
ESTIMATIVA DE CRESCIMENTO EM DIÂMETRO E VOLUME

PATRÍCIA PÓVOA DE MATTOS
EVALDO MUÑOZ BRAZ
VITOR DRESSANO DOMENE
ANDREIA TABORDA DOS SANTOS
ANABEL APARECIDA MELLO
SUZANA MARIA SALIS
ROBÉRIO ANASTÁCIO FERREIRA &
WANDERLEY PORFIRIO DA SILVA

Observa-se uma demanda crescente para o desenvolvimento de métodos alternativos de manejo das vegetações naturais, para garantia de sua manutenção frente a novas opções de uso da terra. Assim, torna-se necessário desenvolver critérios de manejo para espécies nativas, seja em plantios ou em florestas naturais.

Para isso, é fundamental ter o conhecimento de variáveis que possibilitem estimar tanto a produção como a recuperação do crescimento pós-manejo ou de outras intervenções antrópicas. Conhecer o ritmo de crescimento em determinado período e poder estabelecer inferências volumétricas acuradas são informações essenciais para o planejamento do manejo.

A dendrocronologia é uma ferramenta para a rápida recuperação das séries históricas de incremento anual em diâmetro, das espécies que em locais com clima sazonal apresentam anéis de crescimento visíveis. Pode auxiliar na determinação rápida do incremento médio anual e do incremento

corrente anual, além de facilitar a estimativa da idade das classes diamétricas (MATTOS *et al.*, 2011).

Equações de volume também são ferramentas importantes para a tomada de decisão durante o planejamento do manejo florestal. Por isso, várias equações matemáticas foram desenvolvidas para estimar o volume de madeira em florestas naturais e plantadas.

Por esse motivo, foram ajustados modelos para estimativa de volume para a aroeira (*Schinus terebinthifolius*) da região do Baixo São Francisco e para a estimativa de crescimento em diâmetro para a aroeira na região em estudo. Além disso, determinou-se o máximo incremento médio anual, como embasamento para futuras ações de manejo.

TABELA 19. Altura total, diâmetro a 1,30 m de altura (DAP) e à altura da base (DB) das árvores estudadas, no Baixo São Francisco, Sergipe.

Árvore	Altura (m)	DAP (cm)	DB (cm)	Ano de Plantio
1	6,6	5,6	6,9	2003
2	5,5	6,7	7,6	2003
3	7,2	18,4	23,8	-
4	5,2	10,7	19,1	-
5	4,8	8,0	14,1	-
6	6,5	11,2	19,2	-
7	5,75	10,0	13,1	-
8	5,4	7,1	11,9	-
9	4,9	7,5	14,3	-
10	4,75	7,5	9,9	-
11	8,9	8,4	23,5	-

Ajuste de modelos para estimativa do volume

Para estimativa dos volumes individuais comerciais com casca de árvores de aroeira, foram ajustados oito modelos matemáticos (Tabela 20). Os modelos 1 a 3 são equações de simples entrada (utilizam somente o diâmetro como variável independente), enquanto que os demais modelos (4 a 8) são de dupla entrada (usam diâmetro e altura do fuste).

TABELA 20. Modelos matemáticos testados para estimativa do volume de *Schinus terebinthifolius* no Baixo São Francisco, SE.

N	Modelo	Designação - Autor
01	$vol = \beta_0 + \beta_1 d^2$	Kopezky-Gehrhardt
02	$vol = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2$	Hohenald e Krenn
03	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln d$	Husch
04	$vol = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) + \beta_2 h$	Spurr Modificado
05	$vol = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 (d^2 h) + \beta_3 (dh^2) + \beta_4 h^2$	Naslund
06	$vol = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h + \beta_3 d^2 + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 (dh)$	Meyer
07	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h$	Schumacher-Hall
08	$\ln vol = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 h)$	Spurr

Sendo:

vol = volume da árvore;

d = diâmetro à altura do peito (1,30 m de altura) da árvore ou diâmetro na base;

h = altura total da árvore;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = coeficientes do modelo.

Por se tratar de árvores pequenas e bifurcadas, foram testados os diâmetros à altura do peito e da base. Após o ajuste, os modelos foram avaliados quanto à precisão da estimativa de volume.

Critérios para seleção da melhor equação

Os critérios utilizados para a seleção da melhor equação foram: o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), erro padrão da estimativa (Syx%) e o valor de F calculado (Fcal.).

Para possibilitar a comparação de modelos aritméticos com modelos logarítmicos, nas equações logarítmicas, o erro padrão da estimativa foi corrigido na escala original da variável dependente. A correção foi feita com o índice de Furnival (FURNIVAL, 1961) dada pela expressão:

$$IF = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{real_i})}{n} \right] * S_{YX}$$

Onde: IF é o índice de Furnival; V_{real_i} é o volume individual de cada árvore real em m^3 ; SYX é o erro padrão da estimativa; n é o número de árvores amostradas.

Para a escolha do melhor modelo, foi determinado um valor ponderado entre os valores dos parâmetros estatísticos calculados. Os parâmetros foram ordenados de acordo com sua eficiência, sendo atribuídos para cada parâmetro escores entre 1 e 8, sendo 1 para a melhor equação em determinado parâmetro e 8 para a pior, sendo somados os valores finais

para cada equação. O modelo que apresentou o menor valor foi considerado o melhor para se estimar o volume.

Coleta de amostras destrutivas

De cada árvore foram coletados dois discos, sendo um da base e um a 1,30 m (DAP). Esses discos foram posteriormente secos e lixados, para melhor visualização dos anéis de crescimento (Figura 31a). A identificação dos anéis de crescimento nos discos de aroeira foi realizada em quatro raios. A marcação dos anéis de crescimento foi efetuada com auxílio de um microscópio estereoscópico e a medição do incremento, realizada em mesa de mensuração de anéis, com precisão de 0,01 mm, acoplada ao computador (Figura 31b).

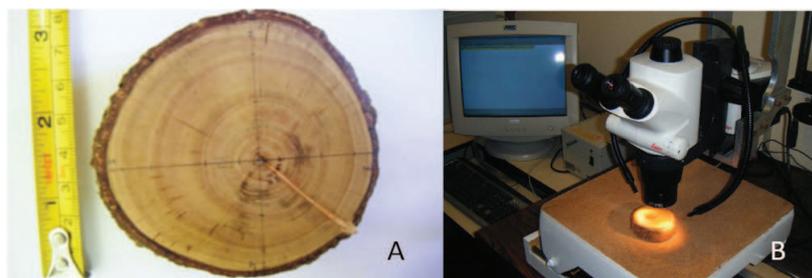


FIGURA 31. a) disco lixado, b) mesa de mensuração e computador, usados para a medição dos anéis de crescimento.

Estimando o volume da aroeira

Os modelos testados com os valores de diâmetro à altura do peito apresentaram parâmetros estatísticos insatisfatórios, com baixo coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e alto erro da estimativa (S_{yx}). Por esse motivo, optou-se por usar apenas o diâmetro da base.

Os parâmetros estatísticos obtidos para a estimativa de volume de *Schinus terebinthifolius* para os oito modelos testados, usando o diâmetro da base, estão apresentados na tabela 21. Os modelos apresentaram coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), com valores variando de 0,77 a 0,90. O coeficiente de variação (Syx%) foi de 7,05% a 444,88%, para um F calculado (Fcal) variando de 14,86 a 51,46.

Os valores ponderados para os oito modelos estão representados na tabela 22. O modelo de dupla entrada que apresentou menor escore foi o de Meyer ($V = -0,42115866 + 0,070418764d + 0,077965h - 0,002414d^2 + 0,0004761(d^2h) - 0,01317973(d*h)$). O modelo de simples entrada selecionado foi o de Hohenald e Krenn ($V = 0,07006 - 0,012239d + 0,000604d^2$), sendo esse o mais indicado pela facilidade de coleta de dados no campo.

TABELA 21. Parâmetros estatísticos obtidos para o ajuste dos modelos para estimativa do volume de madeira de *Schinus terebinthifolius* utilizando diâmetros da base, no Baixo São Francisco, Sergipe.

Modelo	Coeficientes					
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
1	-0,01310	0,000207163				
2	0,07006	-0,012239	0,000604			
3	-9,330870815	2,135907063				
4	-0,015217546	0,00002935	0,0016635			
5	0,03442815	-0,000539285	0,000198565	-0,000383	0,001191	
6	-0,42115866	0,070418764	0,077965	-0,002414	0,0004761	-0,01317973
7	-11,713198633	2,017934862	1,557729462			
8	-11,006314247	1,043824526				
	R^2_{aj}	Syx	CV%	Fcal		
1	0,77	0,018022	9,95	31,99895		
2	0,86	0,014363	7,93	27,9885		
3	0,67	0,021803	444,88	35,8231		
4	0,83	0,018557	8,66	22,9083		
5	0,86	0,014199	7,84	14,8585		
6	0,89	0,012761	7,05	15,1563		
7	0,90	0,015995	212,90	23,7433		
8	0,81	0,016529	203,79	51,4673		

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = coeficientes do modelo; R^2_{aj} - coeficiente de determinação ajustado; Syx - erro padrão da estimativa; CV% - coeficiente de variação em percentagem; Fcal - valor de F da análise de variância.

O modelo selecionado foi o de Meyer, quando for necessária maior precisão das informações sobre o volume. Entretanto, considerando que o modelo de Hohenald e Krenn é de simples entrada, ou seja, não utiliza a variável altura, seria o indicado quando houver necessidade de otimização das atividades de campo ou se tiver dificuldade de avaliar as alturas.

TABELA 22. Valores ponderados para os oito modelos testados para estimativa de volume individual de *Schinus terebinthifolius*, no Baixo São Francisco, Sergipe.

Modelos	Coeficientes			Valor Ponderado
	R ² ajustado	CV%	Fest	
Kopecky-Gehrhardt	0,7750	9,95	32,00	15
Hohenald e Krenn	0,8571	7,93	27,99	11
Husch	0,6707	444,88	35,82	18
Spurr Modificado	0,8296	8,66	22,91	15
Naslund	0,8603	7,84	14,85	13
Meyer	0,8872	7,05	15,16	10
Schumacher-Hall	0,9031	212,90	23,74	13
Spurr	0,8107	203,79	51,47	13

R²aj - coeficiente de determinação ajustado; CV% - coeficiente de variação em percentagem; Fcal - valor de F da análise de variância.

Assumpção Filho (2008) testou 12 modelos para ajuste de equação de volume em remanescente florestal no estado do Rio de Janeiro, selecionando a de Husch como a melhor equação de simples entrada, para a estimativa do volume. No entanto, para a estimativa de volume de aroeira no Baixo São Francisco essa equação foi desconsiderada, pois o coeficiente de determinação foi o mais baixo entre os modelos testados e o coeficiente de variação foi muito elevado. De forma semelhante, as equações de Schumacher e Hall e de Spurr, de dupla entrada, foram descartadas em função do elevado coeficiente de variação, diferindo dos resultados obtidos por Scolforo *et al.* (2004), que recomendam a de Schumacher e Hall para estimativa de volume de madeira para candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish) e Rufini *et al.* (2010), que recomendam Schumacher e Hall e de Spurr para área de Cerrado.

Estudo do crescimento em diâmetro de árvores de *Schinus terebinthifolius*

Datação cruzada

A confirmação da idade das árvores plantadas foi feita pela contagem das camadas de crescimento no disco da base, possibilitando a confirmação do ano de formação de cada anel de crescimento. A datação cruzada entre raios da mesma árvore e entre árvores, comparando-se as variações anuais de crescimento foi feita entre árvores plantadas e nativas.

Na Figura 32a pode-se observar a datação cruzada entre raios da mesma árvore (árvore 10) e na figura 32b entre uma árvore plantada (árvore 2) e discos do DAP de duas bifurcações da árvore 6, confirmando a similaridade na formação das camadas de crescimento.

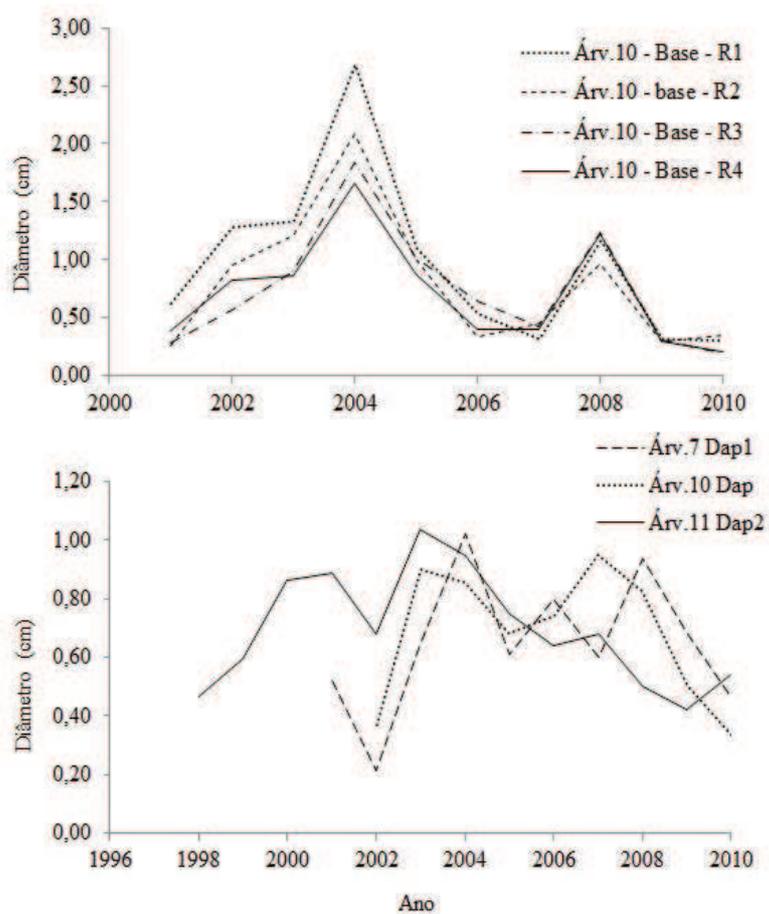


FIGURA 32. a) datação cruzada entre raios da mesma árvore e b) entre árvores.

Crescimento médio anual em diâmetro

Considerando as árvores estudadas do Baixo São Francisco, foi verificado incremento médio anual (IMA) diferenciado no período analisado. Observou-se em 2006, menor valor de IMA (0,51 cm ano⁻¹), enquanto em 2005, registrou-se o maior IMA (0,87 cm ano⁻¹). Essa diferença no crescimento em diâmetro ocorreu, possivelmente, em decorrência de restrições ambientais ocorridas nesse período (Tabela 23).

TABELA 23. Incremento médio em diâmetro de árvores de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi.), na região do Baixo São Francisco, Sergipe.

Ano	Incremento periódico anual (cm)
2004	0,65
2005	0,87
2006	0,51
2007	0,72
2008	0,60
2009	0,60

DOMESTICAÇÃO

As equações de crescimento são muito úteis para o gestor florestal. Elas representam graficamente a evolução do crescimento até o momento atual e possibilitam ao gestor florestal prospectar o crescimento futuro da floresta. A análise do crescimento em diâmetro em função da idade foi realizada mediante a equação de Gompertz, um modelo sigmoidal, sendo uma função exponencial ($y = ae^{-e^{-(b-cx)}}$).

Foram estimados os parâmetros: a = 26,7239; b = -1,2976 e c = -0,0978, com R² de 0,99 e um CV % de 13,8% (Figura 33), sendo os valores de y os DAPs obtidos de acordo com a idade alcançada.

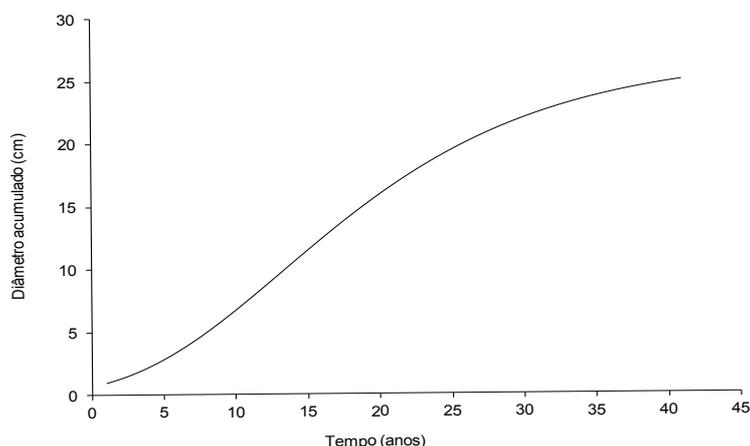


FIGURA 33. Modelo de crescimento de Gompertz, ajustado para árvores de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi.) da região do Baixo São Francisco, Sergipe.

O IMA estimado a partir da equação foi de $0,60 \text{ cm.ano}^{-1}$. O ICA máximo ocorre aos 14 anos ($0,96 \text{ cm.ano}^{-1}$) e começa a decrescer a partir do 15º ano. O incremento periódico anual nos últimos 5 anos para árvores adultas é de apenas $0,21 \text{ cm.ano}^{-1}$.

Os dados cobriam 23 anos (18 cm de DAP), entretanto, o limite máximo de ocorrência na região foi de 30 cm de DAP, assim, resolveu-se utilizar a equação para simular até esse ponto. Observa-se pela curva, a indicação de redução do crescimento em diâmetro mais acelerada, após 18 – 20 cm de diâmetro, supondo que a simulação continuasse com a mesma tendência, a curva estabilizaria perto dos 40 anos (25 cm de DAP).

Seguindo o mesmo procedimento, foram simulados os IMA e ICA para o DAP e volume das árvores de *Schinus terebinthifolius* do Baixo São Francisco. O ponto de equilíbrio entre IMA e ICA, em diâmetro ocorreu próximo aos 21 anos (Figura 34).

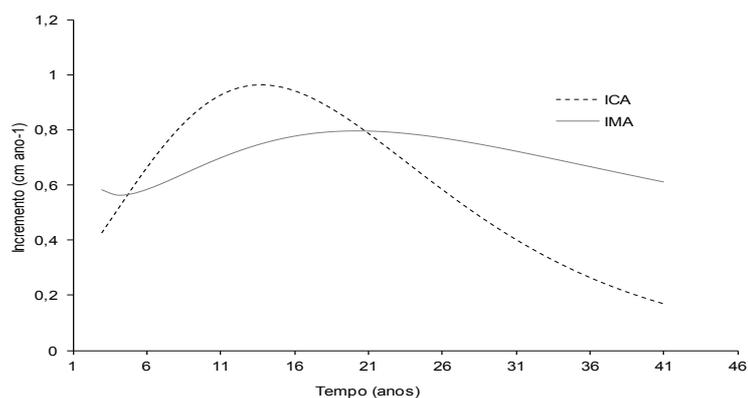


FIGURA 34. Incremento anual em área basal e em diâmetro, para árvores de *Schinus terebinthifolius*.

Considerando a produção em volume, o ponto de equilíbrio entre IMA e ICA ocorreu próximo aos 32 anos (Figura 35).

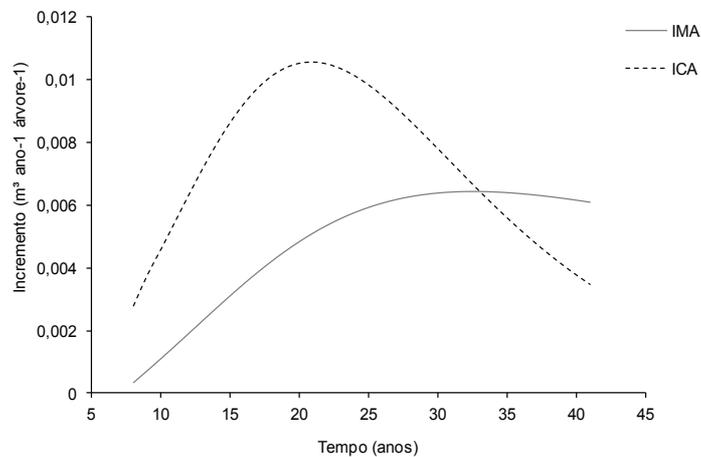


FIGURA 35. Incremento médio e corrente anual em volume estimado para árvores de *Schinus terebinthifolius*.

Estimando a biomassa

A quantidade e a distribuição da biomassa é um aspecto importante nos ecossistemas, pois expressa o potencial de acúmulo de energia e nutrientes da biota em interação com os fatores ambientais. Essas informações são essenciais para o monitoramento dos reservatórios de carbono, sua influência nas mudanças globais e para a compensação e/ou neutralização do carbono emitido em diferentes atividades econômicas nos diferentes biomas brasileiros.

De acordo com Botkin & Simpson (1990) e Coomes *et al.* (2002), existem controvérsias sobre as estimativas feitas sobre a biomassa e o sequestro de carbono, pois as estimativas muitas vezes são baseadas em dados de florestas maduras (com alta biomassa), coletadas pontualmente e extrapoladas para grandes áreas, sendo os valores geralmente sobre-estimados. O problema da extrapolação a partir de pequenos estudos provavelmente se estende a todos os tipos de vegetação (COOMES *et al.* 2002).

Ainda são poucos os trabalhos sobre a biomassa produzida nos ecossistemas brasileiros. A maioria dos estudos estimou a biomassa em florestas úmidas na Amazônia (BROWN *et al.* 1989, FIGUEIREDO *et al.*, 2000; CUMMINGS *et al.* 2002).

Em regiões com vegetação florestal e clima mais seco, com precipitação anual inferior a 1.500 mm, têm-se alguns trabalhos que estimaram produção de biomassa em cerrado (REZENDE *et al.*, 2006; CASTRO & KAUFFMAN, 1998; DELITTI *et al.*, 2006) e cerrado (SALIS *et al.* 2006), e em Caatinga, apenas o trabalho de Schacht *et al.* (1988). Segundo Coomes *et al.* (2002) dados sobre biomassa de arbustos são escassos no mundo, mas podem precisar de mais atenção se a rever-

são da área de agricultura para vegetação nativa for incluída como sequestro de carbono no Protocolo de Quioto.

A biomassa e o carbono armazenado anualmente podem ser estimados usando a equação de crescimento e a de volume, considerando a densidade da madeira, com valores disponíveis em literatura (51 g.cm^{-3} , em troncos) (NOGUEIRA Jr, 2010).

Assumiu-se a distribuição diamétrica encontrada nas áreas de ocorrência como um padrão regular da região. Consideraram-se as equações de crescimento em diâmetro e de volume ajustadas a partir dos dados de campo. Segundo a equação de crescimento, o tempo para formação da estrutura florestal avaliada seriam 41 anos, considerando-se os diâmetros máximos encontrados (classe de 30 cm). A área basal encontrada foi de $0,8252 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ e o volume foi de $3,51 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Nessa condição os IMAs em volume e área basal seriam, respectivamente, de $0,0858 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,02183 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Com relação à distribuição da área basal entre as classes de DAP, pode-se observar que 50% da máxima estrutura é atingida até o centro de classe de 9 cm. Com relação ao volume, 59% é atingido na classe de 11 cm (Figura 36).

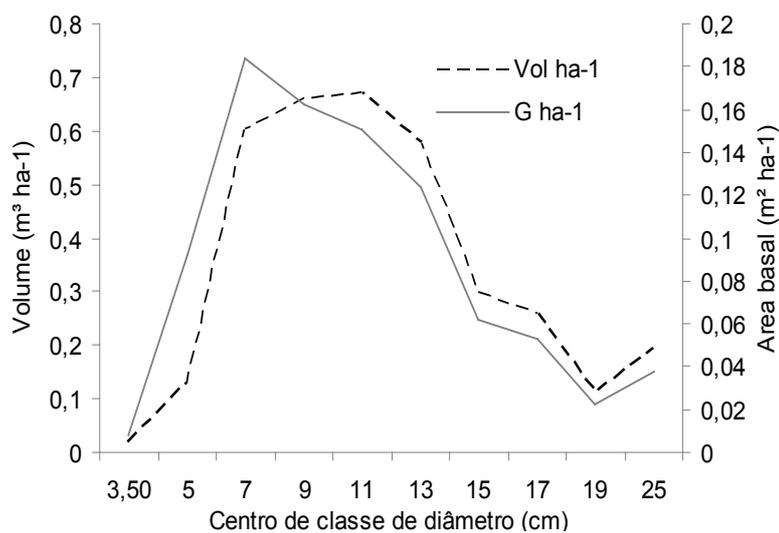


FIGURA 36. Produção em volume e em área basal por classe diamétrica.

Para identificação da máxima produção madeireira, considerou-se o método da maximização da produção anual média (maximização do IMA), em volume. A maximização do volume ocorre aproximadamente, 23 cm de DAP e 32 anos.

Considerações finais

A aroeira que ocorre naturalmente na região do Baixo São Francisco apresenta crescimento compatível com espécies de ciclo curto.

Considerando seu crescimento na floresta natural, uma estrutura que tenha em sua formação atingido a classe de diâmetro de 23 cm já atingiu seu potencial máximo de produção madeireira.