

4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Numa pesquisa científica o procedimento usual é formular hipóteses e verificá-las usando um conjunto de observações. O planejamento de experimentos é essencial para indicar o esquema sob o qual as hipóteses de interesse podem ser verificadas. O planejamento de experimentos e a análise dos resultados estão intimamente ligados e devem ser utilizados dessa forma nas pesquisas científicas das diferentes áreas do conhecimento

Conceitos básicos sobre experimentação

Os experimentos ou ensaios são pesquisas planejadas para obter novos fatos, negar ou confirmar hipóteses ou resultados obtidos anteriormente. Em outras palavras, são pesquisas planejadas, que seguem determinados princípios básicos, com o objetivo de fazer comparações dos efeitos dos tratamentos. Os princípios básicos são a repetição, a casualização e o controle local.

Um tratamento é uma condição imposta ou objeto que se deseja medir ou avaliar em um experimento. Como exemplos de tratamentos, podem-se citar: equipamentos de diferentes marcas, diferentes tamanhos de peças, doses de um nutriente em um meio de cultura, quantidade de lubrificante em uma máquina, temperatura de armazenamento de um alimento. Os tratamentos que podem ser dispostos em uma ordem, como por exemplo, doses de nutrientes, quantidade de lubrificante, níveis de temperatura, são ditos tratamentos quantitativos. Já os tratamentos que não podem ser dispostos numa ordem, são ditos tratamentos qualitativos, por exemplo, variedades de plantas, métodos de preparação de alimento, marcas de equipamentos e outros.

Cada tipo de tratamento também pode ser chamado de um fator. O tipo de tratamento tem importância na forma como os dados serão analisados. Quando os tratamentos são quantitativos, pode-se usar, por exemplo, técnicas de análise de regressão.

Os tratamentos são chamados de variáveis independentes. Quando, em um experimento, estamos interessados em estudar apenas um tipo de variável independente, dizemos que possuímos apenas um fator. Em um experimento, um fator pode ter várias categoriais que são chamadas de níveis.

Exemplo: Um laboratório deseja estudar o efeito da composição de peças de metal sobre a dilatação. Neste exemplo, a composição das peças é o fator (variável independente). Os diferentes tipos de composição são os níveis do fator. A dilatação das peças, medida em milímetros, por exemplo, é a variável resposta (variável dependente).

Em um experimento podem existir mais de um fator e mais de uma variável resposta. Toda e qualquer variável que possa interferir na variável resposta ou dependente deve ser mantida constante. Quando isso não é possível, existem técnicas (estratégias) que podem ser utilizadas para reduzir ou eliminar essa interferência.

Unidade experimental ou parcela

Unidade experimental ou parcela é onde é feita a aplicação do tratamento. É a unidade experimental que fornece os dados para serem avaliados. Exemplos de unidades experimentais ou parcelas são um motor, uma peça do motor, uma placa de Petri com meio de cultura, uma porção de algum alimento. As unidades experimentais podem ser formadas por grupos ou indivíduos. Por exemplo, quando se trabalha com cobaias, pode-se ter apenas uma cobaia como unidade experimental, ou seja, apenas um animal fornecerá a resposta do tratamento, ou ainda, pode-se ter um grupo de cobaias em uma gaiola fornecendo as informações.

Repetição

Repetição é o número de vezes que um tratamento aparece no experimento. O número de repetições, em um experimento, vai depender também dos recursos disponíveis, do tipo de experimento (delineamento) e, também, da variabilidade do experimento ou da variável resposta.

Variável resposta ou variável dependente

Em um experimento, podem ser medidas muitas variáveis, mas devem-se considerar somente aquelas que possam contribuir para a explicação da hipótese formulada.

Quando o volume de dados de um experimento torna-se grande, aumentam os riscos de erros grosseiros, como de registro, de inversão de variáveis etc.

Delineamento experimental (Design)

Com a finalidade de reduzir o erro experimental, existem os chamados delineamentos experimentais. Um delineamento experimental é a forma como os tratamentos ou níveis de um fator são designados às unidades experimentais ou parcelas. A análise de variância é baseada no delineamento experimental utilizado. Por isso, saber como o experimento foi instalado e conduzido, é de fundamental importância. Pequenas modificações podem acarretar em grandes mudanças na forma da análise estatística. Não raro, acontecem situações em que as hipóteses formuladas, a priori, não podem ser testadas, ou ainda, é impossível de se realizar uma análise estatística. Por isso, deve-se dar muita importância ao planejamento experimental. Um delineamento experimental é planejado de tal forma que a variação ao acaso seja reduzida o máximo possível. Alguns dos principais delineamentos experimentais são: delineamento inteiramente casualizado (DIC), delineamento em blocos casualizados (DBC) e quadrado latino.

Delineamento inteiramente casualizado (DIC)

Quando as unidades experimentais são homogêneas, ou seja, as parcelas são uniformes, os tratamentos podem ser sorteados nas unidades experimentais sem qualquer restrição. Nessa situação, o delineamento experimental é chamado de delineamento completamente casualizado. Neste caso, todos os tratamentos têm a mesma chance de serem aplicados em qualquer unidade experimental ou parcela. Esses experimentos levam em consideração os dois princípios básicos da experimentação, a repetição e a casualização. Este tipo de experimento permite que sejam analisados quantos grupos o pesquisador desejar. Basta que estes sejam designados por sorteio. A análise estatística é fácil mesmo quando o número de repetições não é o mesmo para todos os tratamentos. Desvantagem: toda a variabilidade entre as unidades entra no erro experimental. Por esta razão o erro experimental pode ser reduzido utilizando-se outro tipo de planejamento, a menos que as unidades experimentais sejam bastante homogêneas ou que o experimentador não tenha informação para arranjar as unidades experimentais em grupos mais homogêneos.

Delineamento em blocos casualizados (DBC)

Os experimentos em blocos levam em consideração os três princípios básicos da experimentação (repetição, casualização e controle local).

Dentro de cada bloco os tratamentos são distribuídos aleatoriamente. Para que o experimento seja eficiente, cada bloco deve ser o mais uniforme possível, porém os blocos podem ser diferentes entre eles. Quando se tem dúvida sobre a semelhança do ambiente experimental ou quando se tem certeza da sua heterogeneidade deve-se utilizar o DBC. Nem sempre bloco é sinônimo de repetição. O número de blocos e repetições coincide apenas quando os tratamentos ocorrem uma única vez em cada bloco, sendo esta forma a mais utilizada. Porém há casos onde cada bloco inclui todos os tratamentos duas ou mais vezes.

Análise de Variância (ANAVA)

A análise de variância é um método para se testar a igualdade de três ou mais médias populacionais, com base na análise das variâncias amostrais, justificando-se assim o termo análise de variância. A distribuição F é exigida na análise. A análise de variância é portanto um teste de hipóteses para a diferença entre várias médias (várias populações).

Requisitos para a Análise de variância

- 1) As populações têm distribuição aproximadamente normal (normalidade dos resíduos).
- 2) As populações têm a mesma variância (homogeneidade de variâncias).
- 4) As amostras são amostras aleatórias simples.
- 5) As amostras são independentes umas das outras (independência).

Análise de Variância de um fator - Experimento completamente aleatorizado ou delineamento inteiramente casualizado (DIC).

Definição: um tratamento (ou fator) é uma propriedade ou característica que nos permite distinguir as diferentes populações umas das outras.

As hipóteses testadas são:

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_t$ (as médias de todas as populações são iguais)

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$, para algum par i,j. (pelo menos uma média difere das demais)

Organização dos dados observados							
Tratamentos	Repetições						Totais
	1	2	...	j	...	r	
tratamento (ou população) 1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1r}	T_1
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots	\vdots
tratamento i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}	...	x_{ir}	T_i
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots	\vdots
tratamento t	x_{t1}	x_{t2}	...	x_{tj}	...	x_{tr}	T_t
							$G = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r x_{ij}$

O modelo matemático para a Análise de variância é:

$$X_{ij} = \mu + t_i + e_{ij}; \quad i = 1, \dots, t; \quad j = 1, \dots, r; \text{ em que:}$$

X_{ij} é o valor da observação que recebeu o tratamento i na repetição j;

μ é a média geral do experimento; t_i é o efeito devido ao tratamento i;

e_{ij} é o erro aleatório (efeito dos fatores não controlados).

Variação total, variação entre e variação dentro de tratamentos

Na análise de variância a fonte de variação total é dividida em variação devida aos efeitos dos tratamentos (variação entre tratamentos) e variação devida aos efeitos aleatórios (variação dentro dos tratamentos).

A estatística de teste F_c é obtida pelo quociente entre as variâncias estimadas:

$$F_c = \frac{\text{variância entre tratamentos}}{\text{variância dentro dos tratamentos}}$$

A variação total é definida como a soma dos quadrados dos desvios de cada observação em relação à média geral \bar{x} .

A variação entre tratamentos é definida como a soma dos quadrados dos desvios das médias dos tratamentos \bar{x}_i em relação à média geral \bar{x} .

A variação dentro dos tratamentos é definida como a soma dos quadrados dos desvios de cada observação em relação à média do i-ésimo tratamento \bar{x}_i .

$$\text{Variação total} = \text{soma de quadrados total} = \text{SQtotal} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (x_{ij} - \bar{x})^2$$

$$\text{De forma prática pode-se calcular: } \text{SQtotal} = \sum_i \sum_j x_{ij}^2 - \frac{G^2}{tr}$$

$$\text{Variação entre tratamentos} = \text{SQTrat} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 = \frac{\sum_i T_i^2}{r} - \frac{G^2}{tr}$$

$$\text{Variação dentro de tratamentos} = \text{SQ de erros} = \text{SQE} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = \text{SQtotal} - \text{SQTrat}$$

As estimativas das variâncias, denominadas de quadrados médios, são então calculadas:

$$\text{Quadrado médio de tratamentos} = \text{QMtrat} = \frac{\text{SQtrat}}{t-1}$$

$$\text{Quadrado médio de erros} = \text{QME} = \frac{\text{SQE}}{t(r-1)}$$

$$\text{Estatística do teste: } F_c = \frac{\text{QMtrat}}{\text{QME}}$$

O valor crítico de F é encontrado supondo um teste unilateral a direita, já que valores maiores de F_c correspondem a diferenças significativas. Os graus de liberdade são $(t-1)$ para o numerador e $t(r-1)$ para o denominador. Assim, a regra de decisão é rejeitar a hipótese nula se F_c for maior que o valor tabelado de F, a um nível de significância α .

Os procedimentos são resumidos na tabela da análise de variância.

Tabela: Análise de variância de um DIC.

Fontes de Variação	G L	SQ	QM	F_c
Tratamentos	t-1	SQtrat	QMtrat	QMtrat/QME
Erro	r-1	SQe	QMe	
Total	tr-1	SQtotal		

Exemplo 1. Um artigo publicado em um periódico estudou diferentes algoritmos de programação para estimar os custos de desenvolvimento de programas computacionais. Seis algoritmos foram aplicados a oito projetos de desenvolvimento de programas computacionais e observou-se o erro percentual na estimação do custo de desenvolvimento. Os dados estão apresentados na tabela a seguir. Verifique usando um teste adequado se os algoritmos diferem na exatidão da estimação dos custos, usando 5% de significância. Qual algoritmo você recomendaria para uso na prática?

Algoritmo	Projeto (repetição)								Totais de tratamentos
	1	2	3	4	5	6	7	8	—
A (SLIM)	1244	21	82	2221	905	839	527	122	5961
B (C-A)	281	129	396	1306	336	910	473	199	4030
C (C-R)	220	84	458	543	300	794	488	142	3029
D (C-C)	225	83	425	552	291	826	509	153	3064
E (F-P)	19	11	-34	121	15	103	87	-17	305
F (E)	-20	35	-53	170	104	199	142	41	618
totais	1969	363	1274	4913	1951	3671	2226	640	17007

Experimento em blocos aleatorizados ou Delineamento em Blocos Casualizados (DBC)

Algumas vezes é necessário planejar o experimento de modo que a variabilidade proveniente de um fator de ruído (nuisance factor) possa ser controlada. Por exemplo, suponha que um experimento consiste em examinar quatro diferentes variedades de trigo, cada uma cultivada em 5 diferentes lotes de terra. Nesse caso, poderá haver diferenças na produção devida: (1) ao tipo de trigo cultivado, que é o fator de interesse ou, (2) ao lote de terra utilizado, que poderá envolver diferenças de fertilidade, por exemplo. A segunda fonte de variação não é de interesse direto do pesquisador, mas é necessário que esta seja utilizada como um segundo fator, denominado de bloco, e a primeira, denominada tratamento.

Organização dos dados observados em bloco							
Tratamentos	Blocos						Totais
	1	2	...	j	...	b	
tratamento 1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1b}	T_1
tratamento 2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2b}	T_2
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots		\vdots	\vdots
tratamento t	x_{t1}	x_{t2}	...	x_{tj}	...	x_{tb}	T_t
Totais de blocos	B_1	B_2		B_j		B_b	G

Características do Delineamento em Blocos Casualizados (DBC)

- Utilizado quando o material experimental é heterogêneo;
- Princípios Básicos: repetição, casualização e controle local;
- Os tratamentos são designados às parcelas aleatoriamente dentro de cada bloco;
- O número de parcelas por bloco deve ser um múltiplo do número de tratamentos;
- Este delineamento é mais eficiente que o DIC.

Considerando um DBC com t tratamentos e b blocos, o modelo estatístico associado é

$$y_{ij} = \mu + t_i + B_{ij} + e_{ij}; \quad i = 1, \dots, t; \quad j = 1, \dots, b; \text{ em que:}$$

y_{ij} é o valor da parcela que recebeu o tratamento i no bloco j .

μ é a média geral do experimento; t_i é o efeito devido ao tratamento i

e_{ij} é o erro aleatório (efeito dos fatores não controlados).

Os procedimentos da análise de variância para um DBC são resumidos na tabela a seguir.

Tabela: Análise de variância para o DBC

Fontes de Variação	G L	SQ	QM	F _c
Tratamentos	$t-1$	SQ _{trat}	QM _{trat}	QM _{trat} /QME
Blocos	$b-1$	SQ _B	QMB	QMB/QME
Erro	$(t-1)(b-1)$	SQ _e	QMe	
Total	$tr-1$	SQ _{total}		

As somas de quadrados para blocos é calculada por:

$$SQ_{\text{Bloco}} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j} - \bar{y})^2 = \frac{\sum_j B_j^2}{t} - \frac{G^2}{tb} = \text{em que } \bar{y}_{.j} \text{ é a média do } j\text{-ésimo bloco.}$$

$$SQE = SQ_{\text{Total}} - SQ_{\text{Trat}} - SQ_{\text{Bloco}}$$

Exemplo 2. No exemplo dos algoritmos de programação, suponha que o pesquisador tenha certeza que existe uma grande variabilidade entre os diferentes projetos, e que por esse motivo tenha instalado seu experimento considerando cada projeto como um bloco, ou seja, como um fator de variação. Proceda a análise de variância supondo que o pesquisador deseje controlar a fonte de variação projeto, mas que o seu fator de interesse seja o algoritmo. Apresente as conclusões.