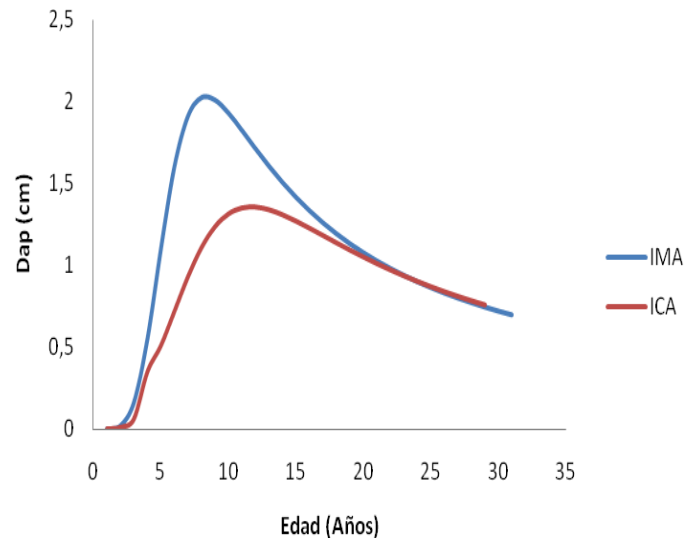


Gráfico 6. Patrones de crecimiento e incremento para el DAP.

En el grafico 6, observamos que el punto máximo del incremento medio anual es de 2,04 cm a los 8 años de edad, de igual manera se observa que el incremento corriente anual llega a su máximo desarrollo a los 12 años y es de 1,37 cm.

Como se decía anteriormente estos datos no pueden ser definitivos tanto para la altura media como para el DAP ya que no se cuenta con más mediciones de la especie sino solo hasta los trece años de edad

### **C. MODELO DE ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE SITIO EN BASE A FACTORES AMBIENTALES**

Identificados los índices de sitios como la altura dominante a una edad dada se analizó su correlación con las variables ambientales obteniéndose el cuadro 11.

**Cuadro 11.** Matriz de Correlación de Spearman

	EH	PE	Ph	M O	NH4	P	K	CaO	MgO	T	Est r	Da	Dr	Por	Est
R	,39 4 **	,42 5 **	-,691 **	,63 5 **	,691 **	,36 5 **	- ,691 **	- ,365 **	-,691 **	,69 6 **	,69 6 **	,69 6 **	,63 0 **	,696 **	,630 **
Si g	,00 0	,00 0	,000	,00 0	,000	,00 1	,000	,001	,000	,00 0	,00 0	,00 0	,00 0	,000	,000
N	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

En la cuadro 11, se observa una correlación significativa con todas las variables ambientales analizadas, mostrando valores considerados de los coeficientes de correlación con las variables Ph, K, MgO, textura, estructura, densidad aparente, densidad real, porosidad y estabilidad estructural, con valores medianamente fuertes superiores a 0,6 esto brinda una medida de efecto del ambiente sobre la estructura de bosque ya sea en altura o por clases diamétricas.

Analizando las correlaciones de las variables y sus transformaciones se logró un modelo sin intercepto con un ajuste aceptable para el IS en función de las variables ambientales: PH, materia orgánica (MO), Estabilidad estructural, inverso de la pedregosidad (invPE) y inverso de espesor del horizonte A (invEHA) resultando la bondad de ajuste del mismo en el cuadro 12.

**Cuadro 12.** Bondad de ajuste del modelo propuesto con factores ambientales.

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> corregida	Error típ. de la estimación
,988	,975	,974	2,48123

El mejor ajuste se obtuvo con este modelo el que posee el mejor comportamiento de sus coeficientes de determinación, determinación corregido y el menor error de estimación, siendo considerables al explicar solamente la proporción al 97% de la variable dependiente, la variable predictora valido en este caso al existir poca variabilidad de estas variables en una misma hacienda a una misma edad (desviación típica muy baja) anexo 5. En la cuadro 13. Se puede percibir la existencia de una relación significativa entre las variables ( $\alpha < 0,05$ ), el estadístico F contrasta la hipótesis nula de que el valor poblacional de R es cero.

**Cuadro 13.** Significación del análisis de regresión en base a factores ambientales.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	20087,238	5	4017,448	652,556	0
Residual	504,832	82	6,156		
Total	20592,069	87			

Continuando con el análisis, ahora con los coeficientes de la regresión se representa su significancia estadística para cada modelo en la cuadro 14.

**Cuadro 14.** Significación de los coeficientes de la regresión en base a factores ambientales.

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estand	t	Sig.
	B	Sx	Beta	B	Sx
$\beta_1$	0,574	0,223	0,238	2,573	0,012
$\beta_2$	1,096	0,283	0,239	3,877	0
$\beta_3$	3,836	0,725	0,572	5,288	0
$\beta_4$	5,966	1,726	0,86	3,456	0,001
$\beta_5$	-8,516	2,65	-0,883	-3,214	0,002

El valor t y sus niveles críticos (sig) en esta tabla contrastan la hipótesis nula de que los coeficientes valen cero en la población  $\alpha < 0,05$ , la pendiente poblacional de la recta de regresión es significativamente distinta de cero.

Analizando los residuos anexo 6, no se percibe una tendencia específica, pudiéndose agrupar en una banda lo cual denota homogeneidad de varianza así como aleatoriedad supuestos que fortalecen y validan el modelo obtenido.

Sustituyendo los coeficientes no estandarizados de la regresión se obtiene el siguiente modelo:

**Cuadro 15.** Determinación de los coeficientes(a,b)

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta	B	Error típ.
Ph	0,574	0,223	0,238	2,573	0,012
MO	1,096	0,283	0,239	3,877	0
Estabilidd	3,836	0,725	0,572	5,288	0
invEHA	5,966	1,726	0,86	3,456	0,001
invPe	-8,516	2,65	-0,883	-3,214	0,002

$$IS = 0,574Ph + 1,096MO + 3,836Est + 5,9661 \frac{1}{EHA} - 8,5161 \frac{1}{PE}$$

Este modelo nos permite ubicar teniendo un conocimiento de las variables ambientales correlacionadas con el IS la calidad de sitio a la que pertenece y ubicarla en el has de curvas obtenidos en el grafico 3.

No es casualidad que la profundidad del suelo haya sido de las variables que se correlacionan con el IS, ha sido la misma las más empleada en la obtención de índices de

productividad sobre la base de factores ambientales, así se encuentran los modelos obtenidos por Contreras y Peters (1982) para plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* en la provincia de Valdivia en Chile sobre la base de un coeficiente de correlación de 0,86 y por Cox (1982)

#### D. INDICE DE SITIO

##### 1. Sitios aptos para la producción de *Tectona grandis* tomando como referencia los estudios realizados

De acuerdo a la presente investigación y con los valores de la  $H_0$  promedio de cada una de las haciendas en estudio y se determinó la calidad de sitio a la cual pertenecen, descrito en el cuadro 16.

Cuadro 16. IS de las haciendas forestales analizadas

HACIENDAS	INDICE DE SITIO	CALIDAD DE SITIO
Mireya	25,47	II
Santa Elena	19,564	IV
Zulema	28,287	I

Analizando el cuadro 16 y sustituyendo los valores dentro del haz de curvas de índices de sitio de la figura tres tenemos que; la hacienda que presenta el mejor comportamiento para el desarrollo óptimo de la teca es Zulema Chaune con un IS de 28,287 que está dentro de la calidad de sitio I, la hacienda Mireya del Pilar también presenta un valor alto, 25,470 y está considerado de acuerdo al estudio dentro de la calidad de sitio II, La hacienda Santa Elena tiene un valor de IS de 19,564 y está considerado como un sitio de calidad IV, los resultados obtenidos en esta investigación no pueden ser determinantes, ya que se analizaron datos solo hasta los trece años de edad, de igual manera se recomienda también analizar otros parámetros como manejo, para poder concluir con más precisión y hacer un análisis

económico, de esta manera ver si es rentable sembrar en sitios con características como los que presenta la hacienda Santa Elena.

Cuadro 17. IS de las haciendas forestales con plantaciones de teca

<b>HACIENDAS</b>	<b>INDICE DE SITIO</b>	<b>CALIDAD DE SITIO</b>
<b>Casa Vinces</b>	26,547	I
<b>Lastenia</b>	22,104	III
<b>San Alejandro</b>	30,145	I
<b>San Simón</b>	26,718	II

De igual manera se reemplaza los valores del Ho para el resto de haciendas que no fueron analizadas, pero que tienen áreas plantadas de teca, en las que hemos obtenido las diferentes calidades de sitio; La hacienda Casa Vinces con un IS de 26.547 a los 12 años, y San Alejandro con un IS de 30,14 a los 13 años, están ubicadas dentro de la calidad de sitio I, San Simón con un IS de 26,71 a los 13 años, y se clasifica dentro de la calidad de sitio II, y Lastenia con un IS de 22,10 a los 13 años, y esta dentro de la calidad de sitio III por lo tanto podemos decir que estas haciendas son lugares que se consideran que tienen buenas características para el desarrollo de la especie de acuerdo al estudio realizado

## VI. CONCLUSIONES

- A. El sistema de curvas de índices de sitio permitió diferenciar las plantaciones en siete calidades, fijados estos para los valores 15, 18, 21, 24, 27, 30 y 33 metros a la edad de 25 años y determinadas por el valor de la altura dominante.
- B. El modelo matemático obtenido en la investigación ( $H_0=22,295*[1-e(-0,291*t)]9,288$ ) conjuntamente con las calidades de sitio establecidas nos permitió graficar el haz de curvas de índice de sitio y observar de esta manera la tendencia de crecimiento de la teca.
- C. La tendencia de crecimiento de la teca en este estudio fue similar a lo reportado para la especie por Keogh (1980) para toda la cuenca del caribe, Centro América, por Friday (1990) en Puerto Rico, y por Jaca y Garcia (2005) en Cuba, por lo que garantiza el resultado obtenido, lo cual permitirá la comparación de la especie para otras regiones.
- D. El punto de máximo incremento anual en altura dominante que experimenta la especie es de 1,39 cm y lo alcanza a los 12 años de edad así como el punto de máximo incremento periódico anual es de 2,51cm a los 8 años de edad.
- E. El empleo de la altura dominante como el indicador de la edad dependiente del sitio permitió la obtención de modelos de DAP y H lo cuales facilitan tomar decisiones sobre tres aspectos de vital importancia en la producción forestal: fijación de turnos, permanencia de la especie o su sustitución por especies más tolerantes a condiciones extrema y cambio en los esquemas de regímenes de manejos implementados hasta el momento.
- F. El modelo de índice de sitio de mejor ajuste sobre la base de los factores ambientales PH, materia orgánica (MO), Estabilidad (Est), inverso de la pedregosidad (invPE) y inverso de espesor del horizonte A (invEHA), resulto ser el polinomio:



$$IS = 0,574Ph + 1,096MO + 3,836Est + 5,9661 \frac{1}{EHA} - 8,5161 \frac{1}{PE}$$

- G. El modelo del índice de sitio determinado en este estudio va a ser de gran ayuda para la determinación de las calidades de sitio en las diferentes haciendas unas ves determinadas las variables ambientales.

## VII. RECOMENDACIONES

- A. Aplicar los modelos y ecuaciones generados dentro de la región de estudio para masas coetáneas y puras de *Tectona grandis*.
- B. Continuar las mediciones de las parcelas permanentes para incluir las mediciones con edades superiores y así perfeccionar el modelo de crecimiento de altura dominante generado en este trabajo.
- C. Llevar a cabo estudios de índice de sitio considerando otras variables como son la temperatura y la precipitación.
- D. Para realizar un plan de manejo forestal es recomendable considerar los índices de sitio de una plantación
- E. Se recomienda a la Compañía Reybanpac Reybanano del Pacífico realizar el análisis de las variables ambientales en las diferentes haciendas, para de esta manera concluir con el estudio y determinar cuáles son los sitios más aptos para la producción de *Tectona grandis* tomando como referencia esta investigación.

## VIII. RESUMEN

La presente investigación propone: Determinar el índice de sitio en tres plantaciones de *Tectona grandis* de la Compañía Reybanpac Reybanano del Pacífico C.A, ubicada en la provincia de Los Ríos ; se tomaron datos de 87 parcelas en tres haciendas, para el estudio se tomo en cuenta 2 criterios; ecológico y dasométrico, los modelos empleados fueron los de (Shumacher, 1965)  $y = \beta_0 e^{(\beta_1/t^{\beta_2})}$  y (Chapman, 1959; Richards, 1961)  $y = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 t)}]^{\beta_2}$  de los cuales el modelo seleccionado para la presente investigación fue el de (Chapman, 1959; Richards, 1961) por ser más conservador en relación al ajuste de los datos analizados. Se determina un sistema de ecuaciones para la  $H_0$ , de la que se obtiene la fórmula general para calcular el IS en base al criterio

dasométrico en relación altura-edad;  $IS = H_0 * \left[ \frac{1 - e^{-0,291 * ti}}{1 - e^{-0,291 * t}} \right]^{9,288}$  Identificados los IS

como la  $H_0$  a una edad dada se analizó su correlación con las variables ambientales, como la textura, estructura, EHA, PE, pH, materia orgánica, lo cual origino la siguiente fórmula

$$IS = 0,574Ph + 1,096MO + 3,836Est + 5,9661 \frac{1}{EHA} - 8,5161 \frac{1}{PE}. \quad \text{Los IS}$$

determinados para las tres hacienda en estudio son: Zulema Chaune un IS de 28,2871 que se encuentra dentro de la calidad I, Mireya del Pilar con un IS de 25,469 que pertenece a la calidad de sitio II, Y Santa Elena que tiene un IS de 19,5635 el cual esta dentro de la calidad de sitio IV. Se concluye que las haciendas Zulema Chaune y Mireya del Pilar son sitios óptimos para el desarrollo de la teca, de igual manera la tendencia de crecimiento de la teca en este estudio fue similar a lo reportado para la especie por Keogh (1980) por lo que garantiza el resultado obtenido, lo cual permitirá la comparación de la especie para otras regiones.

## IX. SUMMARY

This research proposes: To determine the site index in three plantations of *tectona grandis* of the Reybanpac Reybanano Pacific Company located in the Rios province; 87 plots data were taken in three plantations, for the study two criteria were considered: ecological and dasometric, the used models were (Shumacher, 1965)  $y = \beta_0 e^{(\beta_1/t^{\beta_2})}$  y (Chapman, 1959; Richards, 1961)  $y = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 t)}]^{\beta_2}$  as the most conservative in regard to the adjustment of the analyzed data. An equations system for Ho is determined, from which we obtain the general formula to calculate IS in the height – age dasometric criteria;

$$IS = Ho * \left[ \frac{1 - e^{-0,291 * ti}}{1 - e^{-0,291 * t}} \right]^{9,288}$$
 . Once the IS have been identified like Ho in a determined

age their relationship with the environmental variables was analyzed, such as: texture, structure, EHA, PE, Ph, organic material, which originated the formula

$$IS = 0,574Ph + 1,096MO + 3,836Est + 5,9661 \frac{1}{EHA} - 8,5161 \frac{1}{PE}$$
 . The determined IS

for the three studied haciendas are: Zulema Chaune IS an the 28,469 is which is in the quality category I, Mireya del Pilar with a 25,469 IS it is in the quality category II and Santa Elena is a 19,5635 IS, it is in the quality category IV. We conclude that the haciendas Zulema Chaune and Mireya del Pilar are optimal sites for the *tectona grandis* development, just as the trend growth of *tectona grandis* in this study was similar to the reported for the species Keogh (1980) by this the results are guaranteed, which will allow comparison of the species for other regions.

## X. BIBLIOGRAFIA

1. Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol.2: predicción del rendimiento. Estudios FAO: Montes, 22 (2).
2. Álvarez O, P. A, Varona J.C. 1988. Silvicultura. Ciudad de la Habana: Editorial Pueblo y Educación; 354pp.
3. Bailey, R.L. and J.L. Clutter. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. Forest Science 20(2): 155-159.
4. Barrero, H. 2010. Modelo integral de crecimiento, perfil del fuste, grosor de corteza y densidad de la madera de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari. Estudio de caso EFI Macurije. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias forestales, Universidad de Pinar del río Cuba.
5. Betancourt A (1987): Silvicultura especial de árboles maderables tropicales. Segunda Edición. Editorial Científico Técnica Madrid. España. pp 251-279.
6. Bobkó, A y Aldana, E (1981): Ordenación de Montes. Partes 1 y 2. 134 p.
7. Bruce, D. y Schumacher, F. 1965. Medición Forestal. Editorial Herrero. México D.F. Traducido por Ramón Palazón y José Meza. 474 p.
8. Camacho, M. 1993. Desarrollo de un sistema preliminar de clasificación de sitios para Teca (*Tectona grandis*), Melina (*Gmelina arborea*) y Pochote (*Bombacopsis quinatum*) aplicable en la Zona Chorotega, Guanacaste, Costa Rica: Informe de práctica de especialidad. ITCR, Cartago, Costa Rica. 16-32p.
9. Clutter, J; Forston, J; Pienaar, L; Brister, G; Bailey, R (1983): Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons.

10. Contreras, C; Peters, R (1982): Índices de sitio para pino de oregón en la provincia de Valdivia y sus relaciones con sitios para Pino insigne. Actas: evaluación de la productividad de sitios forestales: Universidad austral de Chile.
11. Cox, F (1982): Índices de productividad en la evaluación de la calidad de sitio. Actas: evaluación de la productividad de sitios forestales: Universidad austral de Chile.
12. Dupuy, B.; Maître H.; N'Guessan Kanga, A. 1999. Table de production du teck (*Tectona grandis*): l'exemple de la Côte d'Ivoire. Bois et forêts des tropiques, 261(3): 7-16.
13. Fors, A. J. (1967): Manual de Silvicultura. 4a Edición. Instituto del Libro. Habana. 149p.
14. Friday, K. S. (1990). Site Index Curves for Teak (*Tectona grandis* L.) in the Limestone Hill Region of Puerto Rico. TRI Working Paper No. 14. Tropical Resources Institute, Yale School of Forestry and Environmental Studies.
15. Friday, K. S. 1987. Site index curves for Teak. Commonwealth Forestry Review 66(3): 239-253.
16. Greijamns, M.; Lammens, E. 1992. Preliminar local growth and yield tables for *Tectona grandis* (construction and a comparison with other tables). Thesis, International Agricultural College Larenstein Velp. Netherlands. 44 p.
17. Henao, H. 1982. Estudio de rendimientos y rentabilidad en una plantación de Teca (*Tectona grandis* L. F.) del departamento de Córdoba, Colombia. Crónica Forestal y del medio ambiente 2(1-2): 1-78. Medellín, Colombia.
18. Hernández, R; Fernández, C; Baptista, P. 1997. Metodología de la investigación. MCGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO, S.A. de C.V.

19. Horne, J. E. M. 1962. Growth Rates in the Timber Plantations of Western Nigeria. Nigerian For. Info. Bull. (New Series) No. 12. Lagos: Federal Printing Division. Federation of Nigeria.
20. Jaca, D y García, I (2005). Tabla de producción para plantaciones de *Tectona grandis* en la EFI Guisa, Granma. Memorias de II DEFORS, La Habana Cuba.
21. Keogh, R. M. 1980. Teca (*Tectona grandis* Linn., F.): cuadro provisional de la clasificación de sitios para el Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia. IUFRO/MAB/Forest Service Symposium: Wood production in the Neotropics via plantations. 8 - 12 September, 1980. Río Piedras, Puerto Rico.
22. Keogh, R. M. 1980. Teca (*Tectona grandis* Linn., F.): cuadro provisional de la clasificación de sitios para el Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia. IUFRO/MAB/Forest Service Symposium: Wood production in the Neotropics via plantations. 8 - 12 September, 1980. Río Piedras, Puerto Rico.
23. Keogh, R. M. 1988. Growth rates of Teak in the Caribbean-Central American Region. Personal communication.
24. Lamb, A. 1957. Teak (Trinidad). Tropical Silviculture, Vol. II FAO, Forestry and Forest Products Studies, No. 13 Rome. 179-186 p.
25. MAG-DGF. 1984. Mapas preliminares de áreas óptimas para el cultivo de cinco especies forestales de Costa Rica: memoria explicativa. San José, Costa Rica. 10p.
26. Marten, K. D. 1988. Replay to Friday's paper in Commonwealth Forestry Review, 66 (3), 1987.
27. Meredieu, C. 1998. Croissance et branchaison du Pin Laricio (*Pinus nigra* Arnold ssp. (Poiret) Maire): Élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la

prevision de caractéristiques des arbres et du bois.Thèse présentée l'Université Claude Bernard-Lyon I pour Diplôme de doctorat.

28. Miller, A.D. 1969. Provisional Yield Tables for Teak in Trinidad. Trinidad Government Printery. 21 p.
29. Mora, F y Mesa, M. 2003.Comparación del crecimiento en altura de la Teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo.22p
30. Mora, F. 1992. Criterios para clasificar los terrenos ocupados con plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis* Linn.). II Congreso Forestal Nacional, 25, 26 y 27 de noviembre, San José, Costa Rica. 58-60p.
31. Pérez,D. 2005.Stnd growth scenarios for tectona grandis plantations in Costa Rica. Academic dissertation,University of Helsink 75 p.
32. Proaño, E. A. 2007. Identificación de la calidad de sitio, utilizando el incremento medio anual en un cultivo de rebrote de Teca en la hacienda Tecal Robusta. Tesis de grado previo a la obtención de título de ingeniero agropecuario. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil Ecuador.
33. Rodríguez, M y Arteaga, B. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Mtnez) andrese, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol 11(001): 39-44.
34. Sablón, M. 1980. Dendrología. CUPR. Facultad de Agronomía y Forestal. Unidad Docente de Ingeniería Foresta. Cajálbana. 119p.
35. Schumacher, F.X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. Journal of Forestry 37(11):819-820.



36. Seth, S. K. et al. 1964. Yield and Stand Tables for Plantation Teak (*Tectona grandis* Linn. F.). Indian Forest Records (New Series), Silviculture 9 (4). 151-216 p.
37. Torres, J.M. 2001. Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigaciones forestales. *Agrociencia* 35: 87-98 p.
38. Vallejos, O. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variable fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L. F., *Bombacopsis quinatum* (jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 147 p.
39. Vásquez, W.; Ugalde, L. 1994. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinata* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 12-44p.
40. Weaver, P. L. & J. K. Francis. 1990. The performance of *Tectona grandis* in Puerto Rico. *Comm. For. Rev.* 69 (4): 313-323.

## XI. ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de correlación de Pearson de las variables dasométricas

Dap	Correlación de Pearson	1	,914(**)	,882(**)	,853(**)	,724(**)	-,276(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0
	N	435	435	435	435	435	435
H	Correlación de Pearson	,914(**)	1	,941(**)	,812(**)	,720(**)	-,205(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0
	N	435	435	435	435	435	435
Ho	Correlación de Pearson	,882(**)	,941(**)	1	,763(**)	,773(**)	-,130(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0,007
	N	435	435	435	435	435	435
G	Correlación de Pearson	,853(**)	,812(**)	,763(**)	1	,639(**)	-,208(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0
	N	435	435	435	435	435	435
Edad	Correlación de Pearson	,724(**)	,720(**)	,773(**)	,639(**)	1	-,219(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0
	N	435	435	435	435	435	435
N/ha	Correlación de Pearson	-,276(**)	-,205(**)	-,130(**)	-,208(**)	-,219(**)	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0,007	0	0	0
	N	435	435	435	435	435	438

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

### Anexo 2. Resumen del modelo (b)

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> correg	Error típ.
1	,867(a)	,753	,752	,23416

a Variables predictoras: (Constante), in 0.1

b Variable dependiente: Indap.

## ANOVA

Modelo		Suma d cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	72,201	1	72,201	1316,81	,000(a)
	Residual	23,741	433	0,055		
	Total	95,942	434			

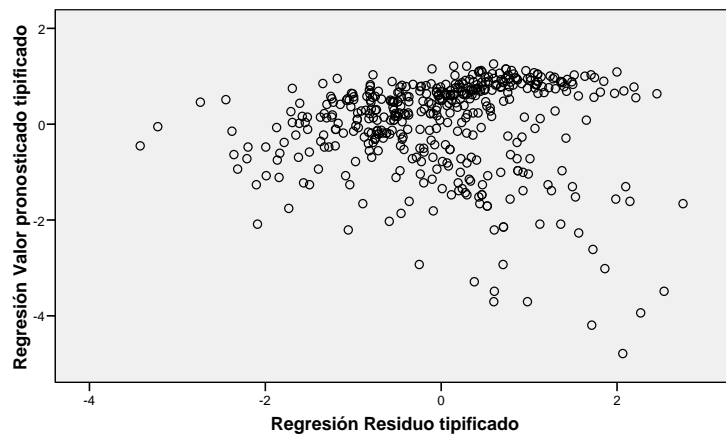
## Coeficientes (a)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.
		B	Error típ.	Beta	B	Error típ.	
1	$\ln \beta_0$	3,112	0,02			158,649	0
	$\beta_1$	1,482	0,041	0,867		36,134	0

## Anexo 3. Gráficos de dispersión

## Gráfico de dispersión

Variable dependiente: Indap



**Anexo 4.** Resumen del modelo (b)

Modelo	R	R <sup>2</sup>	R2 corregida	Error típ. de la estimación
1	,913(a)	,834	,833	,22490

ANOVA (b)

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	109,768	1	109,768	2170,109	,000(a)
	Residual	21,902	433	,051		
	Total	131,670	434			

Coefficientes(a)

Modelo		Coeficientes no est		Coeficientes est	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta	B	Error típ.
1	$\ln \beta_0$	3,030	,019		161,772	,000
	$\beta_1$	1,828	,039	,913	46,584	,000

## Anexo 5. Descriptivos

HACIENDA			Estadístico	Error típ.
EHA	Santa Elena	Media	,5151	,03321
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior ,4483 Límite superior ,5819	
		Media recortada al 5%	,5101	
		Mediana	,4500	
		Varianza	,054	
		Desv. típ.	,23248	
		Mínimo	,18	
		Máximo	,94	
		Rango	,76	
		Amplitud intercuartil	,37	
		Asimetría	,441	,340
		Curtosis	-,801	,668
	Zulema	Media	,8425	,04917
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior ,7377 Límite superior ,9473	
		Media recortada al 5%	,8428	
		Mediana	,8500	
		Varianza	,039	
		Desv. típ.	,19669	
		Mínimo	,58	
		Máximo	1,10	
		Rango	,52	

		Amplitud intercuartil	,31	
		Asimetría	,038	,564
		Curtosis	-1,814	1,091
	Mirreya del Pilar	Media	,8873	,03846
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	,8073	
		Límite superior	,9672	
		Media recortada al 5%	,8892	
		Mediana	,8400	
		Varianza	,033	
		Desv. típ.	,18037	
		Mínimo	,62	
		Máximo	1,12	
		Rango	,50	
		Amplitud intercuartil	,38	
		Asimetría	-,060	,491
		Curtosis	-1,143	,953
PE	Santa Elena	Media	,6708	,03689
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	,5966	
		Límite superior	,7450	
		Media recortada al 5%	,6704	
		Mediana	,6000	
		Varianza	,067	
		Desv. típ.	,25821	
		Mínimo	,25	
		Máximo	1,10	

	Rango	,85	
	Amplitud intercuartil	,45	
	Asimetría	,286	,340
	Curtosis	-,978	,668
Zulema	Media	1,0669	,05568
	Intervalo de Límite confianza para la inferior media al 95%	,9482	
	Límite superior	1,1855	
	Media recortada al 5%	1,0693	
	Mediana	1,1050	
	Varianza	,050	
	Desv. típ.	,22270	
	Mínimo	,75	
	Máximo	1,34	
	Rango	,59	
	Amplitud intercuartil	,37	
	Asimetría	-,121	,564
	Curtosis	-1,771	1,091
Mirreya del Pilar	Media	1,0945	,03163
	Intervalo de Límite confianza para la inferior media al 95%	1,0288	
	Límite superior	1,1603	
	Media recortada al 5%	1,0995	
	Mediana	1,1000	
	Varianza	,022	
	Desv. típ.	,14835	
	Mínimo	,84	

Ph	Santa Elena	Máximo	1,26	
		Rango	,42	
		Amplitud intercuartil	,28	
		Asimetría	-,660	,491
		Curtosis	-,644	,953
		Media	6,6898	,01020
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	6,6693	
		Límite superior	6,7103	
	Media recortada al 5%	6,7000		
	Mediana	6,7000		
	Varianza	,005		
	Desv. típ.	,07143		
	Mínimo	6,20		
	Máximo	6,70		
	Rango	,50		
	Amplitud intercuartil	,00		
	Asimetría	-7,000	,340	
	Curtosis	49,000	,668	
Mirreya del Pilar	Media	6,0636	,04859	
	Intervalo de confianza para la media al 95%			
	de			
	Límite inferior	5,9626		
	Límite superior	6,1647		
	Media recortada al 5%	6,0763		
	Mediana	6,2000		
	Varianza	,052		
	Desv. típ.	,22792		



		Mínimo	5,70	
		Máximo	6,20	
		Rango	,50	
		Amplitud intercuartil	,50	
		Asimetría	-1,097	,491
		Curtosis	-,887	,953
MO	Santa Elena	Media	1,8571	,05714
		Intervalo de Límite confianza para la inferior media al 95%	1,7422	
		Límite superior	1,9720	
		Media recortada al 5%	1,8000	
		Mediana	1,8000	
		Varianza	,160	
		Desv. típ.	,40000	
		Mínimo	1,80	
		Máximo	4,60	
		Rango	2,80	
		Amplitud intercuartil	,00	
		Asimetría	7,000	,340
		Curtosis	49,000	,668
NH4	Santa Elena	Media	9,2469	,04694
		Intervalo de Límite confianza para la inferior media al 95%	9,1526	
		Límite superior	9,3413	
		Media recortada al 5%	9,2000	
		Mediana	9,2000	
		Varianza	,108	
		Desv. típ.	,32857	

		Mínimo	9,20	
		Máximo	11,50	
		Rango	2,30	
		Amplitud intercuartil	,00	
		Asimetría	7,000	,340
		Curtosis	49,000	,668
	Mirreya del Pilar	Media	11,7727	,09719
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	11,5706	
		Límite superior	11,9748	
		Media recortada al 5%	11,7475	
		Mediana	11,5000	
		Varianza	,208	
		Desv. típ.	,45584	
		Mínimo	11,50	
		Máximo	12,50	
		Rango	1,00	
		Amplitud intercuartil	1,00	
		Asimetría	1,097	,491
		Curtosis	-,887	,953
P	Santa Elena	Media	38,5429	,05714
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	38,4280	
		Límite superior	38,6578	
		Media recortada al 5%	38,6000	
		Mediana	38,6000	
		Varianza	,160	

		Desv. típ.	,40000	
		Mínimo	35,80	
		Máximo	38,60	
		Rango	2,80	
		Amplitud intercuartil	,00	
		Asimetría	-7,000	,340
		Curtosis	49,000	,668
	Mirreya del Pilar	Media	38,8000	1,06904
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		Límite inferior	36,5768	
		Límite superior	41,0232	
		Media recortada al 5%	38,5222	
		Mediana	35,8000	
		Varianza	25,143	
		Desv. típ.	5,01427	
		Mínimo	35,80	
		Máximo	46,80	
		Rango	11,00	
		Amplitud intercuartil	11,00	
		Asimetría	1,097	,491
		Curtosis	-,887	,953
K	Santa Elena	Media	169,0592	,74082
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		Límite inferior	167,5697	
		Límite superior	170,5487	
		Media recortada al 5%	169,8000	
		Mediana	169,8000	

		Varianza	26,892	
		Desv. típ.	5,18571	
		Mínimo	133,50	
		Máximo	169,80	
		Rango	36,30	
		Amplitud intercuartil	,00	
		Asimetría	-7,000	,340
		Curtosis	49,000	,668
	Mirreya del Pilar	Media	120,2455	4,72324
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	110,4229	
		Límite superior	130,0680	
		Media recortada al 5%	121,4727	
		Mediana	133,5000	
		Varianza	490,797	
		Desv. típ.	22,15394	
		Mínimo	84,90	
		Máximo	133,50	
		Rango	48,60	
		Amplitud intercuartil	48,60	
		Asimetría	-1,097	,491
		Curtosis	-,887	,953
CaO	Santa Elena	Media	2,1020	,00204
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		de		
		Límite inferior	2,0979	
		Límite superior	2,1061	
		Media recortada al 5%	2,1000	

		Mediana	2,1000	
		Varianza	,000	
		Desv. típ.	,01429	
		Mínimo	2,10	
		Máximo	2,20	
		Rango	,10	
		Amplitud intercuartil	,00	
		Asimetría	7,000	,340
		Curtosis	49,000	,668
	Mirreya del Pilar	Media	2,0091	,06803
		Intervalo de confianza para la media al 95%	1,8676	
		Límite inferior		
		Límite superior	2,1506	
		Media recortada al 5%	2,0268	
		Mediana	2,2000	
		Varianza	,102	
		Desv. típ.	,31909	
		Mínimo	1,50	
		Máximo	2,20	
		Rango	,70	
		Amplitud intercuartil	,70	
		Asimetría	-1,097	,491
		Curtosis	-,887	,953
MgO	Santa Elena	Media	,3496	,00041
		Intervalo de confianza para la media al 95%	,3488	
		Límite inferior		
		Límite superior	,3504	

		Media recortada al 5%	,3500	
		Mediana	,3500	
		Varianza	,000	
		Desv. típ.	,00286	
		Mínimo	,33	
		Máximo	,35	
		Rango	,02	
		Amplitud intercuartil	,00	
		Asimetría	-7,000	,340
		Curtosis	49,000	,668
	Mirreya del Pilar	Media	,3164	,00486
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		Límite inferior	,3063	
		Límite superior	,3265	
		Media recortada al 5%	,3176	
		Mediana	,3300	
		Varianza	,001	
		Desv. típ.	,02279	
		Mínimo	,28	
		Máximo	,33	
		Rango	,05	
		Amplitud intercuartil	,05	
		Asimetría	-1,097	,491
		Curtosis	-,887	,953
Da	Mirreya del Pilar	Media	1,2500	,02054
		Intervalo de confianza para la media al 95%		
		Límite inferior	1,2073	

			Límite superior	1,2927	
			Media recortada al 5%	1,2495	
			Mediana	1,2000	
			Varianza	,009	
			Desv. típ.	,09636	
			Mínimo	1,10	
			Máximo	1,40	
			Rango	,30	
			Amplitud intercuartil	,20	
			Asimetría	,878	,491
			Curtosis	-,807	,953
Dr	Mirreya	del	Media	2,5409	,01458
	Pilar				
			Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior 2,5106	
				Límite superior 2,5712	
			Media recortada al 5%	2,5371	
			Mediana	2,5000	
			Varianza	,005	
			Desv. típ.	,06838	
			Mínimo	2,50	
			Máximo	2,65	
			Rango	,15	
			Amplitud intercuartil	,15	
			Asimetría	1,097	,491
			Curtosis	-,887	,953
Porosida	Mirreya	del	Media	48,9091	,45063
d	Pilar				
			Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior 47,9719	

confianza para la inferior media al 95%		
	Límite superior	49,8462
Media recortada al 5%		48,9899
Mediana		48,0000
Varianza		4,468
Desv. típ.		2,11365
Mínimo		44,00
Máximo		52,00
Rango		8,00
Amplitud intercuartil		4,00
Asimetría		,264
		,491
Curtosis		,136
		,953

**Anexo 6.** Dispersión de los Residuos del modelo de IS en función de las variables ambientales.

