

# CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS COM BASE EM FATORES EDÁFICOS PARA *Pinus caribaea* var. *hondurensis* NA REGIÃO DE PRATA, MINAS GERAIS

Jacob Miguel Bila<sup>1</sup>, Carlos Roberto Sanquetta<sup>2</sup>, Sebastião do Amaral Machado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eng. Florestal, M.Sc., Instituto de Investigação Agrária de Moçambique, Maputo, Moçambique - jacobila@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Eng. Florestal, Dr., Depto. de Ciências Florestais, UFPR, Curitiba, PR, Brasil - sanquetta@ufpr.br; samachado@ufpr.br

Recebido para publicação: 03/10/2010 – Aceito para publicação: 26/03/2011

---

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do solo e características dendrométricas na classificação de sítios florestais para a espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e analisar a correlação entre as características químicas e a altura dominante na idade de referência. Usaram-se dados de 240 parcelas permanentes e 183 amostras de solos na profundidade 0 a 20 cm. Foram testados os modelos de Schumacher (1939), Chapman e Richards (1959), Bailey e Clutter (1974) e de Prodan (1968), para a construção da curva-guia na idade de referência de 20 anos, e construiu-se uma matriz de correlação entre variáveis edáficas e variáveis dendrométricas. Com base no método de *stepwise* e no método de componentes principais, foram desenvolvidos modelos para estimar o índice de sítio em função de variáveis edáficas. Os resultados mostraram que as características químicas do solo, como variáveis índice de SMP, Al<sup>3+</sup>, H+Al e P (Mehlich-1), foram consideradas fatores limitantes no crescimento em altura de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com o modelo de Chapman e Richards apresentando melhor ajuste. O modelo obtido a partir do método *stepwise* foi o que apresentou a melhor capacidade de expressar a relação entre variáveis edáficas e características dendrométricas.

**Palavras-chave:** Índice de sítio; altura dominante; características químicas de solos.

## Abstract

*Site classification based on edaphic factors for Pinus caribaea var. hondurensis in the Prata region, Minas Gerais.* This research aimed to study soil factors that affect growth of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, classifying the site and analyzing the correlation between soil chemical characteristics and dominant height. It was used 240 permanent plots data and 183 soil samples at 0 to 20 cm depth. Models of Schumacher, Chapman e Richards, Baily e Clutter and Prodan were tested in order to construct the guide curve. It was adopted the age of 20 years as reference with three site classes as well as built a data matrix consisting of dominant height and soil variables. Based on the method of principal components and *stepwise* method it was developed models to estimate the site index by soil characteristics using. The results revealed that the correlation analysis, the soil chemical characteristics, such as variables SMP index, Al<sup>3+</sup>, H + Al, CEC at pH 7, and P (Mehlich-1), were borderline factors in the height growth of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, as well as the model of Chapman e Richards fitted the best to the data. The model developed by *stepwise* revealed the greatest accuracy.

**Keywords:** Site index; dominant height; chemical characteristics of soils.

---

## INTRODUÇÃO

As plantações florestais apresentam grande importância socioeconômica em vários países, gerando produtos para consumo interno ou para exportação e empregos para a população. O estudo da classificação das áreas florestais em relação ao potencial de produtividade é de grande importância, tanto para o manejo florestal como para o planejamento de uma empresa florestal, tendo em vista que expressa a produtividade de uma região e é uma variável requerida para o desenvolvimento de modelos de predição da produção florestal. Também possui grande importância para a estratificação das áreas

florestais segundo a sua capacidade produtiva para fins de inventários florestais e planejamento das operações de exploração.

Os sítios florestais se definem sob diferentes pontos de vista entre os ecólogos e manejadores florestais. Segundo Scolforo (1993), os ecólogos definem sítio como uma unidade geográfica uniforme, caracterizada por combinações estáveis dos fatores que interagem no meio, e os manejadores florestais definem sítio como um fator de produção primário capaz de produzir madeira ou produtos florestais a eles associados (SCHONAU, 1987).

Portanto, com o objetivo de subsidiar o manejador florestal, este trabalho visou avaliar o efeito do solo e as características dendrométricas na classificação de sítios florestais para a espécie *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* localizados no município de Prata, Minas Gerais, por meio do teste de modelos matemáticos de classificação de sítio florestal; da determinação do índice de sítio com base no modelo selecionado; da análise de fatores edáficos e sua correlação no crescimento em altura na idade de referência; e através da comparação de modelos de regressão obtidos por meio de análise de componentes principais e do método *stepwise*, para estimativa do índice do sítio usando variáveis do solo. Carvalho *et al.* (1999) estudaram os efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. no município de Arapoti, estado do Paraná, Brasil.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

Este trabalho foi realizado nas fazendas Salto e Ponte I e II, Salto e Ponte III, Vertente Grande, Buriti dos Bois e Jussara de Minas, na região de Prata, estado de Minas Gerais, numa área total de aproximadamente 4.856,626 km<sup>2</sup>, dos quais 89,8756 km<sup>2</sup> (8.987,56 hectares) são constituídos de vegetação e cerca de 54% estão ocupados por plantios de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical semiúmido, com chuvas no verão e seca no inverno. Apresenta temperatura média anual de 24 °C, com precipitação média anual de 1.500 mm. A vegetação original da área era predominantemente constituída de cerrado, apresentando trechos de floresta tropical no vale dos principais rios. O relevo pertence ao Planalto Sedimentar Medianamente Dissecado, com relevos residuais a oeste e planície fluvial a leste (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2009). Os dados foram levantados a partir de 240 parcelas permanentes estabelecidas em plantios de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, sendo que dos plantios obtiveram-se 183 amostras de solos.

### Ajuste de modelos

A classificação do sítio foi feita ajustando-se 4 modelos aos dados de 240 parcelas permanentes estabelecidas e remeidas ao longo de 5 anos. O intervalo de medições estendeu-se de 2005 a 2010, tendo sido feitas medições anualmente em todas as 5 fazendas em estudo. A finalidade do ajuste foi testar e selecionar o melhor modelo, através das estatísticas: coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa, análise gráfica dos resíduos e validação dos modelos através do teste de qui-quadrado. Foram testados os modelos de Schumacher, Chapman e Richards, Bailey e Clutter e Prodan (Tabela 1). Dos dados obtidos, separaram-se 30 árvores, com a finalidade de determinação do teste de qui-quadrado.

Tabela 1. Modelos testados.

Table 1. Tested models.

Modelos	Forma geral
Schumacher (1939)	$H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 (1/I)^{\beta_2}$
Chapman e Richards (1959)	$H_{dom} = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 I})^{\beta_2}$
Bailey e Clutter (1974)	$\ln H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 (1/I)^{\beta_2}$
Prodan (1968)	$\ln H_{dom} = I^2 / (\beta_0 + \beta_1 * I + \beta_2 * I^2)$

Com base nas alturas dominantes calculadas partir de dados de campo, através do programa *FlorExcel* v. 3. 8. 08, foram ajustados os modelos usando-se a ferramenta *Solver* do programa Microsoft Excel.

### **Classificação do sítio**

A idade-índice é um ponto de referência para a determinação da qualidade de sítio em diferentes áreas florestais. Apesar de sua escolha ser arbitrária, é aconselhável que essa idade seja igual à rotação prevista ou próxima a esta (STRAND, 1964). Neste trabalho, a idade de referência escolhida foi de 20 anos, sendo definidas três classes de sítio sobre a idade-índice e seus limites definidos em 17, 21, 25 e 29 m.

### **Espacialização da área**

A espacialização da área de estudo foi feita com o recurso do Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando-se o método de interpolação *Inverse Distance Weight* (IDW). Segundo Boscatto *et al.* (2007), a interpolação de dados é um método utilizado para valores de uma sucessão entre dois valores consecutivos conhecidos. Para este trabalho, esse método foi utilizado para encontrar locais com a mesma capacidade produtiva a partir de pontos já conhecidos.

### **Análise de correlação entre as variáveis edáficas e biométricas**

A correlação foi analisada entre as 16 variáveis edáficas e de altura dominante na idade de referência, com a finalidade de verificar a associação entre essas variáveis. As variáveis edáficas foram obtidas em amostras de solos analisadas numa camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade.

Os solos foram classificados (*in loco*) e as seguintes variáveis foram analisadas no laboratório da Embrapa Florestas: teores de argila, pH, ISMP,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  e  $H + Al^{3+}$ , soma de bases, CTC, CTC a pH7, P (Mehlich-1), carbono orgânico, saturação de bases, saturação de alumínio e relação  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ .

### **Seleção das variáveis edáficas mais importantes**

A seleção das variáveis edáficas mais importantes na determinação da qualidade de sítio foi efetuada através da determinação da matriz de correlação a partir dos dados das 16 variáveis do solo, e do índice do sítio, por intermédio do programa *Statgraphics Plus* v. 5.1. Todas as variáveis que apresentaram coeficiente de correlação não significativo ao nível de 1% com a altura dominante foram descartadas.

### **Determinação e comparação dos modelos de regressão**

Foram usados dois métodos, o modelo obtido a partir de análise de componentes principais e o modelo obtido pelo método *stepwise*. A comparação da precisão desses modelos foi feita com base nas estatísticas de ajustes, como coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, análise gráfica dos resíduos e teste t-student para a análise da significância dos coeficientes no modelo gerado.

### **Determinação do modelo de regressão usando o método de análise de componentes principais**

A análise de componentes principais foi executada com base na matriz de correlação, através do software *Statgraphics Plus* v. 5. 1. Para determinar o número de componentes principais retidos na análise, utilizaram-se dois critérios: critério de Kaiser (KAISER, 1958), que sugere manter na análise as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que 1, e critério de reter o número de componentes principais que acumulem pelo menos certa porcentagem da variabilidade total dos dados, de preferência, acima de 70% (JOHNSON; WICHERN, 1998).

### **Determinação do modelo de regressão usando o método *stepwise***

Além da seleção das variáveis usando os componentes principais, fez-se também a seleção das variáveis usando o método *stepwise*. Esse método permite desenvolver um modelo de regressão que maximiza a previsão da altura dominante com menor número de variáveis, eliminando todas as variáveis de solo com menor peso.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Ajuste de modelos**

Os resultados de ajustes de modelos de regressão estão apresentados na tabela 2. Pode-se perceber que o modelo de Chapman e Richards apresentou melhor resultado de ajuste, com  $Syx$  (%) e  $R^2$  aj.(%) de 8,79% e 70,68%, respectivamente. O modelo de Prodan teve desempenho de  $Syx$  (%) e  $R^2$  aj.(%) de 8,83% e 70,00%, seguido pelo modelo de Schumacher, com  $Syx$  (%) e  $R^2$  aj.(%) de 8,88% e 70,25% e pelo modelo de Bailey e Clutter, com  $Syx$  (%) e  $R^2$  aj.(%) de 9,19% e 65,50%.

Tabela 2. Coeficientes de regressão dos modelos ajustados e suas estatísticas de ajuste e precisão.  
 Table 2. Regression coefficients from adjusted models and their statistics of fitting and accuracy.

Modelo	Coeficientes de regressão			Estatísticas de ajuste	
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	Syx (%)	R <sup>2</sup> aj.(%)
Schumacher (1939)	3,520724	-7,90822	-	8,88	70,25
Bailey e Clutter (1974)	-14,2166	15,49661	-0,03844	9,19	65,50
Chapman e Richards (1959)	26,54541	0,118662	1,524792	8,79	70,68
Prodan (1968)	0,028975	0,218265	1,473439	8,83	70,00

$\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$ : coeficientes; Syx,%: erro padrão da estimativa; R<sup>2</sup> aj.(%): coeficiente de determinação.

### Análise gráfica dos resíduos

Foram construídos gráficos de resíduos para cada modelo ajustado, com o objetivo de verificar a distribuição dos resíduos em função da altura dominante estimada. Pode-se notar que os modelos apresentaram características de distribuição dos resíduos semelhantes, não evidenciando tendenciosidade (Figura 1).

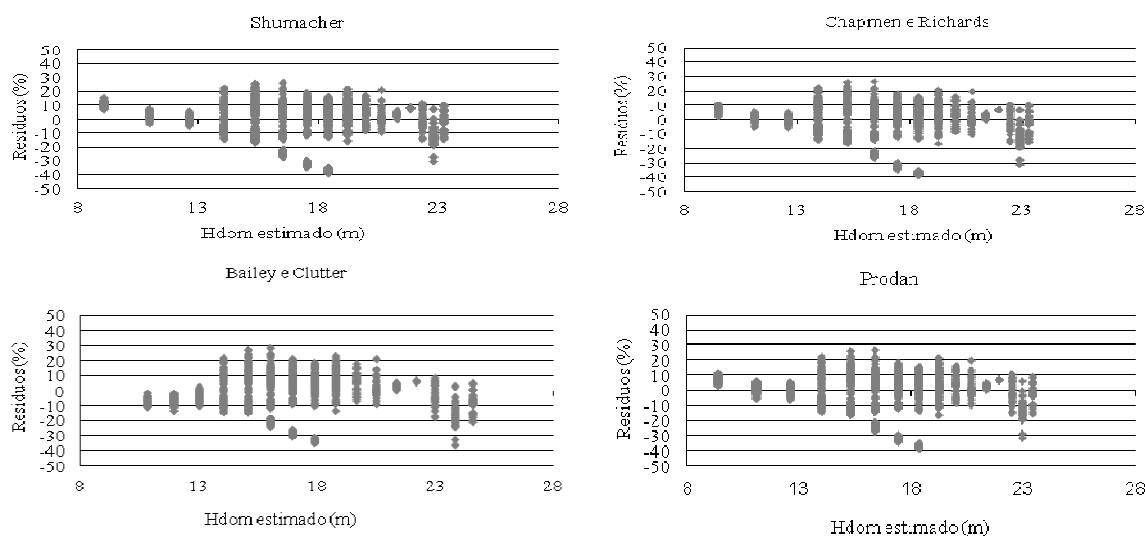


Figura 1. Gráficos de dispersão de resíduos em função da altura dominante estimada pelas equações de Schumacher, Chapman e Richards, Bailey e Clutter e Prodan.

Figure 1. Graphics of residuals dispersion as a function of dominant height estimated by the equations of Schumacher, Chapman and Richards, Bailey and Clutter and Prodan.

### Validação dos modelos

A validação dos modelos foi feita com base no teste de qui-quadrado. Se o valor de  $\chi^2$  calculado for menor que seu respectivo valor tabelado, ao nível de 95% de probabilidade, isso indica que não existem diferenças estatisticamente significativas entre as alturas dominantes reais e estimadas. Sendo assim, todos os modelos testados são válidos para a região de estudo (Tabela 3).

Tabela 3. Dados tabelados e calculados do qui-quadrado.

Table 3. Data tabulated and calculated chi-square.

Modelo	P	GL	$\chi^2$ tab.	$\chi^2$ calc.
Schumacher (1939)	0,05	29	42,56	4,31
Bailey e Clutter (1974)	0,05	29	42,56	1,78
Chapman e Richards (1959)	0,05	29	42,56	4,21
Prodan (1968)	0,05	29	42,56	2,14

P: probabilidade; GL: grau de liberdade;  $\chi^2$  tab.: valor de qui-quadrado tabelado;  $\chi^2$  calc.: valor de qui-quadrado calculado.

### Seleção do melhor modelo

Após análises, o modelo que apresentou o melhor ajuste foi o de Chapman e Richards, pois apresentou maior valor de coeficiente de determinação e menor valor de erro padrão da estimativa, com 70,58% e 8,79%, respectivamente. A análise gráfica dos resíduos e a validação dos modelos foram satisfatórias para todos os modelos ajustados também.

### Classificação do sítio

Neste trabalho, a idade-índice ou idade de referência é de 20 anos. O índice de sítio nessa idade de referência é de 23 m, determinado a partir do modelo selecionado. Foram definidas três classes de sítio. Os índices de sítio III e II apresentaram limite superior de altura dominante de 21 m e 25 m, respectivamente, enquanto que o sítio I, que apresenta melhor desenvolvimento das árvores, teve um limite superior de 29 m na idade de referência. Na tabela 4 são apresentados os limites para cada classe de sítio. As curvas de sítio são apresentadas na figura 2.

Tabela 4. Limites de classes de sítio.

Table 4. Limits of site class.

Idade (anos)	Classes de sítio					
	III		II		I	
	Índices de sítio					
	Inferior (m)	Superior (m)	Inferior (m)	Superior (m)	Inferior (m)	Superior (m)
2	1,84	2,24	2,24	2,75	2,75	3,15
4	4,48	5,44	5,44	6,67	6,67	7,63
6	7,05	8,58	8,58	10,51	10,51	12,03
8	9,36	11,37	11,37	13,94	13,94	15,96
10	11,33	13,77	13,77	16,88	16,88	19,32
12	12,97	15,76	15,76	19,32	19,32	22,12
14	14,31	17,40	17,40	21,33	21,33	24,42
16	15,41	18,73	18,73	22,96	22,96	26,29
18	16,29	19,81	19,81	24,28	24,28	27,79
20	17,00	21,00	21,00	25,00	25,00	29,00
22	17,57	21,35	21,35	26,18	26,18	29,97
24	18,02	21,90	21,90	26,85	26,85	30,73
26	18,38	22,34	22,34	27,38	27,38	31,35
28	18,66	22,68	22,68	27,81	27,81	31,83
30	18,88	22,96	22,96	28,14	28,14	32,22

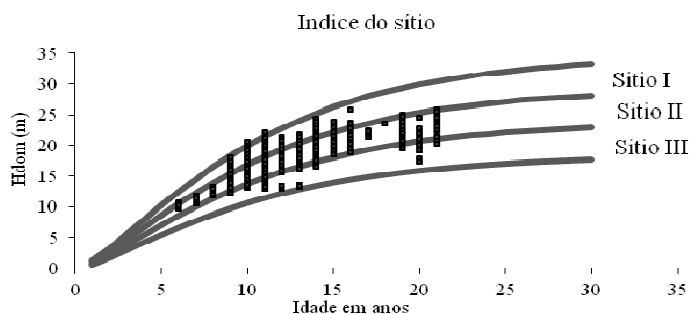


Figura 2. Curvas de índice de sítio.

Figure 2. Site index curves.

Segundo mostra a figura 2, a área com o índice de produtividade classificado como sítio II apresentou maior número de parcelas em relação ao índice I, com muito poucas parcelas para o índice do sítio III – 195, 45 e 3 parcelas, respectivamente. Entretanto, pode-se apontar que o modelo ajustado possuiu aderência ao conjunto de dados, visando expressar as classes do índice do sítio na área de estudo.

### Espacialização dos sítios nas áreas avaliadas

Os mapas das áreas avaliadas com a espacialização dos sítios encontrados, através do método IDW, estão apresentados na figura 3. Segundo mostram essas figuras, a maior área estabelecida de plantações nessa região é classificada como sítio II e pequenas áreas para as classes de sítio I e III. Nas fazendas Salto, Ponte III, Buriti dos Bois e Jussara Minas, não foi observada a classe de sítio III, sendo predominante na região a classe de sítio II.

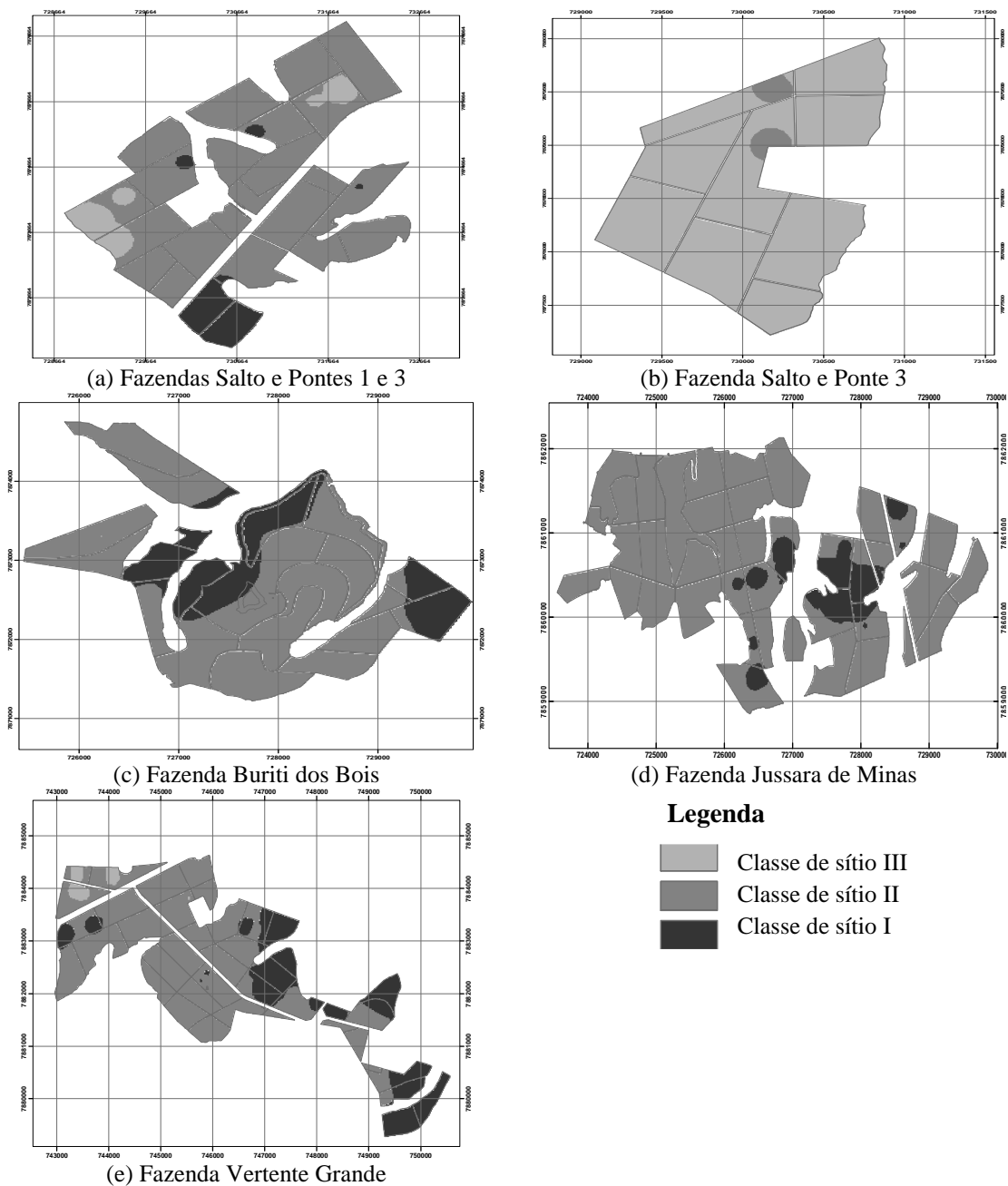


Figura 3. Mapas da distribuição espacial do índice de sítio nas áreas avaliadas.  
Figure 3. Maps of spatial distribution of site index on the available area.

### Correlação entre as variáveis de solos e variáveis biométricas

A correlação significativa foi observada a partir de probabilidade abaixo de 0,05. Nesses termos, a altura dominante na idade de referência obteve uma correlação significativa com algumas variáveis de solos, tais como índice de SMP,  $Al^{3+}$ , H+Al e P (Mehlich-1), com probabilidade de 0,02, 0,01, 0,03 e 0,02, respectivamente. Portanto, essas variáveis de solo podem ser consideradas como fatores limitantes ao crescimento em altura de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de Prata, em Minas Gerais. No entanto, Carvalho *et al.* (1999), estudando o efeito de características de solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*, encontrou variáveis de solos que se correlacionam com altura dominante diferentes das encontradas neste trabalho, tais como o pH, carbono orgânico,  $Ca^{2+}$  e  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ . Hope (1980), no seu trabalho sobre relações entre dados analíticos do solo, análise foliar e dados de crescimento de *Araucaria angustifolia* Bert O. Ktze. na Floresta Nacional de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, encontrou correlação entre as variáveis P,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  com a variável altura total. A observação da tabela 5 apoia esses resultados.

Tabela 5. Matriz de correlação entre variáveis de solos e variável biométrica.

Table 5. Correlation matrix between soil variables and biometric variable.

	S	pH	Índice SMP	$Al^{3+}$	H+Al	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$K^+$	S. de bases	CT C ef	CT C pH 7,0	Argila	P (Meh-1)	Carb .Org	Sat. P. Bases	S.po r AL	R. $Ca^{2+}/Mg^{2+}$
S	1,00																
pH	0,02	1,00															
í. SMP	0,23	0,35	1,00														
$Al^{3+}$	-0,26	-0,72	-0,62	1,00													
H+Al	-0,22	-0,31	-0,97	0,61	1,00												
$Ca^{2+}$	0,03	0,78	0,36	-0,59	-0,33	1,00											
$Mg^{2+}$	0,11	0,74	0,36	-0,59	-0,34	0,93	1,00										
$K^+$	0,06	0,21	-0,15	-0,05	0,15	0,41	0,40	1,00									
S. de Bases	0,06	0,77	0,35	-0,59	-0,32	0,99	0,98	0,44	1,00								
CTC efe	-0,12	0,41	-0,03	0,02	0,05	0,78	0,77	0,51	0,80	1,00							
CTC pH 7	-0,18	0,18	-0,76	0,25	0,81	0,28	0,27	0,42	0,29	0,55	1,00						
Argila	-0,14	0,05	-0,30	0,12	0,30	0,20	0,19	0,24	0,20	0,34	0,42	1,00					
P (Meh-1)	0,23	-0,01	0,09	-0,13	-0,07	0,17	0,24	-0,00	0,20	0,16	0,05	-0,21	1,00				
Car. Org	-0,01	0,06	-0,46	0,07	0,45	0,02	0,05	0,26	0,04	0,10	0,48	0,38	0,03	1,00			
Sat./ Bases	0,10	0,80	0,52	-0,68	-0,49	0,95	0,95	0,30	0,96	0,68	0,11	0,12	0,20	-0,08	1,00		
Sat./Al	-0,13	-0,81	-0,49	0,80	0,47	0,88	-0,86	-0,25	-0,88	-0,49	-0,07	-0,10	-0,16	0,04	-0,94	1,00	
R. $Ca^{2+}/Mg^{2+}$	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,47	0,29	0,10	0,70	0,00		1,00
	-0,04	0,01	0,13	-0,01	-0,09	0,18	-0,15	-0,06	0,03	0,04	-0,07	0,01	-0,10	-0,16	0,06	-0,07	
	0,72	0,88	0,17	0,96	0,37	0,06	0,13	0,55	0,73	0,70	0,49	0,90	0,32	0,09	0,57	0,48	

Para cada variável, a linha superior corresponde à correlação e a linha inferior ao valor de P.

### Determinação de modelos de regressão

A análise de regressão foi usada para se encontrar a equação que permite estimar o índice de sítio (Hdom na idade de referência) a partir de variáveis do solo. Todavia, foram usados dois métodos, o modelo obtido a partir do método de componentes principais e o modelo obtido a partir do método *stepwise*.

### Análise de componentes principais

Foi feita a análise de componentes principais para os dados das 16 variáveis explicativas de amostras de solos, obtidas na área das cinco fazendas em estudo. Os componentes principais obtidos apresentaram autovalores que variaram de 0 a 7,006 (Tabela 6). Verifica-se, ainda, que somente os cinco

primeiros componentes apresentaram autovalores superiores a 1, explicando 81,64% da variação total. Isso significa que as 16 variáveis explicativas estudadas podem ser substituídas por esses cinco componentes, com perda de apenas 18,36% de informação. Assim, para cada componente, a variável ou grupo de variáveis com maiores coeficientes absolutos foram destacadas como as mais importantes até o quinto componente. Elas praticamente dispensam o uso das demais variáveis inicialmente avaliadas. As variáveis que apresentaram maior valor absoluto nos quatro componentes principais (Tabela 7) foram: saturação por bases, P (Mehlich-1) e CTC a pH 7. Portanto, essas variáveis foram identificadas como as mais importantes, sendo que a análise de regressão dessas três variáveis sobre o índice do sítio resultou na seguinte equação:

$$S = 21,3323 + 0,022016 * \text{Saturação por bases} + 0,631923 * P \text{ (Mehlich-1)} - 0,537908 * \text{CTC a pH 7}$$

A equação do modelo proposto através da análise de regressão é apropriada para relacionar as alturas dominantes na idade de referência e as três variáveis do solo com maior importância, pois o valor de *P* da tabela de Anova é de 0,0163. Portanto, quando o valor de *P* for menor que 0,10 ao nível de significância de 90%, então existe relação estatisticamente significativa entre as variáveis em análise. O coeficiente de determinação e o erro padrão da estimativa foram de 6,88% e 2,11%, respectivamente.

Tabela 6. Autovalores e componentes principais extraídas.

Table 6. Eigenvalues and principal components extracted.

Número componente	Autovalores	Var. relativa	Var. cumulativa
1	7,00605	43,788	43,788
2	3,72349	23,272	67,060
3	1,22773	7,673	74,733
4	1,10441	6,903	81,635
5	0,86591	5,412	87,047
6	0,71454	4,466	91,513
7	0,67771	4,236	95,749
8	0,38468	2,404	98,153
9	0,15426	0,964	99,117
10	0,08044	0,503	99,620
11	0,04004	0,250	99,871
12	0,01321	0,083	99,953
13	0,00745	0,047	100,000
14	0,00002	0,000	100,000
15	0,00002	0,000	100,000
16	0,00002	0,000	100,000

Tabela 7. Autovetores das quatro componentes principais das características de solos.

Table 7. Eigenvectors of the four principal components of the soil characteristics.

Variáveis	C. P. 1	C. P. 2	C. P. 3	C. P. 4
pH	0,3134	-0,0005	-0,0564	-0,2671
Índice SMP	0,1905	-0,4183	-0,0454	0,0199
Al <sup>3+</sup>	-0,2712	0,2099	-0,0860	0,3778
H+Al	-0,1802	0,4245	0,0337	0,0155
Ca <sup>2+</sup>	0,3646	0,0814	-0,0950	0,1176
Mg <sup>2+</sup>	0,3608	0,0840	0,1301	0,0095
K <sup>+</sup>	0,1399	0,2632	-0,0166	0,0523
Soma de bases	0,3686	0,0937	0,0038	0,0720
CTC efetiva	0,2531	0,2737	-0,0601	0,3722
CTC a pH 7	0,0472	0,4872	0,0361	0,0604
Argila	0,0481	0,2979	-0,3363	-0,2463
P (Mehlich-1)	0,0743	-0,0119	0,6455	0,4418
Carbono org.	-0,0121	0,3186	0,1589	-0,4386
Satura/bases	0,3737	-0,0114	0,0074	0,0425
Satura/alumínio	-0,3556	0,0405	0,0101	0,1178
Relação Ca <sup>2+</sup> /Mg <sup>2+</sup>	0,0193	-0,0651	-0,6322	0,3964



### Análise de significância dos coeficientes do modelo obtido por componentes principais

Segundo a estatística *t-student* sobre a análise de significância dos coeficientes, a variável do solo saturação por bases apresentou uma probabilidade de 0,435 (acima de  $P = 0,005$ ), o que significa que essa variável não acrescenta melhorias ao modelo, podendo ser descartada.

### Análise de regressão com base no método *stepwise*

Usando o modelo gerado através do método *stepwise*, foram mantidas as seguintes seis variáveis:  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ , soma de bases, CTC efetiva, P (Mehlich-1) e Relação  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ . Portanto, pelo método *stepwise*, o modelo de regressão sobre o índice do sítio e as variáveis do solo resultou na seguinte equação:

$$S = 18,666 - 156,215*Al^{3+} - 25,8343*Ca^{2+} - 140,25*Soma\ de\ bases + 153,56*CTC\ efetiva + 0,554066*P\ (Mehlich-1) + 2,0359*Relação\ Ca^{2+}/Mg^{2+}$$

Levando-se em conta o teste de significância do modelo, essa equação é apropriada para relacionar o índice de sítio e as variáveis do solo mantidas, pois o valor de  $P$  da tabela da Anova é de 0,0001. Isso significa que, quando o valor de  $P$  for menor que 0,01 ao nível de significância de 99%, existe relação estatisticamente significativa entre as variáveis em análise, sendo o coeficiente de determinação ajustado e o erro padrão da estimativa de 20,18% e 1,96%, respectivamente.

No que se refere aos coeficientes do modelo obtido pelo método *stepwise*, a estatística *t-student* sobre a análise de significância para todas as variáveis de solos foi satisfatória, pois apresentou uma probabilidade abaixo de 0,05, o que significa que essas variáveis são significativas no modelo.

### Comparação dos modelos de regressão obtidos a partir de componentes principais e de *stepwise*

Na comparação dos modelos, considerou-se a qualidade de regressão, que leva em conta as seguintes estatísticas de precisão: coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa e análise gráfica dos resíduos. Os coeficientes de determinação ajustados para os modelos a partir da análise multivariada e método *stepwise* foram 5,13% e 20,1%. Já os erros padrões da estimativa foram 2,13% e 1,96% para a análise multivariada e método *stepwise*, respectivamente.

Os gráficos de resíduos obtidos a partir do modelo de índice do sítio estimado através de componentes principais e dos resíduos obtidos pelo método *stepwise* estão apresentados na figura 4.

Segundo mostram os gráficos da figura 4, o modelo de regressão obtido a partir do método *stepwise* apresentou uma estimativa melhor ao longo da linha de regressão, em relação ao modelo obtido por componentes principais, o qual apresentou uma tendência com os pontos concentrados entre as alturas de 16 a 20 m. Ainda, o modelo obtido a partir do método *stepwise* apresentou um coeficiente de determinação maior em relação ao modelo obtido por análise das componentes principais e um menor erro padrão da estimativa, o que apontou para a indicação de melhor ajuste do modelo *stepwise* aos dados utilizados.

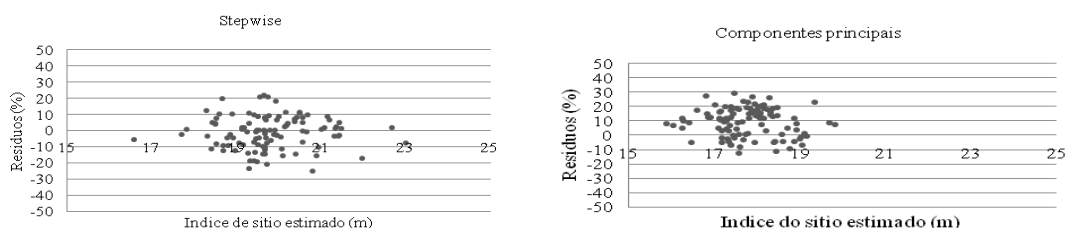


Figura 4. Gráficos de dispersão de resíduos em função do índice de sítio estimado pelo *stepwise* e pelas componentes principais.

Figure 4. Graphics of residual dispersion as a function of site index estimated by *stepwise* and by principal components.

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O melhor modelo para a construção da curva guia foi o de Chapman e Richards.
- As variáveis índice de SMP,  $Al^{3+}$ , H+Al e P (Mehlich-1) foram os fatores de solo limitantes ao crescimento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de Prata, apontando interferência de forma significativa no desenvolvimento das árvores locais.

- O modelo de regressão obtido a partir do método *stepwise* apresentou o melhor comportamento na predição da altura dominante para o conjunto de dados, sendo, portanto, indicado como melhor alternativa em situações futuras semelhantes.
- Recomendam-se estudos da mesma natureza com amostras de solo que são coletadas na mesma área das parcelas permanentes, para que se tenha melhor correlação entre as variáveis biométricas e as edáficas.

## REFERÊNCIAS

BOSCATTO, F.; PROCHNOW, R. M.; OLIVEIRA, F. H. Utilização do sistema de informação geográfica - SIG como apoio ao planejamento legal da Malacocultura. **XXII CBC**. Rio de Janeiro. p. 1678 - 1686, 2007.

CARVALHO, A. P.; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E. B.; MACHADO, S. A.; POTTER, R. O.; FASOLO, P. J.; TERREIRA, C. A.; BARTOSZECK, A. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n. 39, p. 51 - 66, 1999.

HOPE, J. M. **Relações entre dados analíticos do solo, análise foliar e dados do incremento de *Araucaria angustifolia*** Bert. O. Ktze. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 1980.

INTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) CIDADES, Disponível em: <[www.Ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm2009](http://www.Ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm2009)>. Acesso em 15/08/2010.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4th edition. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998. 816 p.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23. p. 187 - 200, 1958.

SCHONAU, A. P. G. A. **Site evaluation study in black wattle (*Acacia mearnsii* de Wild)**. University von Stellenbosch, South África, 1987. 214 p.

SCOLFORO, J. S. R. **Mensuração florestal**: Avaliação de produtividade florestal através da classificação do sítio. ESAL/FAEPE, Lavras, 1993. 451 p.

STRAND, L. Numerical constructions of site index curves, **Forest Science**. Washington, v. 10 n. 4, p. 410 - 414. 1964.