

TEMA 15: CALIDAD DE SITIO e INDICE DE SITIO

Por: Enrique Wabo

1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por SITIO: a) el espacio físico en donde crece o puede crecer un rodal; y b) los factores climáticos, edáficos y bióticos asociados a esa área (Clutter et al, 1983). A mejores condiciones del sitio para el crecimiento de una especie, mayor es su potencial de producción. Este potencial de producción se conoce como Calidad de Sitio. Como existen distintas definiciones de Calidad de Sitio, nosotros adoptamos la siguiente: “*potencial de producción de madera de un área específica para una especie determinada*”.

Los métodos de evaluación de la calidad de sitio se dividen en Directos e Indirectos, aunque los especialistas no se ponen de acuerdo en los contenidos de cada una de estas dos divisiones. Por lo tanto adoptamos el criterio de Clutter et al (1983), que los define de la siguiente manera:

- **Métodos Indirectos:** evalúan la calidad de sitio a través de los factores del medio ambiente, incluida la vegetación, pero con exclusión de la especie forestal de interés.
- **Métodos Directos:** evalúan la calidad de sitio a través de alguna característica de los individuos de la especie de interés, cuando crecen en el sitio bajo estudio. Uno de estos métodos es el Índice de Sitio, que veremos con cierto grado de detalle.

2 FUNDAMENTOS DEL ÍNDICE DE SITIO Y DE LAS CURVAS DE ÍNDICE DE SITIO

Como fuera expresado, los métodos directos evalúan la calidad de sitio a través de alguna característica de los individuos de la especie de interés; por lo tanto, el primer paso para aplicar un método directo es definir esa característica.

El volumen del árbol aparece como la característica más razonable a tener en cuenta, por ser la variable de mayor interés; pero es afectado por una serie de factores ajenos a la calidad de sitio, entre los que se destaca la densidad del rodal. Otro tanto ocurre con la altura media total y el diámetro medio por árbol. Una variable que ha mostrado una estrecha correlación con la calidad de sitio, sin estar mayormente afectada por los factores de la masa, es su Altura Media Dominante (AMD). Por esta razón, la AMD del rodal es la variable más empleada para indicar la calidad de sitio con métodos directos.

Con el paso del tiempo (edad), los árboles crecen en altura y otro tanto ocurre con la AMD, de manera que su valor para una misma calidad de sitio habrá de variar con la edad del rodal. Este comportamiento genera el siguiente problema: ¿la altura dominante de qué edad tomaremos como indicadora de la calidad de sitio? La solución es simple y consiste definir una edad de referencia, que

denominamos *Edad Base* o *Edad Índice*. El Índice de Sitio se define, entonces, como la altura media dominante del rodal correspondiente a la edad base. En nuestro medio esa altura es expresada en metros, pero sin indicarse la unidad de medida; por ejemplo, un Índice de Sitio 19,6 indica que la altura media dominante correspondiente a la edad base es de 19,6 metros. La edad que se toma como Edad Base es arbitraria, pero se recomienda que sea posterior a la etapa exponencial de crecimiento de la especie. Queda claro que para determinar el índice de sitio de un rodal debemos conocer su altura media dominante a la edad base.

Sin embargo, el mecanismo hasta ahora propuesto permite determinar el Índice de Sitio sólo de aquellos rodales cuya edad al momento de la observación coincide con la edad base elegida. Si el rodal aún no alcanzó esa edad debemos esperar y si ya la superó no hay posibilidad de conocerla. Para resolver este problema recurrimos a las Curvas de Índice de Sitio. Supongamos que luego de plantada una especie, medimos y registramos su AMD a intervalos regulares de tiempo. Con estos datos podemos construir una curva que represente la evolución de la AMD del rodal en función de su edad. Si repitiésemos una segunda plantación con la misma especie, en igual sitio y bajo iguales condiciones, es de esperar que su altura media dominante evolucione igual que la primera vez, y que la curva de la AMD obtenida en esta oportunidad sea igual a la obtenida la primera vez. En otras palabras, ya conocemos la curva de evolución de la AMD en función de la edad, para esa especie y esa calidad de sitio. Más aun, es de esperar que rodales con igual calidad de sitio compartan la misma curva y que ésta sea diferente a la de otras calidades de sitio, para la misma especie.

Una vez conocida la curva de evolución de la AMD de un rodal podemos predecir esa altura a una edad futura o determinar que altura presentaba a una edad pasada. Si esa edad es la edad base, la altura asociada es entonces el índice de Sitio; por lo tanto, una vez conocida la curva de evolución de la AMD de un rodal podemos determinar su correspondiente Índice de Sitio. En otras palabras, podemos predecir el Índice de Sitio de ese rodal cualquiera fuese su edad.

La altura del árbol es una variable cuantitativa continua y, por extensión, otro tanto ocurre con el Índice de Sitio. Es por eso que en un área son posibles tantas Curvas de Índice de Sitio y tantos Índices de Sitio como rodales distintos existan. Por lo tanto, se requiere un mecanismo que nos permita cubrir en forma sencilla todo el rango de calidades de sitio presente en un área de interés. Este mecanismo es el Sistema de Curvas de Índice de Sitio.

3 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SITIO DE UN RODAL

La determinación del Índice de Sitio de un rodal requiere de dos pasos. El primer paso consiste en la construcción de un sistema de Curvas de Índice de Sitio, las que nos permitirán luego determinar el índice de sitio de un rodal particular. El segundo paso consiste en asignar el índice de sitio al rodal de interés, a partir de las curvas de Índice de Sitio construidas en el primer paso, su edad y su AMD a esa edad. En primer lugar, veremos cómo determinar el índice de sitio de un rodal ya conocido el sistema de curvas de índice de sitio; posteriormente veremos cómo desarrollar ese sistema de curvas.

Para establecer la altura media dominante de un rodal y, en general, de cualquier conjunto de árboles, hay disponibles cuatro alternativas:

1. promediando las alturas de los árboles reconocidos como dominantes;
2. promediando las alturas de los árboles reconocidos como dominantes y codominantes.
3. promediando las alturas de los 100 árboles más altos por hectárea; y
4. promediando las alturas de los 100 árboles más gruesos por hectárea (top height).

Las dos primeras alternativas son las más exactas, pero poseen un inconveniente que es la dificultad para identificar a los árboles dominantes y codominantes observando desde el terreno. Los dos métodos restantes surgieron, precisamente, para eliminar este problema.

El método más difundido es el indicado en el punto 4, denominándose top height a la altura promedio obtenida, ya que en rigor no es la altura dominante. Sin embargo, en algunos países se menciona directamente a este promedio como la altura media dominante, y no como top height. La expresión 100 árboles/ha representa una proporción de referencia; por ejemplo, se medirán 50 alturas si la superficie es de $\frac{1}{2}$ ha y se medirán 200 alturas si esa superficie fuera de 2 hectáreas. No obstante, distintos autores proponen distintas proporciones.

La edad del rodal surge, en todos los casos, como la edad promedio de los árboles de ese rodal; la fuente de información pueden ser registros, o mediciones con barreno o con otro método a campo.

Es importante destacar que el procedimiento final de asignación del Índice de Sitio del rodal debe coincidir con el mecanismo utilizado para la construcción del sistema de curvas.

3.1 CONSTRUCCION DE CURVAS DE INDICE DE SITIO

3.1.1 FUENTES DISPONIBLES DE DATOS

Para construir el sistema de curvas de índice de sitio se necesitan pares altura dominante/edad. Hay tres fuentes posibles de datos:

1. Parcelas de Muestreo Temporarias. Los datos se obtienen de árboles presentes en parcelas de muestreo temporarias. Posee ciertas desventajas; una de ellas es que el rango de edades que se pretende puede no existir; otra, es la posibilidad de que no haya buenas calidades de sitio en los rodales más viejos.
2. Parcelas de Muestreo Permanentes. Los datos se obtienen de árboles presentes en parcelas de muestreo permanentes. Se hace el seguimiento de la altura media dominante a lo largo del tiempo para un mismo sitio, mediante mediciones repetidas en esas parcelas. Es el mecanismo que permite los datos más exactos. Posee una limitación importante que es la imposibilidad de permitir datos en forma inmediata. Por otro lado, las mediciones deben hacerse con mucho cuidado.
3. Análisis de Fuste o Análisis de Tronco. Permite lograr información del crecimiento en altura ya ocurrido en un mismo sitio. Al árbol seleccionado se le apea y se le efectúan cortes transversales a alturas conocidas, determinando la edad en cada corte por recuento de anillos. La parcela tiene por objeto determinar los árboles que se van a apea. Posee limitaciones y ventajas.

La edad a considerar se obtiene como promedio de las edades de los árboles utilizados para establecer la altura media dominante. Las edades individuales se pueden obtener: 1) de los registros de la plantación, si los hay; o 2) a través de su observación a campo, que es lo más apropiado. Por otro lado, la edad puede ser la edad desde el momento de la plantación, o la edad a la altura del pecho.

3.1.2 CURVAS ANAMÓRFICAS y POLIMÓRFICAS

Pretendemos un sistema de curvas que represente la evolución de la AMD de los rodales con la edad, según su calidad de sitio.

Los sistemas de curvas que pueden desarrollarse se dividen en dos categorías, que son: a) las Curvas Anamórficas o Proporzionales, y b) las Curvas Polimórficas.

En un sistema anamórfico, la AMD es proporcional a la calidad de sitio que representa. Así, la relación de alturas entre dos curvas distintas es constante para todas las edades. En un sistema polimórfico, en cambio, la forma de cada curva depende de la calidad de sitio que representa, razón por la cual

proporcionalidad observada en las curvas anamórficas no existe.

Si la calidad de sitio está mejor representada por un sistema Anamórfico/Polimórfico, decimos que tiene comportamiento Anamórfico/Polimórfico. Se supone que es el comportamiento polimórfico el que debe esperarse que muestre la calidad de sitio. Sin embargo, cuando se inician las tareas para desarrollar un sistema de curvas de Índice de Sitio se desconoce a cuál de los dos tipos responde la calidad de sitio, lo que lleva a la necesidad de hacer comprobaciones. Que el sistema a utilizar represente un sistema anamórfico o polimórfico depende exclusivamente de la forma en que se estiman los parámetros del modelo utilizado. Cualquiera fuese el modelo matemático que se emplee para expresar la evolución de la AMD, cada curva tendrá una tasa de crecimiento de la altura en función de la edad; cuando el parámetro responsable de esta tasa se mantiene constante, el sistema de curvas es anamórfico. La principal ventaja de los sistemas anamórficos es la posibilidad de convertir alturas dominantes en índice de sitio y viceversa, sin limitaciones; esta posibilidad no existe necesariamente en los sistemas polimórficos.

Para la construcción de un sistema de curvas existen varios modelos y métodos. Nosotros veremos algo más en detalle el conocido como Método de la Curva Guía, el Método de la Ecuación de las Diferencias y el Método Paramétrico. Finalmente, veremos algunos detalles del análisis de fuste.

3.1.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Se han ensayado y se siguen ensayando distintos modelos matemáticos para representar la evolución de la AMD con la edad. En el Anexo se indican algunos modelos frecuentemente utilizados.

3.1.4 MÉTODO DE LA CURVA GUÍA

Permite generar sólo curvas anamórficas. Uno de los modelos más usados con este método es el modelo de Schumacher, que representa una familia de curvas de altura/edad y puede expresarse de la siguiente forma:

$$Hd_i = A_{oi} e^{bE^{-1}} \quad (1)$$

siendo A_{oi} una constante asociada con la i -ésima curva, es decir, que varía de una curva a otra. Puede verse que el sistema que se genera es anamórfico:

$$\frac{H_i}{H_j} = \frac{A_{oi} e^{bE^{-1}}}{A_{oj} e^{bE^{-1}}} = \frac{A_{oi}}{A_{oj}} = \text{constante}$$

El modelo es normalmente usado en su forma logarítmica: $\text{Ln}(H) = \text{Ln}(A_{oi}) + b E^{-1}$. Con este formato, el sistema de curvas de índice de sitio toma

la forma de una familia de rectas paralelas con pendiente negativa. Con la linealización, el método de la curva guía involucra ajustar, a partir de los datos de altura/edad disponibles, una ecuación de la forma: $\text{Ln}(Hd) = a + b E^{-1}$. Una vez estimados los parámetros, el modelo se expresa como:

$$\text{Ln}(Hd) = a + b E^{-1} \quad (2)$$

donde a y b representan las estimadas de las constantes. La recta obtenida es la llamada "curva guía", que representa el promedio de las alturas para los datos de la muestra. Las líneas que representan la curvas de AMD en función de la edad son paralelas a esta línea. Para desarrollar estas curvas se plantea la siguiente relación: cuando la edad E es igual a la edad base E_0 , la altura media dominante Hd es, por definición, el índice de sitio (IS): $\text{Ln}(IS) = a + b E_0^{-1}$. Esto permite despejar el valor de la ordenada al origen, que varía de una curva a otra: $a = \text{Ln}(IS) - b E_0^{-1}$. Reemplazando en obtenemos:

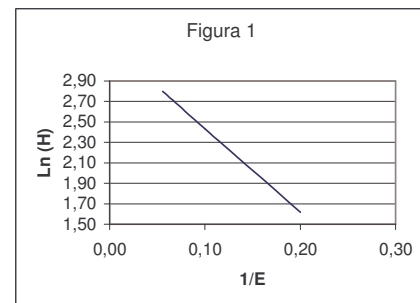
$$\text{Ln}(Hd) = \text{Ln}(IS) + b (E^{-1} - E_0^{-1}) \quad (3a)$$

$$\text{Ln}(IS) = \text{Ln}(H) - b (E^{-1} - E_0^{-1}) \quad (3b)$$

Las fórmulas (3) nos permiten calcular la altura dominante para un determinado índice de sitio y edad, o el índice de sitio para una altura y una edad. En rigor, cuando debemos asignar el IS a un rodal a partir de su edad y su AMD usamos la fórmula (3b). En la Figura 1 se muestra una curva guía para *Pinus elliottii* en Misiones ($b = -8,176$).

3.1.5 MÉTODO DE LA ECUACION DE LAS DIFERENCIAS (extraído de Clutter et al)

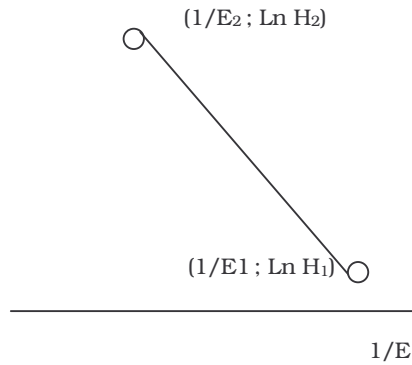
Requiere datos provenientes de parcelas permanen-



tes o de análisis de fuste. El método es muy flexible y puede aplicarse con cualquier modelo para producir curvas anamórficas o polimórficas.

El paso inicial es el desarrollo de una ecuación de altura/edad de forma diferencial. Esta forma diferencial expresa la altura de la segunda medición (H_2) como una función de la edad en ese momento (E_2), y de la edad y alturas iniciales (E_1 y H_1). Como ejemplo tomemos el modelo de Schumacher en forma logarítmica. Asociando dos puntos edad/altura medidos en forma consecutiva, obtenemos la siguiente expresión:

$$\text{Ln}(H)$$



siendo:

$$b = \frac{\text{Ln}H_2 - \text{Ln}H_1}{\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}}$$

de donde surge:

$$\text{Ln}(H_2) = \text{Ln}(H_1) + b(1/E_2 - 1/E_1) \quad (4)$$

que es la ecuación de la diferencia del modelo de Schumacher.

Con mediciones repetidas o análisis de fuste esta ecuación sería ajustada usando procedimientos de regresión lineal. El modelo general es: $Y = b X$, siendo: $Y = \text{Ln} H_2 - \text{Ln} H_1$ y $X = 1/E_2 - 1/E_1$.

Después de que b es estimado se obtiene una ecuación de IS haciendo $E_2 = E_0$, de manera que $H_2 = IS$. La ecuación anterior pasa a ser:

$$\ln(IS) = \ln(H_1) + b\left(\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_1}\right) \quad (5)$$

3.1.6 METODO PARAMETRICO

Requiere de datos provenientes de parcelas permanentes o de análisis de tronco. No asume proporcionalidad entre las curvas, por lo que éstas son polimórficas. No existe un método paramétrico único, de allí que no sea posible observar en detalle cada una de las variantes posibles. El procedimiento básico, sin embargo, una vez recogidos los datos y hechas las correcciones correspondientes, incluye los siguientes pasos:

1. Utilizando algunos de los modelos disponibles se ajusta una función altura/edad para cada árbol o parcela.
2. Utilizando este modelo se le asigna el Índice de Sitio a cada árbol o parcela.
3. Finalmente, se relacionan las estimadas de los parámetros con los Índice de Sitio asociados.
4. Se reemplaza cada parámetro del modelo original por la función de ajuste correspondiente, con lo

cual podemos calcular las alturas a distintas edades para diferentes Índices de Sitio.

Supongamos que en N árboles muestra hemos hecho análisis de fuste y que hemos utilizado el modelo de Schumacher: $\text{Ln}(H) = a + b(1/E)$ para modelar la altura de cada árbol observado. Usando el modelo le asignamos el IS a cada árbol observado, con lo cual disponemos de N conjuntos $\{a, b, IS\}$. El paso siguiente consiste en ajustar las estimadas de los parámetros, por ejemplo:

$$a = \beta_1 + \beta_2(IS) \quad b = \beta_3 + \beta_3(IS) + \beta_4(IS)^2$$

Una vez estimados los valores β_i reemplazamos en el modelo de predicción de altura original:

$$\text{Ln}(H_d) = [\beta_1 + \beta_2(IS)] + [\beta_3 + \beta_3(IS) + \beta_4(IS)^2](1/E) \quad (6)$$

De esta forma, cada curva de altura/edad tendrá sus propios parámetros, los que dependerán del Índice de Sitio asociado.

4 ANÁLISIS DE FUSTE CON CORRECCIONES

Cuando se lleva a cabo un análisis de fuste para determinar el crecimiento de altura en función de la edad se utilizan las siguientes pautas:

- el número de anillos contados en un corte transversal indica el número de ciclos de crecimiento que culminaron por encima de ese corte; y
- la diferencia entre la edad del árbol (número máximo de anillos) y el número de anillos contados en un corte transversal indica la cantidad de ciclos de crecimiento que culminaron por debajo del corte.

El método usado hasta ahora para generar curvas de altura en función de la edad considera que el cono de crecimiento central culmina su crecimiento exactamente a la altura del corte transversal en el cual se contaron los anillos. Esto es aceptable si los árboles crecen en altura con suma lentitud, en cuyo caso se pueden hacer cortes con altas distancias de separación y aceptar que el cono asociado culmina su crecimiento exactamente a la altura del corte. Por ejemplo, es el caso de un rodal de Norway spruce en Bavaria (Alemania), que a los 112 años presenta un Dap y Altura Total promedio de 37 cm y 28 m respectivamente; lo que indica un crecimiento medio anual en altura de 25 centímetros.

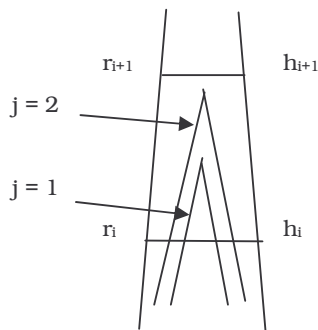
Pero ese criterio es inaceptable cuando la especie crece muy rápidamente en altura. Por ejemplo, en Misiones (Argentina) un rodal de P. elliottii puede crecer hasta casi 4 m de alto en un solo año, si las condiciones de ese año son excelentes. Esto torna

necesario hacer correcciones a las lecturas del análisis de fuste, que es lo que veremos.

Existen diferentes formas de estimar la altura a la cual culmina su crecimiento el cono central. Una de ellas fue propuesta por Carmean, que es la que consideraremos. Para su aplicación debemos agregar una nueva pauta a las dos ya mencionadas, que es la siguiente: si sumamos 1 a la diferencia entre la edad del árbol y el número de anillos de un corte obtenemos el año correspondiente al cono central atravesado por ese corte transversal. Esto permite aplicar la siguiente fórmula:

$$H_{ij} = h_i + \frac{(h_{i+1} - h_i)}{(r_i - r_{i+1})} \times (j - 0,50) \quad (7)$$

siendo H_{ij} la altura corregida del i -ésimo corte correspondiente al j -ésimo cono central. En el siguiente esquema se indican los términos:



A continuación veremos un ejemplo de corrección.

Supongamos un árbol de 8 años de edad y de 9,60 m de altura total. En la primera tabla se indican los datos de campo, esto es, las alturas a las que se hicieron los cortes y el número de anillos que se han contado en cada corte.

A partir de estos datos construimos una segunda tabla donde reemplazamos el número de anillos contados por $E - N^{\circ} + 1$; siendo E la edad del árbol, N° el número de anillos contados en el corte la diferencia entre la edad del árbol (pauta 3), y representa la edad del cono central a la altura del corte. Obviamente, ese cono culminó su crecimiento entre ese corte y algún corte más alto.

Ahora vamos a corregir las alturas para cada año de vida del árbol:

- cono correspondiente al año 1: culminó entre 0 y 2 m

$$h = 0 \text{ m} + [(2 - 0)/(8 - 7)] \times 0,5 = 1,00 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 2: culminó entre 2 y 4 m

$$h = 2 \text{ m} + [(4 - 2)/(8 - 7)] \times 0,5 = 2,50 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 3: culminó entre 2 y 4 m

$$h = 2 \text{ m} + [(4 - 2)/(8 - 7)] \times 1,5 = 3,50 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 4: culminó entre 4 y 6 m

$$h = 4 \text{ m} + [(6 - 4)/(5 - 4)] \times 0,5 = 5,00 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 5: culminó entre 6 y 8 m

$$h = 6 \text{ m} + [(8 - 6)/(7 - 5)] \times 0,5 = 6,50 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 6: culminó entre 6 y 8 m

$$h = 6 \text{ m} + [(8 - 6)/(7 - 7)] \times 1,5 = 7,50 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 7: culminó entre 8 y 9,60 m

$$h = 8 \text{ m} + [(9,6 - 8)/(8 - 7)] \times 0,5 = 8,80 \text{ m}$$

- cono correspondiente al año 8: culminó a 9,60 m (es dato y no se corrige).

BIBLIOGRAFIA

TIMBER MANAGEMENT: a quantitative approach. 1982. Clutter J. L., Fortson J. C. et al. John Wiley & Sons, New York. 329 pp

Datos de campo	
Altura (m)	Nº Anillos
2,00	7
4,00	5
6,00	4
8,00	2
Datos de campo	
Altura (m)	Cono Central
2,00	2 (= 9 - 7)
4,00	4 (= 9 - 5)
6,00	5 (= 9 - 4)
8,00	7 (= 9 - 2)
9,60	8

ANEXO

Modelos

Nombre	Ecuación	Observaciones
1. Modelo de Schumacher	$Hd = A_0 e^{bE^{-1}}$	Ao, b y K : constantes; e: base de los log naturales ; E: edad
2. Modelo de Prodan	$Hd = \frac{E^2}{a + bE + cE^2}$	a, b y c: constantes.
3. Modelo de Chapman-Richards	$Hd = b_1 (1 - e^{b_2 \cdot E})^{b_3}$	b _i : constantes; k = (1 - b ₃) ⁻¹
4. Modelo de Misterlich	$Hd = b_1 (1 - e^{b_2 \cdot E})$	b _i : constantes
5. Modelo Logístico	$Hd = \frac{H \text{ total}}{(1 + b_1 \cdot e^{b_2 \cdot E})}$	b _i : constantes

La constante Ao del modelo de Schumacher recibe el nombre de altura asintótica, por representar la altura que alcanzaría el árbol si la edad se prolongara hasta infinito.