

ESTRATÉGIAS PARA O MELHORAMENTO GENÉTICO DA ERVA-MATE

*Marcos Deon Vilela de Resende¹, José Alfredo Sturion²
e Rosângela Maria Simeão³*

RESUMO

O presente trabalho reporta aspectos referentes a uma estratégia para melhoramento da erva-mate. Os temas abordados são: métodos de seleção, estrutura de populações e delineamentos de cruzamento. As seguintes conclusões foram obtidas: o número ótimo de indivíduos a serem incluídos nos pomares de sementes varia de 15 a 25; a proporção 1 macho:1 fêmea nos pomares maximiza o ganho com seleção; no estágio atual o maior ganho genético é obtido com a instalação de um pomar heptaclonal com 3 reprodutoras e 4 indivíduos masculinos; no estágio atual praticamente não existem vantagens na utilização de polinização controlada.

Palavras-chave: intensidade de seleção, acurácia, estrutura de populações, repetibilidade.

ABSTRACT

This paper reports aspects concerning to a breeding strategy for erva-mate. The concepts of selection methods, population structure and mating designs are considered. The following conclusions were obtained: 15 - 25 individuals is the optimum number to be included in the seed orchards; the ratio 1 male:1 female in the seed orchards maximizes the genetic gain; a seed orchard with 3 female tested parents and 4 male non-tested parents maximizes genetic gain in this stage; control pollination is not advantageous in this stage.

Key Words: selection intensity, accuracy, population structure, repeatability.

1 Eng. Agrônomo, Mestre, CREA nº 50602/D, Pesquisador da EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. Estrada da Ribeira, km 111, CEP 83411-000, Caixa Postal, 319; Colombo-PR; Fone: (041) 766-1313; Fax (041) 766-1276.

2 Eng. Florestal, Doutor, CREA nº 47.263, Pesquisador da EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. Estrada da Ribeira, km 111, CEP 83411-000, Caixa Postal, 319; Colombo-PR; Fone: (041) 766-1313; Fax: (041) 766-1276.

3 Bióloga, Mestre, CRB nº 1271803/B, Doutoranda do Departamento de Genética da Universidade Federal do Paraná.

1. INTRODUÇÃO

O melhoramento genético da erva-mate tem sido realizado na Argentina desde 1970 (BELINGHERI & PRAT KRICUM, 1995) e no Brasil desde 1990 (RESENDE et al., 1993). É portanto, uma ciência relativamente nova e o volume de trabalhos gerados é ainda pequeno. Por ser uma espécie perene e dióica, seu melhoramento muito se assemelha ao melhoramento animal, que dispõe de muitas metodologias que ainda poderão vir a ser adaptadas a esta espécie.

As pesquisas realizadas têm se concentrado no estudo do controle genético associado principalmente ao caráter produção de massa verde, referente aos parâmetros repetibilidade (RESENDE & SILVA, 1991; RESENDE et al., 1995), herdabilidade no sentido restrito (RESENDE et al., 1995; STURION & RESENDE., 1997), herdabilidade no sentido amplo (RESENDE et al., 1996; CORREA et al., 1997) e correlação genética entre caracteres (STURION & RESENDE., 1997). Outros estudos têm enfatizado a comparação entre populações (CROCE et al., 1994), a comparação entre clones e progênies (sistemas de propagação) (BELINGHERI & KRICUN, 1995) e o efeito de sexo sobre a produção de massa verde (STURION et al., 1995). Por outro lado, pesquisas envolvendo estratégias de melhoramento e métodos de seleção têm sido escassas.

Baseando-se nestes antecedentes, o presente trabalho tem, como objetivos realizar uma análise crítica do estado da arte do melhoramento da erva-mate e discorrer sobre aspectos de uma estratégia ideal para melhoramento da espécie.

2. DESENVOLVIMENTO

Os fatores essenciais para o desenvolvimento de uma estratégia de melhoramento são: seleção de germoplasma; métodos de seleção de indivíduos; delineamentos de cruzamento e estruturação de populações.

2.1. Valores médios para produção de massa verde

A produtividade média de massa verde por área verificada no Brasil é da ordem de 7.500 kg/ha para materiais não melhorados sendo que encontram-se em seleção materiais que produzirão acima de 11.000 kg/ha (STURION & RESENDE., 1997). Para este mesmo caráter a produtividade média verificada na Argentina é da ordem de 8.500 kg/ha, sendo que encontram-se

em seleção progênes e clones que produzem 11.000 kg/ha a 12.700 kg/ha (BELINGHERI & KRICUN, 1995). Estes resultados revelam o grande potencial do melhoramento genético em elevar a produtividade da erva-mate.

Quanto ao efeito de sexo na produção de massa verde, BELINGHERI & KRICUN (1995) relataram que não existem diferenças significativas entre plantas femininas e masculinas. Entretanto, segundo STURION et al. (1995) relataram que em experimentos, as plantas femininas produziram significativamente (15%) mais que as masculinas. Se confirmado, este resultado indica que seria desejável a avaliação de um maior número de plantas femininas nos programas de melhoramento.

Quanto aos sistemas de propagação, os resultados experimentais obtidos tem sido surpreendentes. De maneira geral, um mesmo indivíduo quando propagado por sementes tem apresentado significativamente maior produção do que quando propagado via estacas clonais (BELINGHERI & PRAT KRICUN, 1995). Pela teoria genética, este resultado não é esperado. O esperado é que, um mesmo material propagado vegetativamente apresente rendimento superior ou pelo menos igual ao mesmo material propagado via sementes. Em termos genéticos significa que, se existir dominância alélica afetando o caráter, espera-se superioridade do material propagado vegetativamente. Por outro lado, não existindo dominância (ação gênica completamente aditiva), espera-se desempenho igual para os dois sistemas de propagação. Assim, os resultados obtidos revelam, provavelmente, problemas fisiológicos associados à técnica de propagação vegetativa. Torna-se claro então que a silvicultura clonal da erva-mate necessita ser melhor estudada e compreendida. Outro aspecto associado à comparação clone x sementes refere-se à menor estabilidade e adaptabilidade dos clones sobretudo quando cultivados em diversas condições ambientais.

2.2. Seleção de populações

O germoplasma-base para seleção deve apresentar média alta e variabilidade genética ampla. Neste sentido, a seleção de populações é uma etapa importante tanto para a determinação de fontes de sementes para plantio quanto para a identificação do germoplasma-base para seleção. Esta etapa deve basear-se na realização de testes de procedência (para se inferir sobre a média populacional) ou testes de procedência/progênie (para se inferir sobre a média populacional e variabilidade genética).

Quanto ao fator média populacional, os resultados experimentais tem revelado que não existe muita diferenciação entre procedências. CROCE et al. (1994) compararam 16 populações, sendo que 12 delas mantiveram-se estatisticamente iguais. As mais produtivas em Chapecó-SC e Três Barras-SC foram as populações de Barão de Cotegipe-RS e Água Doce-SC. STURION et al. (1997) compararam quatro procedências avaliadas no município de Colombo-PR, tendo verificado que Toledo-PR foi a mais produtiva (Tabela 1).

Tabela 1. Produtividades de procedências de erva-mate avaliadas em três locais.

Procedência*	Índice de massa foliar aos 7 anos** (comparação pelo Teste de Scheffé)	Procedência***	Massa verde aos 5 anos kg/ha
1. Barão de Cotegipe-RS	14,76 a	1. Toledo-PR	7350
2. Água Doce-SC	14,17 ab	2. Campo Mourão-PR	6.900
3. Quedas do Iguaçu-PR	13,20 abcd	3. Cascavel-PR	5.060
4. Concórdia-SC	11,84 abcd	4. Soledade-RS	4.300
5. Seberi-RS	11,59 abcd		
6. Passo Fundo-RS	10,46 abcd		
7. Mafra-SC	9,97 abcd		
8. Erebango-RS	9,96 abcd		
9. Cerro Azul-Argentina	9,01 abcd		
10. Venâncio Aires-RS	8,59 abcd		
11. Ilópolis-RS	7,33 abcd		
12. Palmas-PR	6,77 abcd		
13. Chapecó-SC	6,23 bcd		
14. Canoinhas-SC	5,28 cd		
15. Catanduvas-SC	3,69 d		
16. São Francisco de Paula-RS	não sobreviveu		

* Resultados médios obtidos por CROCE et al. (1994) a partir da avaliação em Três Barras-SC e Chapecó-SC.

** Este índice é função do volume da copa e da densidade da copa e apresentou correlação de 0,93 com volume de copa.

*** Resultados obtidos por STURION e RESENDE (1997) no município de Colombo-PR.

Também WINGE et al. (1995), empregando isoenzimas, encontraram uma alta identidade genética entre as populações de Pinhão-PR, Catanduvas-SC e Erechim-RS, tomadas duas a duas, sendo que a distâncias genéticas entre elas foram pequenas e de mesma magnitude.

Embora a variação genética dentro de populações difira bastante (FLOSS, 1994), os resultados apresentados anteriormente revelam que, provavelmente, a seleção dos indivíduos com maiores valores genéticos (estimados utilizando também a informação de família e de procedências), independentemente da procedência a que pertençam seja a estratégia mais plausível em detrimento da seleção de procedências. É importante ressaltar que este procedimento é também desejável em termos de variação genética, pois o cruzamento entre indivíduos selecionados de diferentes procedências deverá conduzir a uma ampliação da base genética da população resultante.

2.3. Seleção de indivíduos

2.3.1. Maximização do ganho genético

As expressões para cômputo do ganho genético (G_s) com seleção são:

$$G_s = K r_{IA} \sigma_A \quad (1) \text{ para o sistema de propagação sexuada e}$$

$$G_s = K r_{IG} \sigma_G \quad (2) \text{ para o sistema de propagação clonal}$$

onde:

K - diferencial de seleção padronizado

r_{IA} e r_{IG} - acurácias com a seleção visando a propagação sexuada e assexuada, respectivamente.

σ_A e σ_G - desvios padrões genético aditivo e total, respectivamente.

Verifica-se por estas expressões, que o ganho genético pode ser maximizado aumentando-se a intensidade de seleção e a acurácia seletiva, sendo esta última, função do método de seleção empregado e da precisão experimental conseguida.

Considerando-se que a erva-mate é dióica a expressão do ganho genético com vistas a propagação sexuada deve ser modificada para:

$$G_s = (G_{SF} + G_{SM}) / 2$$

$$G_s = \left[(K_F r_{IAF} \sigma_A) + (K_M r_{IAM} \sigma_A) \right] / 2 \quad (3)$$

onde **F** e **M** referem-se à seleção de plantas femininas e masculinas, respectivamente.

É importante verificar que a expressão (1) só é válida se forem recombina- dos números equivalentes de indivíduos masculinos e femininos, seleciona- dos com a mesma acurácia. E isto não acontece na prática.

2.3.2. Intensidade ótima de seleção

A intensidade ótima de seleção na população de produção (ganho gené- tico a curto prazo) depende sobretudo da variância do ganho genético com seleção. Quanto menor o número de indivíduos selecionados, maior é a intensidade de seleção e, conseqüentemente, maior é também a variância do ganho genético, fato que é indesejável por significar menor probabilidade de realização do ganho genético predito.

A variância do ganho genético para os sistemas de propagação sexuada ou assexuada, respectivamente, é dada por:

$$V(G_s) = \frac{1}{N}(1 - r_{IA}^2) \sigma_A$$

ou

$$V(G_s) = \frac{1}{N}(1 - r_{IG}^2) \sigma_G$$

onde: **N** é o número de indivíduos selecionados.

Assim, esta variância é tanto menor quanto maiores forem a acurácia e o número de indivíduos selecionados.

No sistema de propagação clonal, geralmente os indivíduos são selecio- nados a partir de testes clonais, onde r_{IG} tende a 1 e $V(G_s)$ tende a 0. Dessa forma, um número muito pequeno ($N \ll 1$) de clones pode ser selecionado.

No sistema de propagação sexuada, a seleção de indivíduos está associada a uma acurácia de média magnitude (geralmente de 0,40 a 0,70) e, por- tanto, o **N** ideal deve ser determinado criteriosamente. Deve-se, para tanto, considerar a maximização do limite inferior (**LI**) do intervalo de confiança do ganho genético, dado por: $LI = Kr_{IA} - t\sqrt{1/N(1 - r_{IA}^2)}$ (desconsiderando- se s_A que é constante), onde **t** é a estatística de Student, equívulendo a 1,96 para um intervalo construído com 95% de confiança. A referida expressão pode ser reescrita como:

$$LI = (Z/f)r_{IA} - 1,95\sqrt{1/N(1 - r_{IA}^2)} = (Z/N/npb)r_{IA} - 1,95\sqrt{1/N(1 - r_{IA}^2)} = (Znpb/N)r_{IA} - 1,95\sqrt{1/N(1 - r_{IA}^2)},$$

onde: **Z** é a ordenada da curva normal padrão no ponto de truncamento, **f** é a fração selecionada e **n**, **p** e **b** referem-se aos números de indivíduos por

parcela, de progênes e de blocos, respectivamente. Com base nesta última expressão, e considerando $n_{pb} = 10.000$ como ideal, pode ser estabelecida uma tabela que indica o N ótimo para cada grau de controle genético (herdabilidade no sentido restrito = h^2).

Tabela 2. Número de indivíduos (N) a serem selecionados para composição de um pomar de sementes clonal, a partir de experimentos com p progênes e nb indivíduos por progênie, em função da herdabilidade no sentido restrito (h^2) associada ao caráter sob seleção.

h^2	95% de r_{IA}^{max}	nb^*	p	N	Ganho genético em unidades de desvio padrão genético aditivo
0,10	0,5225	200	50	25	1,2907
0,15	0,5510	120	85	25	1,3865
0,20	0,5795	85	120	20	1,4798
0,25	0,5985	50	200	20	1,5461
0,30	0,6270	35	285	15	1,6551

* valor necessário para se atingir 95% da acurácia máxima.

Verifica-se que o número ótimo de indivíduos a serem incluídos no pomar de sementes varia de 15 a 25 e logicamente quanto maior a herdabilidade maior será o ganho genético obtido (Tabela 2).

Com proporção de sexo **1:1** e com machos e fêmeas avaliados em um mesmo experimento deve-se utilizar no pomar **(1/2)N** indivíduos masculinos e **(1/2)N** indivíduos femininos. Por outro lado, se a proporção de sexo difere de **1:1** estes valores devem ser recalculados. Os valores ótimos de N devem ser determinados através da combinação que maximiza

$$(K_M r_{IA} + K_F r_{IA}) / 2 - t \sqrt{1 / N_e (1 - r_{IA}^2)} \quad (4)$$

Considerando a proporção de sexo **8M:5F** encontrados por STURION et al. (1995), obtiveram-se os valores da Tabela 3, para herdabilidade de 25%.

Tabela 3. Número de fêmeas (N_f) e de machos (N_m) a serem selecionados para a composição de pomar de sementes clonal com N indivíduos, considerando diferentes proporções (p) de seleção em cada sexo, bem como ganho genético (G_s) em unidades de desvio-padrão genético aditivo associados a cada situação.

N	N_f	N_m	N_c	$P_F(\%)$	$P_M(\%)$	\bar{p}	G_s
20	10,0	10,0	20,00	0,263	0,161	0,212	1,5465
20	7,6*	12,4*	18,85	0,200	0,200	0,200	1,5356
20	6,0	14,0	16,80	0,158	0,226	0,192	1,5290
20	14,0	6,0	16,80	0,368	0,097	0,232	1,5188
20	10,0	10,0	20,00	0,200**	0,200**	0,200	1,5461

* Mantendo-se a proporção de **8M:5F** no pomar;

** Se a proporção de sexo fosse **1:1**.

Verifica-se que o N_c é preponderante na maximização do limite inferior do intervalo de confiança. Como a maximização do N_c ocorre com $N_m = N_f$ recomenda-se também a adoção da proporção **1:1** no pomar. Para um mesmo tamanho efetivo, verifica-se que é mais vantajoso selecionar um menor número de indivíduos no sexo menos frequente do que o contrário, pois este procedimento maximiza a intensidade de seleção média \bar{p} (Tabela 3). Este procedimento é ainda mais vantajoso se de fato as plantas femininas produzirem mais que as masculinas.

A nível prático, a instalação do pomar com proporção **1M:1F** não impede que as fêmeas sejam repetidas muito mais vezes do que os machos, visando aumentar a quantidade de sementes.

No caso da erva-mate, o procedimento seleção de parentais, atualmente, equivale à seleção de fêmeas reprodutoras com base em testes de suas progênies, visto que a seleção de parentais masculinos em espécies dióicas só é possível com polinização controlada.

A seleção de fêmeas está associada a uma maior acurácia e os números ideais de fêmeas a serem selecionadas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Número adequado (N) de fêmeas (reprodutoras) a serem selecionadas, considerando a avaliação de $F = 100$ famílias e $nb = 100$ indivíduos por família, bem como valores obtidos para a acurácia (r_{IA}) e ganho genético (G_s) em unidades de desvio padrão genético aditivo, para diferentes herdabilidades (h^2).

h^2	r_{IA}	nb	F	N	G_s
0,10	0,85	100	100	3	1,3317
0,15	0,89	100	100	2	1,5228
0,20	0,92	100	100	2	1,6841
0,25	0,93	100	100	1	1,7580
0,30	0,94	100	100	1	1,8364

Verifica-se que poucas (1 a 3) fêmeas podem ser selecionadas e utilizadas com segurança.

2.3.3. Utilização de reprodutoras

As reprodutoras selecionadas com base em testes de suas progênes devem ser utilizadas em pomares de sementes em conjunto com machos selecionados dentro de testes de progênes mas que não sejam filhos das matrizes selecionadas. Neste caso, a intensidade de seleção nos machos será menor que no item anterior, pois deverão ser selecionadas 15, 20 ou 25 machos para maximizar o ganho com a seleção de machos. Utilizando-se a expressão (4) estabeleceu-se a Tabela 5.

Tabela 5.** Ganhos genéticos (G_s) associados à utilização de reprodutoras.

h^2	\bar{r}_{IA}	N_f	N_m	N_e	G_{SM}^*	G_s	Eficiência em relação a seleção de indivíduos
0,10	0,6863	3	25	10,71	1,1768	1,3351	1,035
0,15	0,7205	2	25	7,41	1,2664	1,4147	1,020
0,20	0,7498	2	20	7,27	1,3593	1,5371	1,040
0,25	0,7643	1	20	3,81	1,4216	1,5028	0,972
0,30	0,7845	1	15	3,75	1,5181	1,6099	0,973

* Considerando-se a menor intensidade de seleção e proporção 1M:1F.

** h^2 , r_{IA} , N_f , N_m , N_e , G_{SM} - herdabilidade, acurácia média, número de fêmeas, número de machos, tamanho efetivo e ganho genético com a seleção de machos, respectivamente.

Verifica-se que na prática não devem ser selecionadas menos que duas progênes, pois só assim, sempre haverá vantagem com a seleção de reprodutoras em relação à seleção de indivíduos.

Observa-se também, na expressão 4, que a maximização do ganho com esta modalidade de pomar provavelmente não advém da combinação dos números que maximizam os ganhos com a seleção de machos e fêmeas isoladamente. Assim foi estabelecida a Tabela 6 com outras combinações entre número de fêmeas e de machos.

Tabela 6*. Ganhos genéticos (G_s) associados à diferentes combinações de números de fêmeas (F) e de machos (M) selecionados.

		h^2						
	M	\bar{K}	N_c	G_s 0,10	G_s 0,15	G_s 0,20	G_s 0,25	G_s 0,30
F=1	1	3,2615	2,0	1,230	1,389	1,529	1,599	1,694
	2	3,125	2,7	1,277	1,424	1,554	1,619	1,707
	3	3,079	3,0	1,290	1,434	1,560	1,624	1,709
	4	3,052	3,2	<u>1,298</u>	<u>1,439</u>	<u>1,563</u>	<u>1,626</u>	<u>1,710</u>
	5	3,016	3,33	1,289	1,428	1,551	1,613	1,696
F=2	1	3,1395	2,7	1,287	1,435	1,565	1,632	1,719
	2	3,004	4,0	1,349	1,485	1,604	1,665	1,745
	3	2,957	4,8	1,379	1,510	1,625	1,684	1,61
	4	2,930	5,33	<u>1,393</u>	<u>1,522</u>	<u>1,635</u>	<u>1,693</u>	<u>1,768</u>
	5	2,894	5,71	1,390	1,516	1,627	1,684	1,756
F=3	1	3,063	3,0	1,279	1,422	1,548	1,613	1,697
	2	2,927	4,8	1,358	1,489	1,603	1,661	1,737
	3	2,881	6,0	1,395	1,521	1,631	1,687	1,760
	4	2,853	6,86	<u>1,414</u>	<u>1,537*</u>	<u>1,644*</u>	<u>1,699*</u>	<u>1,770*</u>
	5	2,8175	7,5	1,413	1,534	1,639	1,693	1,763
F=4	1	3,006	3,2	1,266	1,406	1,529	1,592	1,674
	2	2,870	5,33	1,352	1,479	1,590	1,647	1,721
	3	2,824	6,86	1,394	1,516	1,622	1,677	1,748
	4	2,796	8,0	1,415	<u>1,534</u>	<u>1,638</u>	<u>1,691</u>	<u>1,760</u>
	5	2,7605	8,9	<u>1,417*</u>	1,533	1,635	1,687	1,755

Valores grifados = valores mais altos para herdabilidade fixa.

* \bar{K} , N_c , h^2 - diferencial de seleção padronizado médio, tamanho efetivo e herdabilidade, respectivamente.

Avaliando-se a Tabela 6, conclui-se:

- para todas as herdabilidades consideradas e variados números de fêmeas, a seleção de 4 machos maximiza o ganho genético;
- para todas as herdabilidades consideradas, a seleção de 3 fêmeas maximiza o ganho genético, havendo tendência para a utilização de 4 fêmeas para herdabilidades menores que 10% e 2 fêmeas para herdabilidades maiores que 30%;
- assim, a seleção de 3 reprodutoras, com base em testes de suas progênie e a seleção dos 4 melhores machos dentro dos testes de progênie é a estratégia que promove o maior ganho genético possível para o sistema de propagação via sementes;
- o pomar biclonal só promoverá maior ganho genético se o macho for também selecionado com base em testes de sua progênie. No momento, para a utilização do pomar biclonal, sugere-se a prévia avaliação de cruzamentos específicos envolvendo combinações entre as melhores fêmeas e os melhores machos selecionados;
- a utilização de 3 fêmeas e 4 machos é indicada, também, com base em um tamanho efetivo (6,86) de boa magnitude. E isto é muito desejável pois haverá maximização do ganho com manutenção de um razoável nível de diversidade genética, fato que concorrerá para uma maior estabilidade e adaptabilidade do material genético selecionado.

O impacto da seleção de reprodutores é similar ao impacto do uso da inseminação artificial em animais, pois advém da maximização da intensidade de seleção. A diferença principal é que no melhoramento animal enfatiza-se a seleção de machos e no caso da erva-mate enfatiza-se a seleção de fêmeas com base em testes de progênie. Para um uso mais generalizado das reprodutoras recomenda-se a realização de testes de progênie em vários ambientes, de forma que as fêmeas selecionadas possam ser usadas em conjunto com os machos selecionados localmente.

2.3.4. Maximização da acurácia seletiva

A maximização da acurácia depende basicamente de uma experimentação adequada, do tipo de progênie (delineamento de cruzamento) ou material experimental utilizado e do método de seleção empregado.

2.3.4.1. Parâmetros genéticos para produção de massa verde e volume de copa e estratégia para produção de sementes melhoradas

O principal caráter sob seleção em erva-mate é a produção de massa verde o qual pode ser avaliado indiretamente pelo volume de copa, em função da alta (acima de 0,90) correlação genética entre estes dois caracteres. Na Tabela 7 são apresentados alguns parâmetros genéticos para estes caracteres.

Tabela 7. Estimativas* dos parâmetros genéticos herdabilidade no sentido restrito (h^2), repetibilidade (r), correlação genética (r_g), correlação entre valores genéticos (r_{VG}), correlação de postos (r_p) e correlação fenotípica (r_F) envolvendo os caracteres produção de massa verde e volume de copa em erva-mate.

Caráter	h^2	r^*	r_g	r_{VG}	r_r	r_F
Massa Verde (M)	0,19	0,30**	-	-	-	-
Volume da Copa (V)	0,07	0,44+	-	-	-	-
M x V	-	-	1,00	0,98	0,90	0,95

* STURION & RESENDE (1997);

** RESENDE et al. (1995);

+ Calculado empregando-se os dados de STURION et al. (1997) e o método aproximado de regressão (BRIQUET, 1971, p.54).

Os parâmetros apresentados, embora em pequeno número, permitem algumas inferências:

- a repetibilidade de massa verde da ordem de 30 a 50%, indica que a eficiência da seleção pode ser aumentada empregando-se mais de uma medição (safra) por indivíduo;
- o volume de copa, pode ser utilizado vantajosamente visando seleção para massa verde, pois as altas correlações verificadas conduzem a altos (r_{VG} alto) diferenciais de seleção indiretos para massa verde, não importando a herdabilidade mais baixa do volume de copa;
- uma estratégia ideal de avaliação e produção de sementes melhoradas pode ser indicada:

ANO 1:

- avaliação do volume de copa na 1^a. safra e seleção de indivíduos que formarão o grupo 1;
- poda dos indivíduos não selecionados (grupo 2) avaliando-se a produção de massa verde e estabelecimento de um pomar de sementes por mudas com os indivíduos do grupo 1.

ANO 2:

- avaliação do volume de copa na 2^a. safra nos indivíduos do grupo 2 e seleção de indivíduos com base no volume médio das 2 safras e na produção de massa verde da 1^a. safra, através de um índice. Os indivíduos selecionados constituirão o grupo 3 e os não selecionados constituirão o grupo 4;
- poda dos indivíduos do grupo 4 avaliando-se a produção de massa verde da 2^a. safra.

ANO 3:

- avaliação do volume de copa na 3^a. safra nos indivíduos do grupo 4 e seleção de indivíduos com base no volume médio de 3 safras e na produção média de massa verde de 2 safras, através de um índice. Os indivíduos selecionados constituirão o grupo 5 e os não selecionados constituirão o grupo 6;
- poda dos indivíduos do grupo 1 e do grupo 6, avaliando-se a produção de massa verde;
- estabelecimento do pomar de sementes por mudas com os indivíduos do grupo 3.

ANO 4:

- avaliação do volume de copa na 2^a. safra para os indivíduos do grupo 1 e na 4^a. safra para os indivíduos do grupo 6 e cálculo de valores genéticos no grupo 1 considerando o volume médio de duas safras e a produção de massa verde da 1^a. safra;
- comparação dos valores genéticos dos indivíduos dos grupos 1 (volume médio de duas safras e massa verde de uma safra); 3 (volume médio de duas safras e massa verde de uma safra); 5 (volume médio de 3 safras e produção média de massa verde de 2 safras); 6 (volume médio de 4 safras e produção média de 3 safras);
- seleção com base na comparação dos valores genéticos e considerando os parâmetros repetibilidade para massa verde e volume de copa e correlação entre estes dois caracteres.
- estabelecimento do pomar de sementes definitivo.

Verifica-se que o pomar de sementes é “rotativo” nos primeiros anos sendo constituído por indivíduos do grupo 1 nos dois primeiros anos e do grupo 3 nos dois anos subseqüentes. No quinto ano o pomar já é definitivo.

A estratégia apresentada baseia-se na suposição de um efeito não significativo de competição a nível de copa, o que é razoável se as plantas já estiverem rebaixadas antes da 1^a. avaliação. Paralelamente ao esquema de pomar de sementes por mudas, indivíduos superiores poderão ser estabelecidos em pomares clonais ou testes clonais, em quaisquer dos anos de avaliação. O esquema apresentado possibilita, simultaneamente, a seleção precoce e o estabelecimento de pomares por mudas e clonais, sem que haja comprometimento da acurácia seletiva.

2.3.4.2. Delineamentos de cruzamento

Os delineamentos de cruzamento referem-se aos tipos de progênies a serem avaliadas na população experimental e portanto relacionam-se com a eficiência seletiva. Os principais objetivos dos testes de progênies são: avaliação genética de parentais e geração da população base para nova seleção.

Para avaliação da capacidade geral de combinação dos parentais, um número de 4 a 5 cruzamentos com outros parentais tem sido relatado como adequado. Por outro lado, os seguintes requisitos devem ser observados na geração de uma população base adequada: (i) grande número de indivíduos e razoável número de cruzamentos para propiciar uma alta intensidade de seleção; (ii) possibilidade de gerenciamento do parentesco entre indivíduos através de informações de genealogia, geradas por cruzamentos controlados; (iii) tamanho efetivo alto; (iv) garantia de que cada parental não tenha sido cruzado apenas com parentais bons ou ruins. Este último requisito é importante, sobretudo, para evitar que os melhores parentais sejam cruzados apenas com parentais ruins, pois, cruzamentos deste tipo conduziriam à não seleção das progênies geradas por estes parentais melhores. Neste sentido, alguma forma de seleção de cruzamentos, ou a utilização de policruzamentos (polinização aberta) são desejáveis.

A nível de eficiência e facilidade operacional, os delineamentos de cruzamento mais recomendados são o dialélico parcial, o fatorial desconexo e o meio dialélico desconexo. Por outro lado, mesmo delineamentos mais simples como os de polinização aberta e pares simples (progênies de irmãos

germanos), podem ser muito eficientes se associados a métodos elaborados de seleção (RESENDE, 1997a). Abordagens mais completas referentes à métodos elaborados de seleção são encontrados em RESENDE et al. (1994) e RESENDE (1997b e c).

No caso da erva-mate, a realização de cruzamentos controlados é especialmente importante em função da diócia, ou seja da necessidade de se selecionar machos e fêmeas com base em testes de progênes e de se avaliar machos e fêmeas em cruzamentos específicos visando o estabelecimento de pomares biclonais. Neste sentido, o uso de progênes de irmãos germanos é muito útil, embora seja restritivo por não permitir avaliação adequada de parentais. Para avaliação de parentais, os delineamentos mencionados acima (dialélico parcial, fatorial desconexo e dialélico desconexo) são também adequados. O delineamento de polinização aberta só é adequado para avaliação de parentais femininos.

2.3.4.3. Comparação entre delineamentos de cruzamento, métodos de seleção e sistemas de propagação

Utilizando-se de parâmetros genéticos para o caráter produção de massa verde, pode-se comparar diversas combinações entre delineamentos de cruzamentos e métodos de seleção, em termos de potencial genético e eficiência. Com este objetivo foram utilizadas as seguintes estimativas de parâmetros genéticos obtidas de STURION & RESENDE (1997).

$$h^2 = 0,20 \quad - \text{herdabilidade no sentido restrito}$$

$$\sigma_A^2 = 3,0698 \quad - \text{variância genética aditiva}$$

$\sigma_{ep}^2 = 1,6371$ - variância ambiental permanente, assumida como sendo equivalente à variância de ambiente comum ou variância ambiental entre parcelas

$$\sigma_F^2 = 15,89 \quad - \text{variância fenotípica a nível de indivíduo}$$

Adicionalmente a estes parâmetros supôs-se duas situações: ausência de dominância ($\sigma_D^2 = 0$) e dominância completa (assumindo uma população com nível intermediário de melhoramento) ou seja $\sigma_D^2 = 0,5 \sigma_A^2$, onde σ_D^2 é a variância genética de dominância. Assim, foram utilizados na simulação, dois grupos de parâmetros: 0,20, 0,20 e 0,30; 0,20, 0,30 e 0,40, para herdabilidade no sentido restrito, no sentido amplo e repetibilidade, respectivamente. Os valores de repetibilidade utilizados são coerentes com aqueles apresentados no item 2.3.4.1.

Foram comparados 16 métodos de seleção conforme a Tabela 8. Estes métodos são:

(a) Propagação sexuada do material selecionado

(a.1.) Avaliação de uma safra

- (1) seleção de indivíduos em testes de progênes de meios irmãos, baseada em índice, usando informações do indivíduo e de sua família;
- (2) seleção de parentais com base em teste de suas progênes de meios irmãos;
- (3) Seleção de indivíduos com base em seus valores fenotípicos;
- (4) seleção de indivíduos em testes de progênes de irmãos germanos baseada em índice, usando informações do indivíduo e de sua família.

(a.2.) Avaliação de mais de uma safra

- (5) idem (1);
- (6) idem (2);
- (7) idem (3);
- (8) idem (4).

(b) Propagação assexuada do material selecionado

(b.1.) Avaliação de uma safra

- (9) idem (1);
- (10) seleção de clones a partir de testes clonais;
- (11) idem (3);
- (12) idem (4)

(b.2.) Avaliação de mais de uma safra

- (13) idem (1);
- (14) idem (10)
- (15) idem (3)
- (16) idem (4)

Tabela 8. Acurácias máximas possíveis associadas a vários métodos de seleção em erva-mate e número de indivíduos por acesso e medições por indivíduo, visando a obtenção de 95% da acurácia máxima possível.

Métodos	Acurácia	Número de indivíduos		Número de medições		
	máxima	por acesso		por indivíduo		
	SD	CD	SD	CD	SD	CD
1	0,61	0,61	80	80	1,0	1,0
2	1,00	1,00	176	176	1,0	1,0
3	0,45	0,45	-	-	1,0	1,0
4	0,75	0,68	-	43	1,0	1,0
5	0,84	0,76	80	80	18,0	11,0
6	1,00	1,00	110	120	2,0	2,0
7	0,82	0,71	-	-	24,0	15,0
8	0,87	0,76		43	-	6,0
9	0,61	0,69	80	54	1,0	1,0
10	1,00	1,00	37	21	1,0	1,0
11	0,45	0,55	-	-	1,0	1,0
12	0,75	0,76	-	33	1,0	1,0
13	0,84	0,91	80	54	18,0	9,0
14	1,00	1,00	21	12	2,0	2,0
15	0,82	0,87	-	-	24,0	15,0
16	0,87	0,91	65	33	-	-

Verifica-se que, de maneira geral, é vantajosa a realização de mais de uma medição por indivíduo. Este fato decorre do fato de que a repetibilidade a nível de indivíduo é de baixa magnitude e que no caso de métodos com apenas uma medição, assume-se a repetibilidade como 1, para efeito de cômputo da acurácia máxima possível (ver fórmulas em RESENDE et al., 1996). Constata-se também que para uma mesma herdabilidade no sentido restrito, a seleção com progênies de irmãos germanos é mais favorável se não houver dominância do que se houver dominância, para o sistema de propagação sexuada. Por outro lado, para uma mesma herdabilidade no sentido restrito, a presença de dominância sempre conduz a maiores acurácias do que a ausência, para o sistema de propagação assexuada. Em ausência de dominância, a propagação sexuada e assexuada conduzem à mesma

acurácia e, portanto, não se justifica a utilização de clones (este fato demonstra a importância de se estimar os dois parâmetros (h_r^2 e h_a^2) associados ao controle genético dos caracteres).

Considerando a avaliação de várias safras, outras conclusões podem ser enunciadas com base na Tabela 8:

- com dominância, a avaliação de progênies de irmãos germanos não conduz a ganhos superiores a avaliação de progênies de meios irmãos, pois a realização de um maior número de avaliações neste último caso, permite atingir a mesma acurácia máxima;
- em ausência de dominância, a avaliação de progênies de irmãos germanos conduz a ganhos superiores (pequena margem) a avaliação de progênies de meios irmãos e esta última conduz a ganhos similares aqueles obtidos com seleção individual;
- o melhor método de seleção de indivíduos está associado a avaliação de progênies de irmãos germanos em ausência de dominância. Com dominância, o melhor método é a seleção e clonagem de indivíduos em testes de progênies de meios irmãos (ou de irmãos germanos).
- embora a avaliação de várias safras contribua para aumentar a acurácia máxima possível, com repetibilidade baixa, o número de safras necessário para atingir 95% da acurácia máxima é muito alto e dificilmente será atendido na prática.

Os métodos “seleção em testes clonais” e “seleção de parentais”, embora mais acurados, não são prontamente comparáveis aos demais métodos, pois permitem menor intensidade de seleção. Em geral, a seleção a partir de testes clonais é utilizada para uma nova seleção, desta feita com maior precisão sobre materiais já selecionados previamente pelos demais métodos.

Pode-se dizer que praticamente não se compensa a utilização de progênies de irmãos germanos. Caso se decida pelo uso de cruzamentos controlados, o ideal seria a utilização de cruzamentos do tipo dialélico, pois estes permitem a avaliação de parentais masculinos e conseqüentemente permitiria a plena utilização da seleção de parentais. Isto permitiria a utilização vantajosa do pomar biclonal (ganho = 1,68) sobre o pomar heptaclonal (ganho = 1,64), embora com pequena margem. Em resumo, as vantagens da utilização de polinização controlada em erva-mate são muito pequenas no atual estágio. Provavelmente este tipo de polinização seja mais indicado para gerações avançadas de melhoramento, sobretudo para melhor gerenciamento

do parentesco entre os indivíduos. No atual estágio, maiores esforços devem ser dispendidos na avaliação de várias safras em cada indivíduo do que no uso de elaborados e onerosos delineamentos de cruzamento.

2.4. Estrutura de populações

Estrutura de populações refere-se à subdivisão da população de melhoramento como forma de atender aos seus objetivos de propiciar ganhos genéticos a curto, médio e longo prazos.

A principal estrutura de população proposta em literatura é denominada “núcleos de melhoramento ou cruzamento” e foi delineada inicialmente para o melhoramento de carneiros (JAMES, 1977). Esta estrutura baseia-se na divisão da população de melhoramento em duas subpopulações: (i) núcleo de cruzamentos ou população elite; (ii) população principal. O núcleo constitui-se dos indivíduos com os maiores valores genéticos enquanto a população principal contém o restante dos indivíduos. Os dois segmentos são selecionados para o mesmo caráter objetivo e não existe restrição quanto à alocação de indivíduos parentes para qualquer um dos segmentos. Maiores esforços em cruzamento e teste são dispendidos para a subpopulação do núcleo, podendo inclusive serem adotados diferentes delineamentos de cruzamento para o núcleo e para a subpopulação principal. Dessa forma, este tipo de estrutura enfatiza o maior uso dos indivíduos com os maiores valores genéticos.

2.4.1. Núcleo fechado de melhoramento

Neste tipo de estrutura, a cada geração alguns indivíduos do núcleo são transferidos à subpopulação principal visando aumentar a taxa de melhoramento da mesma (Figura 1).

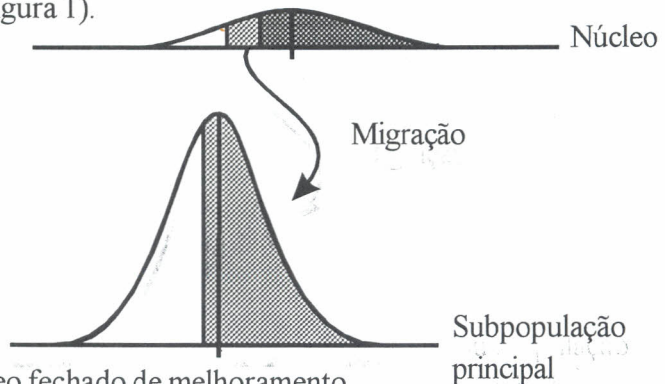


Figura 1. Núcleo fechado de melhoramento.

Verifica-se que a subpopulação principal apresenta alguns indivíduos com maiores valores genéticos do que os piores indivíduos do núcleo.

2.4.2. Núcleo aberto de melhoramento

Neste tipo de estrutura, indivíduos da subpopulação principal também são transferidos ao núcleo, visando injetar variabilidade genética e amenizar a endogamia (Figura 2).

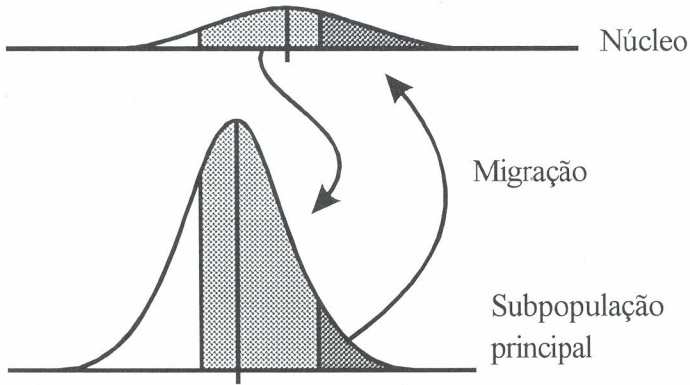


Figura 2. Núcleo aberto de melhoramento.

Adicionalmente, este sistema conduz a maior ganho genético no núcleo e conseqüentemente na população como um todo. O ganho extra em relação ao núcleo fechado é da ordem de 10% a 15% (KINGHORN, 1992).

Entretanto, a longo prazo, os dois (aberto e fechado) tipos de estrutura podem conduzir a um parentesco elevado entre as duas subpopulações, sendo que no esquema aberto o parentesco cresce mais rapidamente. Neste sentido, um esquema preconizando apenas a transferência de indivíduos da subpopulação principal para o núcleo seria mais desejável, penalizando entretanto, o progresso genético na subpopulação principal.

2.4.3. Uma estrutura para o melhoramento da erva-mate

Para o melhoramento da erva-mate a seguinte estrutura pode ser proposta:

- população de produção e núcleo elite em uma só unidade física: pomar de sementes clonal com os 20 ou 25 melhores indivíduos e pomar heptaclonal;

- subpopulação principal constituída pelos indivíduos do pomar de sementes por mudas (menor intensidade de seleção que o pomar clonal);
- população de conservação genética obtida a cada geração pela seleção do melhor indivíduo dentro de cada progênie (pomar de sementes por mudas).

Esta estrutura pode ser ilustrada conforme a Figura 3.

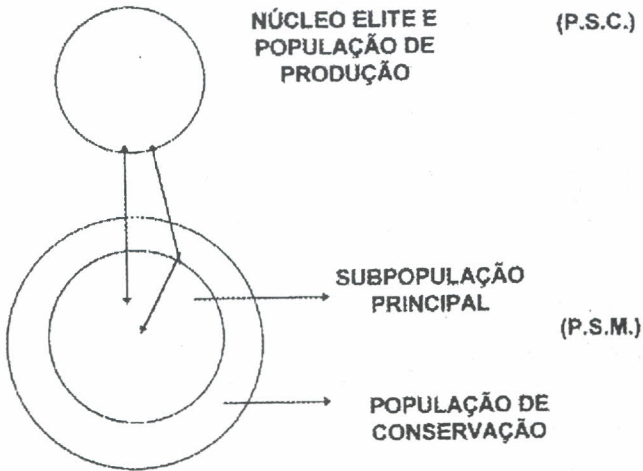


Figura 3. Estrutura de população de melhoramento proposta para erva-mate.

Neste tipo de estrutura torna-se necessária a instalação de dois experimentos em cada geração, um deles correspondendo à avaliação de progênies de polinização controlada obtidas da população de produção e núcleo elite e progênies de polinização aberta obtidas da subpopulação principal e o outro correspondendo à avaliação de progênies de polinização aberta obtidas da população de conservação.

Verifica-se pela Figura 3, que em cada geração indivíduos do núcleo serão incorporados à subpopulação principal e vice versa. Por outro lado, a população de conservação fornecerá indivíduos à subpopulação principal e ao núcleo, mas não receberá indivíduos de qualquer delas, fato que permitirá a manutenção da população de conservação totalmente não aparentada e sob melhoramento. Este procedimento permite maximizar o ganho genético nas populações de produção (ganho imediato) ao mesmo tempo que conduz

a amplas possibilidades de obtenção do teto seletivo das populações de melhoramento (ganho a longo prazo).

2.5. Potencialidades do melhoramento genético da erva-mate

O potencial do melhoramento genético como fator preponderante ao aumento da produtividade da erva-mate pode ser demonstrado como base na Tabela 9.

Tabela 9. Ganhos genéticos preditos a partir da seleção em testes de progênies de erva-mate, na Região de Colombo-PR.

Métodos de seleção	Ganho genético padronizado	Ganho genético (kg/ano)	Ganho genético (%)	Média original (kg/ha)	Nova média (kg/ha)	Eficiência em relação à seleção de indivíduos
Seleção de indivíduos (pomar clonal)	1,4798	2,593	58,79%	7.350	11.670	-
Seleção de reprodutoras (pomar heptaclonal)	1,664	2,880	65,32%	7.350	12.150	11%

Verifica-se que em apenas uma geração de seleção, a produtividade da população poderá ser aumentada de 7.350 kg/ha para 12.150 kg/ha, ou seja, um aumento de 65,32%. Vale ressaltar que ganhos contínuos poderão ser obtidos com o melhoramento gradativo da população, a médio e longo prazos. O potencial da utilização de clones necessita ser melhor elucidado através de estudos básicos sobre controle genético do caráter massa verde, principalmente quanto ao parâmetro grau médio de dominância. Trabalhos empíricos de campo, a nível de comparação de produtividade de plantios clonais e por sementes também são essenciais.

3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se como número ótimo valores entre 15 a 25 indivíduos a serem incluídos em um pomar de sementes.
- Recomenda-se a utilização da proporção de sexo 1:1 mesmo com proporção diferente desta (mas com fêmeas repetidas muito mais vezes do que os machos) nos pomares de sementes, pois este procedimento conduz à maiores ganhos genéticos.

- Na modalidade seleção de parentais, 1 a 3 fêmeas podem ser selecionadas e utilizadas com segurança.
- Para a propagação via sementes, a estratégia que promove maior ganho genético é o estabelecimento de um pomar heptaclonal, composto por três reprodutoras selecionados com base em teste de suas progênes e 4 machos selecionados dentro do teste de progênes.
- De maneira geral, é sempre vantajosa a avaliação de mais de uma safra por indivíduo.
- A utilização de progênes de irmãos germanos praticamente não é vantajosa em relação à utilização de progênes de meios irmãos.
- No estágio atual, praticamente não existem vantagens na utilização de cruzamentos controlados em erva-mate.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELINGHERI, L.D.; PRAT KRICUN, S.D. Evaluacion preliminar de clones y progenies policlonales de yerba mate. In: WINGE, H.; FERREIRA, A.G.; MARIATH, J.E. de A.; TARASCONI, L.C. Org. Erva-mate: biologia e cultura no cone sul. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995. p.151-156.
- BRIQUET JUNIOR, R. O conceito de repetibilidade. Zootecnia, São Paulo, v.9, n.2, p.51-66, 1971.
- CORREA, G. Controle genético do enraizamento de estacas em erva-mate. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1995. 54p. Tese Mestrado.
- CROCE, D.M.; HIGA, A.R.; FLOSS, P.A. Escolha de fontes de sementes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill) para Santa Catarina. Florianópolis: EPAGRI, 1994. 23p. (EPAGRI, Boletim Técnico, 69).
- FLOSS, P.A. Variações genéticas entre populações naturais de *Ilex paraguariensis* St. Hill (erva-mate) avaliadas em Chapecó-SC e Três Barras-SC. Piracicaba: ESALQ, 1994.
- KINGHORN, B. Principles of genetic progress. In: HAMOND, K.; GRASER, H.N.; McDONALD, C.A. Animal Breeding: The Modern Approach. Post Graduate Foundation. Sydney, 1992, p.193-203.
- JAMES, J.W. Open nucleus breeding system. Animal Production, v.24, p.287-305, 1977.
- RESENDE, M.D.V. de. Melhoramento de essências florestais. In: BOREM, A. Melhoramento de Plantas: Culturas Agronômicas. Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1977a.
- RESENDE, M.D.V. de. Melhoramento genético de essências florestais. In: SANTOS, J.B. Simpósio sobre Atualização em Genética e Melhora-

- mento de Plantas. Universidade Federal de Lavras, 1997b, p. 59-93.
- RESENDE, M.D.V. de. Avanços da genética biométrica florestal. In: VENCOVSKY, R.; MIRANDA FILHO, J.B. Genética Biométrica Vegetal. Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, 1997c.
- RESENDE, M.D.V. de; MORAES, M.L.T.; PAIVA, J.R. Comparação de métodos de avaliação genética e seleção no melhoramento da seringueira [*Hevea brasiliensis* (Wild)]. Floresta. 1996.
- RESENDE, M.D.V. de; STURION, J.A. PRATES, D.F.; MENDES, S. Tamanho de parcela e estimação de parâmetros genéticos em erva-mate sem o uso de testes de progênies e clonais. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, v.32/33, 1996.
- RESENDE, M.D.V de; STURION, J.A.; MENDES, S. Genética e Melhoramento da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill). EMBRAPA-CNPQ. Colombo. 33p. (Documentos n.25).
- RESENDE, M.D.V de; OLIVEIRA, E.B. de; MELINSKI, L.C.; GOU-LART, F.S.; Oaida, g.r. selegen - Seleção Genética Computadorizada - Best Prediction: Manual do Usuário. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1994. 31p.
- RESENDE, M.D.V de; STURION, J.A.; CARPANEZZI, A.A.; MENDES, S. Genética e melhoramento da erva-mate para produção de massa-verde na região de Curitiba. Colombo: EMBRAPA-CNPQ. 1993. 10p. (EMBRAPA-CNPQ. Subprojeto 08.0.94.501.02).
- RESENDE, M.D.V de; SILVA, H.D. Estratégia de melhoramento para erva-mate baseada no coeficiente de repetibilidade. In: CONGRESSO FLORESTAL E DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ, 3. 1991. Anais. p.241-251.
- STURION, J.A.; RESENDE, M.D.V. de; MENDES, S. Proporção de sexo e produtividade de massa foliar em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill). Boletim de Pesquisa Florestal. Colombo, v.30/31, p.19-27, 1995.
- STURION, J.A.; RESENDE, M.D.V. de. Relatório de Pesquisa do Subprojeto 08.0.94.501.02. Colombo, 1997 (não publicado).
- WINGE, H.; WOLLHEIN, C.; CAVALLI-MOLINA, S.; ASSMANN, E.M.; BASSANI, K.L.L.; AMARAL, M.B.; COELHO, G.C.; FREITAS-SACCHET, A.M. de O.; BUTZKE, A.M.; MARIATH, J.E. de A. Variabilidade genética em populações nativas de erva-mate e a implantação de bancos de germoplasma. In: WINGE, H.; FERREIRA, A.G.; MARIATH, J.E. de A.; TARASCONI, L.C., Org. Erva-mate: biologia e cultura no cone sul. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995. p.322-345.