

Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile*

Important site variables and factors for *Pinus radiata* D. Don productivity in Chile

C.D.O.: 181.2; 181.3

VICTOR GERDING, JUAN E. SCHLATTER

Instituto de Silvicultura, Universidad Austral de Chile, casilla 567, Valdivia, Chile.

SUMMARY

Site factors and variables that best explain productivity variability were determined for sites with adult *Pinus radiata* plantations. The study covered 70 sites in Central Chile (33°-41° S) with great climate and soil variations. Through correlation analysis, step-wise and linear regression, climate stood out as the main factor of productivity variability. According to this result, the need to analyze sites with sandy soils separately from those with non-sandy soils became evident. The water regime, through the soil physical and climatic variables, was shown have the greatest effect upon productivity; the regime of soil nutrients was shown to have a lesser effect.

RESUMEN

Para sitios con plantaciones adultas de *Pinus radiata* se determinaron variables y factores del sitio que mejor explican la variabilidad de la productividad. El estudio abarcó 70 sitios en Chile central (33°-41° S) con grandes variaciones de clima y suelo. A través de análisis de correlación, regresión lineal y paso a paso se destacó el clima como el principal factor de la variabilidad de la productividad. En este resultado se evidenció la necesidad de analizar por separado los sitios con suelos arenosos de aquellos con suelos no arenosos. El régimen de agua, a través de variables climáticas y físicas del suelo, manifestó el mayor efecto sobre la productividad. El régimen de elementos nutritivos mostró efectos menos importantes.

INTRODUCCION

Las plantaciones de *Pinus radiata* en Chile se extienden en una amplia zona (33° - 41° latitud sur) que presenta importantes variaciones climáticas y edáficas. Ellas son una causa evidente de la variabilidad de la productividad de sitio, lo cual tiene efectos en muchos aspectos relacionados con las plantaciones como, por ejemplo, silviculturales, económicos, sociales y biológicos. Una base fundamental para el manejo de las plantaciones es la selección adecuada de los sitios para el establecimiento de esta especie, en concordancia con sus

requerimientos. Para ello es necesario determinar la influencia de distintos factores del sitio sobre la productividad de la plantaciones de *P. radiata*.

La productividad de sitio puede expresarse a través del siguiente modelo general (Chertov, Stepanov y Melnitskaya, 1977): $P = f(C, R, S, G, V, A, M, T)$, donde P es la productividad del sitio, C: clima, R: relieve, S: características estables y dinámicas del suelo incluyendo el régimen de agua, G: calidad genética del bosque, V: estructura de la comunidad vegetal, A: animales, M: influencia del hombre, y T: tiempo. Para determinar los principales factores del sitio que explican la variabilidad de la productividad de plantaciones forestales es necesario realizar una simplificación de este modelo, debido al gran número de factores involucrados en él. De esta manera se asume que los factores G, V, A, M y T son constantes y que

* Investigación realizada con el apoyo de la Dirección de Investigación (Proyecto S-88-29), Vicerrectoría Académica, Universidad Austral de Chile.

R está expresado a través de C y S. Así se puede expresar la productividad del sitio en función de los factores clima y suelo.

Los supuestos anteriores deben basarse en una metodología apropiada, de tal manera que la simplificación del modelo permita destacar los aspectos relevantes del sitio en la productividad y facilitar su interpretación. Al respecto, existen antecedentes que sustentan tales supuestos. En relación a la calidad genética de los bosques, Delmastro, Díaz-Vaz y Schlatter (1982) encontraron en Chile que la mayor variabilidad en las características de los árboles se debe a factores del sitio y en menor proporción a la variabilidad genética. Esto refuerza el conocimiento general de que *P. radiata* presenta una sola procedencia en el país. La influencia de la actividad humana (principalmente la silvicultura) es un factor controlado a través de una adecuada selección de rodales. El factor tiempo, desde el punto de vista del crecimiento del bosque, también se controla mediante una adecuada muestra de rodales y apropiadas mediciones o estimaciones de la productividad. Sólo los factores V y A se asumen constantes sin conocer su influencia directa en la productividad. Sin embargo, hay indicadores de su efecto a través de la forma de humus (Ulrich, 1981), la cual no presenta grandes variaciones en plantaciones adultas (Gerding, 1991) y se relaciona con cambios en el factor suelo (Florence y Lamb, 1974).

Considerando modelos simplificados, numerosos trabajos han determinado factores de importancia para la productividad de *P. radiata* en distintas regiones donde crecen plantaciones de esta especie (Caldentey, 1989; Franke, 1988; Franke, Vergara y Bennowitz, 1988; Hunter y Gibson, 1984; Jackson y Gifford, 1974; Reilly, Parkes y Ferguson, 1975; Ruiz y Schlatter, 1985; Schlatter, Gerding y Bonnefoy, 1982; Schlatter y Gerding, 1984; Truman, Humphreys y Lambert, 1983). Los resultados obtenidos presentan diferencias debido a los factores considerados y a su amplitud de variación. Si bien estas funciones pueden emplearse para predecir la productividad, muchas veces no resultan prácticas en ese sentido y pueden producir estimaciones inexactas (McQuilkin, 1976). Por ello, normalmente se utilizan con éxito para determinar la importancia relativa de los factores que explican la variabilidad de la productividad.

En el presente trabajo se enfatiza este segundo aspecto a través del análisis de un conjunto de sitios con plantaciones adultas de *P. radiata* en

Chile central. Específicamente, se pretende determinar variables y factores del sitio que mejor explican la variabilidad de la productividad de estas plantaciones.

MATERIAL Y METODOS

Sitios y variables. Se emplearon datos de los 70 sitios descritos por Gerding (1991), que se distribuyen en el rango de latitud de 33°07'- 40°37'S. Las variables que describen estos sitios incluyen características climáticas (temperaturas y precipitación), edáficas (químicas y físicas) y de la forma del terreno.

El área de estudio puede dividirse en tres zonas climáticas (Fuenzalida, 1965): Zona climática 1 (Csb1): Clima templado cálido con estación seca prolongada (20 sitios); Zona climática 2 (Csb2): Clima templado cálido con estación seca y lluviosa semejantes (36 sitios); Zona climática 3 (Cfsb): Clima de costa occidental con influencia mediterránea (14 sitios).

Las variables climáticas y sus rangos de variación (Huber, 1975) son los siguientes: Temperaturas medias (°C) anual (11.5-14.5), de primavera (10.2-14.0), de verano (15.7-19.0), de otoño (10.8-14.0) y de invierno (6.0-12.1); Precipitación (mm) total anual (500-3000), de primavera (60-600), de verano (1-220), de otoño (100-800), de invierno (300-1200) y la suma de primavera, verano y otoño (161-1610); e índice de aridez de Martonne (21.3-136.4).

Los suelos se clasificaron según el material de origen (ODEPA, 1968; Gerding, 1991): dunas litorales (Entisol, 2 sitios); arenales (Entisol, 10 sitios); cenizas volcánicas (Andosol, 9 sitios); graníticos (Alfisol, 17 sitios); metamórficos (Alfisol, 17 sitios); rojo arcillosos (Alfisol y Ultisol, 11 sitios); y sedimentos marinos (Alfisol y Ultisol, 4 sitios).

En cada sitio se describió el perfil de suelo según Schlatter, Grez y Gerding (1981) y se complementó la información con un reconocimiento del suelo a través de un bastón pedológico en una superficie de aproximadamente 1 ha. Esta descripción abarcó principalmente: material de origen, horizontes, profundidad, drenaje, textura, proporción de esqueleto, consistencia, estructura, color, arraigamiento fino y capacidad de agua aprovechable (CAA).

Los análisis químicos y físicos del suelo (Gerding, 1991) se hicieron en tres estratos de

profundidad de acuerdo con la descripción morfológica: Profundidad 1 (P1): límite inferior promedio de 17 cm (variación entre 5 y 43 cm); Profundidad 2 (P2): límite inferior promedio de 45 cm (variación entre 22 y 90 cm); Profundidad 3 (P3): límite inferior promedio de 107 cm (variación entre 50 y 170 cm).

Características de los rodales. Los rodales presentaban edades de 14-37 años, la altura media de los árboles dominantes varió entre 18.5 y 39.2 m, la densidad entre 507 y 2.122 árboles/ha y el área basal entre 28.6 y 79.8 m²/ha. El índice de sitio (altura media de los árboles dominantes a la edad de 20 años) calculado según García (1970) fluctuó entre 17.8 y 34.7 m. La biomasa aérea calculada según Gerding (1991) varió entre 100 y 481 t/ha, con una fluctuación del incremento medio anual de 5.0 a 21.4 t/ha/año.

Análisis de los datos. A partir del análisis de componentes principales con las variables que describen los sitios (12 variables climáticas, 19 variables químicas del suelo y 19 variables físicas del suelo) (Gerding, 1991), fueron seleccionadas variables según el procedimiento de retención de variables descrito por Isebrands y Crow (1975). Luego se sometieron a análisis de regresión paso a paso (Draper y Smith, 1966) sobre las variables dependientes que estiman la productividad de sitio. Se consideró una probabilidad $P < 0.10$ para el ingreso y salida de variables independientes a los modelos de regresión. Este procedimiento se aplicó a diferentes grupos de sitios clasificados según el tipo de suelo y el clima (tamaño muestral = 10 sitios).

Como variables dependientes se emplearon el índice de sitio (IS) y, en algunos casos, también el incremento medio anual en biomasa aérea (IBM). Estos indicadores permitieron abarcar el mayor número posible de los sitios en estudio (Gerding, 1991).

Las relaciones entre pares de variables se determinaron a través de correlaciones de Pearson. Las comparaciones de medias se hicieron por análisis de varianza simple y prueba de Scheffé (Hartung, Elpelt y Klösener, 1986).

RESULTADOS

Relaciones entre el índice de sitio y variables climáticas. La productividad promedio de *P. radiata*, medida a través del IS, aumenta desde la

zona climática 1 a la 3 (figura 1). En términos generales, el IS se ve favorecido con el aumento de la precipitación, especialmente aquella relacionada con el período vegetativo (cuadro 1). Este efecto también es evidente a través de la latitud y el índice de aridez de De Martonne, pues entre estas dos variables y las precipitaciones existen correlaciones positivas altamente significativas.

La mayor temperatura media de otoño muestra una influencia positiva sobre el IS en la zona climática más fría (cuadro 1). Una situación inversa se presenta en los suelos metamórficos, debido a que éstos se encuentran también en zonas más secas y cálidas donde la baja precipitación (342-1.205 mm en el período primavera-verano-otoño) coincide con mayores temperaturas (12.3-14.0°C promedio de otoño), mostrándose así que en esos rangos es más importante el abastecimiento de agua que el nivel de temperatura. En las cenizas volcánicas el IS correlaciona positivamente con la temperatura media del verano.

La latitud y la longitud están relacionadas con la variación climática general, pero también con variaciones importantes en el suelo (Gerding, 1993a). La elevación como un factor regulador del clima no mostró su efecto en el rango en que se encuentran estos sitios (10-400 y sólo algunos

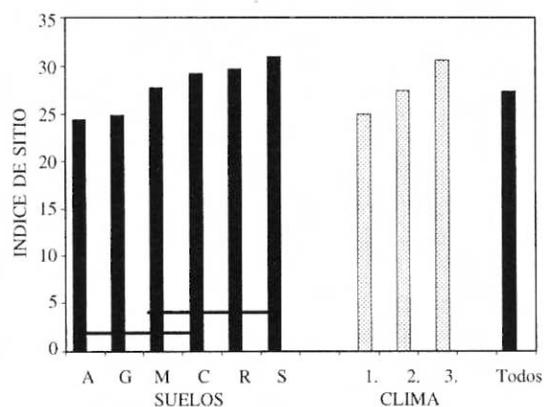


Figura 1. Índice de sitio promedio de *P. radiata* por zona climática y por tipo de suelo: A = Arenas, C = Cenizas volcánicas, G = Graníticos, M = Metamórficos, R = Rojo arcillosos, S = Sedimentos marinos, 1 = Clima Csb1, 2 = Clima Csb2, 3 = Clima Cfsb. Línea horizontal une promedios iguales ($P < 0.05$).

Average site index of *P. radiata* by climatic zone and by soil type: A = sand, C = volcanic ash, G = granite, M = metamorphic, R = red clay, S = marine sediments, 1 = climate Csb1, 2 = climate Csb2, 3 = climate Cfsb. Horizontal lines connect similar averages ($P < 0.05$).

CUADRO 1

Coefficientes de correlación significativos (1) entre el índice de sitio de *P. radiata* y variables climáticas.

En paréntesis: número de sitios.

Significant (1) correlation coefficients between the site index of *P. radiata* and climatic variables.

Number of sites shown in parenthesis.

Variable	Sitios				
	Todos (70)	Suelos no arenosos (58)	Suelos metamórficos (16)	Suelos de cenizas volcánicas (9)	Zona climática 3 (14)
Latitud	0.49**	0.54**	-	-	-
Longitud	0.51**	0.56**	-	-	-
Índice de aridez	0.50**	0.50**	-	-	-
Precipitación					
anual	0.48**	0.51**	-	-	-
de primavera-verano-otoño	0.49**	0.54**	-	-	-
de primavera	-	0.52**	-	-	-
de otoño	0.48**	-	-	-	-
Temperatura media de otoño	-	-	-0.56*	-	0.76**
Temperatura media de verano	-	-	-	0.64*	-

(1): ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; - $P > 0.05$.

hasta 750 m s n.m.), pues se buscó justamente evitar dicha influencia para identificar mejor los efectos de los otros factores del sitio.

Para los suelos no arenosos se observó una tendencia creciente del IS en el rango de 500 a 2400 mm de precipitación anual. Por sobre este nivel hay otros factores que distorsionan dicha tendencia, produciéndose una leve caída del IS con las mayores precipitaciones. Ello se debe a que en esas condiciones se presentan menores temperaturas y algunos suelos con drenaje interno menos favorable.

El IS muestra una buena relación con la distribución de la precipitación en el año, especialmente con la caída durante el período vegetativo. Sin embargo, dichas relaciones no son mejores que las encontradas con la precipitación total anual.

La temperatura mostró relaciones menos significativas que la precipitación con respecto al IS. En la zona climática 3 se apreció un incremento del IS con las mayores temperaturas promedio de otoño en el estrecho rango de 11.4 a 12.5 °C, siendo más favorables las temperaturas superiores a 12°C. Esta condición más favorable está relacionada con un clima moderado en la zona costera, en la cual se presentan mayores temperaturas que hacia el interior. Ello resulta importante para la

productividad de las plantaciones ya que en dicha zona la precipitación es abundante (2000-3000 mm anuales). Esta situación de la zona climática 3 contribuye a explicar la variación del IS con las precipitaciones comentadas anteriormente.

Relaciones entre el índice de sitio y variables edáficas. La productividad (IS) de las plantaciones se ve influida significativamente por el tipo de suelo en el cual se desarrollan, no obstante la gran amplitud de condiciones de clima que también actúan significativamente sobre dicha productividad (figura 1).

Variables físicas del suelo. En el conjunto total de sitios se destaca el efecto negativo sobre la productividad (IS) de altos contenidos de arena gruesa y de una densidad aparente alta; también se aprecia el efecto positivo de una mayor CAA y mayor volumen total de poros. En los suelos no arenosos se mantienen estas mismas tendencias, pero los coeficientes de correlación son menores, aunque significativos. Esto indica el efecto que produce el grupo de suelos arenosos en las tendencias generales de la productividad, lo cual puede observarse a través de la comparación de los respectivos coeficientes de correlación en el cuadro 2.

En las arenas se destaca que la calidad de sitio

disminuye con el aumento de la densidad aparente del subsuelo, siendo consecuentemente positivo el efecto de la mayor porosidad total. También es beneficiosa la mayor participación de limo en el suelo superior y una CAA más alta. En los suelos graníticos sólo se encontró una relación negativa con la arena gruesa del primer horizonte; en los suelos metamórficos tanto la textura como la densidad aparente y la CAA mostraron efectos sobre la productividad y en los suelos rojo arcillosos sólo la CAA. En estos tres grupos de suelos dichas relaciones presentaron las mismas tendencias antes mencionadas, pero de menor significancia. En los otros suelos no se encontraron correlaciones significativas.

En la zona climática 1 se destaca el efecto positivo de una mayor proporción de limo, una CAA más alta y mayor volumen total de poros. En forma negativa actúan el mayor contenido de arena gruesa del suelo superficial y una densidad aparente más alta. En esta zona de clima más seco se hace evidente el beneficio que reporta un mejor abastecimiento de agua, expresado a través de las variables antes mencionadas que favorecen la CAA y el mejor desarrollo radicular.

En la zona climática 2 se observan las mismas tendencias antes mencionadas, además de un efecto positivo de la mayor presencia de arcilla en todo el perfil de suelo. Sin embargo, al excluir los suelos arenosos, que en 10 de los 12 casos se encuentran en la zona climática 2, en esta zona ninguna variable presenta correlaciones significativas con el IS. Ello demuestra una vez más el efecto que tienen los suelos arenosos en las tendencias del IS cuando se le asocia con variables edáficas.

En la zona climática 3 el IS tampoco presentó correlaciones significativas con ninguna de las variables físicas consideradas. Ello se debe a que en esta zona climática todos los suelos abarcados presentan condiciones físicas favorables dentro de estrechos rangos de variación. Se destaca así la tendencia del IS con las condiciones climáticas mostradas a través del cuadro 1. La productividad de las plantaciones tiende a disminuir en esta zona bajo las condiciones climáticas que imperan en la depresión intermedia y precordillera andina, es decir, con un clima más continental. Este resultado coincide con lo encontrado por Vera (1987) en plantaciones de *P. radiata* creciendo sobre suelos de origen volcánico en esta misma región.

Otra característica muy importante de los regímenes de agua y aire del suelo es el drenaje inter-

no. En la figura 2 se aprecia el efecto de esta variable sobre el IS y el IBM. En ella se gráfica el porcentaje alcanzado por el IS y el IBM con respecto al máximo valor promedio en una clase de drenaje interno, que en este caso correspondió al drenaje rápido a moderado. En ambos casos la tendencia es similar, pero más pronunciada en el IBM. La mayor productividad se alcanzó en condiciones de drenaje moderado-lento hasta drenaje rápido, mientras que tanto con drenaje impedido como excesivo la productividad de las plantaciones fue menor. En general, los suelos arenosos presentaron drenaje en el rango rápido a muy rápido; las cenizas volcánicas de moderado a rápido; los graníticos moderado, pero también los dos únicos casos de drenaje restringido; y los metamórficos, rojo arcillosos y sedimentos marinos moderado y en algunos casos moderado a lento.

El drenaje externo del suelo no mostró ninguna relación significativa con la productividad. La caracterización de esta variable del régimen de agua se hizo principalmente en función de la pendiente del terreno y la textura del suelo, por lo que su efecto sobre la productividad ha sido encubierto por otros factores del sitio. Pero en algunos sitios en particular el drenaje externo puede explicar cierta magnitud de la variabilidad de la productividad.

Es importante considerar las relaciones entre

VARIACION IS - IBM (%)

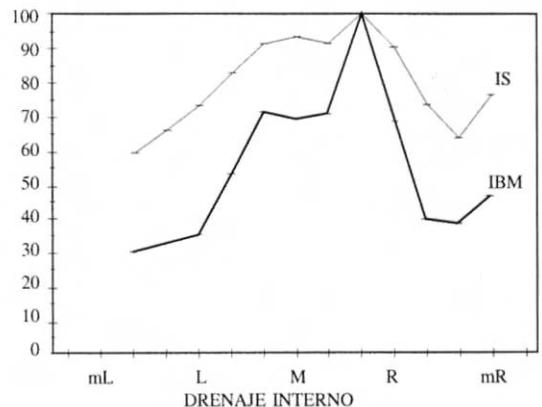


Figura 2. Variación del índice de sitio (IS) y del incremento medio anual en biomasa (IBM) de *P. radiata* según clase de drenaje interno del suelo (mL = muy lento, L = lento, M = moderado, R = rápido, mR = muy rápido).

Variation of the site index (IS) and the average annual increment in biomass (IBM) of *P. radiata* according to the internal drainage class of soils (mL = very slow, L = slow, M = moderate, R = rapid, mR = very rapid).

CUADRO 2

Coefficientes de correlación (1) entre el índice de sitio de *P. radiata* y variables físicas del suelo.

En paréntesis: número de sitios.

Correlation coefficients (1) between the site index of *P. radiata* and physical soil variables.

Number of sites shown in parenthesis.

Variable	Sitios							
	Todos (70)	Suelos no arenosos (58)	Suelos arenosos (12)	Suelos graníticos (17)	Suelos rojo arcillosos (10)	Suelos metamórficos (16)	Zona cli- mática 1 (20)	Zona cli- mática 2 (36)
Contenido de arcilla								
profundidad 1	-	-	-	-	-	-	-	0.55**
profundidad 2	-	-	-	-	-	-	-	0.45**
profundidad 3		-	-	-	-	-	-	0.51**
Contenido de limo								
profundidad 1	0.50**	0.38**	-	-	-	-	0.65**	0.54**
profundidad 2	-	-	0.79**	-	-	-	0.59**	0.51**
profundidad 3	-	-	-	-	-	0.58*	0.64**	0.58**
Contenido de arena gruesa								
profundidad 1	-0.63**	-0.57**	-0.68*	-0.53*	-	-	-0.63**	-0.62**
profundidad 2	-0.57**	-0.46**	-	-	-	-	-	-0.60**
profundidad 3	-0.57**	-0.48**	-	-	-	-	-	-
Contenido de arena total								
profundidad 1	-0.57**	-0.54**	-	-	-	-0.53*	-	-0.62**
profundidad 2	-	-	-0.78**	-	-	-	-	-
Densidad aparente								
profundidad 1	-0.57**	-0.50**	-0.70*	-	-	-0.61*	-0.50*	-0.50**
profundidad 2	-0.54**	-0.45**	-0.88**	-	-	-	-	-0.42**
profundidad 3	-0.51**	-0.43**	-0.75**	-	-	-	-0.57**	-0.35*
Volumen total de poros								
profundidad 1	0.51**	0.46**	0.68*	-	-	-	0.56*	0.37*
profundidad 2	0.50**	0.41**	0.87**	-	-	-	0.45*	-
profundidad 3	-	-	0.72**	-	-	-	0.56*	-
Capacidad de agua aprovechable								
profundidad 1	0.50**	0.31*	0.63*	-	-	-	-	0.40*
profundidades 1+2	0.62**	0.53**	0.69*	-	0.75*	0.55*	-	0.54**
hasta 1 m	0.47**	0.37**	0.78**	-	-	-	0.46*	0.35*
profundidad de raíces.	0.56**	0.43**	0.78**	-	-	-	0.64**	0.50**
hasta máximo 1 m	0.56**	0.42**	0.77**	-	-	-	0.58**	-

(1): ** P < 0.01; * P < 0.05; - P > 0.05.

variables del sitio para comprender mejor el efecto de una de ellas sobre la productividad, ya que una variable del sitio correlacionada con la productividad también lo está con otras variables del sitio que pueden ser de muy distinta naturaleza (Gerding, 1993a). Evidentemente, todas las variables que pueden definir un sitio están influyendo sobre la productividad de tal sitio, siendo inexacto atribuirle sólo a una variable del sitio la explica-

ción de la variabilidad de la productividad. Sin embargo, las relaciones entre un indicador de la productividad y las variables individuales del sitio, como las mostradas aquí, orientan adecuadamente sobre las tendencias de tal indicador respecto de factores medioambientales.

Variables químicas del suelo. Los suelos presentan características químicas diferentes que influyen en la productividad y que permiten distin-

guir algunos sitios, de tal manera que las tendencias que siguen los indicadores de la productividad con la mayoría de las variables químicas consideradas están determinadas en el conjunto de todos los sitios por alguno de los tipos de suelo. El efecto producido por los suelos arenosos -mencionado para las variables físicas- también se aprecia con otros tipos de suelo para las variables químicas. A modo de ejemplo se puede mencionar que en la zona climática 2 se encontraron más de 30 variables significativamente correlacionadas con el IS ($P < 0.01$), pero al excluir las arenas se obtuvieron sólo dos correlaciones de menor significancia ($P < 0.05$). Por lo anteriormente expuesto se consideró conveniente mostrar el análisis de las relaciones del IS con las variables químicas del suelo en cada tipo de suelo por separado, sin tomar en cuenta las agrupaciones por zona climática (cuadro 3).

Arenas: se destaca el efecto positivo de mayores contenidos de materia orgánica en el subsuelo y de una mayor capacidad de intercambio de bases en el suelo superior. La tendencia negativa con el Mg de reserva del primer horizonte se debe a los suelos de dunas costeras que son las más ricas en reservas de bases, pero presentan otras limitaciones (Gerding, 1991, 1993b). Las mejores correlaciones se obtuvieron con el K intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico del primer horizonte.

Sin embargo, para el conjunto de suelos arenosos se encontró, por una parte, que con mayores niveles de K intercambiable también se presentan ($P < 0.01-0.05$) mejores características físicas y mayores niveles de materia orgánica del suelo, lo cual influye favorablemente en la productividad. Por otra parte, en el follaje de estas plantaciones se encontraron niveles altos de K (concentración $> 0.6\%$), excepto en dos de ellas, en que sólo fue moderado pero no limitante para el crecimiento de los árboles (Gerding, 1991). Y no hubo correlación significativa entre el K intercambiable y el K del follaje, lo cual indica que la correlación positiva entre el IS y el K intercambiable no tiene una causa principalmente nutritiva, sino que se basa en la interrelación de variables del sitio. Estas relaciones se expresan a través del K intercambiable, pero están dominadas principalmente por el efecto negativo de una mayor proporción de arena gruesa y el efecto positivo de un mayor contenido de materia orgánica de estos suelos.

Cenizas volcánicas: se observa que el IS pre-

senta las relaciones más significativas con variables del intercambio catiónico del subsuelo. En los suelos con mayor nivel de bases intercambiables la productividad tiende a ser mejor y entre estas variables se presentan las naturales correlaciones positivas. Este resultado coincide con lo encontrado por Fassbender y Tschinkel (1974) en otros suelos derivados de cenizas volcánicas, en el sentido de que el IS correlaciona mejor con las cantidades por hectárea de elementos nutritivos que con las concentraciones, pero difiere en que en este estudio se presentan mejores correlaciones con variables del subsuelo que con las del primer horizonte. Esto último puede relacionarse con el grado de evolución de los suelos, indicando que en suelos más desarrollados la productividad es mejor que en suelos más jóvenes.

El hecho de que en los suelos de cenizas volcánicas se presenten mejores correlaciones de la productividad con las cantidades de elementos intercambiables, en vez de las concentraciones respectivas, refleja que en estos suelos las plantaciones se favorecen con una mayor profundidad del suelo y no se manifiestan limitaciones debido a la densidad aparente.

Graníticos: se observan relaciones de menor significancia, destacándose la correlación negativa del IS con el pH en agua del subsuelo (pHa3: 4.7-6.7). Los suelos más ácidos corresponden a aquellos mejor desarrollados y en climas más húmedos. Los niveles de pH no son restrictivos para el crecimiento de la plantaciones, ya que se encuentran en los rangos tampón de intercambio a carbonato de calcio en todo el perfil (Ulrich, 1961). Los posibles efectos negativos de pH en el rango tampón de intercambio pueden ser contrarrestados o sobrepasados por las mejores características físicas del suelo y climáticas.

Metamórficos: el IS se relaciona positivamente mejor con el Al intercambiable. En estos suelos la concentración de Al intercambiable varía entre 0.12 y 6.36 meq/100g en el primer horizonte y entre 0.01 y 9.99 meq/100g en el segundo nivel de profundidad. La saturación de Al en el segundo nivel de profundidad fue de 0.1 a 87%, con un promedio de 43%. Con tales condiciones no se observaron limitaciones para el desarrollo radicular (Gerding, 1991), no obstante que se considera que una saturación de Al superior a 50% es fuertemente restrictiva para el crecimiento de las plantas (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Las mayores cantidades de Al intercambiable

CUADRO 3

Coefficientes de correlación significativos (1) entre el índice de sitio de *P. radiata* y variables químicas del suelo para distintos grupos de sitios según el tipo de suelo. En paréntesis: número de sitios.
 Significant correlation coefficients between the site index of *P. radiata* and chemical soil variables for distinct groups of sites according to soil types. Number of sites shown in parenthesis.

Variable (+)	Arenas (12)		Variable	Cenizas volcánicas (9)	
	Concentración	Cantidad		Concentración	Cantidad
C total (P2)	0.69*	0.66*	H intercambiable (P1)	-0.68*	-
C total (P3)	0.65*	0.69*	Na intercambiable (P2)	-	0.68*
N total (P2)	0.67*	0.67*	Ca intercambiable (P2)	-	0.74*
CTIC (P1)	0.76**	-	Mg intercambiable (P2)	-	0.72*
CTIC (P2)	0.72**	-	CEIC (P2)	-	0.81**
CEIC (P1)	0.61*	0.62*	Variable Rojo arcillosos (10)		
CEIC (P2)	-	0.67*	Concentración Cantidad		
K intercambiable (P1)	0.87**	0.88**	C total (P3)	-	-0.73*
Ca intercambiable (P1)	0.66**	-	N total (P3)	-	-0.80**
Ca intercambiable (P2)	-	0.70*	CTIC (P2)	-0.75*	-
Mn intercambiable (P1)	-	-0.63*	P reserva (P1)	-0.69*	-
% K intercambiable (P1)	0.77**	X	Ca reserva (P3)	-	-0.70*
% Ca intercambiable (P2)	0.63*	X			
Mg reserva (P1)	-0.67*	-0.69*			
Variable Metamórficos (16)			Variable Graníticos (17)		
Concentración Cantidad			Concentración Cantidad		
pH agua (P2)	-0.59*	X	pH agua (P2)	-0.55*	X
C total (P1)	0.55*	0.51*	pH agua (P3)	-0.58*	X
C total (P2)	-	0.59*	pH KCl 0.1 n (P3)	-0.51*	X
N total (P2)	-	0.53*	C total (P3)	-	0.54*
Na intercambiable (P1)	-	-0.51*	K intercambiable (P1)	-	0.51*
Al intercambiable (P1)	0.54*	-	% Mg intercambiable (P2)	-0.56*	X
Al intercambiable (P2)	-	0.70**	P reserva (P3)	-	0.50*
Mn intercambiable (P2)	-	-0.55*			
% Al intercambiable (P2)	0.65**	X			
% Ca intercambiable (P2)	-0.51*	X			
% Mg intercambiable (P2)	-0.51*	X			
Ca reserva (P3)	-	-0.64**			

(1): ** P < 0.01, * P < 0.05, - P > 0.05; X: no determinado
 (+): P1, P2, P3 = Estratos de profundidad del suelo, CTIC = Capacidad total de intercambio canónico, CEIC = Capacidad efectiva de intercambio catiónico.

en los suelos metamórficos se encuentran en condiciones de clima más húmedo. Los promedios para el segundo nivel de profundidad son de 180, 377 y 462 kg/ha en estos suelos de las zonas climáticas 1, 2 y 3, respectivamente. De esta manera también coinciden con suelos más limosos y más ricos en materia orgánica. La cantidad de Ca

de reserva tiene una tendencia contraria a la del Al. En general, estas variables están indicando que en suelos más desarrollados con clima más húmedo la productividad tiende a ser mayor.

Rojo arcillosos: la productividad de las plantaciones fue menor cuando se presentó mayor cantidad de N total en el subsuelo. Sin embargo, los con-

tenidos de N total fluctuaron entre 0.21 y 0.68% en el primer horizonte, con un contenido máximo de C total de 10.9%, y entre 0.03 y 0.17% en el tercer nivel de profundidad, con un máximo de 1.9% de C total. Dentro de estos rangos de materia orgánica no debería esperarse un efecto negativo de ésta. Efectivamente, los suelos con mayor cantidad de N en el subsuelo se presentan en terrenos más planos con menor CAA y clima más seco y cálido. Respecto de estas variables del sitio ya se mostró el efecto positivo de la CAA sobre el IS (cuadro 2), y el efecto negativo del clima más caluroso en verano también puede explicarse por su relación con el abastecimiento de agua.

Respecto a las relaciones de la productividad con las variables químicas del suelo se puede apreciar que, salvo algunas excepciones, éstas no se correlacionan bien con el IS en cada tipo de suelo. Además, en la mayoría de los casos tales correlaciones representan en forma indirecta los efectos de otras variables del sitio clasificadas en este estudio como variables físicas del suelo y variables climáticas. En el caso de las arenas se obtuvo una relación lógica con la materia orgánica y con las bases de intercambio; igualmente en los suelos de cenizas volcánicas con el intercambio catiónico. Sin embargo, en las arenas las variables químicas están estrechamente relacionadas con variables físicas del suelo, las cuales como variables individuales explican mejor las variaciones del IS. Este fenómeno también ocurre en los suelos graníticos, metamórficos y rojo arcillosos, en los cuales además se observan relaciones significativas de las variables químicas con variables climáticas, siendo estas últimas las que en forma individual permiten mejor explicación de las variaciones del IS.

Este comportamiento de las relaciones entre la productividad y las variables químicas se debe a que los suelos presentan en general buenas condiciones químicas para el desarrollo de las plantaciones. Como ejemplo se puede mencionar que el pH se encuentra en los rangos tampón de intercambio a carbonato de calcio en todos los perfiles de suelo; en el primer horizonte la capacidad efectiva de intercambio catiónico varía entre 1.5 y 21.4 meq/100g con un promedio de 7.8 meq/100g; la saturación de bases entre 5 y 80%, aunque la gran mayoría de los suelos presenta valores sobre 20%; y el nivel de C total fluctúa entre 0.1 y 11.5%, con un promedio de 4.0%. Tales características se reflejan en un buen estado nutricional de las plantaciones, con algunas excepciones que coinciden con

los sitios más pobres en elementos nutritivos (Gerding, 1991).

De esta manera los resultados expuestos indican que las variaciones del IS son explicadas en mejor forma a través de las variables climáticas y físicas del suelo, cuando éstas son consideradas en forma individual. Pero ellas representan también importantes características químicas de los suelos. Esto dificulta la evaluación de la relación entre variables individuales y la productividad, debiéndose tener especial cuidado en distinguir las relaciones causa-efecto y las relaciones espúreas.

FACTORES DE IMPORTANCIA PARA LA PRODUCTIVIDAD

En la dependencia de la productividad respecto a las variables individuales del sitio, destaca la gran interrelación de ellas en su efecto sobre la productividad. Es de interés, por lo tanto, analizar la dependencia de la productividad de sitio en función de un conjunto de variables del sitio de distinta naturaleza, para destacar las más significativas. Para una mejor interpretación de los resultados es conveniente agrupar tales variables independientes en conjuntos que caracterizan determinadas condiciones de los sitios. Estos grupos de variables se denominan en adelante "factores del sitio".

En el cuadro 4 se muestra la variabilidad de la productividad, a través del IS y del IBM, en los distintos grupos de sitios considerados. En todos los casos la variabilidad del IBM es mayor que la del IS. Respecto a los tipos de suelo, la mayor variabilidad se encontró en los arenosos y graníticos, que a su vez presentan los menores valores promedio; una menor variabilidad se presentó en los metamórficos y rojo arcillosos, que tienen mayor productividad promedio. En relación a las zonas climáticas se aprecia que de norte a sur disminuye la variabilidad y aumenta la productividad promedio. Los suelos arenosos influyen esta tendencia especialmente en la zona climática 2, donde hacen disminuir la productividad promedio y aumentar la variabilidad.

Un resumen de los resultados de las regresiones para los distintos conjuntos de sitios en que se aplicó este análisis se presenta en el cuadro 5. Se observa que en la mayoría de los casos se alcanzó un grado de explicación de la variabilidad de la productividad (R^2) por sobre 60% y en un tercio de los grupos de sitios se obtuvo un R^2 superior a 80%. En general, se obtuvieron mejores regresio-

nes para el IS que para el IBM. Este resultado muestra una alta proporción de explicación de la variabilidad de la productividad en comparación con los de otros autores que alcanzan un nivel de explicación rara vez superior al 60% (Covell y McClurkin, 1967). Al respecto Shrivastava (1976) realizó una profunda revisión de la literatura, encontrando pocas veces tan altas proporciones de explicación de la variabilidad de la productividad.

A continuación se analizan sólo aquellas regresiones que presentan $R^2 > 50\%$. De esta manera, se considera el IS como variable dependiente en los grupos de: todos los sitios, suelos metamórficos, suelos rojo arcillosos y zonas climáticas. El IBM se considera en los grupos de: sitios con suelos no arenosos, suelos arenosos y suelos graníticos.

En el aporte de cada factor del sitio (dR^2) a la explicación de la variabilidad de la productividad ($R^2\%$) se observa que los factores más significativos y más frecuentes son la textura, el clima y el intercambio catiónico (cuadro 6). Luego están las reservas de elementos nutritivos y la materia orgánica del suelo. El detalle de las principales variables en cada caso se muestra en el cuadro 7.

Para ejemplificar las interrelaciones entre las variables de la regresión con otras variables del sitio, se presentan en forma gráfica aquellas de correlación más significativa ($P < 0.001-0.01$) en los grupos de todos los sitios, suelos no arenosos y suelos arenosos. Al lado derecho de una variable

de la regresión y con signo (+) se muestran las variables del sitio que se correlacionan positivamente con la variable de la regresión. Por el contrario, al lado izquierdo y con signo (-) se presentan las variables de correlación negativa (figuras 3 y 4).

Todos los sitios. El factor más importante es la textura y luego aparecen con igual proporción el clima y el intercambio catiónico; con un pequeño aporte contribuye la reserva de elementos nutritivos del suelo. Los altos contenidos de arena gruesa influyen negativamente en la productividad. Pero esta variable está altamente correlacionada con otras variables del sitio (Gerding, 1993a) que contribuyen a explicar su efecto sobre la productividad. Lo mismo ocurre con las otras variables que fueron incluidas en la regresión paso a paso (figura 3). En general, la arena gruesa del primer horizonte representa variaciones de características físicas y químicas del suelo y el índice de aridez la variación climática y de algunas características físicas del suelo. Este resultado está fuertemente influido por el grupo de suelos arenosos por sus características extremas, lo que indica que ellos deberían ser considerados en un estrato separado en los análisis de la influencia de los factores edáficos sobre la productividad de las plantaciones de *P. radiata*.

Sitios con suelos no arenosos: en este caso el factor más importante es el clima y en segundo lugar las propiedades químicas del suelo. En compa-

CUADRO 4

Variabilidad de los indicadores de la productividad en distintos grupos de sitios
(n = número de sitios, CV = coeficiente de variación).

Variability of productivity indicators in distinct groups of sites (n = number of sites, CV = coefficient of variation).

Grupos de sitios	Índice de sitio (m)					Incremento de biomasa (kg/ha/año)				
	n	Promedio	CV %	Mínimo	Máximo	n	Promedio	CV %	Mínimo	Máximo
Todos los sitios	70	27.2	14.0	17.8	34.7	57	12.209	32.8	5.016	21.410
Suelos no arenosos	58	27.7	12.6	17.8	34.7	47	12.712	29.4	5.397	21.410
Suelos arenosos	12	24.6	17.0	18.3	32.3	10	9.846	44.7	5.016	16.627
Suelos graníticos	17	25.0	15.4	17.8	31.4	17	10.288	31.8	5.397	16.628
Suelos metamórficos	17	27.8	9.6	23.5	32.1	14	12.490	25.3	8.446	17.718
Suelos rojo arcillosos	11	29.7	10.0	24.7	34.7	6	14.645	23.5	8.191	17.937
Zona climática 1	20	24.8	14.2	17.8	32.3	17	9.074	30.9	5.397	16.478
Zona climática 1 sin arenas	18	24.5	13.1	17.8	29.2	15	8.712	24.7	5.397	13.078
Zona climática 2	36	27.3	13.1	18.3	32.1	31	12.951	30.6	5.016	21.410
Zona climática 2 sin arenas	26	28.6	9.6	23.5	32.1	23	14.200	21.8	8.903	21.410
Zona climática 3	14	30.6	7.6	27.1	34.7	9	15.577	9.3	13.796	17.937

CUADRO 5

Resumen de las regresiones paso a paso para el índice de sitio y el incremento en biomasa como variables dependientes. R^2 = Coeficiente de determinación (%), F = valor de F del análisis de varianza, ES = Error estándar de la estimación, n = número de sitios.

Summary of step-wise regressions with site index and biomass increment as dependent variables. R^2 = coefficient of determination (%), F = value from the analysis of variance, ES = standard error of the estimation, n = number of sites.

Grupo de sitios	Índice de sitio (m)				Incremento en biomasa (kg/ha/año)			
	n	R^2	F	ES	n	R^2	F	ES
Todos los sitios	70	63.5	15.39***	2.43	57	48.7	12.36***	2.977
Suelos no arenosos	58	58.4	10.01***	2.43	47	59.2	11.88***	2.558
Suelos arenosos	12	85.1	25.64***	1.78	10	98.9	111.47***	621
Suelos graníticos	17	59.5	6.36**	2.73	17	73.0	11.71***	1.889
Suelos metamórficos	17	58.8	9.55***	1.32	14	22.5	3.19 ns	2.662
Suelos rojo arcillosos	11	99.4	127.26***	0.37	-	-	-	-
Zona climática 1	20	85.4	21.91***	1.52	17	66.9	14.12***	1.725
Zona climática 1 sin arenas	18	90.7	23.34***	1.17	15	79.5	14.23***	1.100
Zona climática 2	36	70.2	14.14***	2.11	31	41.9	10.08***	3.125
Zona climática 2 sin arenas	26	15.1	4.26*	2.42	23	30.6	4.41*	2.704
Zona climática 3	14	57.5	16.26**	1.58	-	-	-	-

* $P < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $P < 0.001$, ns: no significativo, -: no analizado ($n < 10$).

CUADRO 6

Factores del sitio más significativos según las regresiones paso a paso para diferentes grupos de sitios. Los valores muestran la contribución de cada factor del sitio ($dR^2\%$) a la explicación total de la variabilidad de la productividad ($R^2\%$).

Most significant site factors according to step-wise regression for different groups of sites. The values show the contribution of each site-factor ($dR^2\%$) to the total explication of the variability in productivity ($R^2\%$).

Grupos de sitios	Variable Dependiente	Factores del sitio							Total R^2 (%)
		Clima	Textura	Propied. físicas	CAA	M.O.	CIC	Reserva	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
Todos los sitios	IS	10.8	39.7	-	-	-	10.8	1.8	63.1
Suelos no arenosos	IBM	34.4	-	-	-	-	12.6	12.2	59.2
Suelos arenosos	IBM	1.2	3.9	-	-	28.3	65.5	-	98.9
Suelos graníticos	IBM	-	21.0	-	18.5	33.5	-	-	73.0
Suelos metamórficos	IS	23.0	35.8	-	-	-	-	-	58.8
Suelos rojo arcillosos	IS	17.5	-	-	1.4	-	49.7	30.6	99.2
Zona climática 1	IS	-	41.6	-	-	-	5.1	37.7	84.4
Zona climática 1 sin arenas	IS	-	70.4	-	-	-	20.3	-	90.7
Zona climática 2	IS	-	-	-	15.0	-	51.9	3.3	70.2
Zona climática 2 sin arenas	IBM	13.0	-	-	-	-	-	17.6	30.6
Zona climática 3	IS	57.5	-	-	-	-	-	-	57.5

(1): IS = Índice de sitio, IBM = Incremento en biomasa.

(2): Variables climáticas.

(3): Textura del suelo.

(4): Propiedades físicas del suelo.

(5): Capacidad de agua aprovechable del suelo.

(6): Materia orgánica del suelo (C y N totales).

(7): Cationes intercambiables, capacidad total y efectiva de intercambio catiónico, pH.

(8): Reservas de elementos nutritivos.

-: Factor no significativo.

CUADRO 7

VARIABLES (1) INCLUIDAS EN LAS REGRESIONES PASO A PASO DE DISTINTOS GRUPOS DE SITIOS (IS = VARIABLE DEPENDIENTE ÍNDICE DE SITIO, IBM = VARIABLE DEPENDIENTE INCREMENTO EN BIOMASA, dR^2 = INCREMENTO (%) DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN).

VARIABLES (1) INCLUDED IN THE STEP-WISE REGRESSIONS OF DISTINCT GROUPS OF SITES (IS = SITE INDEX AS THE DEPENDENT VARIABLE, IBM = BIOMASS INCREMENT AS THE DEPENDENT VARIABLE, dR^2 = INCREMENT (%) OF THE COEFFICIENT OF DETERMINATION).

Todos los sitios (IS)		Suelos no arenosos (IBM)		Suelos arenosos (IBM)	
	dR^2		dR^2		dR^2
Contenido de arena gruesa (P1)	39.7	Precipitación del período primavera-verano-otoño	34.4	K intercambiable (P1)	65.5
Índice de aridez	7.1	CEIC (P1)*	7.6	C total (P1)	28.3
Mg intercambiable (P1)	4.6	Mg reserva (P1)	6.2	Contenido de limo (P1)	3.9
K intercambiable (P1)	4.4	K reserva (P1)	6.0	Temperatura media de invierno	1.2
Temperatura media anual	3.7	Mn intercambiable (P1)	5.0		
K reserva (P1)	2.2				
Fe intercambiable (P1)	1.8				
Suelos graníticos (IBM)		Suelos metamórficos (IS)		Suelos rojo arcillosos (IS)	
	dR^2		dR^2		dR^2
N total (P1)	33.5	Contenido de limo (P3)	31.8	CTIC (P2)*	49.7
Contenido de limo (P3)	21.0	Precipitación de otoño	23.0	Mg reserva (P1)	26.8
CAA hasta 1 m	18.5	Contenido de arena gruesa (P1)	4.0	Temperatura media de invierno	17.5
				K reserva (P1)	3.8
				CAA profundidad de raíces	1.4
Zona climática 1 (IS)		Zona climática 1 sin arenas (IS)		Zona climática 2 (IS)	
	dR^2		dR^2		dR^2
Contenido de limo (P1)	41.6	Contenido de limo (P1)	64.4	K intercambiable (P1)	42.2
P reserva (P1)	34.0	Fe intercambiable (P1)	11.9	CAA P1 + P2	15.0
Fe intercambiable (P1)	5.1	Contenido de limo (P3)	6.0	Al intercambiable (P1)	6.1
Mg Reserva (P1)	4.7	pH agua (P1)	4.4	CTIC (P2)	3.6
		H intercambiable (P1)	4.0	K reserva (P1)	3.3
Zona climática 3 (IS)					
	dR^2				
Temperatura media de otoño	57.5				

(1): P1, P2, P3 = Estratos de profundidad del suelo.

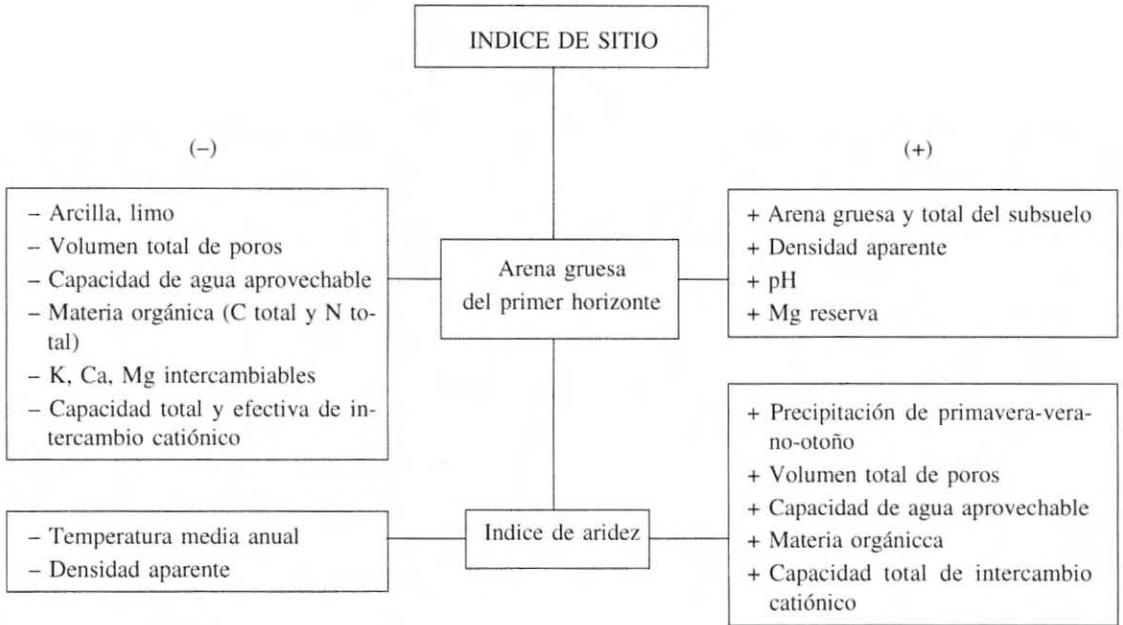
* CEIC, CTIC = Capacidad efectiva y total de intercambio, respectivamente.

ración con el conjunto de todos los sitios, al excluir los suelos arenosos, se observan otros factores y variables del sitio que contribuyen a explicar las variaciones de la productividad. Como es de esperar, al disminuir la variabilidad de los suelos aparece el clima como el factor más significativo en la regresión, representado por la precipitación del período primavera-verano-otoño. Esta variable también representa la materia orgánica de los suelos.

Suelos arenosos: la variabilidad de la productividad está explicada principalmente a través de

características químicas del suelo. El clima muestra una muy baja incidencia directa o indirecta debido a la poca variación climática que se observa en estos sitios. Sin embargo, de acuerdo con Gerding (1991) y la figura 4, la relación causa-efecto entre el K del suelo y la productividad está modificada por otros factores del sitio, de tal manera que la causa principal de la variabilidad de la productividad se debe a un conjunto de diversas variables representadas por el K intercambiable y no tanto al suministro de K.

TODOS LOS SITIOS



SITIOS CON SUELOS NO ARENOSOS

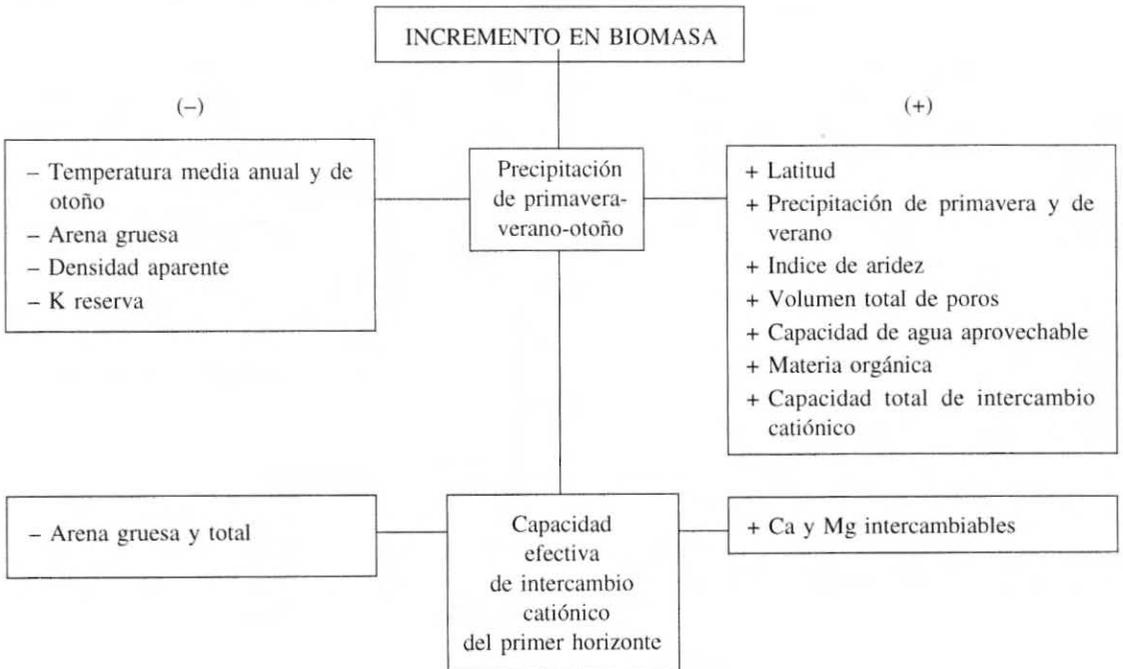


Figura 3. Relaciones de las principales variables de las regresiones paso a paso con otras variables del sitio para los grupos de todos los sitios y de sitios con suelos no arenosos.

Relations of the principal variables of the step-wise regressions with other site variables for groups of all sites combined and for groups of sites with non-sandy soils.

SITIOS CON SUELOS ARENOSOS

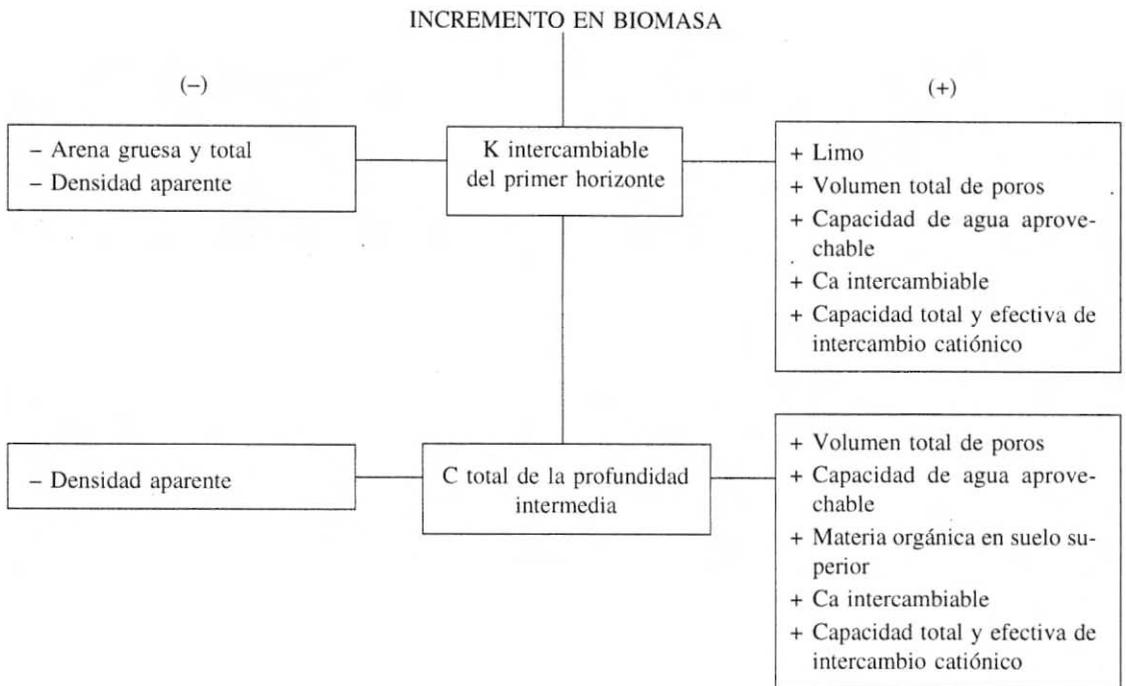


Figura 4. Relaciones de las principales variables de las regresiones paso a paso con otras variables del sitio para el grupo de sitios con suelos arenosos.

Relations of the principal variables of the step-wise regressions with other site variables for groups of sites with sandy soils.

Suelos graníticos: se destaca la materia orgánica del suelo como el factor más significativo. Los factores textura y CAA también contribuyen con una importante proporción a la explicación de la variabilidad de la productividad. El efecto del nitrógeno del suelo sobre la productividad se explica mejor por su correlación ($P < 0.01$) con otras variables del sitio, especialmente las climáticas y físicas del suelo, que por una causa puramente nutritiva, ya que el contenido de nitrógeno del suelo no presentó una correlación significativa con el contenido de N del follaje, el cual fue sólo moderado a bajo.

Suelos metamórficos: la textura y el clima fueron los dos únicos factores significativos. La productividad se favorece con suelos más limosos y mayor precipitación.

Suelos rojo arcillosos: el factor más destacado es el intercambio catiónico y luego están la reserva de elementos nutritivos, el clima y con un pequeño aporte, la capacidad de agua aprovechable. El mayor intercambio catiónico coincide con sue-

los más ricos en materia orgánica, pero con menor abastecimiento de agua (precipitaciones, CAA), lo que provoca una relación negativa con el IS.

Zona climática 1: los factores más significativos son la textura y la reserva de elementos nutritivos. Suelos con mayor proporción de limo presentan condiciones más favorables para el desarrollo del pino. La reserva de fósforo muestra un efecto positivo sobre la productividad, pero está influido por la presencia de suelos arenosos, en especial del sitio 55 (Laja) que presenta las mejores condiciones de los suelos arenosos (Gerding, 1991). Estos suelos arenosos presentan altas reservas de P y Mg. Además, por encontrarse en la región sur de esta zona climática, sus condiciones de clima son más favorables. Al excluir del análisis los sitios con suelos arenosos (sitios 55 y 57, Laja; Gerding, 1991), los factores significativos fueron, en primer lugar, la textura y, luego, el intercambio catiónico del suelo. En este caso mejora el nivel de explicación de la variabilidad del IS, manteniéndose la principal variable en ambas re-

gresiones. Esto indica la conveniencia de analizar separadamente los suelos arenosos de los otros de textura más fina. La presencia del Fe intercambiable en la regresión es difícil de explicar respecto a la productividad, pues no se encontraron correlaciones significativas con ninguna de las otras variables del sitio incluidas en el estudio. Además, esta variable presenta valores muy bajos (0-0.03 meq/100g) que no representan condiciones desfavorables del intercambio catiónico. Tampoco se observaron evidencias de deficiencia de Fe en los árboles, aunque no se dispone de los análisis foliares correspondientes.

Zona climática 2: en esta zona climática gran parte de la variabilidad de la productividad está determinada por los suelos arenosos. Al excluir las arenas del análisis se obtuvo un R^2 máximo de 30.6% para el IBM. Pero incluyendo los suelos arenosos el R^2 fue de 70.2% para el IS, destacándose en la regresión el intercambio catiónico como el factor más importante. La relación entre el K del suelo y la productividad puede deberse más al efecto de las variables asociadas al K intercambiable que a una causa principalmente nutritiva, ya que los árboles presentaban buen nivel nutritivo de K. Las variables principales destacan la incidencia de los regímenes de elementos nutritivos y de agua en la productividad, los cuales presentan condiciones menos favorables en los suelos arenosos.

Zona climática 3: el único factor significativo fue el clima a través de la variable temperatura media del otoño. En los análisis para cada zona climática era de esperar que las variables del clima no contribuyeran significativamente a la explicación de la variabilidad de la productividad, pues se reduce marcadamente el rango de variación climática en cada zona. Ello ocurrió en las zonas climáticas 1 y 2, pero no en la 3. En esta zona climática el IS correlaciona positivamente con la temperatura de las estaciones frías, lo que puede indicar que al sur del paralelo 40° S se encontraría el límite para las plantaciones de alta productividad. Sin embargo, tal límite no estaría dado sólo por condiciones de temperatura sino que también edáficas que coinciden con la variación climática (Gerding, 1991, 1993a).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los factores del sitio (suelo y clima) incorporados a los análisis explicaron en gran parte la varia-

ción de la productividad de las plantaciones y destacaron por sobre otras posibles influencias. Como entre las variables del sitio existen múltiples interrelaciones, es difícil aislar el efecto neto de una variable determinada sobre la productividad. Normalmente una variable representa el efecto combinado de muchas otras variables.

La variación de la productividad de las plantaciones se pudo explicar en gran parte a través de las condiciones físicas del suelo y las precipitaciones. Otras variables del clima y las condiciones químicas del suelo también aparecen en algunos casos como importantes factores de la variabilidad de la productividad. Sin embargo, en tales casos ello se debe principalmente a las interrelaciones entre las variables del sitio y sólo en menor grado a un efecto directo de tales factores.

Los resultados de estos análisis dependen del tipo y cantidad de variables que se consideren y de los sitios muestreados. Por ello pueden obtenerse resultados muy diversos, lo cual se refleja ampliamente en la literatura (Ballard, 1971; Caldentey, 1989; Hunter y Gibson, 1984; Jackson y Gifford, 1974; Reilly, Parkes y Ferguson, 1975; Ruiz y Schlatter, 1985; Saunders *et al.*, 1984; Truman, Humphreys y Lambert, 1983; Turvey, 1983; Will y Hodgkiss, 1977). Una mayor precisión se obtiene en la medida que algunos factores del sitio son constantes o de baja variabilidad y las variables sean adecuadamente seleccionadas.

Respecto a lo anterior, una mejor aproximación a la relación sitio-productividad puede lograrse a través de estudios locales para tipos de suelos y zonas climáticas determinadas. Al restringir la enorme variación de los factores suelo y clima también es posible incorporar otras variables de fácil medición que integran una serie de características del sitio y pueden explicar y precisar mejor las estimaciones de la productividad. Entre tales variables están las de la fisiografía (principalmente ubicación en el relieve, pendiente, exposición), la profundidad del suelo y las características del uso anterior del suelo que señalan condiciones de erosión y agotamiento de los suelos (Graney y Ferguson, 1972; Jackson y Gifford, 1974; Monserud, 1987; Reilly, Parkes y Ferguson, 1975). La inclusión de suelos fuertemente erosionados, más pobres y deteriorados que los considerados en este trabajo, permitiría determinar los efectos de deficiencias nutritivas y fuertes alteraciones físicas que son comunes en extensas zonas donde también se planta *P. radiata*. Los resul-

tados de este trabajo entregan una adecuada orientación para continuar el trabajo en tal sentido. A través de este procedimiento, también es posible mejorar la clasificación de los sitios, lo cual es deseable para la práctica forestal (Gerding, 1991).

De esta manera, modelos simples de pocas variables permiten interpretar un sinnúmero de interrelaciones que determinan el nivel de la productividad de los sitios. Esto es de importancia para la selección de sitios para nuevas plantaciones y la aplicación de medidas silviculturales con el fin de aprovechar, conservar o mejorar la productividad de los sitios. Algunas condiciones edáficas favorables para el crecimiento de *P. radiata*, aquí determinadas, pueden considerarse en algunos casos como una meta a lograr con el manejo.

Este estudio corrobora el hecho ampliamente conocido de que *P. radiata* como especie pionera presenta una gran plasticidad y se adapta satisfactoriamente a condiciones de sitio muy diferentes, alcanzando una buena productividad. En esta gran variedad de sitios, tanto el clima como los factores que determinan la fertilidad del suelo mostraron distintos grados de influencia sobre la productividad:

a) En la extensa zona de plantaciones de *P. radiata* se destaca el clima como el principal factor de la variabilidad de la productividad, cuando son excluidos los suelos de condiciones extremas (suelos arenosos). *Pinus radiata* se adapta a condiciones climáticas muy variadas y alcanza la mejor productividad en condiciones de alta precipitación anual y temperaturas moderadas. Se observó la evidencia de que las bajas temperaturas de las estaciones frías y la baja precipitación en el período vegetativo son limitantes para el desarrollo de las plantaciones. Esto, sin embargo, no se pudo comprobar con los datos disponibles debido a la asociación entre el tipo de suelo y el clima.

Este resultado coincide con lo encontrado por Caldentey (1989) en un estudio del efecto del clima en la productividad de *P. radiata* en Chile. Tal autor atribuye gran parte de la variación de la productividad de las plantaciones a la precipitación anual y al déficit hídrico. Tales condiciones no presentarían limitaciones importantes en las zonas climáticas 2 y 3.

b) El régimen de agua, a través de diversas variables edáficas y climáticas que representan el abastecimiento de agua, manifestó el mayor efecto sobre la productividad. Lógicamente ésta se favorece con un mejor abastecimiento de agua. El abastecimiento restringido de agua, manifestado a tra-

vés de las bajas precipitaciones, poca retención de agua aprovechable y diferentes impedimentos en la arraigabilidad, evidencian la mayor limitación para el crecimiento del pino en los sitios de este estudio. Asociado a esto, el régimen de aire también muestra un importante efecto a través del drenaje del suelo, de tal manera que las condiciones extremas, especialmente el drenaje impedido, restringen el desarrollo del pino y, por el contrario, el drenaje moderado lo favorece.

Estos resultados coinciden con aquellos encontrados en Nueva Zelanda y Australia, en el sentido de que la variabilidad de la productividad puede explicarse en gran parte a través del abastecimiento de agua. Este abastecimiento se expresa a través de la precipitación anual, la textura, la capacidad de agua aprovechable y la profundidad del suelo arraigable (Hunter y Gibson, 1984; Jackson, Gifford y Chittenden, 1976; Turvey, 1983). Pero difieren en que en el presente trabajo los elementos nutritivos del suelo fueron de menor importancia.

c) El régimen de elementos nutritivos no manifestó un efecto muy significativo, no obstante que presentó grandes variaciones. Ello se debe a que en tales condiciones los árboles estaban satisfactoriamente abastecidos de elementos nutritivos y ningún suelo presentó características químicas extremas que perjudicaran sensiblemente la nutrición. Es interesante notar este aspecto, pues la muestra de sitios no consideró suelos fuertemente erosionados o empobrecidos que limiten significativamente la productividad. Por ello, la extrapolación de los resultados de este estudio a sitios con tales restricciones nutritivas debe considerar aquellas limitaciones que no fueron analizadas en este caso.

Evidentemente *P. radiata* se desarrolla mejor en suelos con un equilibrado régimen de elementos nutritivos y buen abastecimiento de éstos. Y en suelos de bajos contenidos de elementos nutritivos estas plantaciones pueden alcanzar un buen desarrollo si los regímenes de agua y aire, la arraigabilidad y el clima son favorables. Pero al contrario, si el régimen de elementos nutritivos del suelo es bueno y alguno de los otros factores edáficos es desfavorable, el desarrollo del pino es limitado.

Los suelos de este estudio son en general profundos a moderadamente profundos, satisfaciendo las necesidades del pino. No fueron abarcados suelos delgados, por lo que su efecto no se consi-

deró en forma directa. Sin embargo, fueron detectadas algunas limitaciones para la arraigabilidad a través de las condiciones físicas y el drenaje del suelo. *Pinus radiata* se vio fuertemente afectado por suelos de alta densidad y de drenaje impedido, en los cuales se restringe la arraigabilidad permanente o temporalmente.

BIBLIOGRAFIA

- BALLARD, R. 1971. "Interrelationships between site factors and productivity of radiata pine at Riverhead forest, New Zealand", *Plant and Soil* 35: 371-380.
- CALDENTEY, J. 1989. Beziehungen zwischen Klimaelementen und der Produktivität von *Pinus radiata*-Plantagen in Chile. Dissertation Forstwissenschaftliche Fakultät Ludwig-Maximilians-Universität. München, 131 pp.
- CHERTOV, O.G., V.M. STEPANOV, G.B. MELNITSKAYA. 1977. "Statistical models of forest soil productivity". En: *Proceedings soil as a site factor for forests of temperate and cool zones*. International Society of Soil Science, Zvolen. Vol. 2: 55-61.
- COVELL, R.R., D.C. McCLURKIN. 1967. "Site index of loblolly pine on Ruston soils in the southern Coastal Plain", *Journal of Forestry* 65: 236-264.
- DELMASTRO, R., J. DIAZ-VAZ, J. SCHLATTER. 1982. Variabilidad de las características tecnológicas hereditarias del *Pinus radiata* D. Don. Documento de trabajo 43, FO: DP/CHI 76-003/PNUD/FAO, Santiago, 98 pp.
- DRAPER, N., H. SMITH. 1966. *Applied regression analysis*. Wiley, New York, 407 pp.
- FASSBENDER, H.W., E. BORNEMISZA. 1987. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, 420 pp.
- FASSBENDER, H.W., H. TSCHINKEL. 1974. "Relación entre el crecimiento de plantaciones de *Cupressus lusitanica* y las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia", *Turrialba* 24(2): 141-149.
- FLORENCE, R.G., D. LAMB. 1974. "Influence of stand and site on radiata pine litter in South Australia", *N.Z.J. For. Sci.* 4(3): 502-510.
- FRANKE, S. 1988. "Influencia de algunos factores edáficos en el índice de sitio de plantaciones de *Pinus radiata* para la V Región", *Ciencia e Investigación Forestal (Chile)* 2(3): 67-79.
- FRANKE, S., N. VERGARA, R. BENNEWITZ. 1988. "Evaluación preliminar de las principales series y fases de suelo en relación al índice de sitio de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don de la X Región", *Ciencia e Investigación Forestal (Chile)* 2(4): 1-14.
- FUENZALIDA, P.H. 1965. Clima. En: *Geografía Económica de Chile*. Texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, pp. 99-152.
- GARCIA, O. 1970. *Índices de sitio para pino insigne en Chile*. Instituto Forestal, Serie de Investigación 2, Santiago, 29 pp.
- GERDING, V. 1991. *Pinus radiata*-Plantagen in Zentralchile: Standortfaktoren der Produktivität und Nährstoffverteilung in Beständen. Dissertation Forstwissenschaftliche Fakultät Georg-August-Universität, Göttingen, 182 pp.
- GERDING, V. 1993a. "Influencia del suelo y del clima en una clasificación de sitios asociados a plantaciones de *Pinus radiata* D. Don", *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 10: 46-54.
- GERDING, V. 1993b. "Estabilidad de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don: Extracción y pérdida de elementos nutritivos asociadas al manejo", *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 10: 55-63.
- GRANEY, D.L., E.R. FERGUSON. 1972. "Shortleaf pine site-index relationships in the Ozark Highlands", *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 495-500.
- HARTUNG, J., B. ELPELT, K.H. KLÖSENER. 1986. *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 5. Auflage. Oldenbourg Verlag. München, 973 pp.
- HUBER, A. 1975. Beitrag zur Klimatologie und Klimaökologie von Chile. Dissertation Universität München.
- HUNTER, I.R., A.R. GIBSON. 1984. "Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables", *N.Z.J. For. Sci.* 14(1): 53-64.
- ISEBRANDS, J.G., T.R. CROW. 1975. *Introduction to uses and interpretation of principal component analysis in forest biology*. General Technical Report NC-17, North Central Forest Experiment Station, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, 19 pp.
- JACKSON, D.S., H.H. GIFFORD. 1974. "Environmental variables influencing the increment of radiata pine. (1) Periodic volume increment", *N.Z.J. For. Sci.* 4(1): 3-26.
- JACKSON, D.S., H.H. GIFFORD, J. CHITTENDEN. 1976. "Environmental variables influencing the increment of *Pinus radiata*: (2) Effects of seasonal drought on height and diameter increment", *N.Z.J. For. Sci.* 5(3): 265-286.
- McQUILKIN, R.A. 1976. "The necessity of independent testing of soil-site equations", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 783-785.
- MONSERUD, R.A. 1987. "Variation on a theme of site index". En: *Forest Growth Modelling and Prediction*. Proceedings IUFRO Conference. EK, A.; S., SHIFLEY, T. BURK (eds.). Minneapolis, pp. 419-427.
- ODEPA (Oficina de Planificación Agrícola Chile). 1968. *Plan de desarrollo agropecuario 1965-1980. Uso potencial de los suelos de Chile*. Ministerio de Agricultura, Santiago, 14 pp. y mapas.
- REILLY, J.J., ED. PARKES, I.S. FERGUSON. 1975. "The potential productivity of farmlands in the lower south coastal region of New South Wales for radiata pine plantations", *Australian Forestry* 38: 233-244.
- RUIZ, G., J.E. SCHLATTER. 1985. "Relación entre el índice de sitio, la elevación y la exposición en la Cordillera de Nahuelbuta". En: *Pinus radiata Investigación en Chile*. OLIVARES, B. y E. MORALES (eds.). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Tomo 2: 51-65.
- SAUNDERS, J.C., T.H. BOOTH, J. TURNER, E.R. WILLIAMS. 1984. "Some effects of site, particularly upper horizon soil, on the growth of *Pinus radiata*". *Australian Forest Research* 14: 27-36.
- SCHLATTER, J.E., V. GERDING. 1984. "Important site factors for *Pinus radiata* growth in Chile". En: *Proceedings IUFRO Symposium on site and productivity of fast growing plantations*. GREY, D.C., A.P.G. SCHÖNAU, C.J. SCHUTZ, A. VAN LAAR (eds.). Pretoria, pp. 541-549.
- SCHLATTER, J.E., V. GERDING, M. BONNEFOY. 1982. "Factores de sitio de mayor incidencia en la productividad de *Pinus radiata* D. Don". En: *Actas Reunión de Trabajo Evaluación de la Productividad de Sitios Forestales*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, pp. 61-95.
- SCHLATTER, J.E., R. GREZ, V. GERDING. 1981. *Manual para el reconocimiento de suelos*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 81 pp.
- SHRIVASTAVA, M.B. 1976. *Quantifizierung der Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Oberhöhe am Beispiel der Fichte (Picea abies Karst.) in Hessen*. Dissertation Forstliche Fakultät Georg-August-Universität Göttingen, 194 pp.

- TRUMAN, R., F.R. HUMPHREYS, M.J. LAMBERT. 1983. "Prediction of site index for *Pinus radiata* at Mullions Range State Forest, New South Wales", *Australian Forest Research* 13: 207-215.
- TURVEY, N.D. 1983. "Soil-type yield curves for *Pinus radiata* in Gippsland, Victoria", *Australian Forestry* 46(2): 118-125.
- ULRICH, B. 1981. "Zur Stabilität von Waldökosystemen", *Forstarchiv* 52(6): 165-170.
- VERA, A. 1987. *Relación entre los factores del sitio y el índice de sitio de Pinus radiata D. Don para la zona de Valdivia*. Tesis Ing. Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 78 pp.
- WILL, G.M., P.D. HODGKISS. 1977. "Influence of nitrogen and phosphorus stress on the growth and form of radiata pine", *N.Z.J. For. Sci.* 7(3): 307-320.