**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Aplicações de delineamentos sistemáticos em experimentos
agronômicos**

Michele Maria Signoreti Penso

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Estatística e Experimentação Agronômica

**Piracicaba
2017**

Michele Maria Signoreti Penso
Licenciada em Matemática

**Aplicações de delineamentos sistemáticos em experimentos
agronômicos**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:

Profa. Dra. **SÔNIA MARIA DE STEFANO PIEDADE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Estatística e Experi-
mentação Agronômica

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Penso, Michele Maria Signoreti

Aplicações de delineamentos sistemáticos em experimentos agronômicos /
Michele Maria Signoreti Penso. -- versão revisada de acordo com a resolução
CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2017 .
55 p.

Dissertação (Mestrado) -- USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz
de Queiroz".

1. Experimentos de Nelder
2. Desenhos para experiência de espaçamentos
3. Gradientes de espaçamentos . I. Título.

DEDICATÓRIA

A minha mãe Rita, ao meu pai Adelino (*in memoriam*),
a minha irmã Adriana e aos meus amigos,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

Primeiramente a Deus pela vida.

Aos meus pais que estiveram ao meu lado sempre, me apoiando nos estudos para eu ser uma boa pessoa e uma boa profissional.

A minha mãe, Rita por ser a força inspiradora de todos os dias, que me encoraja e não me deixa nunca desistir dos sonhos, a não ter medo dos obstáculos e sim a crescer com eles e ser persistente na vida.

Ao meu pai, Adelino (*in memoriam*), que sempre me ensinou a ser humilde e uma pessoa do bem.

A minha irmã, Adriana por todo o incentivo e pela amizade.

A minha madrinha/avó, Elvira minha inspiração de vida e superação.

A madrinha, Regina por todo apoio e ajuda.

À orientadora, Professora Sônia Maria De Stefano Piedade, pelos ensinamentos, aprendizados e amizade.

Aos professores e funcionários do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP, pela atenção, ensinamentos e paciência.

Aos amigos de uma vida inteira, em especial a Bruna, pela amizade e apoio em todos os momentos. As amigas Sabrina e Priscila, por todo o incentivo quando mais precisei. As pessoas que me acolheram em Piracicaba-SP, as quais se tornaram amigas, Juliana, Sabrina e Marianna pela amizade e companheirismo de todo dia.

Aos amigos da graduação, UNESP-RC em especial ao Leandro por toda ajuda e companheirismo, a Tatiana por ser a amiga que me acompanhou da graduação ao mestrado, as amigas Natália e a Adriele que mesmo longe sempre estiveram me apoiando.

Ao CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro.

A todos que, de alguma forma direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis." (José de Alencar)

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Fatores Limitantes Para a Utilização do Delineamento Sistemático	23
2.2 Delineamentos Sistemáticos	24
2.3 Cálculos Para os Valores Utilizados nos Delineamentos Sistemáticos	26
2.3.1 Delineamento em “leque” ampliado para preencher uma parcela retangular	26
2.3.2 Delineamento sistemático em “linhas paralelas”	29
2.4 Delineamentos Sistemáticos Para Ensaios de Espaçamento	30
2.4.1 Tipos de delineamentos sistemáticos para ensaios de espaçamentos	30
3 APLICAÇÕES DE ESTUDOS COM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO	33
3.1 Aplicação 1	33
3.2 Aplicação 2	36
3.3 Aplicação 3	38
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 Material	41
4.1.1 Localização do experimento	41
4.2 Método	41
4.2.1 Caracterização e instalação do experimento	41
4.2.2 Avaliações dendrométricas	41
4.2.3 Falhas e bifurcações	42
4.2.4 Análise dos dados obtido do delineamento sistemático tipo “leque”	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 Análise de Regressão Linear	47
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	53

RESUMO

Aplicações de delineamentos sistemáticos em experimentos agrônômicos

O objetivo do presente trabalho é analisar a eficácia de um desenho em campo e o quanto este pode facilitar a implantação, avaliação e manutenção dos experimentos, principalmente se estes necessitam de uma grande área para a instalação. O delineamento sistemático é aplicado em áreas, tais como, horticultura, solo, irrigação e vem sendo abordado nas pesquisas florestais que se preocupam em oferecer respostas aos gradientes de espaçamentos que uma espécie apresenta em campo. O trabalho, mostra uma revisão bibliográfica de vários estudos realizados com delineamento sistemático em uma gama de aplicações em distintas áreas, revelando suas dificuldades, vantagens e desvantagens sobre os chamados delineamentos clássicos. Os desenhos em campo podem seguir dois diferentes tipos de delineamentos sistemáticos, em “leque” ou linhas paralelas. Para cada um existem regras que devem ser seguidas para a instalação dos experimentos em campo. Com o objetivo de retratar o comportamento da espécie *Eucalyptus dunni*, submetida a diferentes tratamentos, sendo estes os espaçamentos entre as plantas, foi constatada a vantagem em empregar o delineamento sistemático, que reduziu a área utilizada e os custos de produção, melhorando a avaliação e a sobrevivência das espécies. Esse estudo possibilitou identificar o espaçamento ideal para a instalação desta espécie em campo, por meio da análise de regressão.

Palavras-chave: Experimentos de Nelder; Desenhos para experiências de espaçamentos; Gradientes de espaçamentos

ABSTRACT

Applications of systematic delineations in agronomic experiments

The objective of the present work is to analyze the effectiveness of a drawing in the field and how much it can facilitate the implantation, evaluation and maintenance of the experiments, especially if they require a large area for the installation. The systematic design is applied in areas such as horticulture, soil, irrigation and has been approached in the forest researches that are concerned with providing answers to the gradients of spacing that a species presents in the field. This work presents a bibliographical review of several studies carried out with systematic design in a range of applications in different areas, revealing their difficulties, advantages and disadvantages on the so - called classic designs. Field designs can follow two different types of systematic, fan-like or parallel lines. For each one there are rules that must be followed for the installation of field experiments. With the aim of portraying the behavior of the species *Eucalyptus dunni*, submitted to different treatments, these being the spacings between plants, it was observed the advantage of using the systematic design, which reduced the area used and the production costs, improving the evaluation and survival of the species. This study made it possible to identify the ideal spacing for the installation of this species in the field, through regression analysis.

Keywords: Nelder experiments; Designs for spacing experiments; Spacing gradients

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema do espaçamento inicial do experimento	18
2.2	Desenho experimental em parcelas de 1:1 e 1:2	18
2.3	Desenho de Nelder do experimento	19
2.4	Imagem de duas parcelas de Nelder lado a lado aos cinco anos de experimento	20
2.5	Apresentação esquemática de uma região vista a partir da localização de uma árvore central	21
2.6	Repetições dos “leques” no experimento	21
2.7	Mudas de <i>silver birch</i> dispostas em recipientes nas prateleiras construídas dentro de viveiros florestais em desenho de Nelder	22
2.8	Delineamento (Ia) (adequação em uma parcela retangular)	24
2.9	Duas interpretações do delineamento “linhas paralelas”	25
2.10	Delineamento sistemático em leque (adequação em uma parcela retangular) com destaque uma parte do delineamento sistemático tipo leque	26
2.11	(a) Delineamento (Ia); (b) Delineamento (Ib)	30
2.12	(c) Delineamento (Ic); (d) Delineamento (Id)	31
2.13	(a) Delineamento (II)	31
3.1	<i>Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii (Mirbel) Franco)</i> em desenho de Nelder Ia em <i>Ballyhoura Forest</i>	33
3.2	Fotografia do desenho Ia, em um ângulo tomado de frente para o centro, apresentando o aumento de crescimento do centro para fora	34
3.3	Fotografia do desenho Ib, em um ângulo tomado de frente para o centro, demonstrando que na retangularidade maior, as árvores se tornam predominantes	34
3.4	Representação gráfica do desenho de Nelder	36
3.5	Fotografia do desenho de Nelder com 36 raios e 12 arcos, aos 10 meses de plantio. Os dois círculos interiores e o círculo mais externo, foram utilizados como bordaduras	37
4.1	Imagem aérea dos experimentos com <i>Eucalyptus dunnii</i> aos 3 meses de idade, à direita encontra-se o delineamento sistemático tipo “leque” e à esquerda o delineamento casualizado	41
5.1	Altura média (m) aos 6 anos de idade do <i>Eucalyptus dunnii</i> em delineamento sistemático tipo “leque”	45
5.2	DAP médio (cm) aos 6 anos de idade do <i>Eucalyptus dunnii</i> em delineamento sistemático tipo “leque”	46
5.3	Volume médio (dm ³ /planta) aos 6 anos de idade do <i>Eucalyptus dunnii</i> em delineamento sistemático tipo “leque”	46

LISTA DE TABELAS

3.1	Características dos experimentos de desenhos Nelder tipos Ia e Ib	33
3.2	Valores das variáveis de crescimento aos 40 anos em desenho Nelder Ia	35
4.1	Valores da distância radial, área por planta e densidade de plantas para 10 tratamentos (espaçamentos) no delineamento sistemático tipo “leque”	42
4.2	Número do raio da planta correspondente a morte ou falha no experimento do delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos	42
4.3	Número dos raios das plantas que foram retirados da análise correspondente à falha ou morte e suas vizinhas, à bifurcação e a exclusão de árvores para padronizar o experimento com 30 árvores por tratamento no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos	43
4.4	Número dos raios das plantas que constitui as 5 repetições de cada um dos tratamentos no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos	43
4.5	Esquema da análise de variância da regressão linear para efeito de espaçamento no experimento com delineamento sistemático tipo “leque”	44
5.1	Valores médios da altura (m), DAP (cm) e volume individual ($\text{dm}^3/\text{árvore}$) para os 10 tratamentos no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	45
5.2	Primeiro intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 1-2-3 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	47
5.3	Segundo intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 2-3-4 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	47
5.4	Terceiro intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 4-5-6 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	48
5.5	Quarto intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 5-6-7 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	48
5.6	Quinto intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 7-8-9 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	48
5.7	Sexto intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 8-9-10 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DS	Delineamento sistemático
DAP	Medida do diâmetro da árvore a 1,30 metros de altura em relação ao nível do solo
ALT	Altura
SOB	Sobrevivência
r_0	Primeira distância radial
r_n	Demais distâncias radiais
α	Fator de espaçamento
θ	Ângulo entre os raios
τ	Retangularidade
A_n	Área associada por cada uma das plantas, em que $n = 1, 2, \dots, N$ é o número de arcos
L	Comprimento da parcela retangular
a	Menor distância do centro ao lado mais próximo do retângulo fechado
B	Largura da parcela
$1/A_n$	Número de plantas por unidade de área

1 INTRODUÇÃO

Os métodos estatísticos são importantes para a obtenção de resultados nas mais diversas áreas das ciências e principalmente para os estudos em campo foram desenvolvidos os princípios básicos para a realização dos experimentos, repetição e casualização e em parcela de heterogeneidade utilizam-se o controle local e a bordadura (FISHER, 1935).

Tais procedimentos surgiram ao longo das aplicações em áreas agrícolas, nas quais há necessidade da utilização da casualização para que todas as observações experimentais tivessem a mesma probabilidade de receber um tratamento, sem haver influências devido a tendenciosidades do pesquisador ou imprevistos que promovam vantagens sobre o estudo; a repetição é necessária para que os resultados sejam precisos em um mesmo nível de tratamento; o controle local é utilizado quando uma área experimental é heterogênea, estabelecendo-se blocos que subdividam a área total em menores áreas homogêneas. Em alguns casos, a bordadura é empregada, ou seja, tratamentos aplicados em uma parcela não possam interferir em parcelas vizinhas.

A aleatorização é considerada indispensável por grande parte dos pesquisadores, pois experimentos que não seguem o princípio da casualização são considerados inapropriados, assim sendo existe uma grande superioridade em planejamento de experimentos com delineamentos casualizados. Porém, quando os ensaios precisam de grandes áreas para serem instalados o uso da casualização é inviável, uma vez que o uso de delineamento casualizado requer diversos recursos e um investimento muito alto, em razão dos princípios básicos da experimentação, o resultado dificulta a manutenção e a avaliação local, além do que quando existe um número muito elevado de espaçamentos é inevitável que a área experimental seja grande, comprometendo a homogeneidade dentro dos blocos.

Uma alternativa para a casualização, é o emprego dos delineamentos sistemáticos propostos por Nelder (1962), que não seguem o rigor fundamentado nos delineamentos clássicos, entretanto o pesquisador terá seus propósitos concluídos. Os delineamentos sistemáticos são utilizados nas áreas de horticultura, solos, irrigação e florestal. Entretanto, existem justificativas que limitam o uso desse delineamento, sendo a não casualidade o principal fator, seguido da alta mortalidade em observações dentro do experimento, que alteram as condições iniciais propostas. Os pesquisadores utilizam também outras nomenclaturas para referir-se aos delineamentos sistemáticos, como: desenhos/delineamentos/projetos/*design* de Nelder.

O objetivo principal deste trabalho é expressar as facilidades que o delineamento sistemático revela, bem como apresentar uma revisão bibliográfica sobre o assunto e demonstrar, a partir de um banco de dados, como pode ser realizada a análise deste tipo de delineamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Bleasdale (1960), responsável pela ideia original desse tipo de delineamento sistemático (DS), percebeu a necessidade de se obter respostas ao espaçamento de culturas e conseguir melhores resultados na prática. Além disso, este estudo possibilitou a investigação de variáveis de fácil controle e que influenciavam outros aspectos de interesse. A resposta a uma variável foi melhor determinada sob o efeito de um número elevado de valores abrangentes da variável, com isso foi necessária uma grande variedade de densidades de plantas. O uso do delineamento casualizados em blocos abrange uma extensão de terra muito grande para a instalação do experimento, sendo que mais da metade das plantas são bordaduras, além do que, experimentos muito grandes não são estatisticamente apreciáveis e na maior parte das vezes há escassez de recursos disponíveis para a realização do experimento.

À partir dessas circunstâncias, Bleasdale recomendou ao seu colega Nelder que as culturas fossem dispostas em fileiras que irradiavam a partir de um ponto central, com a distância entre as plantas pela extensão de um raio com uma distância aproximada entre os raios nesse ponto, com isso, em uma pequena área foi possível cultivar as densidades de plantas, além do que, as bordaduras foram praticamente nulas, necessárias apenas para delimitar dois grupos de plantas no delineamento sistemático. Assim Nelder, desenvolveu diversos projetos para experimentos que utilizaram a metodologia dos espaçamentos que são intersecções dos conjuntos de linhas retas, paralelas ou concorrentes, ou de arcos de círculos concêntricos. Tais experimentos revelaram ainda os benefícios e prejuízos estatísticos e práticos que o delineamento sistemático poderia apresentar.

De acordo com Oda (2005), os delineamentos sistemáticos de Nelder (1962), são mais utilizados em análise de campo, começando pela horticultura e após isso na área agrícola, tanto nas culturas puras (uma única espécie plantada em uma determinada região), como também nas de consorciação de culturas (plantações de espécies diferentes próximas uma das outras, sendo que essas espécies proporcionam vantagens no crescimento). Bleasdale (1967) sugeriu este delineamento para grandes áreas e em seu trabalho descreveu todos os passos para o cálculo de dois tipos de delineamento sistemático, que foram utilizados de forma mais conveniente pelos pesquisadores.

Espaçamento de plantio ou então ensaios com espaçamentos para determinadas espécies tem uma grande importância, uma vez que, existe influência nas taxas de crescimento, produtividade e sobrevivência, que influenciam nos custos da produção, pois além da extensa área de plantio, são necessárias bordaduras entre os tratamentos que evitam influências nas parcelas vizinhas. O conceito de espaçamento de uma espécie, é determinado pela distância entre as linhas de plantio e entre as plantas nelas inseridas (JÚNIOR, 2007). Com isso, a instalação de experimentos com casualização, controle local e bordadura restringem o número de espaçamentos, pois é necessária uma grande área de instalação, que inviabiliza o processo, pois encarecem a aplicação e manutenção, sendo este um dos motivos para a inserção dos delineamentos sistemáticos (NELDER, 1962).

O estudo com espécies florestais demanda uma grande extensão de terra, uma vez que é necessário utilizar grandes espaçamentos. O que dificulta a homogeneidade dentro de blocos e promove erros experimentais que reduzem os efeitos de cada um dos tratamentos aplicados. Nestes casos, há uma barreira grande para a instalação de experimentos em delineamentos convencionais no estudo de espaçamentos em florestas (STAPE, 1995).

Estudos de espaçamento de plantio na área florestal são influenciados diretamente no progresso particular e na produtividade da área associada a cada planta, assim se houver um bom planejamento para o estudo podem-se obter amplos ganhos na produção. Uma boa alternativa para este estudo foi utilizar o delineamento sistemático tipo “leque”. O espaçamento disponível por árvore influenciou a taxa de crescimento e o rendimento de plantio e para realizar esse tipo de experimento foi necessária uma extensa área, o que inviabilizava o estudo. Porém, os projetos de Nelder demonstraram avaliações em

culturas florestais com uma redução de área, período de tempo e número de árvores (SLYKE, 1964).

Segundo Oda (2005) entre outros autores, Fisher foi quem introduziu os conceitos que temos hoje sobre repetição, controle local, casualização dos tratamentos e bordadura, mas na prática poderiam ocorrer certas dificuldades com a instalação desses experimentos, uma vez que é necessário reduzir o tamanho ou mesmo o número dos ensaios por conta da disponibilidade da área, dos métodos de instalação, conservação e avaliação. Uma característica marcante para os delineamentos sistemáticos, é não utilizar o princípio da casualização, além do que as bordaduras passam a ser diminuídas ou mesmo deixam de existir. Nelder (1962) indicou esse tipo de delineamento para estudos de espaçamentos na área hortícola, pois as plantas da bordadura seriam recusadas e os efeitos das parcelas vizinhas a uma parcela estabelecida seria compensatório no experimento.

De acordo com Chalita (1991), os DS são, sobretudo, importantes na análise inicial para se obter soluções básicas, além do que podem ser utilizados no campo de consorciação de culturas. Esse campo era pouco explorado quando surgiram os primeiros estudos de delineamentos sistemáticos. Freyman e Dolman (1971), realizaram um estudo de plantio de cereais, instalado em DS, que não obteve resultados satisfatórios, uma vez que a área não era homogênea e possuía gradientes de fertilidade.

Para Leeuwen (1994), um benefício de se utilizar delineamentos sistemáticos é notado quando se instalam ensaios preliminares, pois estes abrangem um espaço muito menor e utilizam tratamentos extremos e de fácil observação.

Em um estudo com produção de berinjelas, com vários espaçamentos, verificou-se a vantagem que o delineamento sistemático tem sobre o delineamento convencional, porém quando este experimento foi realizado ainda não havia uma definição formalizado sobre delineamento sistemático para a análise dos dados, assim foram elaborados gráficos de crescimento em que as variáveis estudadas foram avaliadas durante o período de desenvolvimento do projeto (MINAMI, 1977).

Freeman (1964) utilizou o delineamento sistemático em um experimento com árvores de cacau em área totalmente irregular, fez o uso do delineamento tipo Ia de Nelder, já que este era o único conveniente para as circunstâncias do estudo, tendo uma retangularidade constante em toda sua área. O experimento foi dividido em três repetições, porém naquele momento os pesquisadores não tinham uma ideia precisa de como seria a análise dos dados, assim utilizou esse estudo como uma forma de comparar os tratamentos de cada uma das repetições.

Stape e Binkley (2010) realizaram um trabalho para avaliar o comportamento silvicultural de *Eucalyptus dunnii* considerando espaçamentos e materiais genéticos diferentes. Os autores concluíram ser propício fazer o uso dos delineamentos sistemáticos tipo “leque”, pois o campo de instalação do experimento seria menor do que se fosse utilizado delineamento casualizado. Uma vantagem de se utilizar os delineamentos sistemáticos com fator quantitativo contínuo apresentado por Nelder (1962) foi a obtenção de informações básicas e fundamentais para o estudo de espaçamentos florestais, especialmente quando a silvicultura abrange técnicas, regiões ou genótipos novos, uma vez que sua vantagem foi obter uma redução nas áreas experimentais e uma facilidade ao realizar estudos com esse tipo de delineamento (SANTOS, 2011).

Foi possível avaliar simultaneamente a variação genética da espécie *Jacaranda cuspidifolia* em diferentes espaçamentos num mesmo experimento por meio do delineamento sistemático, podendo estabelecer qual espaçamento obteve melhor desempenho. Neste estudo foram avaliadas a altura, medida do diâmetro da árvore a 1,30 metros de altura em relação ao nível do solo (DAP) e a sobrevivência das espécies em nove diferentes espaçamentos de 2 a 42 m²/planta, totalizando de 5000 a 2238 árvores/ha, visto que seria inviável analisar o plantio nestas mesmas condições em delineamentos aleatórios (MORAES et al, 2013).

O desenvolvimento de pinhão-mansão, *Jatropha curcas*, em relação à área útil para cada uma das plantas foi estudado por Aleixo (2012), com o objetivo de avaliar o progresso desta espécie de dife-

rentes procedências, comparando quatro diferentes sistemas de cultivo instalados em DS. Após 540 dias coletaram-se os dados referentes a algumas variáveis coletadas e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância e para estudar o efeito da densidade foi realizada uma análise de regressão polinomial ao nível de 5% de significância e pode-se chegar aos resultados dos sistemas de cultivos que evidenciou o melhor tipo de cultivo do pinhão-mansão em função da área útil por planta.

Teodoro (2016) avaliou o plantio de canafístula, *Peltophorum dubium*, em um delineamento sistemático tipo “leque”, este dando as variáveis altura, diâmetro do fuste, diâmetro e área da copa da árvore e o volume cilíndrico, por meio de análises geoestatísticas e multivariada. Analisou a relação entre as variáveis por meio de autocorrelação, avaliou ao longo do tempo o comportamento dessas variáveis, fazendo uso da análise de medidas repetidas e ao fim do estudo percebeu que é possível associar todas estas análises obtendo uma melhor interpretação do estudo.

Affleck (2001) realizou um trabalho e observou dificuldades para utilizar os experimentos de Nelder, pois existiam correlações significativas entre plantas vizinhas, produzindo estimativas tendenciosas. Foram necessárias outras análises com modelos de erros correlacionados espacialmente, que permitiam a disposição geométrica. O estudo revelou as propriedades e as práticas de quatro diferentes métodos de análises espaciais, todas em experiências florestais com uso do DS e avaliou suas eficiências sob diferentes magnitudes de autocorrelação espacial por meio do estudo de simulação dos dados.

Além disso, o método de Affleck (2001) foi utilizado posteriormente em estudo com dados de um experimento na Universidade de Columbia Britânica *Malcolm Knapp Research Forest em Haney*, Colúmbia Britânica, no qual realizou uma comparação dos dois métodos de análise e obteve uma maior eficiência no método de análise espacial do que no método de análise clássica. Os métodos de análise clássica dependiam de um mecanismo para neutralizar os efeitos de autocorrelação em ensaios repetidos, os desenhos de Nelder, assim métodos de análises espaciais foram mais úteis em dados que apresentaram autocorrelação espacial. Com os 4 métodos de simulação utilizados identificou que os experimentos devem ser estudados caso a caso, não existindo uma regra geral para todos os experimentos em ensaios de DS.

O trabalho de Parrott, Brinks e Lhotka (2011) apresentou uma metodologia prática e eficiente para pesquisadores da área florestal desenvolverem pesquisas com os esquemas de Nelder. Utilizando um exemplo, ilustrou de maneira acessível a aplicação em campo, com explicações sobre as etapas de instalação, as equações necessárias para a instalação do experimento em campo e em seguida realizou a análise com dados correlacionados em DS e com os conceitos que Affleck (2001). Este estudo foi de grande valia para a pesquisa florestal aplicada, pois apresentou de forma clara e concisa uma metodologia de instalação e análise.

Em um trabalho publicado por Belly (2013), onde avaliou a curvatura do caule das espécies *white spruce*, (*Picea glauca* [Moench] Voss) e *jack pine* (*Pinus banksiana* Lamb.), conforme a Figura 2.1, foram utilizadas hastes de plantas com 32 anos de um experimento com espaçamento Nelder em *New Brunswick* no Canadá, instalado em 1977 totalizando 96 árvores. Obteve uma variação em espaçamentos de 640 a 12.000 caules/ha e os resultados mostraram que o espaçamento inicial influenciou na curvatura da árvore e aumentou a curvatura do caule para plantas com espaçamentos iniciais mais largos.

Num experimento com parcelas de Nelder, com idade de 1 a 7 anos de idade e densidades variando entre 238 a 101218 árvores/ha, desenvolveram-se modelos biomatemáticos para a avaliação da altura dominante, diâmetro e sobrevivência dos efeitos de um gradiente de densidade no cultivo sobre a estrutura e dinâmica em plantações de *red alder* (*Alnus rubra* Bong.), os quais resultaram em redução na sobrevivência em níveis mais elevados de competição e nos mais baixos houve um decréscimo no crescimento da altura e do diâmetro das plantas (KNOWE e HIBBS, 1996).

O estudo da plantação jovem de *Douglas-fir* (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.]), da região do oeste de Oregon – EUA, avaliou a relação de crescimento do ramo com o espaçamento inicial das plantas, utilizando parcelas de Nelder, com densidades variando de 309 a 18.730 árvores/ha e crescimento retangular

Figura 2.1. Esquema do espaçamento inicial do experimento

Fonte: Belly (2013)

de parcelas de 1:1 ou 1:2, de acordo com a Figura 2.2. Os estudos concluíram que a redução no crescimento das variáveis, altura e diâmetro, ocorreram em níveis mais baixos de competição intraespecífica e que nos níveis mais elevados de competição intraespecífica houve redução na sobrevivência (NEWTON et al, 2012).

Figura 2.2. Desenho experimental em parcelas de 1:1 e 1:2

Fonte: Newton et al. (2012)

Erkan e Aydin (2016) avaliaram os efeitos do espaçamento inicial sobre o crescimento precoce e as taxas de crescimento de carbono nas plantações de *Pinus brutia*. Os dados foram obtidos num delineamento de Nelder com 72 raios e 18 arcos, as plantas foram plantadas com distâncias entre 1,15 m a 4,77 m, resultando em espécies com maiores alturas em espaçamentos menores até os oito anos de idade e após esse período houve uma redução no crescimento com a fixação do carbono. O diâmetro na altura do peito e o volume individual da árvore aumentaram, já o armazenamento anual de carbono no experimento por hectare diminuiu para espaçamentos maiores, concluindo que são necessário espaçamentos menores e nos anos subsequentes a oito deve-se realizar o desbaste, como exigido por preocupações silviculturais para aumentar o rendimento e a fixação de carbono (Figura 2.3).

Figura 2.3. Desenho de Nelder do experimento

Fonte: Erkan e Aydin (2016)

Ritchie (1997), estudou mudas de *abeto Douglas* (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) em parcelas de Nelder, (Figura 2.4), o espaçamento variou de 265 a 2555 cm²/planta. A avaliação ocorreu após trinta semanas, observando a medida da radiação refletida horizontalmente dentro das parcelas, pode-se ter uma diminuição de 1,2 na menor densidade e 0,71 em uma densidade maior no experimento, além disso analisou a altura média da planta, biomassa da coroa e o número do ramo que aumentaram significativamente com a elevação da densidade por planta.

Newton (2015) analisou a relação existente entre a altura média nas populações de *jack pine* (*Pinus banksiana* Lamb.) e *black spruce* (*Picea mariana*) e a densidade dos plantios, na fase inicial do experimento. Este estudo foi realizado na porção central da região da floresta boreal canadense, com 28 parcelas de Nelder. As avaliações ocorreram aos 16, 20 e 40-41 anos, após o início do experimento e a densidade variou de 1425 a 28.621 hastes/ha. Os resultados obtidos foram realizados por meio da análise de regressão linear, a qual quantificou a relação altura, parcela e ano de coleta pela densidade do plantio. Como resultado foram obtidas dependências da densidade no desenvolvimento da altura para as duas espécies estudadas, sendo 65 % para *jack pine* e 89 % para o *black spruce*, ao nível de 5 % de significância. Este contexto foi discutido para estudar os potenciais que a densidade apresentou em relação a altura nos plantios cultivados. Com esses resultados foi possível quantificar respostas a vários modelos de gerenciamento de densidade que facilitam a tomada de decisão para a escolha do melhor plantio, que tenha maior lucro e produtividade.

Figura 2.4. Imagem de duas parcelas de Nelder lado a lado aos cinco anos de experimento

Fonte: Ritchie (1997)

Um estudo foi realizado para explorar os problemas de espaçamento florestal e fez uso dos dados de árvores com área fixa de um estudo preliminar, no qual foram utilizadas 1000 árvores/ha da espécie *Picea glehnii*, em delineamento sistemático tipo Ib de Nelder, na Floresta Experimental Hitsujigaoka no centro de pesquisa Hokkaido do Instituto de Pesquisa *Forestry and Forest Products*. Os resultados foram obtidos por meio da análise de regressão multivariada e o critério de informação (AIC) para identificar fatores significativos, identificando o espaçamento de plantio das árvores afetou o crescimento em DAP e altura. O autor salienta que são necessários mais estudos desta natureza para que se possa confirmar a eficiência das respostas do crescimento das árvores aos diversos espaçamentos no campo, para compreender melhor estudos de crescimento de árvores plantadas em linha reta e árvores que são utilizadas como bordaduras, além do que no tratamento florestal para desbaste de linha e efeito na construção de estradas florestais (TAKAHASHI e FURUYA, 2014).

Um experimento realizado por Galinski, Witowski, Zwieniecki (1994), com pinho escocês (*Pinus sylvestris* L.) foi testado em delineamento de Nelder durante 4 anos para verificar como esta espécie se comportava em dois diferentes tipos de solo, um com baixa e o outro com alta fertilidade. Analisaram a existência de aglomerados nas árvores de altura uniforme, que é uma média das estimativas da diferenciação de altura dentro dos grupos de árvores localizadas ao longo da coordenada circular de Nelder (Figura 2.5), que será igual a zero para altura uniforme e que aumenta com o surgimento das diferenças de altura entre as árvores vizinhas. Os resultados demonstraram que no solo rico o padrão de crescimento ocorreu no espaçamento de 0,155 a 0,396 m²/árvore, já no outro tipo de solo, o padrão de crescimento só ocorreu no 3º ano com espaçamento de 0,085 m²/árvore, mesmo fazendo a avaliação no 4º ano de experimento o padrão de crescimento foi limitado ao espaçamento de 0,046 a 0,291 m²/árvore, demonstrando que é importante um solo com muitos nutrientes para o desenvolvimento da espécie. Este resultado demonstrou que existe uma fase inicial do crescimento da espécie, já que durante esta fase ocorreu um aglomerado nas árvores de tamanho uniforme ao longo do plantio.

Em uma cultura de repolho (*Brassica oleracea*), com cinco espaçamentos diferentes para avaliar o efeito da densidade das plantas foi utilizado o delineamento sistemático. Para realizar a análise dos dados obtidos fez-se uso da transformação de dados $Y = \arcsen \sqrt{x}$ e obteve-se maior aproximação da distribuição normal e para estudar os contrastes entre as médias utilizou-se o Teste de Tukey ao nível

Figura 2.5. Apresentação esquemática de uma região vista a partir da localização de uma árvore central
 Fonte: Galinski, Witowski e Zwieniecki (1994)

de 5 % de significância. As alterações no experimento foram observadas com o aumento da densidade da população de repolho, havendo redução no número de folhas, peso, volume, diâmetros transversal e longitudinal da planta, mas também houve aumento das plantas que não formaram a “cabeça” ou tiveram o formato da “cabeça” alterado, com isso o autor constatou a influência sobre o plantio de repolho MINAMI e VICTORIA FILHO (1980).

O estudo de Namkoong (1966) verificou a resposta de diferentes genótipos de árvores em diferentes espaçamentos aplicados em uma área compacta. A retangularidade não foi um fator preocupante ao longo do crescimento no experimento e sugeriu uma maior aplicabilidade deste delineamento em estudos de melhoramento florestal e silvicultura. As repetições dos “leques” no campo do experimento podem ser observadas na Figura 2.6.

Figura 2.6. Repetições dos “leques” no experimento
 Fonte: Namkoong (1966)

Para um estudo de resposta da densidade à *silver birch* (*Betula pendula* Roth), foram utilizadas mudas desta espécie, provenientes das sementes de um pomar da Finlândia Central. Para que ocorresse este experimento foram construídos suportes, tipo *racks* nos quais foram distribuídas mudas em seus respectivos recipientes, em um desenho de Nelder (Figura 2.7). As características do experimentos foram

de 12 arcos com 11 raios de aproximadamente 6° e o último arco foi considerado como bordadura, o qual resultou em um estudo de 137 a 1363 mudas/m², foi realizado em uma densidade de 207 a 891 mudas/m². Os pesquisadores concluíram que nesta experiência houve a influência da densidade de mudas das árvores de *silver birch* cultivadas em estufas, no crescimento médio da planta e na uniformidade da espécie, dois fatores muito importantes para a produção de mudas em estoque de viveiro florestal. Confirmando assim que o espaçamento das plantas é uma variável muito importante para obter melhores resultados em viveiro florestal (APHALO e RIKALA, 2006).

Figura 2.7. Mudas de *silver birch* dispostas em recipientes nas prateleiras construídas dentro de viveiros florestais em desenho de Nelder

Fonte: Apalho e Rikala (2006)

2.1 Fatores Limitantes Para a Utilização do Delineamento Sistemático

O delineamento sistemático foi proposto na década de sessenta, quando pesquisadores da área florestal tentaram superar a diminuição no número de espaçamentos em estudos florestais, pois quando isso ocorria ocasionava a perda de informações da pesquisa, dificultando a conclusão do estudo. A vantagem da utilização desse delineamento é a necessidade de uma pequena área experimental e a facilidade de manejo, que possibilitam o estudo de um número grande de espaçamentos (STAPE, 1995).

No entanto, existem motivos que limitam o uso dos delineamentos sistemáticos, tais como: a falta da casualização e a perda da independência dos erros de cada unidade, fazendo com que haja correlação nas unidades experimentais. Além do que há um aumento de observações perdidas no experimento, pois a bordadura não existe ou é pequena, podendo levar a mortalidade alta de observações dentro da unidade experimental. Quando há perda de uma observação, ocorre diferença no espaçamento das observações vizinhas, fazendo com que essas informações não sejam consideradas no banco de dados, com redução de cinco observações, sendo elas a observação perdida em si e suas quatro vizinhas consecutivas. Outra alternativa para reverter essa situação é realizar a análise de covariância, considerando essas mortes ou falhas como uma covariável no modelo (ODA, 2005).

2.2 Delineamentos Sistemáticos

De acordo com Bleasdale (1960), existem dois tipos de delineamentos sistemáticos que são descritos, delineamentos em “leque” e “linhas paralelas”, onde o número de plantas por unidade de área varia sistematicamente nas parcelas no campo e o arranjo das plantas é mantido constante.

O delineamento sistemático em “leque” ou tipo Ia de Nelder, é um conjunto de círculos concêntricos, com os raios dos círculos igualmente intervalados. A Figura 2.8 ilustra como um delineamento em leque se dispõe em uma adequação de parcela retangular, em que as plantas são ilustradas por cada ponto ao longo do experimento. O desvio da diferença dos raios é inerente ao delineamento, pois o arranjo das observações no campo não é estritamente retangular. No entanto, o desvio da retangularidade que é determinado por uma outra planta, a qual não ocupa o ponto médio entre seus vizinhos consecutivos no mesmo raio é controlado por um grau máximo, limitado em 5 % do ponto médio de seus vizinhos, Nelder (1962) fixou um limite para a mudança de espaçamento, ou seja, $\alpha \leq 1,111$. Caso exceda esse valor, deve-se aumentar o número de arcos ou então fazer com que a diferença entre o maior e o menor espaçamento seja reduzida.

Figura 2.8. Delineamento (Ia) (adequação em uma parcela retangular)

Fonte: Nelder (1962)

No delineamento sistemático em “linhas paralelas” é desconsiderada a irregularidade do espaçamento das observações dentro de uma linha de plantio no cálculo dos resultados, sendo mais propício utilizá-lo em experimentos com altas densidades, 100 ou mais plantas/m². As linhas desse plantio são paralelas umas as outras e a distância entre as linhas de plantio é variada, sem ter mudança no padrão do arranjo de plantio. Na Figura 2.9, há duas interpretações desse delineamento; (a) especialmente útil para culturas crescidas em altas densidades, onde as linhas das culturas estão representadas como linhas com o número de planta/linha; (b) sobretudo utilizada em culturas espaçadas largamente como a couve de Bruxelas, por exemplo, tendo um número constante de plantas em cada linha (BLEASDALE, 1960).

Figura 2.9. Duas interpretações do delineamento “linhas paralelas”

Fonte: Bleasdale (1960)

2.3 Cálculos Para os Valores Utilizados nos Delineamentos Sistemáticos

Bleasdale (1960), apresentou valores que caracterizam cada um dos delineamentos definidos, os quais auxiliam a instalação de experimentos que utilizem esses tipos de delineamentos.

2.3.1 Delineamento em “leque” ampliado para preencher uma parcela retangular

Esse delineamento tem como característica: a área por planta aumenta com o aumento da distância à origem, os raios são separados por um ângulo constante, além do que os arcos são separados por fator de espaçamento. O delineamento sistemático em “leque” é mais apropriado para ser utilizado em culturas transplantadas, por exemplo o alface, ou então culturas de sementes grandes, como a batata ou feijão (BLEASDALE, 1967).

A Figura 2.10, mostra todos os valores, ou seja, primeira distância radial é r_0 e as demais distâncias radiais são r_n ; fator de espaçamento é α ; ângulo entre os raios é θ ; retangularidade é τ ; área associada por cada uma das plantas é A_n , em que $n = 1, 2, \dots, N$ é o número de arcos que são utilizados para construir um delineamento sistemático, L é o comprimento da parcela retangular, a é a menor distância do centro ao lado mais próximo do retângulo fechado; a largura da parcela é B e o número de plantas por unidade de área é $1/A_n$.

Figura 2.10. Delineamento sistemático em leque (adequação em uma parcela retangular) com destaque uma parte do delineamento sistemático tipo leque

Fonte: Adaptado de Nelder (1962)

A seguir é apresentado o passo a passo dos cálculos para os valores utilizados no delineamento em “leque” ampliado para preencher uma parcela retangular:

1. Primeiramente calcula-se o fator de espaçamento α :

$$\log \alpha = \frac{\log A_n - \log A}{2N - 2}, \quad (2.1)$$

em que, α é o fator de espaçamento; A_n é a área máxima por planta; A é a área mínima por planta; N é o número de arcos (densidades) que serão usados; $N+1$ representa a bordadura (último arco).

2. O cálculo do ângulo θ entre os raios, é dado por:

$$\theta = \tau(\alpha - 1)\sqrt{\alpha}, \quad (2.2)$$

em que τ em u.a é a retangularidade do arranjo das plantas.

3. Os espaçamentos das plantas por toda a extensão dos raios é calculado da seguinte forma:

Distância da primeira planta, a qual é medida a contar do centro do experimento,

$$r_0 = \sqrt{\frac{2A}{\theta(\alpha^3 - \alpha)}}. \quad (2.3)$$

Distância das demais plantas, $r_1, r_2, \dots, r_n$, as quais são medidas em relação ao centro,

$$r_n = r_0 \alpha^n, \quad (2.4)$$

em que $n = 1, 2, \dots, N$ é o número de arcos.

4. Comprimento da parcela retangular,

$$L = 2 r_{N+1} \text{ sen}(x), \quad (2.5)$$

em que x é o ângulo do meio do leque.

5. O cálculo da menor distância do centro ao lado mais próximo do retângulo fechado,

$$a = r_0 \cos(x). \quad (2.6)$$

6. A largura da parcela é calculada por,

$$B = r_{N+1} - a. \quad (2.7)$$

Considerando M o ponto que cruza o raio central com a linha base e M_1 o ponto que cruza o raio seguinte e assim por diante com cada um dos próximos, as distâncias são calculadas da seguinte forma,

$$\begin{aligned}
MM_1 &= atg(\theta) \\
MM_2 &= atg(2\theta) \\
&\vdots \\
MM_n &= atg(n\theta)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

No entanto, a distância do ponto M aos outros raios deve ser menor que a metade do comprimento da parcela, ou seja, menor que $B/2$.

7. Área por planta relacionada a cada arco, é dada pela expressão,

$$A_r = \frac{r_n^2 \theta (\alpha^2 - 1)}{2\alpha}, \tag{2.9}$$

em que r varia de r_0 a r_n .

8. Cálculo do número de plantas por unidade de área é dado por $\frac{1}{A_n}$, em que A_n é obtido no passo anterior.

2.3.2 Delineamento sistemático em “linhas paralelas”

A seguir é apresentado o passo a passo dos cálculos para os valores utilizados no delineamento em “linhas paralelas”:

1. A constante da série de espaçamento é semelhante ao delineamento anterior α :

$$\log \alpha = \frac{\log A_n - \log A}{2N - 2}, \quad (2.10)$$

em que, α é o fator de espaçamento; N é o número de linhas no plantio, A_1 a A_n são as áreas por planta na linha.

2. Distância da primeira linha do plantio a um ponto de origem arbitrária:

$$x_0 = \frac{\sqrt{\tau}}{(\alpha \log_e \alpha) \sqrt{\rho_1}} \quad e \quad x_n + 1 = \alpha x_n \quad (2.11)$$

em que, ρ_1 a ρ_n são as densidades das plantas na linha.

3. Número de plantas por unidade de comprimento da linha n :

$$U_n = \frac{\sqrt{\rho_1 \tau}}{\alpha^{n-1}} \quad (2.12)$$

4. Área por planta, na linha n :

$$A_n = \frac{\alpha^{(2n-2)}}{\rho_1} \quad (2.13)$$

5. Cálculo do número de plantas por unidade de área é $\frac{1}{A_n}$, em que A_n é obtido no passo anterior.

Delineamento Sistemático em “Linhas Paralelas” é útil em culturas de espaçamentos largos, sendo mais fácil sua esquematização e os cálculos se comparado ao delineamento sistemático em “leque”. Para se obter os dados, cada linha é colhida separadamente no plantio (BLEASADE, 1967).

Em ambos os delineamentos sistemáticos, a qualidade do ajuste da relação entre o peso médio da planta e a densidade em um experimento é dado pela expressão,

$$w^{-\theta} = \alpha + \beta \rho, \quad (2.14)$$

em que, w é o peso médio por planta, ρ é a densidade da planta e θ , α , β são constantes (parâmetros) para um conjunto de dados, onde a densidade é variável.

2.4 Delineamentos Sistemáticos Para Ensaios de Espaçamento

Nelder (1962) desenvolveu cinco diferentes tipos de delineamentos em “leque” para experimentos de espaçamento, onde eles foram esquematizados por intersecções de ajustes de linhas paralelas ou concorrentes ou arcos de círculos concêntricos, sendo que destes cinco, quatro tipos são fundamentados em uma representação de coordenadas polares, completado de raios (Figura 2.11) e arcos circulares (Figura 2.12) e por último, o quinto delineamento segue um esquema retangular (Figura 2.13).

Os delineamentos sistemáticos para experimentos de espaçamento seguem três propriedades: a grade das plantas segue um formato retangular, onde as plantas têm vizinhas próximas; os conjuntos de curvas que definem a grade podem ser linhas retas ou arcos de círculos concêntricos; a densidade, número de plantas em uma determinada área, e as retangularidades, espaçamento entre linhas sobre espaçamentos na linha, variam dentro da malha de pontos para se obter um número maior de combinações (NELDER, 1962). Cada um desses pontos da malha é interpretado como sendo uma observação do experimento (ODA, 2005).

2.4.1 Tipos de delineamentos sistemáticos para ensaios de espaçamentos

Delineamento (Ia): O arranjo das observações no campo é constante (retangularidade constante), e a área de cada uma das observações aumenta com o raio r .

Delineamento (Ib): A área das observações é constante, além do que, a retangularidade varia conforme há alteração no raio r .

Figura 2.11. (a) Delineamento (Ia); (b) Delineamento (Ib)

Fonte: Adaptado de Nelder (1962)

Delineamento (Ic): Há mudança da retangularidade com o raio r mas a densidade será constante por toda extensão das linhas perpendiculares à linha da base.

Delineamento (Id): Há mudança na densidade com o raio r e a retangularidade é mantida constante nas linhas perpendiculares à linha da base.

Figura 2.12. (c) Delineamento (Ic); (d) Delineamento (Id)

Fonte: Adaptado de Nelder (1962)

Delineamento (II): A densidade das plantas e a retangularidade diferem sistematicamente.

Figura 2.13. (a) Delineamento (II)

Fonte: Adaptado de Nelder (1962)

3 APLICAÇÕES DE ESTUDOS COM DELINEAMENTO SISTEMÁTICO

3.1 Aplicação 1

Em uma experiência estudada por Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005) com *Douglas-fir* (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), foi realizado um estudo para avaliar o efeito do crescimento da espécie em diferentes densidades de plantio (Figura 3.1), na propriedade de Cooldurragha, *Ballyhoura Forest* – Irlanda em 2003, aos 40 anos de idade. Os detalhes dos desenhos são apresentados na Tabela 3.1

Figura 3.1. *Douglas-fir* (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco) em desenho de Nelder Ia em *Ballyhoura Forest*

Fonte: Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005)

Tabela 3.1. Características dos experimentos de desenhos Nelder tipos Ia e Ib

Característica	Desenho Ia	Desenho Ib
Área máxima por árvore (m ²)	24.5	9.3
Área mínima por árvore (m ²)	0.4	9.3
Retangularidade(comprimento / largura)	1.0	1.0 - 3.9
Número total de arcos	19	14
Ângulo entre os raios (graus)	7.51	7.55
Número total de raios	13	12
Distância (m) da origem ao primeiro arco	4.07	19.84
Distância (m) da origem ao arco externo	43.04	47.19
Área do quadrante (hectare)	0.15	0.16
Classe de rendimento (m ³ /hectare/ano)	14-20	20

Fonte: Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005)

Esse tipo de avaliação de crescimento ao longo das densidades em modelos de blocos completos aleatorizados, possuía áreas com grandes hectares, pois necessitavam de repetições e instalações de bordaduras para que o efeito dos tratamentos vizinhos não provocasse influência, possuindo assim uma grande extensão de terra, dificultando a manutenção e avaliação do mesmo. Nas Figura 3.2 e Figura 3.3 encontram-se as fotografias dos experimentos tipo Ia e tipo Ib, respectivamente.

Figura 3.2. Fotografia do desenho Ia, em um ângulo tomado de frente para o centro, apresentando o aumento de crescimento do centro para fora

Fonte: Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005)

Figura 3.3. Fotografia do desenho Ib, em um ângulo tomado de frente para o centro, demonstrando que na retangularidade maior, as árvores se tornam predominantes

Fonte: Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005)

A partir dos dados obtidos, foi possível realizar a análise de regressão, os principais resultados estão expressos na Tabela 3.2 e com isso pode-se afirmar que houve efeito significativo nas características avaliadas, demonstrando assim que o aumento da densidade do experimento influencia no crescimento das plantas.

Este experimento demonstrou objetivos claros para tomadas de decisões sobre a cultura final desta espécie, como por exemplo em relação a DAP, altura, volume entre outras características. Porém existem considerações que foram tomadas ao final, são elas, os locais devem ser muito bem escolhidos para se ter a melhor uniformidade, garantindo assim precisão de resultados, bem como preparação dos solos e da drenagem. Após esta experiência, agricultores locais plantaram uma grande variedade de espécies, para observar respostas mais exatas e precisas. Apesar dos desenhos de Nelder apresentarem estatísticas menos rigorosas, pode-se afirmar que estes experimentos são muito eficazes para compreender a resposta que o crescimento de uma espécie apresenta ao longo de diferentes densidades. As facilidades que estes apresentam, são muito benéficas para estudos florestais.

Tabela 3.2. Valores das variáveis de crescimento aos 40 anos em desenho Nelder Ia

Variáveis	Espaçamentos (m)										
	1.8	2.3	3.0	3.9	5.1	6.6	8.6	11.	14.4	18.9	24.5
DAP (cm)	13.4	18.2	22.0	20.2	23.1	26.7	25.7	34.4	35.5	39.3	37.8
Altura (m)	15.8	17.6	19.7	19.9	21.6	21.4	21.2	22.8	22.9	23.4	23.2
Volume da Árvore (m ³)	0.104	0.230	0.355	0.300	0.447	0.562	0.516	0.944	0.935	1.214	1.129
Diâmetro do Ramo (mm)	13.9	18.6	20.3	19.5	23.1	25.1	25.2	34.5	33.8	36.4	42.1

Fonte: Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005)

3.2 Aplicação 2

Uma pesquisa realizada por Stape e Brinkley (2010), retrataram as seguintes problematizações para encontrar o espaçamento mais adequado entre as plantas, nas quais empregaram-se os delineamentos sistemáticos na área florestal. As ideias discorreram por meio de avaliações dos desenhos de Nelder (Figura 3.4), revelando se estes têm a mesma resposta dos espaçamentos de delineamentos tradicionais; se os resultados adquiridos em espaçamentos maiores são satisfatórios; e por último determinaram as consequências do emprego dos desenhos de Nelder em estudos de espaçamentos de produção agroecológica.

Figura 3.4. Representação gráfica do desenho de Nelder

Fonte: Stape e Brinkley (2010)

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado uma área de pesquisa na fazenda Ibiti da *Conpacel Company* (anteriormente Pastas e Papel Ripasa) localizada em Itararé, São Paulo. A primeira questão foi esclarecida por meio de uma comparação com um experimento com a idade de 10 anos em bloco replicado. As sementes foram arranjadas por uma polinização aberta na Austrália e após a realização pode-se constatar que ambas as abordagens obtiveram espaçamentos muito semelhantes, mas o experimento com desenho de Nelder obteve superioridade no volume de árvores por amostra individual. Para o entendimento do segundo e terceiro questionamento foi empregado um experimento clássico com dois clones da espécie de *Eucalyptus saligna*.

A resposta mais favorável para relação entre espaçamento e volume e a relação entre espaçamento e crescimento foi a que utilizou o desenho de Nelder, pois houve uma gama de espaçamento maior e no experimento com os dois clones não foi possível identificar vantagens no uso deste. Já para o estudo de aplicações na produção agroecológica foi verificada uma superioridade nos desenhos de Nelder, pois estes conseguiram identificar com precisão o crescimento nos espaçamentos maiores e analisando o design clássico, este não teve o mesmo rigor para afirmar sobre o aumento do crescimento a medida em que se expandem os espaçamentos ao longo do plantio.

Os autores afirmaram que os experimentos de Nelder utilizam uma menor área experimental, além do que se obteve mais clareza para afirmar respostas de crescimento ao longo do aumento do espaçamento. Os projetos de Nelder podem ser fundamentais na redução de gastos, já que estes ocupam metade da área de um experimento clássico, além do que, apresentaram grande utilidade se usados em áreas novas de plantio, novos genótipos e gerenciamento de novos experimentos, podendo apresentar grandes

informações em silvicultura. Assim estes desenhos apresentam um claro benefício quando comparado aos desenhos clássicos. Stape e Brinkley (2010) acreditam que o *design* de bloco clássico só deve ser aplicado quando existir um conhecimento prévio que possibilite afirmar que o mesmo é mais benéfico que os desenhos mais econômicos e acessíveis, como os de Nelder. A Figura 3.5 mostra uma fotografia do design de Nelder em uma área de plantio.

Figura 3.5. Fotografia do desenho de Nelder com 36 raios e 12 arcos, aos 10 meses de plantio. Os dois círculos interiores e o círculo mais externo, foram utilizados como bordaduras

Fonte: Stape e Brinkley (2010)

3.3 Aplicação 3

O estudo de Moraes et al. (2013) envolveu a espécie *Jacaranda cuspidilifolia*, pertencente à família *Bignoniaceae*, uma árvore que apresenta de 5 a 10 m de altura e seu tronco tem de 30 a 40 cm de diâmetro, com uma propagação em formações secundárias do Triângulo Mineiro e também ocorre no noroeste do estado de São Paulo.

A escolha do espaçamento para o plantio dessa espécie é fundamental, já que uma das grandes finalidades é o uso no paisagismo, logo é de suma importância que se faça a escolha correta do espaçamento, pois se isso não ocorrer poderá prejudicar o desenvolvimento e o rendimento do plantio. Para que o experimento fosse realizado, foram utilizadas sementes de 30 árvores de uma população proveniente de *Jacaranda cuspidilifolia*, a qual estava localizada no município de Ilha Solteira, no interior de São Paulo e a coleta foi realizada no mês de julho de 2006. O objetivo era calcular o crescimento da variação genética *Jacaranda cuspidilifolia* em espaçamentos diferentes.

O experimento foi realizado com árvores (matrizes), que foram escolhidas de forma inteiramente casualizada. Um teste de progênies na FEPE (Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão), pertencente à FEIS/UNESP, em Selvíria/MS foi introduzido na data de 6 de novembro de 2006, seguindo o delineamento sistemático tipo “leque” (Tipo Ia), proposto por Nelder (1962). Os testes de progênies visam a conservação genética das populações; a determinação da estrutura genética e do valor genotípico das matrizes selecionadas nestas populações e estimação de parâmetros genéticos; produção de sementes melhoradas e geração de indivíduos para a seleção recorrente. É escasso o número de trabalhos que utilizam delineamentos sistemáticos em espécies arbóreas nativas, por isso o trabalho utiliza a variação genética *Jacaranda cuspidilifolia* para avaliar o desenvolvimento em diferentes espaçamentos.

Foram utilizadas 30 progênies, ordenadas em um sistema de 30 raios concêntricos, uma progênie por raio de forma aleatória. Definido por meio de faixas comerciais para *Jacaranda cuspidilifolia* as possíveis combinações entre os valores foram: primeira distância radial, $r_0 = 5,76$ m; fator do espaçamento $\alpha = 1,21$; ângulo entre os raios $\theta = 12^\circ$ ou 0,2094 rd e área associada por cada planta, A_n resultou em nove espaçamentos, entre 1,95 m² e 41,19 m². Os caracteres silviculturais foram analisados aos 12 e 24 meses, os quais foram, altura total das plantas (ALT, m), diâmetro a altura de 30 cm do solo (DAP, m), e sobrevivência das plantas (SOB, %).

Para realizar a análise de variância e estimarem os parâmetros genéticos, deve-se considerar que o teste de progênies utilizou uma área de 5.972 m², sendo que 270 m² (4,5 %) era de bordadura do experimento. Apareceram diferenças significativas entre todos os caracteres silviculturais das progênies de *Jacaranda cuspidilifolia*, exceto para o caractere de sobrevivência. Com isso, há uma variação genética dentro dessa população para os caracteres que foram avaliados na análise, e assim eles podem ser pesquisados em programas de conservação e também de melhoramento genético.

Os resultados das progênies nas condições locais do experimento, foram uma alta taxa de sobrevivência, na qual houve uma variação de 95,5% a 94,1% (os dados são aos 12 e aos 24 meses de idade respectivamente). Esses resultados foram comparados com um trabalho de espécies nativas do cerrado, o qual tinha como objetivo recuperar uma área totalmente degradada localizada em Selvíria-MS, segundo (Aguiar et. al, 1999), a espécie *Jacaranda cuspidilifolia*, foi a que obteve uma maior taxa de sobrevivência.

Houve um aumento na altura das plantas, que aos 12 meses apresentavam 1,26 m e aos 24 meses atingiram 3,24 m, e para o caractere DAP, houve variação de 2,87 cm para 4,92 cm, aos 12 e 24 meses respectivamente, assim essa espécie *Jacaranda cuspidilifolia* teve um desenvolvimento muito bom nessa região de plantio.

Concluiu-se que o delineamento sistemático tipo “leque” é de grande utilidade para estudar a variação genética e reconhecer o melhor espaçamento para se realizar um experimento dessa progênie, e

por se tratar de uma área extensa é inviável trabalhar com delineamentos aleatórios tradicionais. Se utilizasse este último delineamento, poderia chegar nas mesmas conclusões, ou não, já que a área experimental aumentaria muito e poderiam surgir dificuldades para se trabalhar, os espaçamentos poderiam ser reduzidos, e o valor que foi encontrado nos delineamentos sistemáticos poderia ser diferente do delineamento aleatório tradicional.

Portanto, o espaçamento 3 x 3 m foi o que obteve os melhores resultados nos caracteres avaliados e o melhor caractere para um melhoramento genético é a altura, além do que a sobrevivência da espécie *Jacaranda cuspidifolia* foi muito alta, tendo uma variação de 94 % a 98 %, o que indica uma boa adaptação das progênies para as reais condições do experimento. Com isso, esse plantio possibilitou o melhor desempenho em altura, DAP e também sobrevivência. Finalizando, é indicado utilizar essa espécie de progênies de *Jacaranda cuspidifolia* para coleta de sementes com o propósito de conservação genética *ex situ* no local.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Localização do experimento

O experimento consistiu no estudo do espaçamento de *Eucalyptus dunnii* em delineamento sistemático tipo “leque” e foi instalado em março de 1988 na fazenda Ibiti, de propriedade da Ripasa S/A Celulose e Papel, no estado de São Paulo, (Figura 4.1). Os dados utilizados neste trabalho são provenientes da dissertação de mestrado do Professor Dr. José Luiz Stape no ano de 1995. As coordenadas geográficas locais são de 24° 11' S de latitude, 49° 08' W de longitude e 980 metros de altitude, sendo um local de relevo pleno, em áreas contíguas.

Figura 4.1. Imagem aérea dos experimentos com *Eucalyptus dunnii* aos 3 meses de idade, à direita encontra-se o delineamento sistemático tipo “leque” e à esquerda o delineamento casualizado

Fonte: Stape (1995)

4.2 Método

4.2.1 Caracterização e instalação do experimento

A instalação do experimento foi em delineamento sistemático tipo “leque”, apresentado na Tabela 4.1 conforme a caracterização do modelo de Nelder (Ia) e foram obtidos os seguintes valores dentro de faixas comerciais de espaçamento da espécie *Eucalyptus dunnii*, $r_0 = 5,30\text{m}$; $\alpha = 1,21$; $\theta = 10^\circ$ (0,17453 rd) e a retangularidade $\tau = 0,9$.

4.2.2 Avaliações dendrométricas

As avaliações dendrométricas das plantas ocorreram aos 26, 42, 48, 60 e 71 meses de idade, as quais foram colhidas informações do DAP e da altura total das árvores úteis. Neste trabalho os dados utilizados são referentes a amostra da idade comercial de corte da espécie *Eucalyptus dunnii*, aos 6 anos - 71 meses de idade e foram colhidos na mesma sequência de caminhamento dentro das parcelas experimentais, além do que registrou-se as ocorrências de falhas, mortalidades e bifurcações. Pode-se

Tabela 4.1. Valores da distância radial, área por planta e densidade de plantas para 10 tratamentos (espaçamentos) no delineamento sistemático tipo “leque”

Tratamento	Distância Radial (m)	Área (m ² /planta)	Densidade (plantas/ha)
1	6,42	1,40	7143
2	7,78	2,05	4878
3	9,42	3,01	3322
4	11,41	4,41	2268
5	13,82	6,47	1546
6	16,74	9,50	1053
7	20,27	13,93	718
8	24,55	20,43	489
9	29,73	29,97	334
10	36,00	43,95	228

Fonte: Stape (1995)

obter volumes sólidos por planta, com casca e foram abatidas aos 6 anos. Estas árvores foram cubicadas de metro em metro, da base do corte até o diâmetro mínimo de 6 cm, tendo o volume de cada seção pela Equação 4.1 e o volume do ponteiro como se fosse um cone. Com isso, realizou-se um ajuste nas equações volumétricas, onde o volume individual é a variável dependente, DAP e altura total são as variáveis independentes do modelo de equação volumétrica descrito por Stape (1995), dado por:

$$V = \exp[-10,257052 + 0,9964961 \times \ln(DAP^2 \times H)], \quad (4.1)$$

em que,

- i) V é o volume individual da árvore (m³),
- ii) DAP é o diâmetro à altura do peito (cm),
- iii) H é a altura total da árvore (m).

4.2.3 Falhas e bifurcações

Falha de plantio é a inexistência da árvore na primeira avaliação realizada e mortalidade é considerada cada futura falha ocorrida ao longo do crescimento e na Tabela 4.2 pode-se observar as plantas que apresentaram falha ou morte e considera-se que neste experimento foi necessário o rearranjo do número de repetições em função das falhas e bifurcações ocorridas.

Tabela 4.2. Número do raio da planta correspondente a morte ou falha no experimento do delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos

Tratamento	Nº do raio
1	6
3	11
4	3
6	22
9	36
Total	5

Fonte: Stape (1995)

Devido às falhas e às mortalidades de algumas árvores, as plantas vizinhas apresentaram uma área disponível de crescimento diferente daquela proposta no início do experimento (Nelder, 1962), mas como estas ocorrências foram poucas e aleatórias dentro do experimento, optou-se por eliminar todas as plantas vizinhas daquelas que apresentaram falha ou morte, como sugerido por Gomez, Dedatta (1972). Com isso, não foi necessário uma correção dos valores obtidos por meio da análise de covariância; o mesmo ocorreu com as árvores bifurcadas, excluindo-as da análise. Para padronizar 30 árvores por tratamento,

foi realizado a exclusão de diferentes números de árvores por tratamento, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Número dos raios das plantas que foram retirados da análise correspondente à falha ou morte e suas vizinhas, à bifurcação e a exclusão de árvores para padronizar o experimento com 30 árvores por tratamento no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos

Tratamento	Falhas/Mortes	Bifurcadas	Exclusão
1	5-6-7		11-21-28
2	6-11		12-14-20-24
3	3-10-11-12		18-25
4	2-3-4-11		29-36
5	3-22		1-10-12-19
6	21-22-23		6-12-34
7	22		5-11-23-31-33
8	36	17-18-23-25	8
9	1-35-36	16	14-27
10	36	10-19	4-7-24

Fonte: Stape (1995)

As falhas, mortes e bifurcações não ocorreram de forma idêntica ao longo de todo o experimento, com isso seguiu-se um padrão para o número total de plantas por tratamento, tomando como referência a mais crítica, perda de 5 plantas no tratamento 8, ficando com 31 plantas por tratamento, das 36 originais. Assim, houve um rearranjo de uma forma bem próxima à proposta original, no início eram 6 repetições por tratamento, com parcelas de 6 plantas, rearranjadas em 5 repetições por tratamento e parcelas de 6 plantas, totalizando 30 plantas por tratamento, conforme pode ser visto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Número dos raios das plantas que constitui as 5 repetições de cada um dos tratamentos no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos

Tratamento	Repetição				
	1	2	3	4	5
1	1-2-3-4-8-9	10-12-13-14-15-16	17-18-19-20-22-23	24-25-26-27-29-30	31-32-33-34-35-36
2	1-2-3-4-5-7	8-9-10-13-15-16	17-18-19-21-22-23	24-26-27-28-29-30	31-32-33-34-35-36
3	1-2-4-5-6-7	8-9-13-14-15-16	17-19-20-21-22-23	24-26-27-28-29-30	31-32-33-34-35-36
4	1-5-6-7-8-9	10-12-13-14-15-16	17-18-19-20-21-22	23-24-25-26-27-28	30-31-32-33-34-35
5	2-4-5-6-7-8	9-11-13-14-15-16	17-18-20-21-23-24	25-26-27-28-29-30	31-32-33-34-35-36
6	1-2-3-4-5-7	8-9-10-11-13-14	15-16-17-18-19-20	24-25-26-27-28-29	30-31-32-33-35-36
6	1-2-3-4-6-7	8-9-10-12-13-14	15-16-17-18-19-20	21-24-25-26-27-28	29-30-32-34-35-36
7	1-2-3-4-5-6	7-9-10-11-12-13	14-15-16-19-20-21	22-24-26-27-28-29	30-31-32-33-34-35
8	2-3-4-5-6-7	8-9-10-11-12-13	15-17-18-19-20-21	22-23-24-25-26-28	29-30-31-32-33-34
9	2-3-4-5-6-7	8-9-10-11-12-13	15-17-18-19-20-21	22-23-24-25-26-28	29-30-31-32-33-34
10	1-2-3-5-6-8	9-11-12-13-14-15	16-17-18-20-21-22	23-25-26-27-28-29	30-31-32-33-34-35

Fonte: Stape (1995)

4.2.4 Análise dos dados obtido do delineamento sistemático tipo “leque”

De acordo com Mead (1988), este tipo de delineamento não pode ser analisado como um delineamento aleatório, já que não há casualização dos tratamentos, não existem bordaduras entre os tratamentos, além do que os fatores de expansão por hectare (k) são extremamente variáveis. Entretanto, é recomendado o uso da análise de regressão, pois os fatores quantitativos crescentes estão colocados em ordem sistemática, contudo antes de realizar a análise de regressão é necessário observar graficamente o comportamento das variáveis em estudo nos espaçamentos estudados, para que seja possível identificar se há algum comportamento anormal das variáveis (NELDER, 1962).

Deste modo, analisa os gráficos de crescimento das variáveis em estudos nos diferentes espaçamentos e realiza a análise de regressão nos dados do experimento da espécie *Eucalyptus dunnii* aos 6 anos de idade.

O modelo da análise de regressão é:

$$y_{ij} = b_0 + b_1.E_i + e_{ij}, \quad (4.2)$$

em que,

- i) y_i é o valor observado no espaçamento i e repetição j ;
- ii) b_0, b_1 são os parâmetros do modelo;
- iii) E_i é o efeito do espaçamento de plantio i (m^2 /planta);
- iv) e_{ij} é o erro experimental associado à observação y_{ij} .

Na Tabela 4.5, encontra-se o esquema da análise de variância para a regressão linear, na qual é possível observar as significâncias das regressões ajustadas no delineamento sistemático.

Tabela 4.5. Esquema da análise de variância da regressão linear para efeito de espaçamento no experimento com delineamento sistemático tipo “leque”

Causa de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Teste F
Efeito Linear	1	SQRL	QMRL	QMRL/QMR
Resíduo	(n-2)	SQR	QMR	
Total	(n-1)			

em que,

- i) SQRL é a soma de quadrados do efeito linear;
- ii) SQR é a soma de quadrados do resíduo;
- iii) QMRL é o quadrado médio do efeito linear;
- iv) QMR é o quadrado médio do resíduo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área ocupada pelo experimento foi de 5972m², tendo uma área útil de 4869 m² (82 %) e 1103 m² (18 %) de bordadura, que apresentou somente 5 falhas/mortes em todo o experimento, expressando uma ótima conservação, 99 % de sobrevivência. Stape (1995), em seu trabalho avaliou o crescimento aos 26, 42, 48, 60 e 71 meses, por meio das variáveis DAP, altura total e o volume individual (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Valores médios da altura (m), DAP (cm) e volume individual (dm³/árvore) para os 10 tratamentos no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Tratamento (m ² /planta)	Altura (m)	DAP (cm)	Volume (dm ³ /árvore)
1 - 1.40	13.63	7.41	0.039
2 - 2.05	16.44	9.14	0.059
3 - 3.01	17.04	10.02	0.070
4 - 4.41	19.87	12.92	0.1222
5 - 6.47	20.46	14.62	0.1610
6 - 9.50	21.34	17.39	0.2348
7 - 13.93	21.82	19.39	0.2939
8 - 20.43	22.18	22.74	0.4108
9 - 29.97	22.42	24.64	0.4720
10 - 43.95	21.20	25.66	0.5104

Fonte: Stape (1995)

Dando continuidade neste trabalho de Stape (1995), realiza o estudo com os dados aos 6 anos - 71 meses, idade de corte para a exploração da espécie, tendo como objetivo avaliar o comportamento das variáveis, altura total, DAP e volume individual da espécie *Eucalyptus dunnii* em diferentes espaçamentos, ou seja, diferentes tratamentos e com isso obter uma avaliação mais precisa do crescimento da espécie na idade de corte.

Figura 5.1. Altura média (m) aos 6 anos de idade do *Eucalyptus dunnii* em delineamento sistemático tipo “leque”

Figura 5.2. DAP médio (cm) aos 6 anos de idade do *Eucalyptus dunnii* em delineamento sistemático tipo “leque”

Figura 5.3. Volume médio (dm³/planta) aos 6 anos de idade do *Eucalyptus dunnii* em delineamento sistemático tipo “leque”

Analisando os gráficos obtidos pelo estudo do espaçamento em cada uma das variáveis, altura (Figura 5.1), DAP (Figura 5.2) e volume individual (Figura 5.3), pode-se afirmar que ao longo do espaçamento houve uma tendência de aumento nos valores médios das variáveis analisadas.

De fato, delineamento sistemático tipo “leque” tem a capacidade em criar gradientes de espaçamentos para realizar estudos de crescimento florestal, como afirmou Namkoong (1966). Além disso, o progresso e a produtividade do plantio podem ser avaliados através de espaçamentos em uma região florestal por meio de ensaios com delineamentos sistemáticos, indicando ótimos resultados com alta economia na pesquisa (SKYLE, 1964).

5.1 Análise de Regressão Linear

Após a observação do crescimento da espécie *Eucalyptus dunnii* por meio dos gráficos, Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3, foram realizadas as análises de regressões para alguns intervalos de espaçamento no experimento, os quais foram estabelecidos após algumas tentativas entre dois a quatro intervalos de espaçamentos consecutivos no campo, realizando a análise de regressão nos seguintes intervalos de tratamentos, 1-2-3, 2-3-4, 4-5-6, 5-6-7, 7-8-9 e 8-9-10, conforme a Tabela 4.5.

Considerando os resultados obtidos na análise de regressão linear por meio do *software SAS* em diferentes espaçamentos, ou seja, comparando os tratamentos com menores grau de espaçamentos, bem como aqueles de maiores grau de espaçamento. As Tabelas 5.2 a 5.7 apresentam as informações da análise de regressão, teste F, quadrado médio do resíduo com 106 graus de liberdade, estimativas dos parâmetros b_0 e b_1 e coeficiente de determinação R^2 com 95 % de confiança, para três variáveis em estudo, altura (m), DAP (cm) e volume individual ($\text{dm}^3/\text{árvore}$) aos 6 anos, em alguns intervalos de espaçamentos.

Tabela 5.2. Primeiro intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 1-2-3 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Altura (m)	DAP (cm)	Volume ($\text{dm}^3/\text{árvore}$)
F = 15.46	F = 15.83	F = 15.73
$\text{valor}-p = 0.0002$	$\text{valor}-p = 0.0001$	$\text{valor}-p = 0.0001$
QMR = 349016	QMR = 10.28	QMR = 0.037
$b_0 = 92.74$	$b_0 = 5.67$	$b_0 = -1.70$
$b_1 = 2.15$	$b_1 = 0.11$	$b_1 = 0.007$
$R^2 = 12.73 \%$	$R^2 = 12.99 \%$	$R^2 = 12.92 \%$

Tabela 5.3. Segundo intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 2-3-4 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Altura (m)	DAP (cm)	Volume ($\text{dm}^3/\text{árvore}$)
F = 24.39	F = 22.58	F = 22.76
$\text{valor}-p < 0.0001$	$\text{valor}-p < 0.0001$	$\text{valor}-p < 0.0001$
QMR = 7809.07	QMR = 93.2	QMR = 0.03
$b_0 = 2852.22$	$b_0 = 31.40$	$b_0 = -1.30$
$b_1 = -40.42$	$b_1 = -0.42$	$b_1 = -0.008$
$R^2 = 18.70 \%$	$R^2 = 17.56 \%$	$R^2 = 17.68 \%$

Tabela 5.4. Terceiro intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 4-5-6 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Altura (m)	DAP (cm)	Volume (dm ³ /árvore)
F = 41.46	F = 31.21	F = 32.69
$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$
QMR = 617659	QMR = 2.60	QMR = 0.03
$b_0 = 3867.23$	$b_0 = 10.30$	$b_0 = -1.006$
$b_1 = -46.88$	$b_1 = -0.08$	$b_1 = -0.01$
$R^2 = 28.12 \%$	$R^2 = 22.75 \%$	$R^2 = 23.57 \%$

Tabela 5.5. Quarto intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 5-6-7 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Altura (m)	DAP (cm)	Volume (dm ³ /árvore)
F = 30.11	F = 22.74	F = 24.88
$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$
QMR = 695842	QMR = 11.93	QMR = 0.04
$b_0 = 4060.72$	$b_0 = 19.02$	$b_0 = -0.88$
$b_1 = -4239.62$	$b_1 = -0.16$	$b_1 = -0.01$
$R^2 = 22.12 \%$	$R^2 = 18.30 \%$	$R^2 = 19.01 \%$

Tabela 5.6. Quinto intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 7-8-9 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Altura (m)	DAP (cm)	Volume (dm ³ /árvore)
F = 34.79	F = 27.00	F = 29.04
$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$
QMR = 796819	QMR = 5468.40	QMR = 0.02
$b_0 = 4633.73$	$b_0 = 320.32$	$b_0 = -0.49$
$b_1 = -48.78$	$b_1 = -3.56$	$b_1 = -0.006$
$R^2 = 24.71 \%$	$R^2 = 20.30 \%$	$R^2 = 21.50 \%$

Tabela 5.7. Sexto intervalo de espaçamento, ou seja os tratamentos 8-9-10 no delineamento sistemático tipo “leque”, aos 6 anos de idade

Altura (m)	DAP (cm)	Volume (dm ³ /árvore)
F = 29.32	F = 24.51	F = 26.73
$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$	$valor-p < 0.0001$
QMR = 1074554	QMR = 31449	QMR = 0.022
$b_0 = 4659.63$	$b_0 = 751.94$	$b_0 = -0.41$
$b_1 = -51.99$	$b_1 = -8.13$	$b_1 = -0.007$
$R^2 = 21.67 \%$	$R^2 = 18.78 \%$	$R^2 = 20.14 \%$

Os valores obtidos em cada uma das tabelas da análise de regressão dos espaçamentos estudados apresentam um efeito linear significativo, porém em todas foi aplicada uma transformação nos dados Box Cox ($\lambda=2$) para que isso pudesse ocorrer. Para a escolha do melhor intervalo de tratamento foi considerado o menor valor do quadrado médio dos resíduos (QMR) e os maiores valores do teste F e do coeficiente de determinação.

Comparando intervalos próximos, percebe-se que ao analisarmos o primeiro intervalo (Tabela 5.2), com o segundo intervalo (Tabela 5.3), este último apresenta um valor maior no modelo ajustado e no valor do teste F e um valor menor para QMR do que o primeiro intervalo; o mesmo ocorre quando observa-se o último intervalo (Tabela 5.7), esse apresenta um valor menor no modelo ajustado e no valor

de F e um maior valor para QMR, quando comparado ao quinto intervalo (Tabela 5.6). Nos intervalos com espaçamentos intermediários pode-se notar que o intervalo com os tratamentos 4-5-6 (Tabela 5.4), teve um melhor valor no modelo ajustado e no valor de F e um baixo valor da QMR quando comparado ao intervalo 5-6-7 (Tabela 5.5). Assim sendo, os intervalos que contém a bordadura interna ou externa não apresentam os melhores resultados e os intervalos intermediários são mais eficazes.

Dessa forma, o aumento nos espaçamentos de plantio, resultou em melhores resultados na análise de regressão, se equiparado aos espaçamentos menores, mas ainda assim o terceiro intervalo de espaçamento mostrou os melhores resultados, ou seja, 4-5-6. Conforme a Tabela 5.4, o melhor ajuste de modelo, o maior valor de F e o menor valor para o quadrado médio dos resíduos, evidenciando que o intervalo de tratamentos 4-5-6 favorece o melhor progresso em altura total, DAP e volume individual para a espécie *Eucalyptus dunnii*.

De acordo com a pesquisa de Redmond, Gallagher e Siúrtáin (2005), é possível compreender a eficácia do crescimento da espécie estudada em relação as variáveis analisadas, conseguindo compreender como estas se comportam em relação às diferentes densidades no experimento, por meio de análise da regressão. Com isso conseguiram implementar estudos, nos quais constataram as vantagens da utilização de delineamentos sistemáticos para experiências florestais.

Além disso Stape (1995), em seu estudo inicial com *Eucalyptus dunnii* em delineamento sistemático tipo “leque”, afirmou que esse delineamento apresentou um ótimo progresso quando comparado aos trabalhos realizados com esta mesma espécie, porém com outros tipos de delineamentos. De fato, o uso do delineamento sistemático não deve ser apenas visto na forma rigorosa da análise estatística, mas deve também verificar a importância que este delineamento tem na área agronômica, tendo o devido cuidado com suas limitações estatísticas, sabendo extrair o máximo proveito deste delineamento (MEAD, 1988).

Concluindo a ideia inicial estudada por Bleasdale (1960), os delineamentos sistemáticos são úteis para respostas às variáveis ao longo do aumento da densidade em campo, pois apresentam melhores resultados para espaçamentos de culturas e determina melhorias na prática dos plantios, além da vantagem de avaliação em área reduzida de plantio. Portanto, o crescimento e aperfeiçoamento de áreas florestais são determinados por um bom planejamento em campo, proporcionando alta produtividade e obtendo alto rendimento da espécie estudada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os fundamentos expostos na revisão bibliográfica, as aplicações sobre os delineamentos sistemáticos e os exemplos utilizados sobre o comportamento e a análise de dados permitiram concluir que o delineamento sistemático é uma ferramenta muito útil para realizar estudos em espaçamentos florestais e para analisar o comportamento de variáveis frente às diversas densidades em campo, trazendo ótimos benefícios para os pesquisadores, visto que apresentam iguais ou superiores vantagens quando comparados aos delineamentos clássicos, uma vez que não utiliza o princípio básico da casualização e a bordadura é reduzida significativamente, proporcionando uma redução na área experimental, beneficiando a instalação e a manutenção do campo experimental. A conclusão obtida neste trabalho para o plantio da espécie *Eucalyptus dunnii* foi determinado por meio desses dados, como sugestão para trabalhos futuros é recomendado utilizar outros experimentos com delineamento sistemático para estudo de espaçamento de *Eucalyptus dunnii* e também, utilizar simulação de dados para verificar se existe alguma resposta mais precisa para obter-se o melhor espaçamento para a espécie. No decorrer do trabalho notou-se a resistência dos pesquisadores brasileiros à trabalhar com este tipo de delineamento, em contraposição aos trabalhos acadêmicos internacionais nos quais continuamente aplicam a metodologia do delineamento sistemático em diversas pesquisas. Dessa forma, a expectativa é que os pesquisadores nacionais deem mais atenção à essa metodologia de estudo, aplicando-a em seus experimentos.

REFERÊNCIAS

- AFFLECK, D. L. R., 2001 *A comparative study of spatial analysis methods for forestry Nelder Experiments*. Master's thesis, The University of British Columbia.
- AGUIAR, V. A., F. BORTOLOZO, M. L. T. MORAES, A. J. FONSECA, and J. A. C. ANDRADE, 1999 Variação genética em progênies de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Jacaranda cuspidilifolia* Mart em consórcio. *Genetics and Molecular Biology* **22**: 620.
- ALEIXO, V., 2012 *Desenvolvimento de Jatropha curcas (L.) em função da procedência, sistema de cultivo e densidade*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon.
- APHALO, J. P. and R. RIKALA, 2006 Spacing of silver birch seedlings grown in containers of equal size affects their morphology and its variability. *Tree Physiology* **26**: 1227–1237.
- BELLEY, D., 2013 Assessment of white spruce and jack pine stem curvature. *Wood and fiber science* **45**.
- BLEASADE, J., 1967 Systematic designs for spacing experiments. *Experimental Agriculture* pp. 73–85.
- BLEASADE, J. and J. NELDER, 1960 Plant population and crop yield. *Nature* p. 342.
- CHALITA, M. A. C., 1991 *Delineamentos sistemáticos*. Master's thesis, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ERKAN, N. and C. A. AYDIN, 2016 Effects of spacing on early growth rate and carbon sequestration in *Pinus brutia* Ten. plantations. *Forest Systems* **25**.
- FISHER, R., 1935 *The design of experiments*. Edinburg: Oliver and Boyd, first edition.
- FREEMAN, G. H., 1964 The use of a systematic design for a spacing trial with a tropical tree crop. *Biometrics* pp. 200–203.
- FREITAS, M. L. M., 2008 Variação genética para caracteres quantitativos em população de *Gallesia integrifolia* (Spreng) Harms. *Revista do Instituto Florestal* **20**: 165–173.
- FREYMAN, S. and D. DOLMAN, 1971 A simple systematic design of planting density experiments with set row widths. *Canadian Journal of Plant Science* pp. 340–342.
- GALINSKI, W., J. WITOWSKI, and M. ZWIENIECKI, 1994 Non-random height pattern formation in even aged scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Nelder Plots as affected by spacing and site quality. *Forestry* **67**: 49–61.
- GOMEZ, K. A. and S. K. DEDATTA, 1972 Missing hills in rice experimentation plots. *Agronomy Journal* **64**: 163–164.
- JÚNIOR, A. R., 2007 *Influência do espaçamento de plantas no crescimento, produtividade e rendimento do amendoim rasteiro, cultivar runner iac 886*. Master's thesis, Faculdade De Ciências Agrárias e Veterinárias “Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho”, Jaboticabal.
- KNOWE, S. A. and D. E. HIBBS, 1996 Stand structure and dynamics of young red alder as affected by planting density. *Florest Ecology and Management* **82**: 69–85.
- LEEUEWEN, J. V., 1994 Planejamento de ensaios com sistemas agroflorestais. *EMBRAPA* **1**: 463–473.
- MACEDO, R. L. G., J. E. GOMES, and B. SALGADO, 2005 Desenvolvimento inicial de *Tectonia grandis* L.f. (Teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. *Cerne* **11**: 61–69.

- MEAD, R., 1988 The design of experiments: statistical principles for practical application. Cambridge p. 620.
- MINAMI, K., 1977 *Análise de crescimento e densidade de população de Solanum melonngera L. - Berinjela, cultivada em delineamento sistemático e convencional*. Master's thesis, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MORAES, A. M., E. C. B. SILVA, S. M. B. MORAES, T. Y. K. KUBOTA, M. D. V. RESENDE, and M. L. T. MORAES, 2013 Variação genética em progênies de *Jacaranda cuspidifolia* Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo "leque". *Scientia Forestalis* **1**: 175–183.
- NAMKOONGL, G., 1996 Application of Nelder's designs in tree improvement research. *Proceeding* pp. 24–37.
- NELDER, J. A., 1962 New kinds of systematic designs for spacing experiments. *Biometrics* pp. 283–307.
- NEWTON, M., B. LACHENBRUCH, J. M. ROBBINS, and E. C. ELIZABETH, 2012 Branch diameter and longevity linked to plantation spacing and rectangularity in young *Douglas-fir*. *Forest Ecology and Management* **266**: 75–82.
- NEWTON, P. F., 2015 Occurrence of density-dependent height repression within jack pine and black spruce populations. *Forests* **6**: 2450–2468.
- ODA, M. L., 2005 *Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um experimento em delineamento sistemático tipo leque*. Master's thesis, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ODA, M. L., D. BARBIN, P. J. R. JÚNIOR, and J. L. STAPE, 2008 Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. *Árvore* **32**: 499–509.
- PARROTT, D. L., J. S. BRINKS, and J. M. LHOTKA, 2011 Designing Nelder wheel plots for tree density experiments. *Springer* pp. 245–254.
- RAO, M. R., M. M. SHARMA, and C. K. ONG, 1990 A study of the potencial of hedgerow intercropping in semi-arid india using a two-way systematic design. *Agroforestry Systems* **11**: 243–258.
- REDMOND, J., G. GALLAGHER, and M. M. SIÚRTÁIN, 2005 Systematic spacing trials for plantation research and demonstration. *Coford Connects* .
- RITCHIEY, G. A., 1996 Evidence for red: far red signaling and photomorphogenic growth response in *Douglas-fir* (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. *Tree Physiology* **17**: 161–168.
- SANTOS, M. D., 2011 *Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de Eucalyptus grandis e Eucalyptus urophylla*. Master's thesis, Faculdade De Ciências Agrônômicas "Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho", Botucatu.
- SEBBENN, A. M., M. L. M. FREITAS, A. C. S. ZANATTO, E. MORAES, and M. A. MORAES, 2007 Conservação *ex situ* e pomar de sementes em banco de germoplasma de *Balfourodendron riedelianum*. *Revista do Instituto Florestal* **19**: 101–112.
- SLYKE, A. L. V., 1964 Study spacing and thinning with nelder new systematic designs. *Faculty of Forestry* p. 11.

- STAPE, J. L., 1995 *Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais*. Master's thesis, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- STAPE, J. L. and D. BINKLEY, 2010 Insights from full- rotation nelder spacing trials with eucalyptus in São Paulo, Brazil. *Southern Forests* **72**: 90–97.
- TAKAHASHI, M. and N. FURUYA, 2014 How does spacing shape affect tree growth? Preliminary study of an area fixed, shape change design plot experiment. *Formath* **13**: 60–77.
- TENNENT, J. H. G., 2010 Competition quotient in young *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* **5**: 230–234.
- TEODORO, J. V., 2016 *Avaliações multivariada e geoestatística e de medidas repetidas de um experimento sob delineamento sistemático tipo "leque"*. Master's thesis, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- WRIGHT, H. L., 1976 Experiments as a source of data for growth models. *New Zealand Journal of Forestry Science* **1**: 60–73.