

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Estatística aplicada à pesquisa agrícola

2ª edição revista e ampliada

Francisco José Pfeilsticker Zimmermann

Embrapa
Brasília, DF
2014

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Arroz e Feijão
Rodovia Goiânia/Nova Veneza, no 462,
Km 12, Fazenda Capivara, Zona Rural
Caixa Postal 179
CEP 75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (62) 3533-2110
Fax: (62) 3533-2100
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo
Embrapa Arroz e Feijão

**Comitê de Publicações da
Embrapa Arroz e Feijão**

Presidente
Roselene de Queiroz Chaves

Secretário-executivo
Luiz Roberto Rocha da Silva

Membros
Camilla Souza de Oliveira
Flávia Aparecida de Alcântara
Luís Fernando Stone
Ana Lúcia Delalibera de Faria
Heloisa Célis de Paiva Breseghele
Márcia Gonzaga de Castro Oliveira
Fábio Fernandes Nolêto

Embrapa Informação Tecnológica
Parque Estação Biológica (PqEB)
Av. W3 Norte (final)
CEP 70770-901 Brasília, DF
Fone: (61) 3448-4236
Fax: (61) 3448-2494
www.embrapa.br/livraria
livraria@embrapa.br

Unidade responsável pela edição
Embrapa Informação Tecnológica

Coordenação editorial
Selma Lúcia Lira Beltrão
Lucilene Maria de Andrade
Nilda Maria da Cunha Sette

Supervisão editorial
Erika do Carmo Lima Ferreira

Revisão de texto
Jane Baptistone de Araújo

Normalização bibliográfica
Celina Tomaz de Carvalho

Ilustração da capa
Ronaldo Cordeiro

Projeto gráfico e capa
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

1ª edição

1ª impressão (2004): 1.000 exemplares

2ª edição

1ª impressão (2014): 1.000 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

Embrapa Informação Tecnológica

Zimmermann, Francisco José Pfeilsticker.
Estatística aplicada à pesquisa agrícola / Francisco José Pfeilsticker Zimmermann. – 2. ed. – Brasília, DF : Embrapa, 2014.
582 p. ; 18,5 cm x 25,5 cm.

ISBN 978-85-7035-344-3

1. Análise estatística. 2. Método estatístico. I. Embrapa Arroz e Feijão.
II. Título.

CDD 519.5

© Embrapa 2014

Apresentação

A estatística experimental oferece uma ampla gama de ferramentas para análise de conjuntos de dados obtidos a partir de experimentos de campo e laboratório. Como todas as ferramentas, elas são úteis apenas nas mãos de quem sabe usá-las. A aplicação correta de métodos estatísticos é essencial para chegar a conclusões válidas e interpretáveis em termos probabilísticos.

O livro *Estatística Aplicada à Pesquisa Agrícola* oferece os conhecimentos necessários para que pesquisadores e estudantes planejem seus experimentos e analisem seus dados da forma mais adequada para cada caso. Esta segunda edição, para atender às solicitações de vários usuários da primeira, foi totalmente revista e significativamente ampliada, com novos procedimentos estatísticos.

A programação SAS (*Statistical Analysis System*) para a análise de todos os delineamentos e procedimentos é apresentada. O Capítulo 12 inclui uma série de modelos, tanto na sua expressão matemática quanto gráfica, e dá mais opções aos leitores na escolha de modelos mais adequados.

Três novos capítulos foram acrescentados. O Capítulo 16 trata da análise exploratória de dados, o capítulo 17 apresenta técnicas de amostragem e o Capítulo 18 é dedicado a uma breve introdução ao uso do SAS. Dados de produtividade média municipal de feijão do Estado de Santa Catarina, para os anos de 2008 e 2009, foram utilizados para exemplificar a análise exploratória e as técnicas de amostragens.

Este livro apresenta-se como um importante aliado à pesquisa agrícola. Com ele, o leitor poderá tirar o máximo proveito de dados experimentais, testando hipóteses, comparando tratamentos e validando conclusões.

Flávio Breseghello
Chefe-Geral da Embrapa Arroz e Feijão

Prefácio à 1ª edição

Nos idos de 1968, recém-formado engenheiro-agrônomo, comecei a trabalhar como experimentador agrícola na estação experimental da Secretaria de Agricultura, no Parque Estadual de Vila Velha em Ponta Grossa, Paraná, como responsável pela condução dos ensaios com cevada, no inverno, e com soja e feijão, no verão. Incentivado por meu primeiro chefe, Giampiero Baldanzi, dediquei-me a analisar os dados colhidos naqueles ensaios, usando como guia o livro de Pimentel Gomes, *Curso de Estatística Experimental*. Foi então que senti a "mordida do bichinho" da Estatística, da qual nunca mais me afastei, tornando-se, ela, uma das grandes paixões da minha vida. Mais tarde, tive o privilégio de ter Pimentel Gomes como professor em três disciplinas no mestrado em Experimentação e Estatística na Esalq, Piracicaba, SP (1972–1973). Em 1975, tornei-me responsável pela estatística experimental da Embrapa Arroz e Feijão, onde, nestes quase 30 anos, já analisei mais de 8 mil experimentos, não apenas com feijão e arroz, mas também com milho, sorgo, soja, trigo, girassol, pasto, gado leiteiro e de carne, além das bactérias, fungos, vírus e outras tantas "pragas" da agricultura. O doutorado, realizado na Califórnia (1979–1983), agregou uma outra área da estatística ao meu universo de pesquisa, a não paramétrica.

Em 2001, em licença sabática na Colômbia, onde atuei como professor visitante nas Universidades de La Sabana, Faculdade de Engenharia, em Chia, Colômbia, e na Nacional de Colômbia, Departamento de Estatística, em Bogotá, dediquei a maior parte do meu tempo a escrever este livro, que em breve deverá ser publicado também em espanhol na Colômbia. Nele procurei reunir toda a experiência adquirida trabalhando com meus colegas pesquisadores de arroz e feijão, com os quais muito aprendi e que muito me desafiaram no planejamento, análise e interpretação dos resultados. Foi nesse ambiente que desenvolvemos os ensaios centrais, puros ensaios fatoriais no que diz respeito à estatística, mas inovadores no que tange aos objetivos; que descobrimos os ensaios comerciais de Chacin Lugo; que exercitamos o emprego do delineamento em blocos aumentados de Federer nas culturas anuais; e que começamos a descobrir as parcelas divididas dentro de um experimento em faixa, delineamento muito pouco conhecido e que, em 2003, foi tema de um trabalho final de curso de um estudante de estatística na Nacional da Colômbia.

O livro contém as informações que considero mais importantes e necessárias a um pesquisador agrícola, e abrange desde o mais simples dos delineamentos, inteiramente

casualizado, até os estudos de superfície de resposta, análise de grupos de experimentos, testes de médias, contrastes e a aplicação da estatística não paramétrica aos delineamentos experimentais, regressão e correlação. Todos os exemplos de aplicação apresentados são oriundos de experimentos reais, conduzidos pela equipe técnica da Embrapa Arroz e Feijão, a qual agradeço pela cessão do uso de seus dados. Em particular, sem desmerecer qualquer um de meus colegas, cito alguns deles pelo constante e maravilhoso desafio que sempre me propuseram: o doutor Evane Ferreira, que mostrou a possibilidade de emprego dos quadrados latinos 12x12, normalmente não recomendados pelos demais autores, e pelas análises conjuntas de quadrado latino com um tratamento comum; o doutor Paulo Hideo pelos blocos aumentados de Federer e as comparações com os reticulados; os doutores Luis Stone e Pedro Marques, pelos ensaios comerciais e experimentos em faixa com parcelas divididas; o doutor Cleber Guimarães e a doutora Beatriz Pinheiro, fisiologistas; e os doutores Orlando Peixoto, Emilio da Maia de Castro e Joaquim Geraldo Cáprio da Costa, melhoristas de plantas, pelo aprimoramento do uso de amostragens dentro de parcelas experimentais na realização das análises estatísticas; e os doutores Nand Kumar Fagéria e Morel Barbosa, por me fazerem dedicar um bom tempo aos contrastes para fatores não igualmente espaçados.

Espero que este livro seja útil aos pesquisadores brasileiros e agradeço, antecipadamente, as críticas e sugestões que os leitores considerarem pertinentes. Aprimorar é sempre possível, especialmente na ciência em que o fim nunca está a vista e, ainda mais nesta obra, que não é exaustiva na exploração do assunto e nem pretendeu ser.

O autor

Prefácio à 2ª edição

Pouco depois da publicação da primeira edição deste livro, decidi aposentar-me e voltei para a Colômbia, onde continuei meu trabalho como professor da Faculdade de Engenharia da Universidad de La Sabana, até o ano de 2007. Nesse ano, acompanhando minha esposa, fomos morar em Maputo, Moçambique, onde permanecemos até o ano de 2010.

No período de 2007 a 2010, trabalhei como professor visitante na Universidade Eduardo Mondlane (UEM), ministrando cursos de estatística experimental nos mestrados em Desenvolvimento Rural, treinamentos específicos em estatística aplicada à segurança alimentar para os técnicos do Secretariado Técnico em Segurança Alimentar do Ministério da Agricultura daquele país.

Para esses treinamentos, elaborei o livro *Estatística Aplicada à Segurança Alimentar*, uma publicação conjunta entre a UEM e a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO). Durante esse mesmo período, fui informado de que os dois livros haviam se esgotado. Também recebi imensos pedidos e sugestões de colegas estatísticos, e de professores e estudantes de várias universidades no Brasil, e fora dele, o que, adicionado a uma indagação feita pela Embrapa Arroz e Feijão, me levaram a escrever esta segunda edição, revisada e ampliada.

Devo aqui agradecer a todas as pessoas da Embrapa Informação Tecnológica, pelo apoio na revisão e correção do texto, em especial a Lucilene Maria de Andrade, Jane Baptistone de Araújo e Celina Tomaz de Carvalho, sem as quais este livro não seria publicado. Quaisquer erros nele encontrados são de exclusiva responsabilidade do autor.

Continuo esperando novas críticas e sugestões, que possam no futuro levar a uma terceira edição.

O autor

Sumário

Introdução	13
Capítulo 1	Conceitos gerais e definições úteis	19
Capítulo 2	Delineamento inteiramente casualizado	47
Capítulo 3	Blocos completos ao acaso	69
Capítulo 4	Delineamento em quadrado latino	95
Capítulo 5	Delineamento em blocos incompletos	125
Capítulo 6	Delineamentos em reticulado	149
Capítulo 7	Blocos aumentados de Federer (BAF)	181
Capítulo 8	Ensaio fatorial	195
Capítulo 9	Experimentos em parcelas divididas e suas variações.....	235
Capítulo 10	Confundimento em ensaios fatoriais	269
Capítulo 11	Análise de grupo de experimentos.....	313
Capítulo 12	Regressão e correlação	345
Capítulo 13	Análise de covariância	381
Capítulo 14	Experimentos fatoriais fracionados: análise de variância e uso para estudo de superfícies de resposta	399
Capítulo 15	Estatística não paramétrica	423
Capítulo 16	Análise exploratória de dados	481
Capítulo 17	Princípios e técnicas de amostragem.....	499
Capítulo 18	Usando o SAS na análise de dados.....	521
Referências	547
Anexos	553

Introdução

A agricultura surgiu nos primórdios da humanidade e foi o agente fixador do homem, isto é, com a agricultura o homem começou a abandonar o nomadismo, pois a prática agrícola o obrigava a permanecer numa mesma área durante o período necessário para o completo desenvolvimento de suas culturas.

Junto com a agricultura, surgiu a investigação ou a pesquisa de novas tecnologias agrícolas. Evidentemente surgiu de forma empírica, observacional, sem qualquer rigorismo científico e, de forma geral, assim continua a ser praticada pelos agricultores até os dias de hoje.

Uma das primeiras tentativas de pesquisa agrícola registrada deu-se há três séculos, quando Johan Baptista van Helmont, de Bruxelas, plantou uma muda de salgueiro em um vaso ao qual adicionou apenas água durante 5 anos, findos os quais obteve uma árvore com 76,7 kg enquanto ao solo faltavam apenas umas poucas gramas de terra. Sua conclusão foi de que as árvores eram constituídas apenas por água, desprezando assim o solo faltante (KALCKMANN, 1958).

Na segunda metade do século 19, começaram a surgir por todo o mundo as primeiras estações experimentais que, no entanto, executavam investigação sem uma metodologia definida e procedimentos estatísticos adequados. A partir dos primeiros anos do século 20, com os trabalhos pioneiros de Sir Ronald Fisher na Estação Experimental de Rothamsted, Inglaterra, começou a ser estabelecida a estatística experimental baseada nos conhecimentos matemáticos e de probabilidade desenvolvidos ao longo dos séculos 18 e 19, principalmente.

Durante a primeira metade do século passado, a maioria dos métodos estatísticos baseou-se na suposição de que os dados seguiam a distribuição normal, ou Gaussiana, e compõe-se o que se convencionou chamar de estatística paramétrica.

A partir do final da década de 1940, os trabalhos pioneiros de Wilcoxon (1945) e de Mann e Whitney (1947) lançaram os fundamentos teóricos da estatística não paramétrica, que teve um grande desenvolvimento nos anos que se seguiram, motivada pela insatisfação de um grupo de pesquisadores com a estatística baseada na distribuição normal, dada sua convicção de que ela não ocorre na natureza. Na estatística não paramétrica, nenhuma