

SITE INDEX AND SOIL PROPERTIES IN YOUNG PLANTATIONS OF *Eucalyptus grandis* AND *E. urophylla* IN SOUTHEASTERN MÉXICO

ÍNDICE DE SITIO Y PROPIEDADES DEL SUELO EN PLANTACIONES JÓVENES DE *Eucalyptus grandis* Y *E. urophylla* EN EL SURESTE DE MÉXICO

Carina E. Delgado-Caballero¹, Armando Gómez-Guerrero¹, José R. Valdez-Lazalde¹, Hector De los Santos-Posadas¹, Aurelio M. Fierros-González¹, William R. Horwath²

¹Forestal, Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230. Montecillo, Estado de México (agomez@colpos.mx). ²University of California, Davis. (wrhorwath@usedavis.edu)

ABSTRACT

Research on the ability of tropical soils to support fast-growing forests species is required to optimize, preserve and select lands for timber production. In this work site index (*SI*) of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* plantations in Southeastern Mexico, was related to chemical and physical soil properties. Based on a joint model of *SI* vs. sand content, the fit suggests that *SI* improves as the sand content increases ($p \leq 0.01$). Sand content of 28% in the surface soil (0-5 cm) and 24% in the sub-surface soil (5-30 cm) is a desired minimum for establishing highly productive stands. The best *SI* conditions were found on sandy soils with a sand content of 65 %. Other variables, such as soil bulk density, N mineralization and organic matter were also measured but were not correlated with stand growth or *SI*. Cation exchange capacity was inversely related to tree growth, which was explained as an indirect relationship since soil with higher content of fine soil particles (clay+silt) were less productive.

Key words: Forest plantations, forest soils, site productivity, soil physical properties.

INTRODUCTION

Site index (*SI*) refers to the height of dominant trees in a stand at a specific age and has been a useful criterion for identifying sites with high potential for tree growth (Spurr and Barnes, 1980; Daniel *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983;). *SI* can be directly estimated only in wooded areas; however, relating *SI* with soil properties is a useful approach to predict forest productivity in lands without trees (Carmean, 1975). Screening sites by soil productivity is a useful method to effectively use the potential of each site and plan forestry activities in a sustainable way (Mckenney and Pedlar, 2003). Studies of productivity in forest plantations are also important as their establishment in lands not previously used for

*Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: April, 2007. Aproved: October, 2008.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 43: 61-72. 2009.

RESUMEN

La investigación sobre la capacidad de los suelos tropicales de favorecer el crecimiento rápido de especies forestales es necesaria para optimizar, preservar y seleccionar tierras para la producción de madera. En este trabajo el índice de sitio (*SI*) de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México se asoció a propiedades químicas y físicas. A partir de un modelo conjunto de *SI* vs. contenido de arena, el ajuste indica que *SI* mejora mientras el contenido de arena aumenta ($p \leq 0.01$). El contenido de arena de 28% en la superficie del suelo (0-5 cm) y de 24% en la capa subyacente del suelo (5-30 cm) es el mínimo deseado para establecer rodales de alta productividad. Las mejores condiciones de *SI* se encontraron en suelos arenosos con un contenido de arena de 65%. Se midieron también otras variables, tales como densidad aparente del suelo, mineralización de N y materia orgánica, pero no se correlacionaron con el crecimiento rodal o *SI*. La capacidad de intercambio catiónico estuvo inversamente relacionada al crecimiento del árbol, lo cual se explicó como una relación indirecta ya que los suelos con mayor contenido de partículas finas del suelo (arcilla+limo) fueron menos productivos.

Palabras clave: Plantaciones forestales, suelos forestales, productividad del sitio, propiedades físicas del suelo.

INTRODUCCIÓN

El índice de sitio (*SI*) se refiere a la altura de los árboles dominantes en un rodal a una edad determinada y ha sido un criterio útil para la identificación de sitios con alto potencial para el crecimiento de árboles (Spurr y Barnes, 1980; Daniel *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983). *SI* se puede estimar sólo en zonas boscosas; sin embargo, relacionar *SI* con las propiedades del suelo es un planteamiento útil para pronosticar productividad forestal en tierras sin árboles (Carmean, 1975). Seleccionar los sitios en función de la productividad del suelo es un método útil para usar efectivamente el potencial de cada sitio y planear actividades de silvicultura de

forestry purposes contributes to sequestering carbon by transferring atmospheric CO₂ to the plant and soil system (Zinn *et al.*, 2002; Forrester *et al.*, 2006; Lima *et al.*, 2006). Lemma *et al.* (2006) found that a 20-year afforestation site with *Eucalyptus grandis* in lands previously used for agricultural purposes returned the levels of soil organic carbon content to that of the native forests. This work focused on finding simple equations to relate *SI* of *E. grandis* and *E. urophylla* with soil properties in plantations established in one of the regions with the highest potential for establishing tropical plantations in México, in order to predict productivity in lands to be planted in the future.

MATERIALS AND METHODS

The study area is located at 17° 07'-17° 54' N and 94° 52'-95° 54' W around the boundary of Oaxaca and Veracruz states (Figure 1). The dominant climate is tropical wet (Aw) with mean annual temperature of 27 °C and mean annual precipitation between 1500 to 2400 mm. Mean elevation is 150 m. Soil types in the area belong to the orders of Alfisols and Ultisols (Soil Survey Staff, 1997). A summary of the soil characteristics in the study sites is presented in Table 1.

Plantations description

The establishment of the plantations under investigation started in 1998 with *E. grandis* and *E. urophylla* on lands used for grazing in the last 40 years. The native vegetation in the area was tropical forest, but an intense program promoted by the Mexican government

manera sostenible (Mckenney y Pedlar, 2003). Los estudios de productividad en plantaciones forestales también son importantes dado que su establecimiento en tierras no usadas anteriormente con fines forestales contribuye al secuestro del carbono mediante la transferencia de CO₂ atmosférico al sistema de planta y suelo (Zinn *et al.*, 2002; Forrester *et al.*, 2006; Lima *et al.*, 2006). Lemma *et al.* (2006) encontraron que un sitio de aforestación de 20 años con *Eucalyptus grandis* en tierras usadas previamente con fines agrícolas restableció los niveles de contenido de carbono orgánico del suelo al de los bosques nativos. El presente trabajo se centró en encontrar ecuaciones simples para relacionar *SI* de *E. grandis* y *E. urophylla* con las propiedades del suelo en plantaciones establecidas en una de las regiones con el mayor potencial para el establecimiento de plantaciones tropicales en México, con el fin de pronosticar productividad en tierras a sembrarse en el futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica a 17° 07'-17° 54' N y 94° 52'; -95° 54' O en la frontera entre los estados de Oaxaca y Veracruz (Figura 1). El clima dominante es tropical húmedo (Aw) con una temperatura promedio anual de 27 °C y una precipitación promedio anual de 1500 a 2400 mm. La elevación promedio es 150 m. Los tipos de suelo en el área pertenecen al orden de los Alfisoles y al de los Ultisoles (Soil Survey Staff, 1997). En el Cuadro 1 se muestra un resumen de las características del suelo en los sitios de estudio.

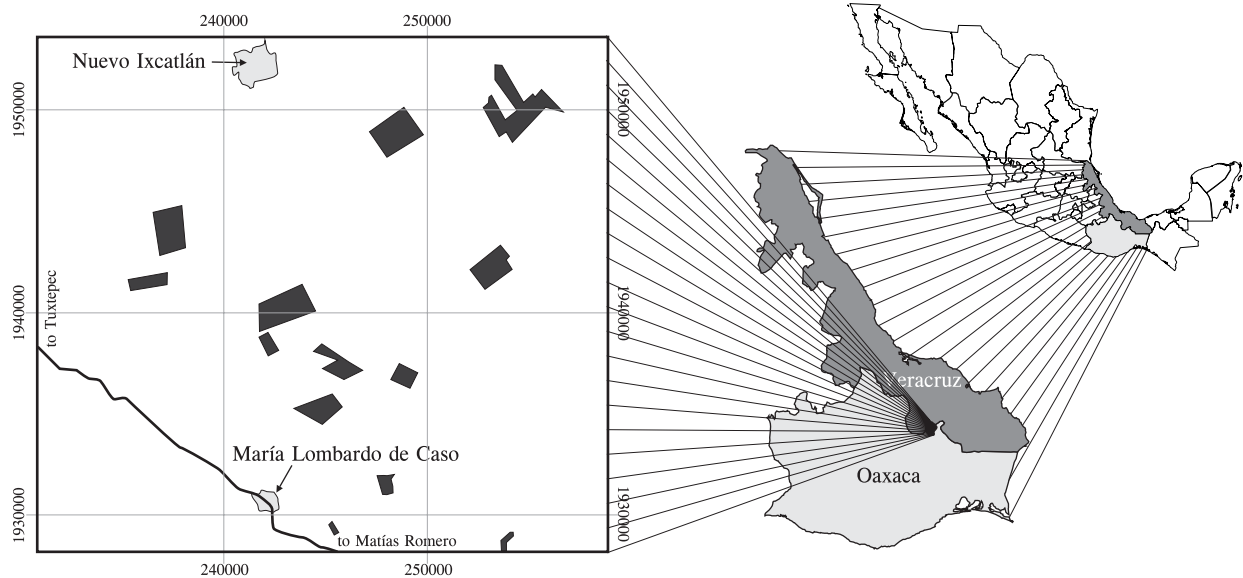


Figure 1. Location of the 13 plantations where 45 study sites of *E. grandis* and *E. urophylla* were established at the Santiago Yaveo, Oaxaca area.

Figura 1. Ubicación de las 13 plantaciones donde se establecieron 45 sitios de estudio de *E. grandis* y *E. urophylla* en la región de Santiago Yaveo, Oaxaca.

Table 1. Surface soil properties measured at the 45 study sites.
Cuadro 1. Propiedades de la superficie del suelo medidas en los 45 sitios de estudio.

	Soil depth (cm)											
	0-5			s ²	5-15			s ²	15-30			s ²
	Min	Max	Mean [†]		Min	Max	Mean		Min	Max	Mean	
Sand (%)	13	77	49.3	2.88	13	80	50	2.95	13	80	47	3.08
Clay (%)	11	43	11	1.43	9	40	24.2	1.4	10	41	24.4	1.54
Silt (%)	11	45	24.7	1.54	11	47	26	1.64	9	53	28.2	1.92
Soil organic matter (%)	1.3	7.3	3.4	0.2	0.6	3.8	2.2	0.13	0.2	3.5	1.4	0.10
Munsell chart color value (wet)	2	7	3.6	0.15	3	7	4	0.13	2	6	4.1	0.15
Cation exchange capacity (Cmol _c kg ⁻¹)	2.5	19.9	7.4	0.54	2	16.2	6	0.5	1.4	15.4	5.3	0.50
Dry bulk density (Mg m ⁻³)	0.80	1.24	1.0	0.01	0.77	1.47	1.3	0.02	0.83	1.47	1.3	0.02
N-mineralization (ppm)	0.07	2.41	1.0	0.1	0.04	1.56	0.6	0.04	0.02	1.06	0.3	0.02

[†] n=45.

encouraged land use change in the 1960's and 1970's (Masera *et al.*, 1992; Paz, 1995). Plantations were 28 to 77 months-old at the beginning of the study and were planted 3 m apart in a square grid fashion. Plantations were fertilized with 60-60-30 kg ha⁻¹ for NPK three times a year during the two first years of establishment. Competition removal was performed during the first three months; afterwards, the establishment of the plantation is not at risk by plant competition.

Soil sampling

At the PLANTEH project, 154 500-m²-circle permanent plots were established in 2004 and the dasometric data was used for the tree growth and yield study reported by Gómez *et al.* (2006). In 2006 forty five of the 154 plots were re-measured and every plot was divided into four quadrants where soil samples were obtained from 0-5, 5-15 and 15-30 cm depth. Samples from the four quadrants were used to make a composite sample for laboratory soil analyses. Additionally, soil bulk density samples were taken at every quadrant at the same soil depths using a core sampler with hammer as illustrated in Figure 2. Since soil bulk density is more variable at the soil surface, an additional sample was taken for the first soil depth. In our study, 720 soil samples for bulk density were taken.

Soil samples were air dried and sieved through a 2-mm mesh. Soil analyses were: pH, organic matter (Walkley-Black), soil texture (Bouyoucos), cation exchange capacity (ammonium acetate, pH 7) (Rowell, 1994) and an anaerobic N-mineralization (Powers, 1980).

Site index estimates

The dominant height models used to obtain the *SI* estimates at each plot (Gómez *et al.*, 2008) were:

$$SI = A_I \left(\frac{1 + \exp(3.162695) \times E_I^{-0.808662}}{1 + \exp(3.162695) \times E_b^{-0.808662}} \right) \text{ for } E. \text{ grandis} \quad (1)$$

Descripción de plantaciones

El establecimiento de plantaciones bajo investigación inició en 1998 con *E. grandis* y *E. urophylla* en tierras usadas para pastoreo en los últimos 40 años. La vegetación nativa de la región fue de bosque tropical, pero un intenso programa promovido por el gobierno mexicano impulsó un cambio en el uso del suelo en los años sesenta y setenta (Masera *et al.*, 1993; Paz, 1995). Las plantaciones tenían entre 28 y 77 meses al inicio del estudio y se plantaron con una separación de 3 m a modo de cuadrícula. Las plantaciones se fertilizaron con 60-60-30 kg ha⁻¹ para NPK tres veces al año durante los dos primeros años de su establecimiento. La eliminación de la competencia se realizó durante los tres primeros meses; después, el establecimiento de la plantación no es un riesgo por la competencia de plantas.

Muestreo del suelo

En el proyecto PLANETH se establecieron 154 500-m²-cúbicos de parcelas permanentes en 2004 y los datos dasométricos se usaron

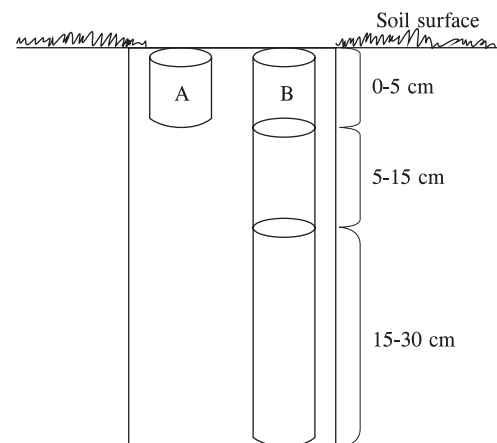


Figure 2. Soil depths monitored for dry bulk density.
Figura 2. Profundidades del suelo monitoreadas para densidad aparente seca.

$$SI = 40 \times \left[1 + \left(\left(\frac{40}{A_I} - 1 \right) \times \left(\frac{E_I}{E_b} \right)^{1.720058} \right) \right]^{-1} \text{ for } E. \text{ urophylla} \quad (2)$$

where SI is site index; A_I = dominant height at the E_I age of 80 months.

These equations are based on a Hossfeld IV model (Cieszewski, 2001; Kiviste *et al.*, 2002). More details for the conditions of fit and validation of these models can be found in Gómez *et al.* (2006). The SI estimates were separated into 3 m intervals.

Statistical analysis

Soil variables were initially correlated to SI and tree growth using PROC CORR (SAS, 1998). Soil variables were also plotted against SI to identify patterns and trends. A simple trend between sand content and SI was described on all soil depths by the following segmented model:

$$SI = \alpha_0 + \alpha_1 (j - S)^2 I_j \quad (3)$$

where S = sand content in %; j = inflection point at which $IS = \alpha_0$ becomes $SI = \alpha_0 + \alpha_1 (j - S)^2$; I_j = the indicator variable equal to 1 for $S > j$, zero otherwise.

The model has the advantage that the inflection point is treated as a parameter and has to be estimated using non-linear regression. This parameter represents the lowest acceptable sand content before SI increases a function of the sand content. Segmented models help to simplify prediction equations with the minimum number of variables.

Marginal increments for SI after the inflection (j) can be calculated as:

$$\frac{d}{dS} SI = -2\alpha_1 (j - S) \quad (4)$$

The model was fitted using PROC MODEL (SAS, 1998). Multiple regression was also used; however, adding more than one variable did not improve significantly the explanation of IS variation, as the segmented model did with one variable. Although using only one variable is a simple approach, the advantage is the easier context in the interpretation.

RESULTS AND DISCUSSION

Tree growth parameters for the 45 study sites are summarized in Table 2. Range for tree age was between 24 to 73 months and for SI between 16 to 38 m at the base age of 80 months. Basal area varied from 2 to 26 m² ha⁻¹, and stand volume from 8 to 229 m³ ha⁻¹. Current increments in stem ranged

para el desarrollo del árbol y el estudio de rendimiento reportado por Gómez *et al.* (2006). En 2006, 45 de las 154 parcelas se volvieron a medir y cada parcela se dividió en cuatro cuadrantes de donde se obtuvieron muestras de suelo a 0-5, 5-15 y 15-30 cm de profundidad. Las muestras de los cuatro cuadrantes se usaron para hacer una muestra compuesta para los análisis de suelos en el laboratorio. Asimismo, se tomaron muestras de densidad aparente del suelo en cada cuadrante a la misma profundidad de suelo usando un muestreador central con martillo, como se observa en la Figura 2. Dado que la densidad aparente es más variable en la superficie del suelo, se tomó una muestra adicional para la primera profundidad del suelo. En nuestro estudio se tomaron 720 muestras de suelo para calcular la densidad aparente.

Las muestras de suelo se secaron y tamizaron a través de una malla de 2 mm. Los análisis de suelo fueron: pH, materia orgánica (Walkley-Black), textura del suelo (Bouyoucos), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio, pH 7) (Rowell, 1994) y mineralización-N anaerobia (Powers, 1980).

Estimaciones del índice de sitio

Los modelos de altura dominante usados para obtener las estimaciones de SI en cada parcela (Gómez *et al.*, 2008) fueron:

$$SI = A_I \left(\frac{1 + \exp(3.162695) \times E_I^{-0.808662}}{1 + \exp(3.162695) \times E_b^{-0.808662}} \right) \text{ para } E. \text{ grandis} \quad (1)$$

$$SI = 40 \times \left[1 + \left(\left(\frac{40}{A_I} - 1 \right) \times \left(\frac{E_I}{E_b} \right)^{1.720058} \right) \right]^{-1} \text{ para } E. \text{ urophylla} \quad (2)$$

donde, SI es el índice de sitio, A_I = altura dominante a la edad E_I de 80 meses.

Estas ecuaciones se basan en el modelo Hossfeld IV (Cieszewski, 2001; Viviste *et al.*, 2002). En Gómez *et al.* (2006) se pueden encontrar más detalles sobre las condiciones de ajuste y validación de estos modelos. Las estimaciones de SI se separaron en intervalos de 3 m.

Análisis estadístico

Las variables de suelo se correlacionaron inicialmente con SI y crecimiento del árbol usando PROC CORR (SAS, 1998). Las variables de suelo también se graficaron contra SI para identificar patrones y tendencias. El siguiente modelo segmentado describió una tendencia simple entre contenido de arena y SI en todas las profundidades de suelo:

$$SI = \alpha_0 + \alpha_1 (j - S)^2 I_j \quad (3)$$

donde, S = contenido de arena en %; j = punto de inflexión en el cual $IS = \alpha_0$ llega a ser $SI = \alpha_0 + \alpha_1 (j - S)^2$; I_j = la variable indicadora igual a 1 para $S > j$, cero de otra manera.

Table 2. Stand variables for the 45 study plots.

Cuadro 2. Variables de los rodales de las 45 parcelas de estudio.

Location	Site	Site index (m)	Relative productivity	Species	Age (month)	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Periodic increment (m ³ ha ⁻¹ month ⁻¹)
La Colmena	1	22	M	G	60	11	99	1.7
	2	24	M	G	60	14	135	2.3
	4	24	M	U	25	3	16	0.6
	5	28	H	G	60	17	197	3.3
	8	21	M	G	60	15	133	2.2
El Rosario	3	22	M	G	64	14	131	2.0
	4	29	H	U	40	8	21	0.5
	5	24	M	U	64	13	132	2.1
	6	29	H	U	64	26	332	5.2
	8	28	H	G	64	21	240	3.8
9	17	L	G	64	9	75	1.2	
La Esperanza 1	11	35	H	U	50	21	259	5.2
	16	32	H	G	55	20	242	4.4
	17	22	M	U	50	11	97	1.9
	18	31	H	U	55	18	209	3.8
	20	34	H	U	50	17	207	4.1
	22	38	H	U	50	25	339	6.8
	24	28	H	U	50	11	127	2.5
	27	29	H	U	55	12	145	2.6
	28	22	M	U	58	11	90	1.6
	29	29	H	G	50	16	163	3.3
31	36	H	U	50	23	298	6.0	
La Esperanza 2	2	29	H	U	50	17	188	3.8
	3	32	H	G	50	16	184	3.7
	5	28	H	G	50	15	151	3.0
	7	19	L	U	50	9	72	1.4
La Estrella	2	18	L	U	28	3	20	0.7
	3	22	M	G	62	15	142	2.3
	5	18	L	G	62	10	77	1.2
	6	19	L	G	62	10	61	1.0
	8	22	M	G	62	14	110	2.2
	10	22	M	G	62	15	148	2.4
	17	18	L	U	28	9	20	0.7
La Tapatia	2	22	M	U	28	11	74	2.6
	3	23	M	U	28	3	14	0.5
	6	23	M	U	41	16	136	3.3
Los Mangos	4	23	M	G	73	21	228	3.1
	5	17	L	G	73	14	124	1.7
	8	17	L	G	73	11	109	1.5
	9	22	M	G	73	16	166	2.3
	10	19	L	G	73	14	132	1.8
Sta. Teresa	7	24	M	U	25	4	29	1.2
	9	26	M	G	40	10	77	1.9
	10	21	M	G	60	13	120	2.0
	11	16	L	U	24	2	8	0.3

E. grandis (G); *E. urophylla* (U); Low (L); Medium (M); High (H).

from 0.3 a 6.8 m⁻³ month⁻¹, that is 3.6 to 81.6 m³ ha⁻¹ year⁻¹.

Soil properties and tree growth relationships are summarized in Tables 3 to 5. The soil variable more

El modelo tiene la ventaja de que el punto de inflexión es tratado como un parámetro y tiene que estimarse usando regresión no lineal. Este parámetro representa el más bajo contenido aceptable de arena antes de que *SI* incremente una función en el contenido de

Table 3. Correlation matrix for the *SI* and soil properties at the 0-5 cm soil depth.

Cuadro 3. Matriz de correlación para las propiedades del suelo y de *SI* a una profundidad de suelo de 0-5 cm.

	SI	PI	Sand	Silt	Clay	pH	OM	CEC	DBD	N mineralization
SI	1									
PI	0.825	1								
Sand	0.660	0.577	1							
Silt	-0.670	-0.593	-0.969	1						
Clay	-0.609	-0.522	-0.971	0.884	1					
pH	-0.201	-0.269	-0.234	0.179	0.276	1				
OM	-0.461	-0.408	-0.580	0.571	0.549	-0.037	1			
CEC	-0.530	-0.527	-0.862	0.800	0.868	0.332	0.638	1		
DBD	0.164	0.176	0.360	-0.380	-0.322	-0.211	-0.249	-0.394	1	
N mineralization	-0.128	-0.219	-0.411	0.344	0.452	0.245	0.219	0.491	-0.131	1

SI = Site index; PI = periodic increment; OM = organic matter; CEC = cation exchange capacity; DBD = dry bulk density.

SI = Índice de sitio; PI = incremento periódico; OM = materia orgánica; CEC = capacidad de intercambio catiónico; DBD = densidad aparente seca.

Table 4. Correlation matrix for the *SI* and soil properties at the 5-15 cm soil depth.

Cuadro 4. Matriz de correlación para las propiedades del suelo y de *SI* a una profundidad de suelo de 5-15 cm.

	SI	PI	Sand	Silt	Clay	pH	OM	CEC	DBD	N mineralization
SI	1									
PI	0.825	1								
Sand	0.651	0.549	1							
Silt	-0.661	-0.579	-0.956	1						
Clay	-0.595	-0.482	-0.967	0.851	1					
pH	-0.291	-0.359	-0.353	0.314	0.359	1				
OM	-0.349	-0.194	-0.320	0.340	0.291	-0.134	1			
CEC	-0.489	-0.445	-0.820	0.731	0.840	0.501	0.302	1		
DBD	0.122	0.194	0.168	-0.144	-0.170	-0.101	0.026	-0.205	1	
N mineralization	-0.226	-0.369	-0.311	0.325	0.279	0.233	0.259	0.376	-0.221	1

SI = Site index; PI = periodic increment; OM = organic matter; CEC = cation exchange capacity; DBD = dry bulk density.

SI = Índice de sitio; PI = incremento periódico; OM = materia orgánica; CEC = capacidad de intercambio catiónico; DBD = densidad aparente seca.

Table 5. Correlation matrix for the *SI* and soil properties at the 15-30 cm soil depth.

Cuadro 5. Matriz de correlación para las propiedades del suelo y de *SI* a una profundidad de suelo de 15-30 cm.

	SI	PI	Sand	Silt	Clay	pH	OM	CEC	DBD	N mineralization
SI	1									
PI	0.825	1								
Sand	0.677	0.557	1							
Silt	-0.666	-0.583	-0.915	1						
Clay	-0.609	-0.480	-0.956	0.758	1					
pH	0.083	-0.064	0.024	-0.070	0.005	1				
OM	-0.092	-0.144	-0.022	0.020	0.024	-0.241	1			
CEC	-0.531	-0.469	-0.817	0.749	0.777	0.171	0.214	1		
DBD	0.156	0.165	0.231	-0.206	-0.217	-0.031	0.134	-0.216	1	
N mineralization	-0.314	-0.341	-0.510	0.545	0.438	0.080	0.101	0.444	-0.013	1

SI = Site index; PI = periodic increment; OM = organic matter; CEC = Cation exchange capacity; DBD = dry bulk density.

SI = Índice de sitio; PI = incremento periódico; OM = materia orgánica; CEC = capacidad de intercambio catiónico; DBD = densidad aparente seca.

correlated to *SI* was soil texture, correlation was positive for larger soil particles and negative for fine soil particles like silt and clay. This trend was found at three soil depths. Cation exchange capacity (CEC) was negatively related to the *SI* and periodic increment (PI). Organic matter and CEC showed a significant correlation (0.64), only at 0-5 cm soil depth. The highest correlation was between CEC and it was negative for the sand component and positive for finer soil particles like silt and clay; this strong correlation was held for the three soil depths. Dry bulk density (DBD) and N mineralization were not significantly related to tree growth.

The fit for equation 3 on each depth is shown in Table 6. All parameters in the model are statistically significant including the inflection point *j*. When testing for differences between species, no statistical differences were found; therefore, a single equation per depth was used. The relationship between *SI* and sand content explained 51 to 53% of the *SI* variation (Figure 3).

The wide range of the values found for stand volume, basal area and periodic increments is a consequence of the variation in age of the plantations. However, differences in *SI* indicate variation in soil productivity at the sites sampled. The highest level of productivity found in this study was 81 m³ ha⁻¹ year⁻¹ which is a productivity as high as that reported in very productive sites of Brazil. For example, Stape *et al.* (2006) reported productivities of 62 m³ ha⁻¹ year⁻¹ for intensive managed eucalyptus plantations.

Productivity is influenced by water availability, and eucalyptus plantations with high water use efficiency yield up to 30 m³ ha⁻¹ year⁻¹ in sites with 1600 mm of annual precipitation (Stape *et al.*, 2004). In the study area the average annual precipitation is 2000 mm, which explains the higher productivity levels. Using wood stem density data and allometric equations for branch and leaf components from the studied

arena. Los modelos segmentados ayudan a simplificar ecuaciones de predicción con el menor número de variables.

Los incrementos marginales para *SI* después de la inflexión (*j*) pueden calcularse como:

$$\frac{d}{dS} SI = -2\alpha_1 (j - S) \tag{4}$$

El modelo se ajustó usando PROC MODEL (SAS, 1998). También se usó regresión múltiple; aunque al agregar más de una variable no mejoró significativamente la explicación de la variación de *SI*, como lo hizo el modelo segmentado con una variable. Usar sólo una variable es un planteamiento simple, pero la ventaja es un contexto más sencillo en la interpretación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros de crecimiento de los árboles para los 45 sitios de estudio se resumen en el Cuadro 2. La variación de la edad para los árboles fue de 24 a 73 meses y para *SI* de 16 a 38 m con una edad base de 80 meses. El área basal varió de 2 a 26 m² ha⁻¹, y el volumen rodal de 8 a 229 m³ ha⁻¹. Los incrementos comunes en el tallo variaron de 0.3 a 6.8 m⁻³ mes⁻¹, es decir, 3.6 a 81.6 m³ ha⁻¹ año⁻¹.

Las relaciones de las propiedades del suelo y el crecimiento de los árboles se resumen en los Cuadros 3 a 5. La variable de suelo más correlacionada con *SI* fue la textura del suelo; la correlación fue posible para las partículas finas del suelo como el limo y la arcilla. Esta tendencia se encontró en tres profundidades de suelo. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se relacionó negativamente con el *SI* y el incremento periódico (PI). La materia orgánica y CEC mostró una correlación significativa (0.64) únicamente a 0-5 cm de profundidad del suelo. La mayor correlación fue entre CEC y fue negativa para el componente de suelo y positiva para partículas de suelo más finas como el limo y la arcilla; esta fuerte correlación se mantuvo

Table 6. Estimated parameters for the different soil depths sampled.
Cuadro 6. Parámetros estimados para las diferentes profundidades del suelo muestreadas.

Depths	Parameter	Estimate	Std Err	t Value	Pr > t	R ²
0-5	α_0	20.45628	0.8775	23.31	< 0.001	0.52
	α_1	0.005085	0.00190	2.68	0.011	
	J	28.40465	7.6355	3.72	0.001	
5-15	α_0	20.23301	0.8704	23.25	< 0.001	0.53
	α_1	0.005244	0.00173	3.03	0.004	
	J	28.87633	6.4342	4.49	< 0.001	
15-30	α_0	20.49444	0.8764	23.38	< 0.001	0.53
	α_1	0.004275	0.00164	2.61	0.012	
	J	24.47576	8.8285	2.77	0.008	

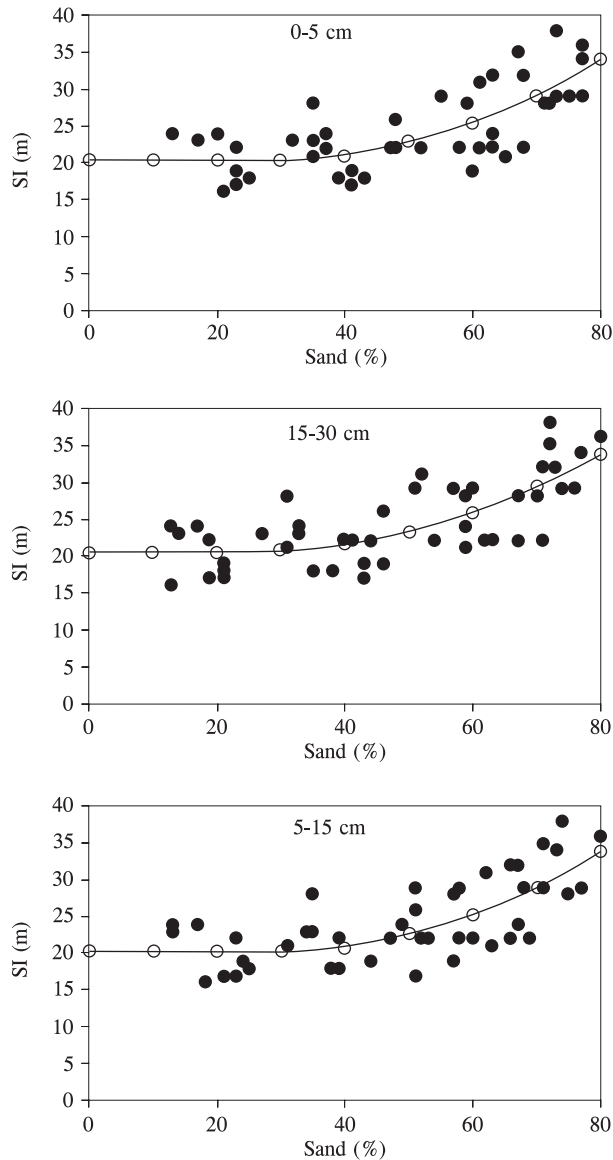


Figure 3. Relationship between *SI* and sand content at the three soil depths.

Figura 3. Relación entre *SI* y contenido de arena en las tres profundidades del suelo.

plantations, aboveground net primary productivity was estimated to be around $3200 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, which is a high level of productivity as compared to other forest communities (Lieth, 1975; Powers, 1999).

Sand content was one of the most important variables related to *SI* variation, a relationship that may be explained by the soil aeration regime which is improved with higher contents of coarse soil particles. The relationship between sand and *SI* fit followed the same pattern when the analysis was performed by soil depth. This is a consistent result that indicates that sandy texture in the soil surface is a critical condition for tree growth on these sites. According to the

para las tres profundidades del suelo. Densidad aparente seca (DBD) y mineralización N no se relacionaron significativamente con el crecimiento del árbol.

El ajuste para la ecuación 3 en cada profundidad se muestra en el Cuadro 6. Todos los parámetros en el modelo son estadísticamente significativos incluyendo el punto de inflexión *j*. Al evaluar las diferencias entre especies, no se encontraron diferencias estadísticas; por lo tanto, sólo se usó una ecuación por profundidad. La relación entre *SI* y el contenido de arena explicó 51 a 53% de la variación de *SI* (Figura 3).

La amplia variación de los valores encontrados en volumen rodal, área basal e incrementos periódicos es una consecuencia de la variación en la edad de las plantaciones. Sin embargo, las diferencias en *SI* indican variación en la productividad del suelo en los sitios muestreados. El mayor nivel de productividad encontrado en este estudio fue $81 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que es tan alta como la reportada en sitios muy productivos de Brasil. Por ejemplo, Stape *et al.* (2006) reportaron productividades de $62 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para plantaciones de eucalipto manejadas intensivamente.

La productividad está influenciada por la disponibilidad de agua y las plantaciones de eucalipto con alta eficiencia en el uso de agua registraron un rendimiento de hasta $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en sitios con 1600 mm de precipitación anual (Stape *et al.*, 2004). En el área de estudio el promedio de precipitación anual es 2000 mm, lo que explica los niveles superiores de productividad. Usando los datos de densidad del tallo de la madera y ecuaciones alométricas para los componentes de la rama y la hoja de las plantaciones estudiadas, se estimó una productividad neta primaria sobre el terreno de alrededor de $3200 \text{ g m}^2 \text{ año}$, que es un nivel alto de productividad si se compara a otras comunidades forestales (Lieth, 1975; Powers, 1999).

El contenido de arena fue una de las variables más importantes relacionadas con variación *SI*, una relación que puede explicarse por el régimen de aeración del suelo que mejora con mayores contenidos de partículas gruesas del suelo. La relación entre arena y ajuste *SI* siguió el mismo patrón cuando el análisis se hizo por profundidad del suelo. Este es un resultado consistente que indica que la textura arenosa en la superficie del suelo es una condición crítica para el crecimiento del árbol en estos sitios. De acuerdo con los parámetros de la ecuación (3), la cantidad de arena en la profundidad de suelo de 0-5 cm comienza a influenciar *SI* cuando los contenidos de arena están cerca de 28%, con incrementos marginales de 0.016 a 0.67 m por unidad por ciento de contenido de arena. La influencia de las partículas de arena de 15-30 cm en el crecimiento del árbol inicia a 24% de contenido

parameters of equation (3), the amount of sand in the 0-5 cm soil depth starts influencing *SI* at sand contents around 28%, with marginal increments from 0.016 to 0.67 m per percent unit of sand content. The influence of the 15-30 cm sand particles on tree growth starts at 24% of sand content with marginal increments from 0.04 to 0.64 per percent unit of sand content. The difference in sand content suggests that the best sites for tree growth require coarse textures. The selection of the main variable related to *IS* was a simple process of correlation analysis, but the segmented model explained as much variation as multiple linear models including more than one variable. Therefore, the simple one-variable model was preferred for the purposes of our study.

From a soil physical perspective, the sites with better drainage in the upper 30 cm soil layer are more suitable for eucalyptus plantations. The relatively flat topography and the high precipitation in the area may lead to a poor aeration regime so that soil texture becomes an important factor influencing soil productivity. Our results are consistent with those of Aparicio and López (1995) and Gonçalves *et al.* (1990) who reported similar results for *E. grandis* in Brazil and Chile. It is important to note that some prediction models assume a bell shape to predict tree growth (Spurr and Barnes, 1980), indicating that forest productivity in extreme soil texture conditions (very clayey or very sandy) lead to lower rates in tree growth. Nonetheless, to explain more accurately the soil texture influence in forest productivity, changes in the soil moisture and soil air regime should be taken into account (Gomez *et al.*, 2002).

The lack of relationship DBD and forest productivity was unexpected. In general, soils with higher DBD are less productive due to the biological implications for root growth (Fisher and Binkley, 2000). Gonçalves *et al.* (1997) found that the productivity of *E. camaldulensis* was more than three times higher when DBD changed from 1.25 to 1.06 Mg m⁻³ in a Inceptisol in Brazil. Correlation between soil texture and DBD was low for all soil depths, with the highest value of 0.38 at the 0-5 cm depth (Table 6). The lack of correlation between DBD and soil texture maybe due to differences in soil structure. Although there is a general correlation between DBD and soil particle distribution, the level of organization of the soil which defines its structure may obscure a direct relationship between these soil variables (Rowell, 1994).

DBD values found for the 0-5 cm soil depth varied from 0.82 to 1.24 Mg m⁻³. For the deeper soil layers values were 1.47 and 1.57 Mg m⁻³ in the 5-15 and the 15-30 cm depths. DBD in the first 5 cm is favorable for tree root growth, but the higher values at the 5-

de arena con incrementos marginales de 0.04 a 0.64 por unidad por ciento de contenido de arena. La diferencia en el contenido de arena sugiere que los mejores sitios para el crecimiento del árbol requiere texturas gruesas. La selección de la variable principal relacionada con *SI* fue un proceso simple de análisis de correlación, pero el modelo segmentado explicó tanta variación como los modelos lineales múltiples que incluían de más de una variable. Por lo tanto, se optó por el modelo simple con una variable para los fines de nuestro estudio.

Desde una perspectiva física del suelo, los sitios con mejor drenaje en la capa superior de 30 cm del suelo son más idóneos para las plantaciones de eucalipto. La topografía relativamente plana y la alta precipitación en la zona pueden llevar a un régimen de aereación escaso, de manera que la textura del suelo llega a ser un factor de influencia importante en la productividad del mismo. Nuestros resultados son consistentes con los de Aparicio y López (1995) y Gonçalves *et al.* (1990) quienes reportaron resultados similares para *E. grandis* en Brasil y Chile. Es importante observar que algunos modelos de predicción adoptan una forma de campana para predecir el crecimiento del árbol (Spurr y Barnes, 1980), lo que indica que la productividad forestal en condiciones de textura del suelo extremas (muy arcillosas o muy arenosas) llevan a índices inferiores en el crecimiento del árbol. No obstante, para explicar con mayor precisión la influencia de la textura del suelo en la productividad forestal, deberán considerarse los cambios en la humedad del suelo y el régimen de aire del suelo (Gómez *et al.*, 2002).

La falta de relación entre DBD y productividad forestal fue imprevista. En general, los suelos con DBD superior son menos productivos debido a las implicaciones biológicas en el crecimiento de la raíz (Fisher y Binkley, 2000). Gonçalves *et al.* (1997) encontraron que la productividad de *E. camaldulensis* fue tres veces más alta cuando DBD cambió de 1.25 a 1.06 Mg m⁻³ en un Inceptisol en Brasil. La correlación entre textura del suelo y DBD fue baja en todas las profundidades del suelo, con un valor máximo de 0.38 a una profundidad del suelo de 0-5 cm (Cuadro 6). La falta de correlación entre DBD y textura del suelo puede deberse a diferencias en la estructura del suelo. Aunque hay una correlación general entre DBD y la distribución de partículas del suelo, el nivel de organización del suelo que define su estructura puede opacar una relación directa entre estas variables del suelo (Rowell, 1994).

Los valores de DBD encontrados en profundidad de suelo de 0-5 cm variaron de 0.82 a 1.24 Mg m⁻³. En el caso de las capas de suelo más profundas los valores fueron 1.47 y 1.57 Mg m⁻³ en las profundidades

10 and 15-30 cm soil depths were expected to have some effect on tree growth as soil porosity is reduced and soil strength increases (Fisher and Binkley, 2000). However, some eucalyptus plantations seem to perform well in Oxisols, Ultisols and Entisols with DBD values up to 1.6 mg m^{-3} , as long as plants are not water stressed (Stape *et al.*, 2004). One explanation for the lack of association between tree growth and DBD in this study is the fact that the soil is relatively wet all year. DBD influences tree root growth especially when decreases in soil moisture lead to increases in soil strength (Gomez *et al.*, 2002). Although DBD showed values relatively high in the subsoil, soil strength did not reach critical levels to impair root growth and hence productivity.

The poor correlation between tree growth (*SI*) and N mineralization and soil organic matter is another unexpected result. The availability of N is an index that generally is related to tree growth as N is the most limiting nutrient in plant communities (Fisher and Binkley, 2000). Ranges of N mineralization for the soil depths 0-5, 5-15, 15-30 cm were 13-104, 8-66 and $4-47 \text{ mg kg}^{-1}$, values which, according to Powers (1980), are influenced by total soil N and are common for forest soils. The poor relationship between N mineralization and *SI* may be explained by the fact that this is the first rotation for the plantation and soils were cropped with grasses for 40 years previous to establishment. The organic matter accumulated in the soil surface during that time may have contributed to maintaining adequate levels of organic matter and available nitrogen. Soil organic matter in the soil surface ranged from 0.5 to 4% and soil N from 0.05 to 0.34% in the upper 30 cm. The availability of N is influenced by the total amount of N and organic matter. It is very likely that the pools of organic carbon in the soil led to an adequate provision of N.

Eucalyptus is highly efficient at recycling nutrients (Stape *et al.*, 2004) and the correlation with N mineralization will be evident as N status of the plantations is expected to decrease in subsequent rotations. Nitrogen is important and mixed plantations of *Eucalyptus* and leguminous species show higher productivity than monoculture (Forrester *et al.*, 2006). Even removal of leguminous species in the herbaceous understory of *Eucalyptus* stands can lead to a deficit of $140 \text{ kg}^{-1} \text{ N ha}^{-1}$ seven years after of the establishment of the plantation (Laclau *et al.*, 2005). Since monoculture is not a sustainable system after the first rotation, we speculate that successive rotations in the study sites will be more N limited, leading to a better relationship between tree growth and soil N availability. Coarse-textured soils with good nutrient status seem to provide the best environments for the

de 5-15 cm y 15-30 cm. DBD en los primeros 5 cm es favorable para el crecimiento de raíz del árbol, pero se esperaba que los valores más altos en las profundidades de 5-10 y 15-30 cm tuvieran algún efecto sobre el crecimiento del árbol dado que la porosidad del suelo disminuye y la dureza del suelo aumenta (Fisher y Binkley, 2000). Sin embargo, algunas plantaciones de eucalipto parecen desempeñarse bien en Oxisoles, Ultisoles y Entisoles con valores hasta de 1.6 mg m^{-3} , siempre y cuando las plantas no estén en estrés hídrico (Stape *et al.*, 2004). Una explicación para la falta de asociación entre crecimiento del árbol y DBD en este estudio es el hecho de que el suelo está relativamente húmedo todo el año. DBD influencia el crecimiento del árbol sobre todo cuando las disminuciones en la humedad del suelo llevan a incrementos en la dureza del suelo (Gomez *et al.*, 2002). Aunque DBD mostró valores relativamente altos en el subsuelo, la dureza del suelo no alcanzó niveles críticos que perjudicaran el crecimiento de raíces y, por consiguiente, la productividad.

La escasa correlación entre crecimiento del árbol (*SI*) y mineralización N y materia orgánica del suelo es otro resultado inesperado. La disponibilidad de N es un índice que se relaciona generalmente con el crecimiento del árbol dado que N es el nutriente más limitante en comunidades de plantas (Fisher y Binkley, 2000). Los intervalos de mineralización N para las profundidades de suelo 0-5, 5-15, 15-30 cm fueron 13-104, 8-66 y $4-47 \text{ mg kg}^{-1}$, valores que, según Powers (1980), están influenciados por N total del suelo y son comunes para suelos boscosos. La escasa relación entre mineralización N y *SI* puede explicarse por el hecho de que esta es la primer rotación para la plantación y los suelos se cultivaron con pastos durante 40 años antes de su establecimiento. La materia orgánica acumulada en la superficie del suelo durante ese tiempo puede haber contribuido a mantener niveles adecuados de materia orgánica y nitrógeno disponible. La materia orgánica del suelo en la superficie del suelo varió de 0.5 a 4% y N de suelo de 0.05 a 0.34% en los 30 cm superiores. La disponibilidad de N está influenciada por la cantidad total de N y materia orgánica. Es muy probable que las reservas de carbono orgánico en el suelo hayan llevado a una provisión adecuada de N.

El eucalipto es muy eficiente en el reciclaje de nutrientes (Stape *et al.*, 2004) y la correlación con la mineralización N será evidente ya que se espera que el estatus de N de las plantaciones disminuya en rotaciones subsecuentes. El N es importante y las plantaciones mezcladas de eucalipto y las especies de leguminosas muestran mayor productividad que el monocultivo (Forrester *et al.*, 2006). Incluso la eliminación de especies

productivity of eucalyptus. This trend was also seen by Stape *et al.* (2004) who reported that coarse-textured soils were twice as responsive to fertilization as sites with finer soil texture.

CONCLUSIONS

Site index (*SI*) of *E. grandis* and *E. urophylla* were related to soil texture. Sand contents higher than 28% at 0-5 cm soil depth positively influenced tree growth. In deeper layers (5-30 cm) this influence occurred at sand contents higher than 24%. Surface soil sand content explained 51 to 53% of *SI* variation. No correlation was found between soil bulk density measured at 0-5, 10-15 and 15-30 cm and tree growth (*SI*). Adequate soil moisture levels may prevent the soil from reaching soil strength values that would impair root growth. Similarly, neither N mineralization nor organic matter content were correlated to soil productivity, which may be explained by the fact that in these soils there were grasses for at least 40 years before the plantations were established, providing enough N to the system. Nevertheless, subsequent rotations may experience N shortages depending on the management system applied to the plantations. To go further with this study two things are needed. The first one is spatial information of soil texture of surface soil and the second one is to establish an experiment to confirm that forest productivity can be predicted from soil texture in new plots.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was sponsored by the National Council for Science and Technology (CONACYT) and the National Forestry Commission of Mexico (CONAFOR). Project: 2003 CO3-9925.

LITERATURE CITED

- Aparicio, J. L., y J. A. López. 1995. Potencial de *Eucalyptus grandis* en el sudeste de la provincia de Corrientes y algunos factores edáficos relacionados con la producción de madera. Bosque 16: 81-89.
- Carnean, W. H. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. Adv. Agron. 27: 209-269
- Cieszewski, C. J. 2001. Comparing fixed-and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. For. Sci. 48: 7-23.
- Clutter, L. J., C. J. Fortson, V. L. Pienaar, and L. R. Bailey. 1983. Timber Management. A Quantitative Approach. New York Wiley. 333 p.
- Daniel, P. W., U. E. Helms, y F. S. Baker. 1982. Principios de Silvicultura. Editorial McGraw Hill. México. 492 p.
- Fisher, R. F., and D. Binkley. 2000. Ecology and Management of Forest Soils. 3rd ed. Wiley. USA. 489 p.
- Forrester, D. I., J. Bauhus, A. L. Cowie, P. A. Mitchell, and J. Brockwell. 2006. Productivity of three young mixed-species plantations containing N₂-fixing *Acacia* and non-N₂-fixing

leguminosas en el sotobosque herbáceo de los rodales de eucalipto puede ocasionar un déficit de 140 kg⁻¹ N ha⁻¹ siete años después del establecimiento de la plantación (Laclau *et al.*, 2005). Dado que el monocultivo no es un sistema sostenible después de la primera rotación, consideramos que las rotaciones sucesivas en los sitios de estudio estarán más restringidos de N, llevando a una mejor relación entre crecimiento del árbol y disponibilidad de N en el suelo. Los suelos de textura gruesa con buenas condiciones de nutrientes parecen proporcionar los mejores medios para la productividad del eucalipto. Stape *et al.* (2004) también observaron esta tendencia y reportaron que los suelos de textura gruesa fueron hasta dos veces más susceptibles a la fertilización que los sitios con textura de suelo más fina.

CONCLUSIONES

Los índices de sitio (*SI*) de *E. grandis* y *E. urophylla* se relacionaron con la textura del suelo. Los contenidos de arena mayores a 28% a una profundidad de suelo de 0-5 cm influenciaron el crecimiento del suelo positivamente. En capas más profundas (5-30 cm) esta influencia ocurrió en contenidos de arena mayores a 24%. El contenido de arena del suelo de la superficie explicó 51 a 53% de la variación *SI*. No se encontró correlación entre densidad global medida a 0-5, 10-15 y 15-30 cm y crecimiento del árbol (*SI*). Niveles adecuados de humedad del suelo pueden impedir que el suelo alcance valores de dureza que podrían perjudicar el crecimiento de la raíz. De manera similar, ni la mineralización N ni el contenido de materia orgánica estuvieron correlacionados con la productividad del suelo, lo que puede explicarse por el hecho de que en estos suelos hubo pastos durante al menos 40 años antes de que se establecieran las plantaciones, proveyendo suficiente N para el sistema. Sin embargo, rotaciones subsecuentes podrían sufrir escasez de N dependiendo del sistema de manejo aplicado a las plantaciones. Se necesitan dos cosas para continuar con este estudio. La primera es información espacial sobre la textura del suelo de la superficie y la segunda es establecer un experimento para confirmar que la productividad de los bosques puede predecirse a partir de la textura del suelo en parcelas nuevas.

—Fin de la versión en Español—



- Eucalyptus* and *Pinus* trees in south-eastern Australia. For. Ecol. Manage. 233: 275-284.
- Gomez, A., R. F. Powers, M. J. Singer, and W. R. Horwath. 2002. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1334-1343.

- Gómez, T. J., H. De los Santos P., y A. M. Fierros G. 2008. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en María Lombardo, Oaxaca, México. In Press. Fitotec. Mex.
- Gonçalves, J. L. M., J. L. I. Demattê, J., and H. T. Z. do Couto. 1990. Relacoes entre produtividade sitios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solo de textura arenosa e média no Estado de Sau Paulo. IPEF. Piracicaba. 43/44: 24-39.
- Gonçalves, J. L. M., N. F. Barros, E. K. S. Nambiar, and R. F. Novais. 1997. Soil and Stand magement for short-rotation plantations. In: Nambiar, E. K. S., and A. G. Brown (eds). Management of Soil, Nutrients, and Water in Tropical Plantation Forester, ACIAR monograph Canberra 43: 397-417.
- Kiviste, A., J., A. Alboreca R., y D. R. González A., 2002. Funciones de Crecimiento en el Ámbito Forestal. Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales. No. 4. 189 p.
- Laclau, J. P., J. Ranger, P. Deleporte, Y. Nouvellon, L. Saint-Adre, S. Martel, and J. P. Bouillet. 2005. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of plantations. For. Ecol. Manage. 210: 375-395.
- Lemma, B., D. B. Kleja, I. Nilsson, and M. Olsson. 2006. Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia. Geoderma 136: 886-898.
- Lieth, H. 1975. Modeling the primary productivity of world. In: Lieth H., and R. H. Wihittaker (eds). Primary Productivity of the Biosphere. Springer Verlag, New York. pp: 237-263.
- Lima, A. M. N., I. R. Silva, J. C. L. Neves, R. F. Novais, N. F. Barros, E. S. Mendonza, T. J. Smyth, M. S. Moreira, and F. P. Leite. 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. For. Ecol. Manage. 235: 219-231.
- Masera, O., M. J. Ordóñez, y R. Dirzo. 1992. Emisiones de carbón a partir de la deforestación en México. CIENCIA: Revista de la academia de la investigación científica 43: 151 p.
- McKenney, D. W., and J. H. Pedlar. 2003. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. For. Ecol. Manage. 175: 497-507.
- Paz, M. F. 1995. Selvas tropicales y deforestación. Apuntes para la historia reciente del trópico húmedo mexicano. In: Paz, M. F. (Coord). De Bosques y Gente. Aspectos Sociales de la Deforestación en América Latina. Cuernavaca, Morelos. CRIM, UNAM. pp: 53-87.
- Powers, R. F. 1980. Mineralizable soil nitrogen as an index of soil nitrogen availability to forest trees. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 1314-1320.
- Powers, R. F. 1999. On the sustainability productivity of planed forest. New Forest 17: 253-306.
- Rowell, D. L. 1994. Soil Science, Methods and Applications. Longman Scientific and Technical. UK. 350 p.
- SAS, Institute 1998. SAS User Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC. 595 p.
- Soil Survey Staff, U.S.D.A. 1997. Keys to Soil Taxonomy. 7th./Ed. Soil Conservation Service. U. S. Department of Agriculture, Blacksburg, Virginia, USA. 545 p.
- Spurr, S. H., and B. V. Barnes. 1980. Forest Ecology. John Wiley and Sons, Inc. 687 p.
- Stape, J. L., D. Binkley, S. Jacob, and E. N. Takahashi. 2006. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in Eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. For. Ecol. Manage. 223: 358-362.
- Stape, J. L., D. Binkley, and M. G. Ryan. 2004. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. For. Ecol. Manage. 193: 17-31.
- Zinn Y. L., D. V. S. Resck, and J. E. Silva. 2002. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. For. Ecol. Manage. 166: 285-294.