

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE EXPERIMENTOS DE AGROSSILVICULTURA

Edilson Batista de Oliveira*
Henrique Geraldo Schreiner*

RESUMO

São apresentados métodos de análise estatística de experimentos de Agrossilvicultura, isto é, associação entre plantios ou povoamentos florestais com espécies anuais ou perenes. Aspectos de competição entre culturas agrícolas e árvores são considerados, como também os tipos de sistemas agroflorestais e possibilidades de sua aplicação no Brasil. Os métodos foram ilustrados com exemplos numéricos e suas vantagens e desvantagens discutidas.

PALAVRAS-CHAVE: Consórcio de culturas, sistemas silviagrícolas, sistemas silvipastoris, Análise Bivariada, competição entre plantas.

CARACTERIZATION AND STATISTICAL ANALYSIS OF AGROFORESTRY EXPERIMENTS

ABSTRACT

Statistical methods are presented for applications in experiments in agroforestry, i.e., associations of forest tree stands with annual or perennial crop species. Aspects related to competition between agricultural crops and forest tree production are considered, as well as other types of agroforestry systems and possibilities of their applications in Brazil. The statistical methods are illustrated with numerical examples with a discussion on its advantages and disadvantages.

KEY-WORDS: Intercropping, silvo-agricultural systems, silvo-pastoro systems, bivariate analysis, interplants competition.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema agroflorestal, ou agrossilvicultural, pode ser definido como a associação de plantios ou povoamentos florestais com culturas agrícolas anuais ou perenes, pastagens, plantas para cobertura e melhoramento do solo, e mesmo, espécies arbóreas ou arbustivas com produtos afins aos das culturas agrícolas. Este sistema de cultivo tem sido praticado desde há muitos séculos. Não obstante,

* Eng.-Agrônomo, M.Sc., CREA nº 1211/D, Pesquisador da EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Florestas.

** Eng. – Agrônomo, M.Sc., CREA nº 5423, Pesquisador da Embrapa – Centro Nacional de Pesquisa de Florestas.

somente nos últimos anos tem merecido atenção especial, graças aos benefícios que pode oferecer quanto ao uso dos solos, inclusive, sob o aspecto ecológico.

A racionalização do trabalho nas zonas de ecologia mais frágil, o aproveitamento das terras marginais ou depreciadas por manejo inadequado e a otimização do uso do solo, em geral, passaram a merecer atenção prioritária das instituições responsáveis, em todo o mundo, pelo desenvolvimento ordenado da agricultura. Neste propósito, sobressaem as possibilidades da agrossilvicultura. Daí, o interesse, hoje, em torno de sua aplicação, tanto nas regiões quente-úmidas e áridas como, inclusive, nas regiões desenvolvidas de clima temperado.

A complexidade destes sistemas, aliada ao fato de a quase totalidade das técnicas experimentais disponíveis ter sido desenvolvida para monoculturas, tem dificultado sua análise e interpretação. Este trabalho apresenta alguns conceitos e métodos de análise estatística de experimentos de agrossilvicultura, cuja maioria é baseada em pesquisas recentes de experimentos de consorciação de espécies agrícolas.

2. SISTEMAS AGROFLORESTAIS: TIPOS E APLICAÇÃO NO BRASIL

2.1. Tipos.

Os principais sistemas agroflorestais, desde os mais antigos e simples até os mais novos e mais elaborados, são:

2.1.1. Sistemas "taungya".

Podem ser considerados como um degrau no processo de transformação da agricultura migratória em sistema agroflorestal. Ainda dominante nos trópicos úmidos, a agricultura migratória consiste na derrubada de um pequeno trecho das florestas, o qual é ocupado por dois ou três anos com culturas agrícolas; em seguida, o campo é abandonado, permitindo rápida regeneração da floresta. Um novo trecho desta é, então, derrubado e utilizado, da mesma forma, pelo agricultor, e assim por diante, até que se chegue de novo ao primeiro trecho.

Nos sistemas "taungya", a derrubada da floresta é feita como na agricultura migratória. Todavia, na ocasião do plantio das culturas agrícolas, é feito também o das espécies arbóreas mais valiosas para a região, promovendo-se, assim, o enriquecimento das capoeiras (NAIR 1984).

2.1.2. Sistemas multiestratos.

Podem ser considerados como variantes dos "taungya". Especial importância é dada ao enriquecimento das capoeiras que se formam após a derrubada para o plantio das culturas agrícolas. Diferenciam-se estratos na vegetação, de acordo com as espécies reintroduzidas e com a utilização. Os mais altos ficam ocupados com árvores produtoras de madeira, como o mogno (*Swietenia macrophylla*), na Amazônia. Em estratos intermediários, ficam distribuídas as espécies arbóreas de menor crescimento e de produção diversificada, como café, guaraná e banana. O estrato junto ao solo é predominantemente ocupado com culturas agrícolas e pastagens.

2.1.3. "Alley cropping".

Este sistema, cujo nome poderia ser traduzido para "cultivo em alamedas", tem sido indicado para as regiões tropicais pouco desenvolvidas (úmidas ou não) pelo International Institute of Tropical Agriculture, sediado em Ibadan, Nigéria. É um sistema no qual as culturas agrícolas, fornecedoras de alimentos, são desenvolvidas em alamedas limitadas por sebes de árvores ou arbustos, principalmente a leucena ou outras leguminosas. Estas sebes são cortadas no plantio das culturas e conservam-se durante o desenvolvimento destas, a fim de evitar competição e sombreamento para as mesmas. Depois da sua colheita, permite-se que as árvores das sebes cresçam livremente, até que cubram o solo. Elas proporcionam vários benefícios como: a) adubo verde para as culturas agrícolas; b) cobertura morta, que sombreia o solo, evitando a entrada de invasoras; c) alimentação de animais, fabricação de estacas e uso como lenha; e d) como leguminosas, fornecem nitrogênio para a cultura acompanhante (KANG et al. 1984).

2.1.4. Cultivos florestais para a produção de alimentos.

Principalmente nas regiões tropicais, é comum o emprego de monoculturas de espécies florestais, produtoras de outros bens que não a madeira, como óleos vegetais, borracha, coco, cacau, café e chá, bem como diversos frutos (estes também nas regiões temperadas). O volume de copa destas espécies, considerando-se os espaçamentos de plantio, permite boa entrada de luz e área suficiente para a intercalação de culturas ou pastagens, especialmente de leguminosas, que poderiam beneficiar a cultura principal (NAIR 1985).

2.1.5. Plantios de florestas.

Nos últimos anos, a atividade florestal firmou-se, nos trópicos, como alternativa compensadora de uso da terra. A tecnologia desenvolvida para o uso de madeiras tropicais na indústria de pasta mecânica e papel, bem como a demanda para a cobertura de crescentes necessidades energéticas, conduziram à instalação de grandes projetos e à rápida mudança na tendência de exploração das florestas naturais para as implantadas. Na implantação dessas florestas, há boa receptividade para o uso de sistemas agroflorestais; primeiro, porque, nos trópicos, a agricultura foi, durante muito tempo, a atividade praticamente exclusiva; e segundo, porque sistemas do tipo "taungya" já serviam, em muitos locais, como forma de se implantarem povoamentos florestais (NAIR 1985).

2.1.6. Sistemas silvipastoris.

Nas práticas agroflorestais até agora descritas, foram referidas, quase exclusivamente, associações de espécies florestais com culturas agrícolas e árvores menores, produtoras de alimentos e outros bens. Entretanto, plantios ou povoamentos florestais podem também associar-se com pastagens, formando sistemas chamados de silvipastoris. Estes são de grande interesse para as zonas subúmidas e mesmo para as semi-áridas, podendo ser citados, entre seus benefícios: a) produção de carne e leite sem o compromissamento de novas áreas especialmente para este fim; b) baixo custo de produção, com ganho adicional para o

fazendeiro; c) a vegetação do sub-bosque mantém-se baixa, reduzindo os riscos de incêndio e os encargos com sua produção.

2.1.7. Introdução de árvores em lavouras e pastagens.

Nos sistemas até agora apresentados, a árvore é o componente mais importante porque, além de propiciar benefícios de ordem ecológica, constitui, por fim, a principal fonte de renda para o proprietário, até o final da rotação. Entretanto, o agricultor e o pecuarista típicos podem obter vantagens também com o plantio de árvores em suas terras. É o que se verifica na formação de faixas para o sombreamento de algumas culturas, faixas contra a erosão, quebra-ventos, cercas vivas, abrigos para o gado etc. Neste caso, invertem-se as prioridades: lavoura e pecuária são as atividades principais, enquanto que as árvores contribuem no sentido de oferecer-lhes ambiente mais favorável, funcionando também como fontes secundárias de receita, graças à madeira que, periodicamente, deve ser cortada.

2.2. Alternativas agroflorestais para quatro grandes regiões brasileiras:

AMAZÔNIA. Como alternativas para a agricultura migratória ou para grandes projetos predatórios: sistemas "taungya"; sistemas multiestratos; "alley cropping".

NORDESTE SEMI-ÁRIDO. Procedimentos que permitam a economicidade ideal na utilização da água: sistemas silvipastoris ou agrossilvipastoris; "alley cropping".

CERRADOS. Alternativas para grandes projetos predatórios, também contemplando economicidade na utilização da água: sistemas silvipastoris ou agrossilvipastoris com árvores nativas ou adaptadas à região; "alley cropping" (pequenas propriedades).

SUDESTE E SUL. Para otimização do uso do solo, tendo em vista o seu alto grau de ocupação já alcançado: sistemas silviagrícolas, silvipastoris ou combinados, no plantio de florestas; projetos de introdução de árvores em lavouras e pastagens.

3. COMPETIÇÃO ENTRE A CULTURA AGRÍCOLA E A ÁRVORE

No sistema agrossilvicultural, os recursos comuns como água, luz e nutrientes podem ser insuficientes para as espécies envolvidas. Isto leva à competição entre elas. Esta competição pode-se manifestar de várias maneiras, e a produção de uma espécie pode tanto aumentar como diminuir em relação ao seu monocultivo.

Segundo MATHER (1961), a competição entre organismos ocorre quando eles habitam um ambiente comum e a soma de suas necessidades excede aos suprimentos disponíveis. Assim, um organismo passa a fazer parte efetiva do ambiente do outro. A competição pode beneficiar ou prejudicar estes organismos de forma individual ou mútua.

A importância do conhecimento dos mecanismos de competição deve-se ao fato de eles estarem ligados diretamente à melhor maneira de se obter uma combinação ótima entre as espécies envolvidas na associação. Os tipos de competição que podem ocorrer entre duas espécies podem ser classificados por diversos critérios, como os apresentados por MCGILCHRIST (1965), WILLEY & OSIRU (1972) e HUXLEY & MAINGU (1978).

As denominações mais comumente adotadas para os tipos de competição são as propostas por HILL & SHIMAMOTO (1973) e WILLEY (1979), e podem ser descritas pelos gráficos da Figura 1. As linhas pontilhadas representam a produção esperada na ausência de competição entre as espécies envolvidas, ou seja, no cultivo associado; a produtividade das espécies seria a mesma que a obtida no cultivo isolado, utilizando-se a mesma área.

Na Figura 1.a, demonstra-se inibição mútua, ou seja, as duas espécies tem suas produtividades diminuídas quando associadas.

Na Figura 1.b, tem-se cooperação mútua, onde cada espécie tem a produtividade superior à que seria esperada no cultivo isolado.

Na Figura 1.c, podem-se ter dois casos. Quando uma das espécies tem sua produtividade aumentada e a outra reduzida nas mesmas proporções, tem-se compensação. Se as perdas e ganhos forem de forma não contrabalançada, ocorre complementação que pode ser parcial, completa ou sobrecomplementação, quando o sistema apresenta produtividade, respectivamente, menor, igual ou maior que seus constituintes em monocultivo.

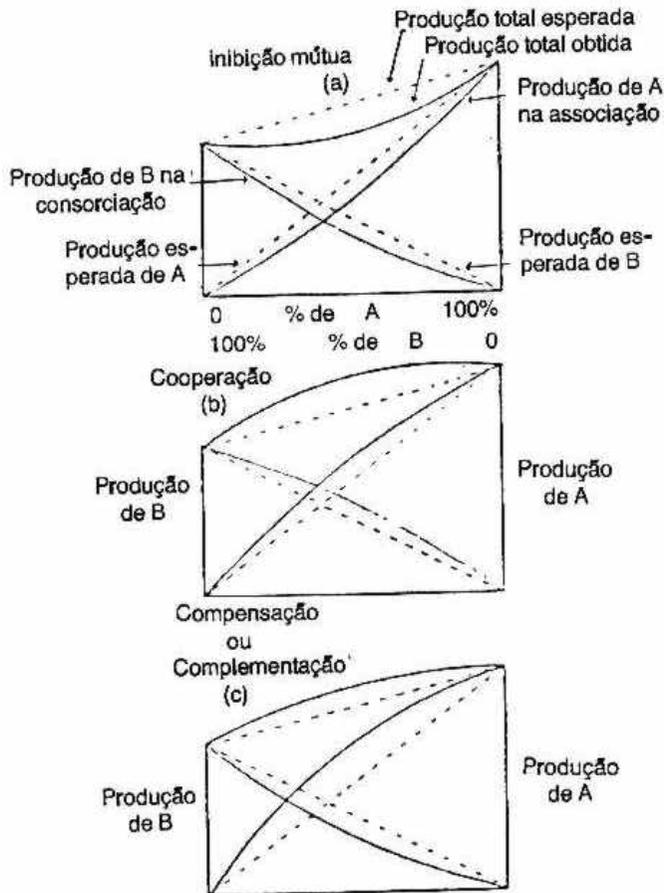


Figura 1. Competição entre espécies associadas.

4. MÉTODOS DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.1. Análise gráfica e contrastes entre médias.

Os métodos de análise gráfica foram iniciados por DE WIT (1960), com os denominados experimentos de série de reposição. Estes são constituídos por tratamentos que incluem o cultivo isolado das duas culturas e suas associações nas proporções de uma e da outra.

Os gráficos e as denominações dos tipos de competição destes experimentos são similares aos da Figura 1.

Quando o produto resultante de cada espécie possui a mesma variável (ex.: peso de folhas de erva-mate e peso de grãos alimentícios), o estudo pode ser realizado com as linhas representantes das culturas isoladas e a linha superior, da produção total.

Para uma classificação estatística do tipo de competição que ocorre em cada associação, podem ser estabelecidos contrastes e aplicados testes estatísticos.

Por exemplo, considerando-se um delineamento inteiramente casualizado onde:

Y_{ij} = média da associação da espécie i com a espécie j

Y_{jj} = média da espécie j em monocultura

Y_{ii} = média da espécie i em monocultura

Teremos:

$$\hat{Y}_1 = Y_{ij} - (P_i \cdot Y_{ii} + P_j \cdot Y_{jj}) \quad \text{e} \quad \hat{V}(\hat{Y}_1) = S_{ij}^2 + P_i^2 \cdot S_{ii}^2 + P_j^2 \cdot S_{jj}^2$$

$$\hat{Y}_2 = Y_{ij} - Y_{jj} \quad \text{e} \quad \hat{V}(\hat{Y}_2) = S_{ij}^2 + S_{jj}^2$$

$$\hat{Y}_3 = Y_{ij} - Y_{ii} \quad \text{e} \quad \hat{V}(\hat{Y}_3) = S_{ij}^2 + S_{ii}^2$$

S_{ij} , S_{ii} e S_{jj} são estimados através dos valores das parcelas que contêm os tratamentos envolvidos.

Aplicando-se testes estatísticos a estes contrastes pode-se calcular o nível de significância para o tipo de competição observado visualmente no gráfico. As situações de compensação ou ausência de competição, por exemplo, são detectadas quando os três contrastes não, são significativos, ou quando Y_1 for não significativo com Y_2 ou Y_3 significativos.

Quando se medem variáveis diferentes (ex: altura da árvore e peso de grãos alimentícios), o estudo pode ser realizado pela observação do comportamento das duas linhas que representam as culturas.

A análise gráfica pode facilitar muito o entendimento das relações competitivas entre as espécies envolvidas.

Os experimentos de agrossilvicultura, geralmente, são conduzidos por mais de um ciclo da cultura agrícola, tornando-se necessário um estudo dos efeitos competitivos ao longo do tempo. Isto pode ser realizado, comparando-se gráficos construídos para cada avaliação.

4.2. Análise através da utilização de índices.

4.2.1. Razão da área equivalente (RAE).

A Razão da Área Equivalente ("Land Equivalent Ratio" - LER) foi apresentada por WILLEY & OSIRU (1972), para avaliação de experimentos de consorciação de milho e feijão, e é definida como a área de terra requerida na monocultura para se obter a mesma produção em um sistema consorciado, sendo obtida pela seguinte expressão:

$$RAE = R_i + R_j = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} + \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}}$$

onde:

Y_{ij} é o rendimento da cultura i em associação com a cultura j.
 Y_{ji} é o rendimento da cultura j, em associação com a cultura i.
 Y_{ii} e Y_{jj} são os rendimentos em monocultura das espécies i e j, respectivamente.

A RAE pode ser tomada como uma medida de vantagem relativa, ou seja, uma RAE de 1,2 indica que seria necessário 20% a mais de área na monocultura para a obtenção da mesma produção na associação. A comparação das RAE's individuais (R_i e R_j) pode indicar as capacidades relativas de competição entre a árvore e a cultura alimentícia.

A RAE, por ser uma razão, pode apresentar valores altos devido a altas produções da associação ou devido a baixas produções do monocultivo, o que torna este índice sem eficiência na comparação de associações de diferentes variedades. Outra desvantagem da RAE é sua limitação em termos de análise estatística. Segundo GONÇALVES (1981), quando as quantidades resultantes da monocultura estão submetidas à variação experimental, a soma dos quocientes que definem as RAE's tem distribuição complexa e as tabelas de análise de variância não têm a mesma representatividade. Obtem-se uma estrutura correlacionada para as observações das parcelas e torna-se duvidoso que as hipóteses de linearidade e normalidade se verifiquem. Assim, a aplicação da análise de variância utilizando RAE's pode levar a erros relacionados à validade das pressuposições de normalidade e homocedasticidade.

4.2.2. Coeficiente de reunião relativa K_i .

O Coeficiente de Reunião Relativa (K_i) foi proposto por DE WIT (1960) e desenvolvido por HALL (1974a, 1974b). Considerando P_i a proporção do componente i em monocultura e $P_j = (1-P_i)$, a proporção do componente j,

$$K_i = \frac{Y_{ij}(1-P_i)}{P_i(Y_{ii}-Y_{jj})}$$

Se $K_i > 1$, a espécie i em associação tem produção maior que a esperada. O componente que apresentar o maior valor de K é o competidor mais forte. Para determinação da vantagem de produção da associação, deve-se obter o produto K dos coeficientes K_i dos componentes. Se $K > 1$, existe vantagem na produção da associação. Se $K < 1$, haverá desvantagem.

4.2.3. Índice de Agressividade (A_{ij}).

Este índice foi proposto por MCGILCHRIST & TREMBATH (1974) e mede quanto o acréscimo relativo de produção do componente i é maior que o do componente j . Ele é definido por:

$$A_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}P_i} - \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}P_j}$$

Se os componentes forem igualmente competitivos, $A_{ij} = 0$.

4.2.4. Razão de competição (CR).

A razão de competição ("Competition Ratio" - CR) foi obtida a partir do "Índice de Agressividade" por WILLEY & RAO (1980):

$$CR = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}P_i} / \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}P_j}$$

Este índice indica o número de vezes em que um componente é mais competitivo que outro.

Todos esses índices foram discutidos e relacionados à RAE por KASS (1978), WILLEY & RAO (1980) e MEAD & RILEY (1981).

Segundo WILLEY (1980), os índices K , A e RAE têm as mesmas vantagens e desvantagens; entretanto, apenas o índice RAE fornece indicação da magnitude de alguma vantagem de produção.

4.3. Análise de variância.

A maior dificuldade dos experimentos de agrossilvicultura, sob o aspecto de análise, é o caráter multivariado das respostas. Em alguns sistemas, podem-se ter

dezenas de variáveis envolvidas. Portanto, algum critério deve ser estabelecido no sentido de se determinar quais tratamentos proporcionam as melhores combinações em função das necessidades do produtor.

Procedendo a análise de variância para cada cultura envolvida no sistema, podem-se obter muitas informações, principalmente quando se tem várias culturas envolvidas, ou quando a produção de uma delas deve ser máxima e a demais só podem ser produzidas à medida que não prejudiquem a cultura principal.

Este método é de grande eficiência na análise estatística da combinação das diferentes produções, considerando a produção equivalente. Esta nova variável pode basear-se, por exemplo, na quantidade total de proteínas, calorias, valor econômico etc. Supondo-se duas culturas A e B, em que o valor econômico de B é três vezes o de A, a produção equivalente de A pode ser calculada pela função:

$$Y = X_1 + 3X_2$$

onde x_1 e x_2 são as produções das culturas A e B, respectivamente.

Com esse processo, não são necessárias as monoculturas no experimento e torna-se possível a obtenção do tratamento mais eficiente, baseado na variável que for considerada de maior importância. Entretanto, estas produções equivalentes são de difícil obtenção nos sistemas agroflorestais.

Normalmente, o método mais eficiente é a análise multivariada da variância, ou seja, a análise da variância aplicada a todas as variáveis, simultaneamente.

Cada método oferece um enfoque diferente e a escolha deles deve ser em função do tipo e objetivos do experimento.

Deve-se procurar utilizar, em conjunto, mais de um método, que pode variar em função das informações requeridas pelo pesquisador.

4.4. Análise bivariada da variância.

A interpretação dos dados de um experimento de agrossilvicultura apresenta dificuldades estatísticas devido à correlação existente entre as produções da árvore e da cultura agrícola. Uma técnica que leva em conta essas correlações é a análise bivariada da variância.

Com esse método de análise, podem ser obtidas muitas informações contidas nos dados originais. Os tratamentos são testados considerando-se a contribuição de cada espécie na produção total do sistema estudado, como também a influência de uma sobre a outra.

O esquema de análise bivariada de variância com as matrizes das somas dos quadrados e somas dos produtos do experimento, em blocos ao acaso, é apresentado a seguir, onde x_1 e x_2 representam os valores da árvore e da cultura associada.

C de Variação	Gl	MATRIZES
Blocos	J - 1	B = $\begin{bmatrix} \text{SQ Blocos}(X_1) & \text{SP Blocos}(X_1, X_2) \\ \text{SP Blocos}(X_1, X_2) & \text{SQ Blocos}(X_2) \end{bmatrix}$
Tratamentos	I - 1	T = $\begin{bmatrix} \text{SQ Trat.}(X_1) & \text{SP Trat.}(X_1, X_2) \\ \text{SP Trat.}(X_1, X_2) & \text{SQ Trat.}(X_2) \end{bmatrix}$
Resíduo	(J-1)(I-1)	E = $\begin{bmatrix} E_1 & E_{12} \\ E_{12} & E_2 \end{bmatrix}$ + por subtração
Total	IJ - 1	T _t = $\begin{bmatrix} \text{SQ Total}(X_1) & \text{SP Total}(X_1, X_2) \\ \text{SP Total}(X_1, X_2) & \text{SQ Total}(X_2) \end{bmatrix}$

onde:

$$\text{SQ Blocos}(X_1) = \frac{\sum_{j=1}^J Y_{1.j}^2}{I} - C_1$$

$$\text{SQ Blocos}(X_2) = \frac{\sum_{j=1}^J Y_{2.j}^2}{I} - C_2$$

$$\text{SQ Trat.}(X_1) = \frac{\sum_{i=1}^I Y_{i1.}^2}{J} - C_1$$

$$\text{SQ Trat.}(X_2) = \frac{\sum_{i=1}^I Y_{i2.}^2}{J} - C_2$$

$$\text{SP Blocos}(X_1, X_2) = \frac{\sum_{j=1}^J Y_{1.j} Y_{2.j}}{J} - C_{12}$$

$$\text{SP Trat.}(X_1, X_2) = \frac{\sum_{i=1}^I Y_{i1.} Y_{i2.}}{J} - C_{12}$$

$$\text{SQ Total}(X_1) = \frac{1}{i=1} \sum_{j=1}^J Y_{1ij}^2 - C_1$$

$$\text{SQ Total}(X_2) = \frac{1}{i=1} \sum_{j=1}^J Y_{2ij}^2 - C_2$$

$$\text{SP Total}(X_1, X_2) = \frac{1}{i=1} \sum_{j=1}^J Y_{1ij} Y_{2ij} - C_{12}$$

y_{1ij} = observação referente à variável x_1 do i -ésimo tratamento, na j -ésima repetição;

y_{2ij} = observação referente à variável x_2 do i -ésimo tratamento, na j -ésima repetição;

I e J = respectivamente, o número de tratamentos e de repetições;

$$c_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{1ij} \right)^2}{IJ}$$

$$c_2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{2ij} \right)^2}{IJ}$$

$$c_{12} = \frac{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{1ij} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{2ij} \right)}{IJ}$$

Para testar os tratamentos, pode-se utilizar o teste F, cujo valor calculado pode ser obtido através do valor do teste de Wilks, sendo:

$$\Lambda = \frac{|E|}{|A + E|}$$

onde:

$|E|$ é o procedimento da matriz de resíduo;

$|A + E|$ é o determinante da soma da matriz do resíduo com a matriz dos tratamentos que se deseja testar.

O valor calculado de F é dado por:

$$F_{[2k_1; 2(k_2-1)]} = \frac{k_2 - 1}{k_1} \cdot \frac{1 - \sqrt{\Lambda}}{\sqrt{\Lambda}}$$

onde:

k_1 = número de graus de liberdade de tratamentos;

k_2 = número de grau de liberdade do resíduo.

Além das pressuposições básicas da análise univariada da variância, a análise bivariada requer que as correlações entre as variáveis sejam constantes para todos os tratamentos. Entretanto, segundo MEAD & RYLEY (1982), essas correlações tornam-se de difícil comparação porque o número de repetições para cada tratamento geralmente é pequeno.

Como exemplo, considere-se o experimento desenvolvido por SCHEREINER & BAGGIO (1984), com o cultivo consorciado de *pinus* e milho. O objetivo do trabalho foi comparar três densidades populacionais de milho (50 mil, 67 mil e 83 mil plantas por hectare) em combinação com plantios comerciais de *Pinus taeda*, cuja monocultura também foi incluída.

As produções de grãos de milho (x_1) e as alturas de plantas de *pinus* (x_2) estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Produção de milho (Kg de grão/ha) em 1984 (terceira colheita) e altura das plantas de *pinus* (m), 29 meses após a implantação do sistema.

Tratamento		Rep. I	Rep. II	Rep. III	Rep. IV	Rep. V	Média
T0							
Pinus	milho	-	-	-	-	-	-
solteiro	pinus	3,38	4,66	4,05	4,48	4,27	4,17
T1							
duas linhas de milho	milho	1,191	3,208	2,109	1,741	1,191	1,888
	pinus	3,81	4,23	3,78	4,25	4,11	4,04
T2							
três linhas de milho	milho	2,712	2,887	2,362	2,974	2,362	2,659
	pinus	3,78	3,57	3,75	3,84	4,03	3,79
T3							
quatro linhas de milho	milho	3,063	3,412	3,588	3,762	4,287	3,622
	pinus	3,64	3,71	3,62	3,84	3,42	3,65

Fonte: SCHREINER & BAGGIO (1984).

A análise bivariada da variância e os coeficientes de correlação para tratamentos e resíduo encontram-se na Tabela 2. As médias dos tratamentos com as respectivas regiões de confiança podem ser representados graficamente, utilizando-se o método proposto por PEARCE & GILLIVER (1979), que ajusta as variáveis eliminando as correlações existentes entre elas, e utiliza eixos oblíquos ao invés de eixos coordenados perpendiculares. Assim, as regiões de confiança tomam forma de círculos ao invés de elipses, facilitando sua interpretação.

TABELA 2. Quadro de análise bivariada da variância e estimativa dos coeficientes de correlação ($\hat{\rho}$) de culturas intercalares de milho, em reflorestamento de *Pinus taeda*.

F de variação	Gl	Matrizes	F	$\hat{\rho}$
Blocos	4	$\begin{bmatrix} 1,1509 & 0,1632 \\ 0,1632 & 0,1270 \end{bmatrix}$		
Tratamento (T)	2	$\begin{bmatrix} 7,5509 & -1,6760 \\ -1,6760 & 0,3876 \end{bmatrix}$	4,17*	-0,98
Resíduo (E)	8	$\begin{bmatrix} 2,7836 & -0,1159 \\ -0,1159 & 0,2821 \end{bmatrix}$		-0,13
Total	14	$\begin{bmatrix} 11,4854 & -1,6287 \\ -1,6287 & 0,7967 \end{bmatrix}$		

* Significativo ao nível de $P = 0,05$ pelo Teste F [2K1, 2(K2 - 1)] .

As variáveis ajustadas têm variância residual igual a um (1) e covariância nula, sendo

$$y_1 = \frac{x_1}{\sqrt{v_1}} \quad (1)$$

onde:

x_1 é a primeira variável original

v_1 é a variável residual de X dada por $E1/(J-1)(I-1)$.

$$y_2 = \frac{(x_2 - v_{12}x_1 / v_1)}{\sqrt{(v_2 - v_{12}^2/v_1)}} \quad (2)$$

Para construção dos eixos oblíquos pode-se seguir o procedimento de PEARCE & GILLIVER (1979) e DEAR & MEAD (1983), com o auxílio da Figura 2.

a) Desenharam-se eixos retangulares y_1 e y_2 , em escalas iguais para as variáveis Y_1 e Y_2 ;

b) Determinam-se os eixos oblíquos x_1 e x_2 , tal que x_1 varia de x_{1M} a x_{1N} e x_2 de x_{2M} a x_{2N} , sendo (x_{1M}, x_{2M}) a origem. O ângulo externo do eixo x_1 com o eixo x_2 , (θ) , é obtido pelo arc cos do coeficiente de correlação residual (\hat{r}) ;

c) Identificam-se os pontos $(Y_1$ e $Y_2)$ correspondentes a valores atribuídos a (x_{1M}, x_{2M}) ; (x_{1M}, x_{2N}) e (x_{1N}, x_{2N}) , traçando-se, a seguir, as linhas do primeiro ao segundo ponto (eixo x_1) e do primeiro ao terceiro ponto (eixo x_2);

d) As médias de cada tratamento são colocadas no gráfico em pares (x_1, x_2) , com utilização dos eixos oblíquos. O valor x_1 é identificado sobre o eixo x_1 e o valor x_2 sobre o eixo x_2 . A distância entre o ponto (x_1, x_2) e o ponto x_1 sobre o eixo x_1 , é idêntica a do ponto x_2 sobre o eixo x_2 e a origem. Poderiam ser utilizados também os eixos y_1 e y_2 , após a conversão dos valores (x_1, x_2) em (y_1, y_2) .

O erro padrão de uma média de tratamento com n valores é representado por uma distância de $1/\sqrt{n}$ em qualquer direção e pode ser plotado como um círculo de raio $1/\sqrt{n}$, na escala dos eixos Y . A região de confiança e a região de não significância são obtidas da mesma forma, sendo os raios dos respectivos círculo $\sqrt{2F/n}$ e $\sqrt{4F/n}$.

O F é o limite unilateral da distribuição F , para o valor 2 e graus de liberdade do resíduo, no nível de significância escolhido.

A correlação residual negativa entre as variáveis é indicada pela posição do eixo x_1 superior ao eixo y_1 . Caso o eixo esteja em posição inferior, a correlação é positiva.

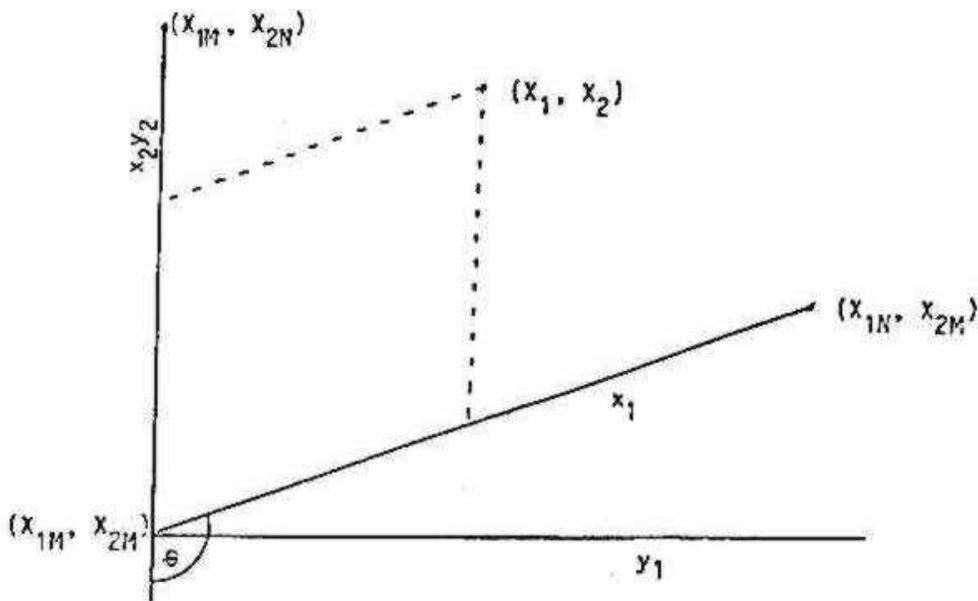


Figura 2. Esquema de construção dos eixos para representação das médias de tratamentos ajustadas.

Voltando ao exemplo utilizado, para construção do gráfico o ângulo será o arc $\cos(-0.13) = 98,63^\circ$ e três dos valores correspondentes a X nos eixos y serão:

x_1	x_2	y_1	y_2
0	5	0	26,88
5	0	8,48	1,12
0	0	0	0

Na figura 3 estão plotadas as médias ajustadas de altura do *Pinus* (eixos x_2 e y_2). Os círculos representam o erro padrão ($1/\sqrt{n}$), região de confiança ($\sqrt{2F/n}$) e a região de não significância ($\sqrt{4F/n}$), e são dadas para a média \bar{y} . O valor de F utilizado foi calculado para o nível de probabilidade de 0,05.

As médias abrangidas pela região de não significância não diferem, no nível de probabilidade escolhido, da média que está no ponto central do círculo. No exemplo dado, a média τ_1 não difere de τ_2 mas difere de τ_3 .

A análise bivariada da variância apresenta a dificuldade de incorporar a produção da cultura isolada. Assim, a média do tratamento τ_0 , plotada sobre o eixo y_2 e x_2 , não pode ter uma comparação precisa com as demais, e para isso, essa técnica deve ser utilizada conjuntamente com outras técnicas como análise da variância e razão da área equivalente (RAE).

A aproximação da média de um tratamento, para um determinado eixo, demonstra o maior domínio da variável representada por esse eixo. O sentido da variação é importante na escolha do melhor tratamento, em função do maior interesse por uma ou outra cultura.

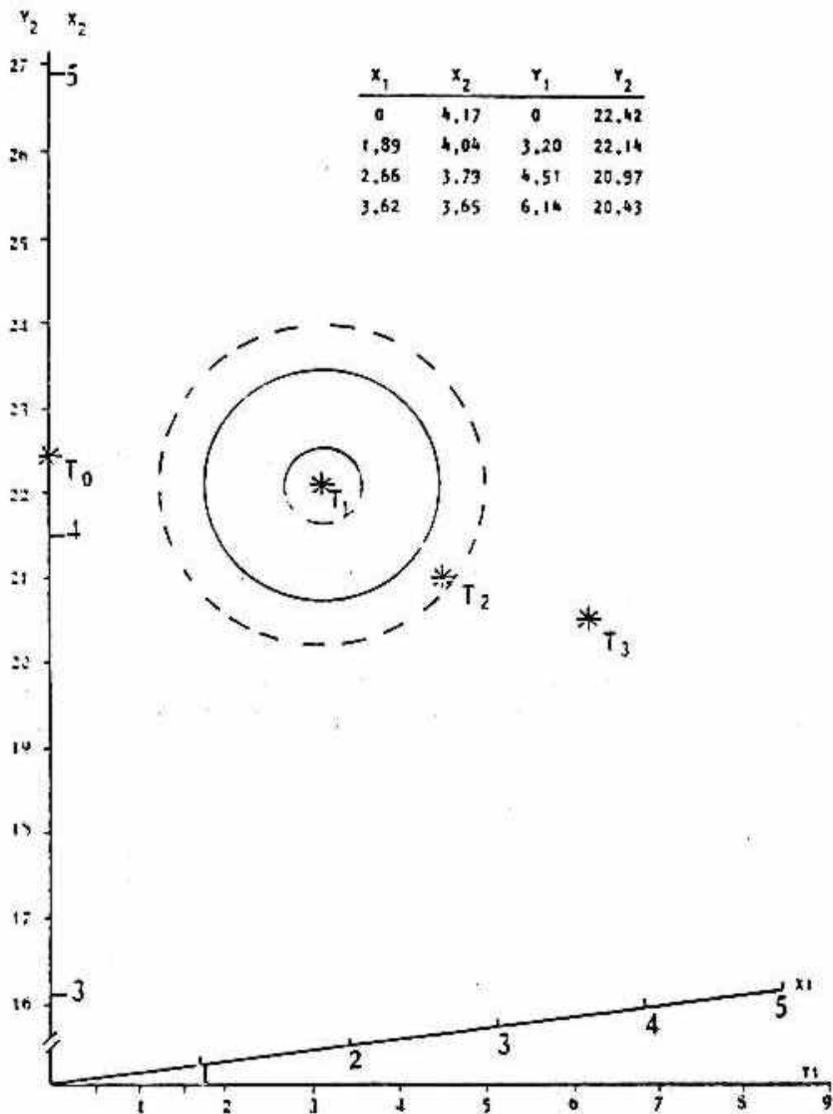


Figura 3. Representação gráfica da média de altura de *Pinus* e produção de milho, erro padrão de \bar{x}_1 , intervalo de confiança e regiões de não significância.

4.4. Análise de regressão.

Esta técnica é baseada no método de FYNLAY & WILKINSON (1963) para estudo de estabilidade fenotípica de cultivares, cujo processo consiste na análise conjunta de ensaios para comparar o comportamento de genótipos cultivados em vários locais (ambientes), e a interação entre genótipos e ambientes é estudada

através do desdobramento em regressões e desvios. BREESE & HILL(1973) e HILL(1973) utilizaram este método no estudo de competição em misturas de genótipos de espécies forrageiras. Segundo esses autores, na associação de culturas, uma espécie impõe limites específicos de recursos ambientais à outra. A menor agressividade de uma espécie iguala-se a melhoria das condições ambientais para a espécie associada. Assim, o método de FINLAY e WILKINSON (1963) pode ser adaptado para o estudo do comportamento competitivo de espécies em consórcio, com a substituição dos ambientes pelas espécies associadas, sendo estabelecidas regressões lineares para todas as espécies em relação às espécies associadas.

Para aplicação deste método é necessário que o experimento esteja em esquema fatorial, que pode ser pela combinação de espécies, cultivares ou níveis de tratamentos, formando diferentes esquemas de associações. A média de cada cultura dentro de cada nível da outra é usada como um "índice de comportamento ou de ambiente". Através da regressão de cada nível com esses índices será possível estudar o comportamento competitivo das espécies.

A decomposição do efeito da interação cultura A X cultura B é realizada segundo o modelo

$$(ab)_{ij} = \beta_i X_j + \delta_{ij}$$

onde,

X_j é o índice de comportamento ou de ambiente, definido como

$$X_j = \frac{\sum_i \bar{Y}_{ij}}{n}$$

sendo,

\bar{Y}_{ij} a média das observações correspondentes ao i-ésimo nível da cultura A com o j-ésimo nível da cultura B.

δ_{ij} é o desvio da regressão.

A contribuição do nível i para a interação, atribuível à regressão é dada pelo modelo:

$$\bar{Y}_{ij} = \mu_i + \beta_i + \delta_{ij}$$

onde,

μ_i é a média do nível i para todas as associações.

β_i é o coeficiente de regressão ($i = 1, 2 \dots m$).

Considerando-se $z_j = \bar{Y}_j - \bar{Y}$, a estimativa b do coeficiente de regressão β_i ($i = 1, 2 \dots m$) tem expressão:

$$b_i = \frac{\sum_j \bar{Y}_{ij} z_j}{\sum_j z_j^2}$$

A soma de quadrados dos efeitos da heterogeneidade das regressões lineares é dada por:

$$SQ \text{ (Heter. reg. lineares)} = \frac{\sum_i (\sum_j \bar{Y}_{ij} z_j) - m (\sum_j \bar{Y}_j z_j)^2}{\sum_j z_j^2}$$

A estimativa da variância da regressão é dada por

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2}$$

O estimador não tendencioso para a variância de b_i é definido como:

$$\hat{\sigma}_{b_i}^2 = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}$$

Tome-se, como exemplo, o experimento de tolerância de quatro espécies de gramíneas ao sombreamento, visando a aplicação em atividades silvipastoris, desenvolvido pelo CNPF. A presença das árvores foi simulada com telas de "sombrite", sendo o estudo direcionado apenas para as gramíneas.

As médias de produção de gramíneas, dois anos após o plantio, e a análise de variância com o desdobramento da interação são apresentadas a seguir:

Espécie	% Sombreamento			
	0	25	50	80
Brachiaria	22,26	17,33	8,54	4,94
Pangola	17,76	15,33	11,65	4,94
Hemarthria	16,22	16,44	12,92	4,41
Pensacola	9,45	9,23	5,34	1,49
	16,42	14,58	9,61	3,94

FONTE DE VARIAÇÃO	GI	QM
Blocos	2	44,64
Gramíneas (A)	3	122,84**
Sombreamento (B)	3	375,51**
A X B	(9)	14,91*
Heter. de Reg. Lineares	3	7,71 n.s.
Desvios de Regressão	6	18,51*
Resíduo	30	6,72
TOTAL	47	

As linhas de regressão ajustadas estão apresentadas nos gráficos de eixos cartesianos (Figura 4), mostrando o comportamento individual de cada espécie sob o efeito dos níveis de sombreamento. Junto a cada linha, está seu coeficiente de regressão linear e respectivo erro padrão.

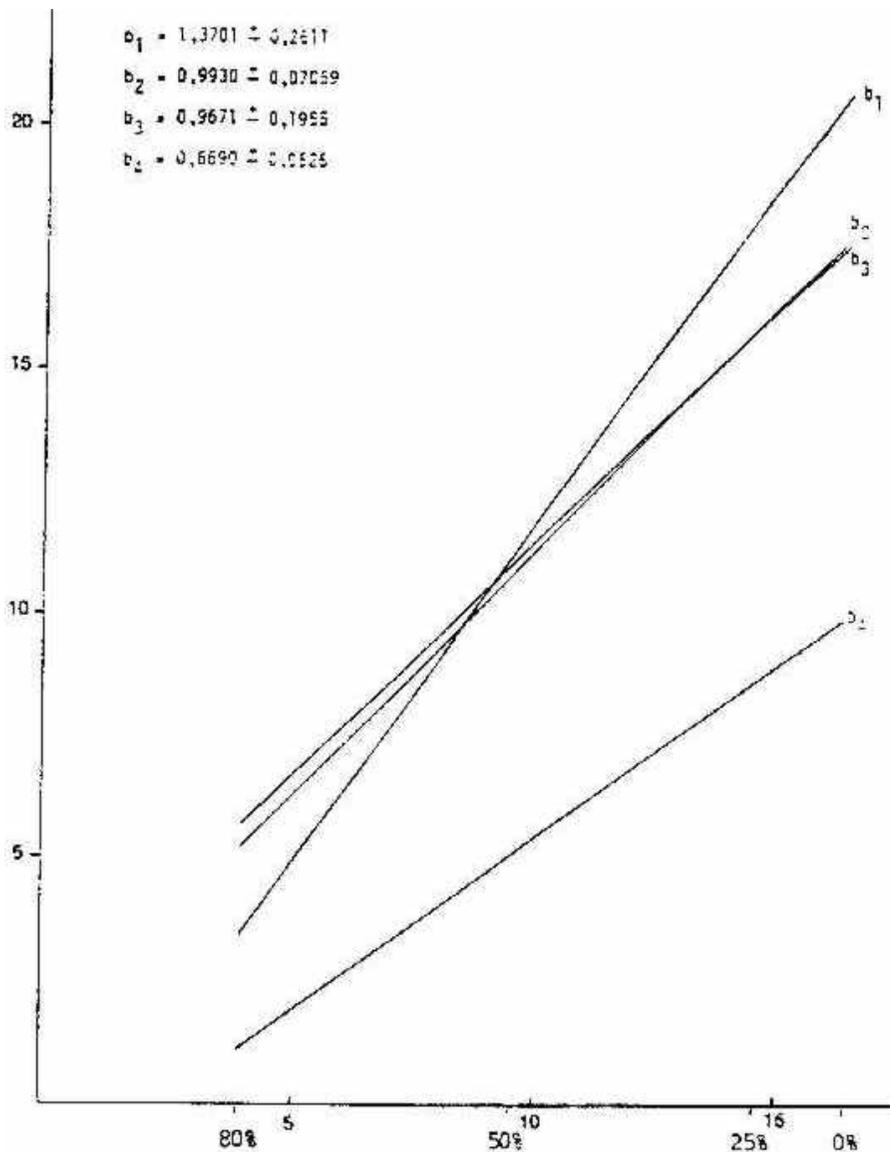


Figura 4. Linhas de regressão, coeficientes b e erros padrão do comportamento individual das gramíneas contra médias de ambiente (níveis de sombreamento).

A heterogeneidade de regressões lineares é testada com os desvios de regressão que, por sua vez, é testado com o resíduo da análise. A caracterização dos diversos tipos de sensibilidade à competição é indicada pelos valores de b . Um valor elevado de b indica grande variação do nível produtivo para os diferentes ambientes competitivos.

Quando se tem o valor b próximo à unidade, o comportamento da espécie é equivalente ao comportamento médio das demais, o que ocorre com as gramíneas Pangola e Hemarthria.

Altos valores de b indicam que menores níveis de competição induzidos pela espécie associada permitem uma elevada produtividade da espécie. À medida em que os níveis de competição forem aumentando, o decréscimo de produtividade de uma determinada espécie será relativamente superior ao de outra com menor valor de b .

Valores pequenos para b indicam pouca sensibilidade a diferentes níveis de competição. No exemplo estudado, os coeficientes de regressão para as diversas espécies não diferem pelo teste F ao nível de probabilidade de 0,05. A significância dos desvios de regressão indicam que as perdas com o sombreamento, para algumas espécies, não estão ocorrendo de forma linear. FINLAY & WILKINSON (1963) recomendam o uso de transformações logarítmicas dos dados para o estudo de "Estabilidade de produção". Este procedimento induz a um alto grau de homogeneidade de variância do erro e pode ser válido para o estudo de competição. Entretanto, no exemplo utilizado, as alterações não foram significativas.

REFERÊNCIAS

- BREESE, E.L. & HILL, J. Regression analysis of interactions between competing species. **Heredity**, London, **31**(2): 181-200,1973.
- DEAR, K.B.G. & MEAD, R. **The Use of bivariate analysis techniques for the presentation, analysis and interpretation of data**. England, Reading University - Department of Applied Statistics, 1983. (Statistics in Intercropping - Technical Report, 1).
- DE WIT, C.T. On Competition. **Versl. Loubouw Orderzoek**, Wageningen, **66**(8):1-82.1960.
- FINLAY, K.W. & WILKINSON, G.N. The analysis of adaption in a plant breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, **14**:742-54,1963.
- GILLIVER, B & PEARCE, S.C. A graphical assessment of data from an intercropping factorial experiment. **Experimental Agriculture**, London, **19**:23-31,1983.
- GONÇALVES, S.R. **Consortiação de culturas - Técnicas de análise e estudo da distribuição do LER**. Brasília, UNB, 1981. 217 p. (Dissertação de Mestrado).
- HALL, R.L Analysis of the nature of interference between plants of different species. I. Concepts and an extension of DE WIT analysis to examine effects. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, **25**:739-47, 1974a.
- HALL, R.L Analysis of the nature of interference between plants of different species. II. Nutrient relaciation in a Nandi Selaria and Greenleaf Desmodium association with particular reference to potassium. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, **25**:749-56, 1974b.
- HARPER. J.L. Approaches to the study of plant competition. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, **15**:1-39,1961.

- HILL, I. Methods of analysing competition with special reference to herbage plants. II. Effects of associate plants. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, **81**:91-8,1973.
- HILL, J. & SHIMAMOTO, Y. Methods og analysis of competition with special reference to herbage plants. I. Establishment. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, **81**:77-89,1973.
- HUXLEY, P.A. & MAINGU, Z. Use of a systematic spacing design as an aid to the study of intercropping: some general considerations. **Experimental Agriculture**, London, **14**:49-56,1978.
- KANG, B.T.; WILSON. G.F. & LAWSON, T.L. **Alley cropping**; a stable alternative to shifting cultivation. Ibadan, International Institute of Tropical Agriculture, 1984. 22 p.
- KASS, D.L. **Polyculture cropping systems**: review and analyses. Ithaca, New York State College of Agriculture and Life Sciences, 1978. 69 p.
- MATHER, K. Competition and co-operation. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, **15**:264-81,1961.
- McGILCHRIST, C.A. Analysis of competition experiments. **Biometrics**, Raleigh. **21**:975-85, 1965.
- McGILCHRIST, C.A. & TRENBATH, B.R. A revised analysis of plant competition experiments. **Biometrics**, Raleigh, **27**:659-71,1971.
- MEAD, R. & RILEY. A review of statistical ideas relevant to intercropping research. **The Journal of the Royal Statistical Society A.**, London. **144**:462-509.1981.
- NAIR, P.K.R. **Soil productivity aspects of agroforestry**. Nairobi. ICRAF, 1985. 85 p. (Science and practice of agroforestry, 1).
- PEARCE, S.C. & GILLIVER, B. The statistical analysis of data from intercropping experiments. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, **91**:625-32,1978.
- PEARCE, S.C. & GILLIVER, B. Graphical assessment of intercropping methods. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, **93**:51-8,1979.
- SCHREINER. H.G. & BAGGIO. A.J. **Intercropping** of com (*Zea mays* L.) with *Pinus taeda* L. planted stands located in Southern Paraná, Brasil. **Bol. Pesq. Flor.**, Curitiba. (8/9):26-49, jun./dez., 1984.
- TREMBATH, B.R. Biomass productivity of mixtures. **Advances in Agronomy**, New York, **26**:177-210, 1974.
- WILLEY, R.W. Intercropping - Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. **Field Crop Abstracts**, Aberystwith. **32**:1-10,1979.
- WILLEY, R.W. & RAO, M.R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. **Experimental Agriculture**, London, **16**:117-25, 1980.
- WILLEY, R.W. & OSIRU, D.J.O. Studies on mixtures of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular reference to plant population. **Journal of Agricultural Science**, New York, **79**:519-29, 1972.