

LA INFLUENCIA DEL SUELO Y EL CLIMA EN EL CRECIMIENTO DE LOS ARBOLES EN LAS REGIONES TEMPLADAS*

Jose A. Bonilla **

RESUMEN

Se discute la necesidad de realizar un amplio esfuerzo tendiente a la determinación de la relación: suelo vs. crecimiento de los árboles, a una escala regional, por medio de bases cuantitativas sólidas.

Se sugieren, como base de discusión, una serie de normas tendientes a tipificar los procedimientos de trabajo.

Se resalta la importancia de que organizaciones internacionales creen un organismo o comité integrado por dasónomos, edafólogos, climatólogos y estapísticos con el objetivo de lograr una solución final al problema.

1 - INTRODUCCIÓN

La influencia de los factores edafológicos y fisiográficos sobre el crecimiento de los árboles es un hecho indiscutible. En Estados Unidos y Europa, principalmente, se han efectuado bastante más de 100 estudios sobre el particular (de acuerdo con las recopilaciones de COILE, 1952 y RALSTON, 1964) todos ellos estableciendo relaciones cuantitativas entre el suelo y el crecimiento forestal.

En Latinoamérica existe considerable información cualitativa, pero infelizmente los estudios cuantitativos son muy escasos. Probablemente, sobre el particular, existe un solo trabajo de envergadura: CASTANOS (1952) referido a **Pinus patula**, siendo asimismo destacable la publicación de BARRETT y GARBOSKY (1960) sobre **Pinus radiata**. Por otra parte, el autor, BONILLA (1964) en **Pinus pinaster**, ha efectuado una contribución absolutamente preliminar sobre el tema. Finalmente, tenemos noticias de que LIESEGANG (comunicación personal) está realizando en Uruguay, un estudio cuantitativo de **Pinus taeda**, mientras que el autor está planeando una investigación sobre diversas especies de Pinos, que será comenzada este año.

Resulta imprescindible, entonces, la sistematización del estudio de la relación: suelo-crecimiento forestal para Latinoamérica (y oventualmente para otras áreas) sobre bases cuantitativas.

Precisamente, el objetivo básico de este artículo es el de ofrecer una base de discusión que sirva para fijar normas de trabajo que sean utilizables por los investigadores de la región, de modo que los resultados sean comparables y por ello, brinden conclusiones más fructíferas. Queremos hacer un énfasis especial en que si bien estos estudios deben ser encarados a nivel general, las características del crecimiento de las masas forestales en zonas tropicales incluyen problemas diferentes a los planteados aquí. Por ello, tal como se

* Trabajo presentado para su publicación en fecha 30 de julio de 1971.

** Ing. Arg. Master en Estadística. Departamento Forestal. Facultad de Agronomía. URUGUAY.

plantea en el título del trabajo, nuestro enfoque se dirige, principalmente, a las regiones templadas.

Es probable que muchos de los criterios expuestos en esta publicación, y sobre todo los referentes a factores edafológicos y climatológicos a tener en cuenta, deban ser modificados y aún cambiados completamente luego de una discusión amplia de los mismos; pero la finalidad de este artículo se verá largamente colmada si esto ocurre realmente, ya que el único propósito que nos guía, es, precisamente, el de que el punto se discuta en forma amplia hasta agotar las dudas existentes y poder llegar así, a la formulación de un cuerpo de normas generales. Para la realización de los objetivos señalados sería altamente recomendable que alguna institución internacional promoviera una reunión regional para discutir y concretar tales normas.

El trabajo se divide en dos partes: la primera, consiste en una recopilación bibliográfica de los resultados de mayor importancia que han sido obtenidos a través de la investigación, y la segunda, representa un esbozo metodológico sobre el tema en estudio, en la referente a sus cuatro aspectos fundamentales: forestal, edafológico, climatológico y estadístico.

2 - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La bibliografía sobre el tema, como ya dijimos, es muy copiosa. A continuación nos limitamos a presentar, discriminadamente por especie, trabajos publicados durante los 15 años comprendidos entre 1952 y 1967. Los anteriores pueden ser hallados en la excelente recopilación de COILE (1952); los posteriores en Forestry Abstracts, en el ítem 54: «Assessment of Site Quality». Respecto a los detalles bibliográficos de los trabajos enumerados a continuación y que no aparezcan en nuestra bibliografía, podrán ser consultados en el trabajo de RALSTON (1964).

La mayoría de los trabajos publicados se refieren a Coníferas y en especial al género **Pinus**, luego a **Pseudotsuga** y **Picea**. Dentro de las latifoliadas, la mayoría se refiere a **Quercus**, luego a **Populus** (en especial *P. tremuloides*) **Liquidambar**, **Liriodendron**, **Juglans**, etc. Cabe citar que un género muy importante en el Cono Sur de Latinoamérica - el **Eucalyptus** registra un solo estudio.

El resumen de trabajos es el siguiente:

ROW (1960); SMITH (1960); McGEE (1961); JACKSON (1962); PEGG (1967) en **Pinus elliotii**. ZAHNER (1954, 1958); GILMORE (1963); LINNARTZ (1964); McCLURKIN y COVELL (1965) en **Pinus taeda**. GAISER y MERZ (1953); MADER y OWEN (1961); RICHARDS, MORROW y STONE (1962) en **Pinus resinosa**. PAWLUK y ARNEMAN (1961) CHROSCIEWICZ (1963); WILDE et al. (1965), en **Pinus banksiana**, ZINKE (1958 1960); COX et al. (1960); MYERS y VAN DUSEN (1960) en **Pinus Ponderosa**. DINGLE y BURNS (1954); ZAHNER (1953); McCLURKIN y COVELL (1965) en **Pinus echinata**; LINNARTZ (1963); McCLURKIN y COVELL (1963, 1965) en **Pinus palustris**. GASER y MERZ (1953), HUSCH y LIFORD (1956) en **Pinus strobus**; COPELAND (1956) en **Pinus monticola**. WEHERMANN (1960); VIRO (1961) en **Pinus silvestris**. BARRER y GARBOSKY (1960) en **Pinus radiata**. CASTANOS (1962) en **Pinus patula**. BONILLA (1964) en **Pinus pinaster**.

CARMEAN (1954); FORRISTALL y GESSEL (1955); LEMMON (1955); SCHOLL et al. (1956); ZINKE (1958); STEINBRENNER (1965); HALLIN (1967) en

Pseudotsuga LEYTON (1952), MACAULAY INSTITUTE (1962) em **Picea sitchensis**. ORLOV (1953) en **Picea mariana**. VIRO (1961) em **Picea abies**.

DOOLITTLE (1959); CARMEAN (1965) en **Quercus velutina**. HEBB (1962), McCLURKIN (1963) en **Quercus alba**. BROADFOOT (1961); HEBB (1962) en **Quercus falcata**. DOOLITTLE (1959) en **Quercus coccinea**. BEAUFIT (1962) en **Quercus phellos**; TRIMBLE y WEITZMAN (1956) en «Upland oak».

VOIGT et al. (1957); STOECKLER (1960); STROTHMANN (1960); GRAHAM et al. (1963) en **Populus tremuloides**. BROADFOOT (1960) en **Populus deltoides**.

BROADFOOT y KRINARD (1959); HEBB (1962); PHILLIPS y MARKLEY (1963) en **Liquidambar styraciflua**.

TRYON et al. (1960); HEBB (1962) en **Liriodendron tulipifera**.

HANSEN y McCOMB (1958); THOMSON Y McCOMB (1962) en **Juglans nigra**.

Otros estudios son los de AIRD y STONE (1955) en **Larix europaea** y **Larix kaempferi**; FORRISTAL y GESSELL (1955) en **Alnus rubra**; KARSCHON y VON PRAAG (1954) en **Eucalyptos rostrata**; BOTVAY (1953) en **Robinia Pseudacacia**; BROONKIRD et al. (1960) em Teca.

La metodología general de los trabajos citados anteriormente, consiste en relacionar el crecimiento de los árboles, expresado por medio de un índice de sitio, con un conjunto más o menos numeroso de variables edafológicas. Los resultados obtenidos, fueron expresados, generalmente, bajo la forma de una función de regresión lineal múltiple.

CZARNOWSKI (1964), en cambio, en un trabajo de extraordinaria envergadura, determinó una fórmula general que relaciona el crecimiento de los árboles no sólo con los factores edafológicos, sino también con los factores biológicos y climáticos. En conjunto, halló once variables de fundamental importancia, discriminadas de la siguiente manera:

A. Variables biológicas.

1. Coeficiente de capacidad transpiracional de la especie,
2. Tolerancia de la especie a los cambios de humedad del suelo,
3. Capacidad de humedad óptima del suelo, para especie y tipo de suelo dado,
4. Coeficiente de densidad del dosel.

B. Variables climáticas.

5. Presión del vapor de agua saturado, en la estación de crecimiento,
6. Humedad relativa del aire, durante la estación de crecimiento,
7. Número total de horas luz, durante la estación de crecimiento,
8. Índice de aridez.

C. Factores edafológicos.

9. Profundidad «efectiva» del suelo,
10. Diámetro medio de las partículas del suelo,
11. Humedad real en el suelo, durante la estación de crecimiento.

La función resultante -extremadamente complicada- puede consultarse en la página 159 de la citada publicación. Los resultados obtenidos con esta fórmula han sido sorprendentemente precisos aplicados a sitios reales con **Pinus sylvestris** en Polonia, Finlandia e Islandia; **Pinus taeda** en Estados Unidos, Australia y Sudáfrica y **Pseudotsuga menziesii** en Tasmania, Canadá y Holanda. Las diferencias entre las medias por especie -

entre valores observados y calculados- fueron del orden de 0,2% 0% y 5,5% de los primeros, respectivamente. Si discriminamos por especie y por sitio, el único caso de una discrepancia relativamente fuerte ocurrió con la **Pseudotsuga** en Tasmania, registrando un valor de 12%. Aplicando la prueba X^2 para el total de datos, se encontró un valor observado de 1,27, el que indica un ajuste casi perfecto entre los valores experimentales y los obtenidos por aplicación de la fórmula de Czarnowski.

3. METODOLOGIA

En virtud de que la solución correcta del problema planteado, responde a una cuádruple interacción de elementos forestales, edafológicos, climatológicos y bioestadísticos, desarrollaremos primeramente cada uno de tales puntos, por separado, analizando sus diversos componentes

3.1. ASPECTOS FORESTALES

Desde el punto de vista forestal, deben ser resueltos varios problemas, principalmente los siguientes: 1. Elección de la variable más adecuada como indicadora de sitio; 2. El factor edad como elemento a considerar en la comparación de bosques; 3. Tamaño de muestra; 4. Tamaño de la parcela y número de árboles a muestrear.

Elección de variable más adecuada com indicadora de sitio:

La **calidad de sitio** puede definirse como la capacidad de un área para soportar el crecimiento de los árboles, siendo la suma de los componentes edafológicos, biológicos y climáticos (y sus interacciones) que actúan sobre dicho crecimiento.

El problema se presenta cuando queremos encontrar un índice relativamente simple y seguro, que exprese el efecto de tales factores y sus interacciones. El asunto es arduo. Ya en 1923, la Sociedad Forestal Americana, nombró un comité para estudiar el punto, el que llegó a la siguiente conclusión «la única base sólida es la producción potencial de volumen de madera, el cual para ser expresado en forma standard, debe ser ubicado en un período definido de la vida del rodal, preferiblemente radicado en la culminación del incremento medio anual y con un método de tratamiento definido, preferiblemente en rodal es bien densos y no raleados, coetáneos».

Sin embargo, tal dictamen no cerró la discusión, sino que ésta se hizo cada vez mayor, ya que iba aumentando el número de posibilidades a examinar. Tal es así, que se han sugerido una serie de variables como: incremento periódico por hectárea (MADER y OWEN, 1961) ; materia seca, expresada en unidades gravimétricas (WECK, 1961); equivalente calorífico de la madera (WOODS, 1960); la altura considerada de diversas formas, etc.

La materia seca y el equivalente calorífico, si bien pueden tener interés desde el punto de vista teórico, no los consideramos como variables posibles, dadas sus dificultades prácticas. La elección del volumen como variable, a pesar de que también presenta ventajas teóricas, no es recomendable, en vista de diversos factores adversos, tales como: gran cantidad de trabajo necesario para el cálculo del volumen; error alto, debido a que el volumen es producto de varios factores, por lo que para reducir convenientemente dicho

error, es necesario realizar un muestreo muy intenso; la mortalidad de árboles, puede agregar serios errores adicionales, etc.

La ley de Eichhorn expresa « la producción total de un bosque es función de su altura média» (esta ley es válida en el interior de una región que tenga características climáticas homogéneas) ya pesar de que hoy día se sabe que su enunciado es sólo una primera aproximación, atendiendo a la simplicidad y seguridad de la mensura de la altura como índice de sitio. Debe resaltarse que el uso de la altura como índice de sitio, sólo debe aplicarse en masas coetáneas con densidades no extremas, ya que en masas vírgenes y disetáneas ocurren constantes períodos de retardo y liberación, causados por competencia y muerte de árboles contiguos.

La altura de los dominantes y codominantes es la variable más usada como índice de sitio, aún cuando en ciertos trabajos se restringe sólo a los dominantes. KER (1952) señala que la altura de los dominantes solamente, tiene la ventaja de ser mucho más precisa que la de los dominantes y codominantes, aparte de que son más fáciles de calcular, ya que los toques son más visibles. Esto, sin dejar de reconocer que el tomar en cuenta sólo a los dominantes, puede conducir, a veces, a errores, ya que esa posición puede deberse a mayor edad o a un mejor micro-sitio. Sin embargo, la utilización de los dominantes, solos o conjuntamente con los codominantes como índice de sitio, no resulta completamente satisfactoria, en base a las siguientes consideraciones adicionales:

(a) La elección de dominantes y codominantes es una operación fundamentalmente subjetiva, pudiendo diferir considerablemente el criterio respectivo entre dos operadores.

(b) El raleo y otras operaciones de corte pueden modificar la altura promedio de los dominantes y los codominantes, dando un índice falso, ya que la calidad del sitio, no cambiará, naturalmente, porque se haga tal manejo.

Parecería, entonces, que lo más conveniente para propósitos experimentales sería considerar la altura, sin tener en cuenta especificaciones subjetivas acerca de la copa. Es así que varios autores han sugerido usar como índice de sitio, la altura del cierto número de árboles más gruesos por parcela. Gray, por ejemplo, ha sugerido como índice la altura del árbol de mayor talla.

Aún cuando el crecimiento en altura parece el mejor índice de sitio (teniendo en cuenta seguridad y simplicidad), existen ciertas objeciones que conviene tener en cuenta:

(a) Las densidades extremas (altas o bajas) afectan el crecimiento en altura.

(b) Existe variación entre árboles en lo que se refiere a la altura, debida a factores genéticos.

(c) En las latifoliadas de copa delicuescente, se hace difícil la mensura correcta de la altura.

(d) La competencia con otras plantas en los primeros años de vida del bosque, llega a producir algunas aberraciones en el crecimiento altimétrico.

Precisamente, para eliminar la dificultad señalada en el último punto, ha surgido un nuevo método, denominado «growth intercept» (sin traducción en castellano). Se entiende por «growth intercept» la altura del árbol comprendida entre cierta cantidad de nudos de crecimiento (4 a 6 y más generalmente 5) sobre el DAP (1,30 m). Esta técnica reduce las aberraciones de crecimiento durante el establecimiento del rodal, recomendándose su uso especialmente para bosques jóvenes, con nudos bien visibles.

Cabe señalar que la determinación del índice de sitio para bosques jóvenes, puede tener el inconveniente de que las características del suelo a cierta profundidad del mismo,

aún no han actuado sobre el crecimiento, dado que los raíces no han llegado todavía a dicha zona.

El factor edad como elemento a considerar en la comparación de bosques.

Cuando estudiamos la relación: suelo-crecimiento, en una zona dada, podemos manejar el factor edad fácilmente si disponemos de curvas de índice de sitio. Por medio de ellas, podemos, por ejemplo, determinar si es mejor un sitio en el cual crece una especie dada con un índice de 17 m. a los 21 años, que otro en el que el índice es de 28 m. a los 35 años. Sin embargo, si nuestro objetivo es encarar los estudios de manera que se obtenga información en un área amplia-a nivel de continente o subcontinente la carencia de tales curvas no constituirá, probablemente, un problema grave, ya que métodos alternativos pueden ser propuestos. (Además debe tenerse en cuenta que estas curvas armonizadas contienen muchas veces, errores de cierta entidad, dado que generalmente las tendencias de crecimiento en los diversos sitios son polimórficas) .

Un método alternativo muy interesante podría ser el siguiente:

Tomar como unidad de trabajo el bosque coetáneo de una región, zona geográfica y especie dada y efectuar para cada uno un estudio completo: suelo-crecimiento. Cuando el número de estudios sea suficiente, el conjunto de datos será analizado exhaustivamente por un comité integrado por dasónomos, edafólogos, climatólogos y estadísticos, los que derivarán de los datos recogidos una interpretación coherente y preferiblemente cuantitativamente de los efectos del suelo y clima sobre el crecimiento de la especie, teniendo en cuenta la multiplicidad de factores en juego. Para lograr esta finalidad, deberán crear una metodología específica.

Con esta idea, se pretende pasar, de los trabajos que actualmente se realizan-los que si bien son meritorios, sólo dan resultados de estricta aplicación local-a un trabajo de conjunto, más profundo y que se acerque al fondo de la cuestión, aprovechando los datos locales y detectando las posibles variaciones que una especie puede registrar en diferentes condiciones ambientales.

Naturalmente, que este tipo de enfoque, quizás, muy ambicioso, no puede llevarse a cabo felizmente sin el respaldo de alguna organización internacional que centralice los esfuerzos y disponga de medios suficientes para que el trabajo pueda llevarse a cabo. Dicha organización podría firmar convenios con las instituciones locales las que oportarían sus resultados, ya la vez recibirían los hallazgos de las otras, conformándose así un proceso dinámico de interacción y de fecundidad científica.

Tamaño de la muestra

El problema del tamaño de muestra, puede resolverse utilizando un elemento clásico en Estadística, la conocida fórmula para poblaciones infinitas:

$$n = \frac{t^2 c^2}{e^2}$$

Dado que t es un valor constante y e debe ser fijado a priori como criterio de precisión, la variable que afecta fundamentalmente al tamaño de la muestra es c (coeficiente

de variación). Pero ocurre que frecuentemente esse valor es desconocido y nos encontramos imposibilitados para aplicar dicha fórmula. Um criterio para salir del «impasse» sería el de tomar una muestra de tamaño «arbitrariamente razonable» ya partir de ella, estimar la variabilidad de la población, con lo que obtenemos un valor de *c*, al que introducimos en la fórmula y ahora sí podemos calcular *n*. Si su valor es menor que o muestra tomada, ésta resulta más que suficiente: en caso contrario, deberá tomarse una muestra complementaria hasta llegar a *n*. El tamaño de muestra inicial o sea el «tamaño arbitrariamente razonable» es materia opinable, pero puede darse la idea empírica, de que solo tratándose de material muy homogéneo, podría ser menor de 30-40 parcelas.

Tamaño de la parcela y número de árboles a muestrear

Con respecto al tamaño de las parcelas y al número de árboles que sería conveniente medir, son pocos los trabajos efectuados. KER (1952) determinó para **Pseudotsuga**, con 60-80 años de edad y con alturas de 25-50 m., em Canadá, que 4-6 árboles por parcela son suficientes para determinar el índice de sitio, con un error de muestreo del 5%. AVERY y NEWTON (1961) trabajando en Georgia Central, encontraron en latifoliadas (**Platanus**, **Liriodendron**, **Liquidambar**, **Quercus**, **Fraxinus**) que las parcelas más adecuadas eram las de 400 m² y para coníferas (**Pinus taeda**, **Pinus echinata**) 200 m². BONILLA (1969) trabajando con **Pinus radiata** en las condiciones ambientales del Uruguay, propuso una pauta provisoria de tamaño de parcela, que oscila entre 400 y 800 m², según el edade y densidad del bosque.

Cabe señalar que los dos últimos trabajos fueron planeados a los efectos de dar información para tamaños de parcelas aplicables a inventarios, por lo que las conclusiones obtenidas no deben considerarse como estrictamente válidas para el problema en consideración.

Diversos investigadores han utilizado diferentes tamaños de parcelas y número de árboles en los estudios realizados. Por ejemplo: BEAUFAIT (1956) utilizó parcelas de 800 m² con un promedio de 2.2 árboles por parcela em **Populus tremuloides**. McGEE (1961) em **Pinus elliotii** trabajó con 6 dominantes o codominantes por parcela. VIRO (1961) menciona los 100 árboles más gruesos por hectárea. trabajando em *Picea abies* y **Pinus sylvestris**.

CASTAÑOS (1962) en **Pinus patula** utilizó 5-7 árboles en parcelas de 1000m². JACKSON (1962) en **Pinus elliotii** trabajó con 5 árboles por parcela. McClURKIN (1963), en **Quercus alba**, utilizó de 1 a 5 dominantes por parcelas de 800 m². PHILLIPS y MARKLEY (1963) en Liquidambar trabajó con parcelas de 400 m². PEGG (1967) en **Pinus elliotii**, utilizó los 50 árboles más grandes por hectárea.

Como se ve, es necesario unificar los criterios para hacer comparables los resultados de los investigadores.

Considerando todos los aspectos forestales discutidos en los cuatro items anteriores y teniendo en cuenta la escasa información disponible, nos atrevemos a proponer la siguiente:

BASE DE DISCUSION:

- **Indice de sitio.** Utilizar para su determinación, la altura de los 3-5 árboles más gruesos por parcela, a los cuales se les mide el DAP, altura y edad; además se debe determinar el

Area Basal, siendo práctica la utilización del principio de Bitterlich, Paralelamente, en bosques jóvenes y con especies que tengan nudos de crecimiento bien visibles sería interesante determinar el «growth intercept» a partir de la distancia existente entre los cinco espacios internodales por encima de la altura del pecho (1,30 m).

-Tamaño de la parcela. Entre 400 y 800 m². Naturalmente, que para un trabajo rápido no es necesario determinar los límites de la parcela, sino que alcanza con hacerlo en forma sólo aproximada, ya que no es indispensable el dato del número de árboles por hectárea.

- Número de parcelas: Aplicar la metodología clásica; si no se dispone de información sobre variabilidad, se sugiere efectuar un doble muestreo, partiendo de una muestra «arbitrariamente razonable», constituida por 30-40 parcelas.

- Características generales de los estudios. Realizar estudios completos en bosques coetáneos. Juntar toda la información disponible en un organismo o comité central, integrado por dasónomos, edafólogos, climatólogos y estadísticos.

3.2. ASPECTOS EDAFOLÓGICOS

Los aspectos edafológicos del problema son fundamentalmente dos: muestreo y elección de las variables a medir. El autor no tiene conocimientos edafológicos especializados, por lo que con respecto a muestreo, se limitará a efectuar una sugerencia basada en los criterios de selección del índice de sitio ya expuestos ya la practicidad del procedimiento; en lo referente a la selección de variables, las sugerencias estarán basadas en los resultados presentados en la bibliografía revisada, así como en consultas hechas al Profesor y Jefe del Departamento de Suelos, Ing. Agr. Luis de León a quien agradecemos su colaboración.

Muestreo

De acuerdo con nuestra recomendación dasométrica, se tomarían 3 a 5 árboles por parcela para determinar el índice de sitio de ésta. Para hallar las magnitudes de las variables edafológicas en la parcela, teniendo en cuenta aquel hecho, sugerimos tomar una muestra de cada horizonte en las cercanías de los árboles elegidos y luego mezclarlas, obteniendo finalmente una muestra por cada horizonte para cada parcela. Naturalmente que esta mezcla sólo deberá hacerse cuando las submuestras no sean demasiado heterogéneas, siendo necesario establecer pautas que permitan actuar con criterios objetivos.

- **Variables edafológicas.** Por razones prácticas de diversa naturaleza, tales como trabajo de campo, de laboratorio y de computación, no es conveniente tomar un número muy grande de variables. Creemos que las mismas no deberían exceder de 30. A continuación ofrecemos una lista tentativa de las mismas, agrupadas en 3 categorías.

- **Variables topográficas.**

- Exposición,
- Pendiente,
- Posición topográfica.

- **Variables físicas del suelo.**

- Porcentaje de limo, arena y arcilla en los horizontes A y B (6 variables), o quizás solo porcentaje de limo + arcilla en ambos horizontes,
- Profundidad efectiva de arraigamiento,
- Espesor del horizonte A,
- Profundidad del horizonte gley o del moteado,
- Porosidad de los horizontes A y B (capilar y no capilar) (4 variables) .
- Clases de drenaje,
- Agua disponible en los horizontes A y B (2 variables) ,
- Densidad aparente de los horizontes A y B (2 variables),

- Variables químicas del suelo.

- PH en agua de los horizontes A y B (2 variables),
- Materia orgánica (horizonte A),
- Profundidad del horizonte de carbonatos,
- Nutrientes: N, P, K, Ca, Mg en horizontes A y B (10 variables).

3.4. ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS

Indudablemente, que cuando estudiamos el comportamiento de los árboles en un sitio dado, los hallazgos acerca del efecto del clima son, en ese lugar, mínimos o inexistentes. Pero si comparamos resultados de crecimientos de árboles en distintas regiones, los efectos climáticos pasan a tener una importancia capital. Por ello es que, conjuntamente con los datos forestales y edafológicos se debe tomar cierta información climatológica.

De acuerdo con FAO (1959) y teniendo en cuenta a CZARNOWSKI (1964) es importante registrar las siguientes variables:

- temperatura media anual
- temperatura media del mes más frío
- temperatura media del mes más cálido
- temperatura máxima absoluta
- temperatura mínima absoluta
- Régimen de heladas (Período libre de heladas perjudiciales)
- Precipitación media anual (frecuencia y distribución)
- humedad relativa
- número de horas luz
- índice de aridez

Para bosques naturales, sería interesante determinar los índices de WECK y PATERSON, de acuerdo con PARDE (1961).

Naturalmente, que a diferencia de las variables forestales y edafológicas que son registradas a nivel de parcela, las variables climatológicas se registran, generalmente, a nivel zonal sin perjuicio de tomar información acerca del microclima cuando ello sea posible.

3.4 ASPECTOS ESTADISTICOS

El análisis estadístico de los datos, efectuado a través de la regresión múltiple puede hacerse por dos caminos: 1.º) Relacionar la variable dependiente (índice de sitio) con cada una de las variables independientes (características edafológicas y fisiográficas) por separado y luego juntar aquellas que se han mostrado más significativas; 2.º) Relacionar la variable dependiente con el conjunto de las variables independientes.

Primer método

De acuerdo a la metodología descrita por CASTAÑOS (1962), quien la refiere a Doolittle, deben cumplirse los siguientes pasos:

a) Realizar un análisis preliminar, relacionando cada una de las variables independientes con el índice de sitio en forma gráfica. Aquellas variables que muestran mayor relación son analizadas estadísticamente, de manera de determinar cuál de ellas es la más significativa. Supongamos que ello ocurre con la variable X_7 , entonces construiremos una ecuación del tipo:

$$y = a + b_7 X_7 \text{ (o una relación curvilínea) (1)}$$

b) Los residuos (o sea las diferencias entre los valores de índice de sitio obtenidos a través de la gráfica y los calculados a partir de la ecuación anterior), se relacionan gráficamente con el resto de las variables. A la variable que muestra mayor relación con los residuos se le determina la significancia del coeficiente de regresión. En caso afirmativo se agrega dicha variable a la ecuación original. Suponiendo que esto se cumpliera con la variable X_{12} , tendremos:

$$y = a' + b'_7 x_7 + b'_{12} X'_{12} \text{ (2)}$$

c) Los nuevos residuos (o sea, los residuos de la ecuación 2), son probados de la misma manera con el resto de las variables y así sucesivamente hasta no obtener coeficientes de regresión significativos. Suponiendo que por este procedimiento podemos incorporar una variable más: X_3 tendremos finalmente una ecuación de regresión múltiple del tipo siguiente:

$$y = a'' + b''_3 x_3 + b''_7 x_7 + b''_{12} X_{12} \text{ (3)}$$

d) En base a la ecuación (3) se realiza el análisis estadístico final, en el que se determina:

Análisis de variancia, determinándose variancia de la regresión y variancia residual.
Coeficientes de correlación: múltiple y parciales.

Segundo método

Por medio del mismo, es posible relacionar todas las variables conjuntamente, por lo que se obtiene un cuerpo de resultados mucho más armónico y completo, pero tiene el

inconveniente de que con más de 4 o 5 variables, como máximo, se vuelve imposible de calcular a menos que se use una computadora electrónica.

Este método se base en los «modelos lineales», que en este caso son del tipo:

$$Y_i = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n x_n + e_i$$

Introduciendo Algebra de Matrices esta expresión puede ser simplificada de la manera siguiente:

$$Y = X \beta + \Sigma$$

Y = vector de respuesta

X = matriz del modelo

β = vector de parámetros

Σ = vector aleatorio

El vector β representa el conjunto de parámetros (o incógnitas) o sea que está constituido por:

a
 β_1
 β_2
.
.
.
 β_n

La tarea básica consiste en estimar dicho vector, demostrándose (ver BONILLA, 1966), que bajo ciertas circunstancias:

$$\beta = (x'x)^{-1} x' y$$

donde x' significa la matriz transpuesta de x ,
 $(x'x)^{-1}$ significa la matriz inversa de $x'x$.

La parte realmente difícil de este cálculo estriba en la inversión de la matriz $x'x$, la cual puede ser efectuada con máquina de calcular si las variables en estudio son a lo sumo 4 o excepcionalmente 5. Más allá de esos límites, a veces demasiado amplios, debe recurrirse indefectiblemente a la computación electrónica. Por otro lado, la llamada matriz de dispersión D (que contiene las variancias y las covariancias de las variables) puede obtenerse con relativa facilidad pudiendo demostrarse (ver BONILLA, 1967), que:

$$D = t_2 (x'x)^{-1}$$

Por lo tanto, hallado el vector β y la matriz D, disponemos de los estimadores de los parámetros, sus variancias y covariancias, por lo que podemos determinar la significancia de los mismos, por medio de una prueba t y de esa manera establecer la ecuación final del tipo de la {3} señalada en el método anterior.

La expresión τ^2 es estimada por medio de la variancia residual, la que se determina a partir de las fórmulas usuales.

Por otro lado, el coeficiente de correlación múltiple se obtiene fácilmente a partir de

$$R = \sqrt{\frac{S.C. \text{Regrsión}}{S.C. \text{Total}}}$$

Las correlaciones simples entre la variable dependiente {índice de sitio) y cada una de las variables independientes, se determinan por medio de las fórmulas usuales.

Todos estos cálculos pueden ser hechos bajo la suposición de que las variables X_1, X_2, \dots, X_n están distribuidas normalmente. Si esto no se cumple, pueden intentarse correctivos tales como las transformaciones de variables del tipo: \sqrt{x} , arc. sen \sqrt{x} , log. x , etc. Existen otros requisitos adicionales como independencia y aleatoriedad de las muestras y homocedasticidad de las variables, que no tratamos aquí con mayor detalle por tratarse de aspectos altamente especializados.

A pesar de la ayuda imprescindible e invaluable de la computación electrónica, el manejo de los datos así como las tareas de perforación de fichas, detección de errores, etc., puede hacerse muy pesado, por lo que si no se dispone de una organización perfectamente planificada al respecto, es conveniente que el número de variables a analizar no sea muy grande. En relación con este problema, podría intentarse una depuración de variables, algo empírica, pero indudablemente efectiva: por simple observación visual, descartar aquellas variables que nítidamente muestran falta de correlación con la variable dependiente. Está de más decir que este tipo de procedimiento sólo puede ser usado por personal muy competente.

De acuerdo con los trabajos de HEBB (1962), McCLURKIN (1963) y otros, se cita un programa específico para resolver estas ecuaciones, creado por Grosenbaugh y Hadek (ver GROSENBAUGH, 1958), el cual puede ser utilizado con máquinas IBM 704. Este programa trabaja con un máximo de 9 variables, en cuyo caso la computadora calcula 511 regresiones. En principio, se deberá escoger aquella que tenga la menor variancia residual, pero también debe tenerse en cuenta el número de variables que contiene cada ecuación, por lo que un compromiso entre ambos factores se impone como solución a la vez precisa y práctica.

La creación de una Computadora Central o la utilización de alguna existente, que recibiera los datos de campo de los investigadores (debidamente planilladas) y proporcionara los resultados estadísticos correspondientes, dependiendo quizás de alguna organización internacional, podría ser de considerable ayuda para el rápido desarrollo del tema en la región.

4. SUGERENCIAS

CON RELACION A ASPECTOS TECNICOS

1. Determinar el índice de sitio a partir de la altura de los 3-5 árboles más gruesos por parcela. En bosques jóvenes determinar el «growth intercept».
2. Fijar el tamaño de la parcela entre 400 y 800 m².

3. Si se dispone de información acerca de la variabilidad del índice de sitio, usar la metodología clásica para determinar el número de parcelas. De lo contrario, partir de una muestra «razonablemente arbitraria» de 30-40 parcelas y completar, si fuera necesario, por medio de un muestreo complementario.

4. Analizar una muestra del horizonte A y otra del B en cada parcela, las que estarán constituidas por una mezcla de muestras obtenidas al pie de cada árbol utilizado para determinar el índice de sitio.

5. Estudiar las propiedades edafológicas más importantes del sitio, no siendo práctico excederse de 30. En el numeral 3.2 se ofrece una lista tentativa de estas variables.

6. Registrar los datos climatológicos más importantes. En el numeral 3.3 se ofrece una lista tentativa de los mismos.

CON RELACION A ASPECTOS ORGANIZATIVOS

7. Creación o adaptación de una Computadora Central a nivel regional (Latinoamérica u otras áreas), con el propósito de procesar las planillas con los datos de campo enviados por los investigadores respectivos, de acuerdo a una metodología standard.

8. Creación de un organismo o comité científico, a nivel regional, integrado con dasónomos, edafólogos, climatólogos y estadísticos, que se ocupen de integrar los resultados obtenidos por las investigaciones locales.

6. BIBLIOGRAFIA

1. AVERY y NEWTON. 1961. Plot Sizes for Timber Cruising in Georgia. **Journ. For.** 63:12 (930-2).
2. BARRET, W. y GARBOSKY, A. (1960). Efecto del suelo en el crecimiento de **Pinus radiata**, en el N. de la Provincia de Bs. Aires. **Rev. Inv. For** 2 (1) : 67-88.
3. BEAUFAIT, W. E. Influence of soil and topography on Willow Oak sites. **Occas. Pap. Sth. For. Exp. Sta.** 148, 12 pp.
4. BONILLA, J. A. y RAVA, C. 1964. Quinta contribución dasométrica. Evaluación de la calidad de sitio del Pino marítimo en la zona de Carrasco em base a características edafológicas. **Bol. Dep. For.** No.12. Montevideo p. 1-9.
5. BONILLA J. A. 1967 - Comparação de equações para a construção de tabelas de volumes «standard» do «pinus marítimo» **Pinus pinaster** Ait. Piracicaba 83 p.
6. BONILLA, J. A. 1969 - El tamaño de parcela: su magnitud más adecuada para relevamientos dasométricos. **Silvicultura**. Maldonado. Uruguay, N.º 27: 15-38.
7. CARMEAN, W. H. 1965 - Black Oak site quality in relation to soil and topography in South Ohio. **Proc. Soll. Soc. Amer.** 29:3 (308-12).
8. CASTAÑOS, J. 1962 -Evaluación de la calidad de estación del **Pinus patula** en el N. de Oaxaca. **Inst. Nac. Inv. For. México**, Boletín Técnico, 2. 32 pp.

9. CHROSCIEWICZ, Z. 1963 - The effects to site on Jack Pine growth in Northern Ontario. **For. Res. Branch**. Publ. N.º 1015. Canadá, 28 p.
10. COILE, T. S. 1952. Soil and the growth of forest. **Advances Agronomy**. 4: 329-98.
11. CZARNOWSKI, M. S. 1964 -Productive Capacity of Locality as a Function of Soil and Climate with Particular reference to Forest Land. **Louisiana State Univ**, 174 p.
12. FAO, 1959 - **Prácticas de plantación en América Latina**. Cuaderno de Fomento Forestal N.º 15. 498 p.
13. GROSENBAUGH, L. R. 1958. The elusive formula of best fit: a comprehensive new machine program. **U. S. For, Serv. Sth. For. Exp, Sta, Occas. Pap**, 158, 9 pp.
14. HALLIN, W. E, 1967 - Soil moisture and temperature trends in cutover and adjacent old-growth douglas for timber. **Pac. Northw. For. Rang. Exp. Stat. Res. Not.** 56, 11 p,
15. HEBB, E. A. 1962 - Relation of tree growth to site factors. **Univ Tenn. Agric. Exp. Sta. Bull**, N.º 349, 18 pp.
16. HUSCH, B. 1963 - **Forest mensuration and statistic**. Ronald Press. 474 p.
17. JACKSON, D. S. 1962 - Parameters of site for certain growth components of Slash Pine (**Pinus elliottii** Engelm.). **Duke Univ. Sch, For. Bull**. N.º 16, 118 p.
18. KARSCHON, R. y PRAAG J. VAN. 1954. Growth of Red Gum (**Eucalyptus rostrata**) as influenced by depth of hardpan. **La Yaaran**. 4 (1/2), 14-17, 38.
19. KER, J. W. 1952 - An evaluation of several methods of estimating site index of immature stands. **For Chron**, 28 (3); 63-74.
20. LIESEGANG, J, 1970 -Comunicación personal.
21. LINNARTZ, N, E. 1963 - Relation of soil and topographic characteristics of site quality for Souther Pines in the Florida parishes of Louisiana. **J. For**, 61 (6), 434-8.
22. MADER, D. L. y OWEN D. F. 1961. Relationships between soil properties and Red Pine growth in Massachussets, **Proc, Soil. Sci, Soc. Amer.** 25, 62-65.
23. MADER, D. L. 1963 Volume growth measurement. An analysis of functions and characteristics in site evaluation. **Journ. For.** 61 (3) : 193-8.
24. MAYER. D. L. - Soil variability a serious problem in soil site studies in the northeast. **Proc. Soll Scl. Soc. Amer.** 27 (6): 707-9.

25. McCLURKIN, D. C. 1963 -Soil site Index predictions for White Oak in North Mississippi and West Tennessee. **For. Sci.** 9 (1) : 108-113.
26. McCLURKIN , D. C. y COVELL, R. R (1965) Site predictions for Pines in Mississippi. **U. S. For. Serv. Res. Pap. Sth. For. Exp. Sta.** - S. 15. 9 p.
27. PARDE, J. 1961 - **Dendrometrie**. Ecole Nat. Eaux For. 350 p.
28. PAWLUK t ARNEMAN. 1961 - Some forest soil characteristics and their relationship to Jack Pine growth **For. Sci.** (72) : 160-73.
29. PEGG, R. E. 1967 -Relation to Slash Pine (**Pinus elliotii var. elliotii**) site index to soil, vegetation and climate in southeast Queensland. **Res. Nore. Dep. For. Queensland.** N.º 19, 53 pp.
30. PHILLIPS, J. J. y MARKLEY, M. L. 1963 - Site index of New Jersey sweetgum stand related to soil and water table characteristics. **Resp. Pap. Ntheast. For. Exp. Sta. NE.** 6-26 p.
31. RALSTON.. Ch. W. 1964 - Evaluatlon of Forest Site Productlvity. **Int. Rev. For. Res.** 1:171-201.
32. STEINBRENNER, E. C. 1965 -The influence of individual soils and physiographic factors on the site index of Douglas Fir in Western Wáshington. **Proced. 2nd. Worth. Am. For. Soils Conf. Oregon State Univ.** 1963, (261-7).
33. STOEKLER, J. H. 1960 - Soil factors affecting the growth of Quaking Aspen in the Lake States. **Tech. Byll. Minn. Agr. Exp. Sta.** 86, 20 p.
34. TAMM, C. O. 1964 - Determination of nutrient requeriment of forest stands. **Int. Rev. For. Res.** 1:115-170.
35. WECK, J. 1957 - Neure Versuche zum Problem der Korrelation: Klima und forstliches productions potential. **Forstarchiv.** 28:223-27.
36. WILDE, S. A. et al. 1964 - Growth of Jack Pine (**Pinus banksiana.**) plantations in relation to fertility of non-phreatic sandy soils. **Soils. Sci.** 98 (3): 162-9.
37. WILDE, SA. et al. 1964 - Growth of Red Pine plantations in relation to fertility of non-phreatic sandys soils. **For. Sci.** 10 (4) : 463-70.
38. WOODS, F. W. 1960 - Energy flow silviculture-a new concept for forestry. **Proc. Soc. Amer. For.** 1960, 25-27.

IPEF n.2/3, p.1-150, 1971



NOSSAS ARVORES PARTICIPAM DO PROGRESSO DO BRASIL

CHAMPION CELULOSE S.A.

Sede: Mogi Guaçu, S. P.

Caixa Postal 10 — Telefone 102

Rua Libero Badaró, 501 — 9.º
São Paulo 2, S. P.

End. Telefónico — Champion
Fones: 37-1111 A 37-1117
Telex N.º 021 — 105

Comp. Agrícola e Industrial CICERO PRADO

PAPÉIS — CELULOSE

Papéis: Cristalite — Granado — Flor Post — Sêda
Kraft — Monolúcido

Cartolinas: Duplex Cromo — Draft para Lixa

PAPÉIS ESPECIAIS PARA CARTONAGENS CELULOSE DE EUCALIPTO

SEDE :

AVENIDA RIO BRANCO, 1675 — SÃO PAULO
ENDEREÇO TELEGRÁFICO: "CICERPRADO"
CAIXA POSTAL, 7727

FÁBRICA :

FAZENDA CORUPUTUBA — PINDAMONHANGABA
TELEFONES: 2641 — 2642 — 2643 — EST. S. PAULO