

Experimentos: Estrategias y Análisis en Ciencia y Tecnología

Eduardo Castaño Tostado
Universidad Autónoma de Querétaro
ecastano@uaq.mx

Jorge Domínguez Domínguez
Centro de Investigación en Matemáticas
jorge@cimat.mx

Experimentos: Estrategias y Análisis en Ciencia y Tecnología

Q182.2

C346

Castaño Tostado, Eduardo

Experimentos: estrategias y análisis en ciencia y tecnología /
Eduardo Castaño Tostado, Jorge Domínguez Domínguez - -
México : Centro de Investigación en Matemáticas, 2003.

p.; cm. Gráficas, Tablas.

ISBN 968-5733-01-5

Mathematics Subject Classification 2000: 62K99, 05Bxx.

1. Diseño de Experimentos - Ciencias. I. Domínguez Domínguez, Jorge

ISBN 968-5733-01-5

©D.R. Centro de Investigación en Matemáticas, A.C.

Jalisco s/n, Mineral de Valenciana,

Guanajuato, Gto., México

Este libro no puede ser reproducido total ni parcialmente, por ningún medio electrónico o de otro tipo, sin autorización escrita del editor.

This book may not be reproduced, whole or in part, by any means, without written permission from the publisher.

Cuidado de edición: Ana Elena Uribe Flores y Hernán González Aguilar

Diseño de portada: David Tremary Rivera

Impreso por: *S y G Editores, S.A. de C.V.*

Cuapinol 52, Santo Domingo de los Reyes, Coyoacán

04369 - México, D.F.

Dedicado a:

María del Mar, Eduardo y Mary Mar

Sary, Axel y Rodrigo

Contenido

Prefacio	vii
1 Planeación de un diseño experimental	1
1.1 Introducción	1
1.2 Propósito del diseño experimental	1
1.3 Estructuras del diseño experimental	4
1.3.1 Definiciones	4
1.4 Secuencia del plan experimental	11
1.5 El razonamiento estadístico de prueba de hipótesis	15
1.6 Inferencia estadística y práctica	17
1.7 Exactitud de técnicas experimentales	18
1.8 Ejercicios	18
2 Diseño con un factor	23
2.1 Factor con dos niveles	23
2.2 Un factor con $k \geq 2$ niveles	28
2.2.1 Análisis de varianza	28
2.2.2 Modelo estadístico	34
2.2.3 Formalización del andeva	35
2.3 Validación del modelo estadístico	38
2.3.1 Análisis de Residuales	38
2.3.2 Prueba de homogeneidad de varianzas	43
2.3.3 Transformaciones	44
2.4 Determinación del número de réplicas	46
2.5 Manejo de estructuras de diseño	47
2.5.1 Restricciones a la aleatorización	48
2.5.2 Análisis de Covarianza	55
2.6 Caso general del análisis de covarianza	59
2.7 Ejercicios	62

3	Comparaciones múltiples	73
3.1	Recomendaciones iniciales	73
3.2	Intervalos de confianza	74
3.3	Comparaciones planeadas entre dos medias	76
3.3.1	Prueba de Tukey	76
3.3.2	Prueba de Dunnett: comparaciones con un control	78
3.3.3	Comparaciones múltiples con el mejor	79
3.4	El estadístico de prueba de Scheffé	83
3.4.1	Contrastes ortogonales	85
3.5	Formalización estadística de la pruebas	86
3.5.1	Prueba de Tukey	86
3.5.2	Prueba de Dunnett	88
3.5.3	Intervalos de confianza de Scheffé para contrastes	89
3.6	Ejercicios	91
4	Estructura de tratamientos factorial	95
4.1	Introducción	95
4.2	Factorial 2^2	97
4.2.1	Cálculo de efectos	97
4.2.2	Inferencia estadística	101
4.3	Factorial 2^3	104
4.3.1	Cálculo de efectos	104
4.3.2	Inferencia estadística	106
4.4	Factorial general de dos factores	119
4.4.1	El análisis de varianza para dos factores	119
4.4.2	Modelo estadístico	124
4.5	Ejercicios	125
5	Estructura factorial fraccionada	137
5.1	Conceptos básicos	137
5.2	Factorial 2^3 fraccionado	137
5.3	Alias y resolución	142
5.4	Factorial 2^4 fraccionado	144
5.5	Fracciones más pequeñas	146
5.6	Criterio de aberrancia mínima	149
5.7	Análisis de efectos confundidos	150
5.7.1	Adición de corridas adicionales	151
5.7.2	Técnica de desdoble	155
5.8	Generadores de fracciones en diseños 2^k	160
5.9	Diseños de Plackett y Burman	161
5.9.1	Construcción del diseño PB	161

5.10	Contribuciones de Taguchi	163
5.10.1	Diseño robusto de parámetros	165
5.10.2	Arreglos ortogonales	166
5.10.3	Doble arreglo ortogonal	168
5.10.4	Un solo arreglo ortogonal	173
5.10.5	Sistemas de señal - respuesta	174
5.11	Ejercicios	186
6	Estructura de tratamientos factoriales 3^k	201
6.1	Diseño factorial 3^k y análisis estadístico	201
6.1.1	Efecto cuadrático	206
6.2	Factorial 3^k fraccionado	209
6.2.1	Fraccionar el factorial 3^3 por un tercio	210
6.2.2	Fracción de un 3^k por medio del cuadrado latino	213
6.2.3	Diseño Plackett - Burman para factoriales 3^k	215
6.3	Ejercicios	216
7	Algunos diseños especiales	223
7.1	Diseño en parcelas divididas	223
7.1.1	Aleatorización en dos etapas	225
7.1.2	El modelo estadístico	226
7.1.3	Cuándo debe aplicarse este tipo de diseño	228
7.2	Experimentos con mediciones repetidas en el tiempo	232
7.3	Diseños que involucran anidamiento	237
7.4	Sobre errores de restricción en la aleatorización	243
7.5	Ejercicios	245
8	El modelo de análisis de regresión	253
8.1	Introducción	253
8.2	Modelos de primer y segundo orden	255
8.3	Estimación de los Parámetros del Modelo	258
8.3.1	Inferencia sobre los parámetros	262
8.4	Significancia global de un modelo ajustado	268
8.5	La prueba de falta de ajuste	271
8.6	Tipos de diseños para optimización	276
8.6.1	Diseños de primer orden	276
8.6.2	Diseños de segundo orden	276
8.7	Ejercicios	284

9 Optimización estadística del proceso	297
9.1 Introducción	297
9.2 Ubicando a la región óptima	298
9.3 Procedimiento de optimización	308
9.4 Caracterización del punto estacionario	312
9.5 Análisis de lomas	313
9.6 Optimización de varias respuestas	318
9.6.1 Método de superposición de curvas de nivel	318
9.6.2 Funciones de deseabilidad	320
9.7 Ejercicios	328
Apéndices técnicos	343
Referencias	357
Tablas	363

Prefacio

Experimenta!

Hazlo tu motivación diaria.

Experimenta,

y te llevará a tu luminaria.

La manzana en la punta del árbol

un reto en ella conlleva.

Así tomando el ejemplo de Eva...

Experimenta!

Curioso,

aunque alguien se resista.

Furioso,

con cada yugo que persista.

Si por este consejo sólo transitas,

el futuro te ofrece dichas infinitas

y te deleita...

Experimenta

y verás!

Cole Porter

La planeación es una actividad que permite eficacia, eficiencia y efectividad en el trabajo. En la investigación experimental, la planeación implica diseñar el experimento. El diseño estadístico de un experimento da la posibilidad de que éste sea realizado de una manera eficiente, es decir, con el mínimo de recursos materiales y tiempo. Pretendemos que al estudiar este libro, el estudiante adquiera habilidades básicas pero esenciales en el diseño de experimentos y en el análisis estadístico de los resultados generados.

Este libro surge de la experiencia de los autores tanto a nivel de docencia de la materia propia del texto, como de la experiencia práctica en el diseño de experimentos en la investigación experimental tanto a nivel industrial como a nivel de ciencia y tecnología. Esto último se ve reflejado en algunos ejemplos y ejercicios. Está dirigido a usuarios de Estadística y no a estudiantes de alguna

ciencia matemática. Por ello, el nivel matemático recomendado en general para estudiar este libro es el de un estudiante típico de ingeniería o de ciencias químico biológicas, después de haber tomado cursos de álgebra y de cálculo. En el texto principal no hay derivaciones matemáticas, algunas de ellas se presentan en el apéndice técnico. Por otra parte, no se presentan enfoques matemáticos alternativos en el manejo de los datos; sólo se presenta la mejor alternativa según la experiencia de los autores.

El énfasis es en los conceptos, objetivos por lograr y suposiciones, así como en la interpretación de resultados.

El contenido del texto está dividido en nueve capítulos, para un curso de 90 horas. El primer capítulo desarrolla ideas y presenta conceptos importantes en la práctica de diseñar experimentos reales. El segundo y tercer capítulos presentan diseños adecuados cuando se estudia un solo factor, considerando o no restricciones en la aleatorización de tratamientos, así como el manejo de covariables. Los capítulos del cuatro al seis, presentan la teoría sobre los diseños factoriales, de manera esencial, factoriales con factores de dos y tres niveles y el uso de fracciones correspondientes, así también se presentan los elementos de lo que se conoce como diseño robusto de parámetros. En el capítulo siete, son presentados tres diseños un tanto más complejos que los anteriores pero de mucha importancia práctica, como el diseño en parcelas divididas, manejo de experimentos con mediciones repetidas en el tiempo y básicos de diseños anidados. En el capítulo ocho se da una introducción al importante tema del modelo de análisis de regresión, que servirá como herramienta en el capítulo nueve donde se presentan los elementos esenciales de la metodología de superficie de respuesta.

Como todo trabajo, este texto resulta de la unión de esfuerzos; agradecemos a todos aquellos que aportaron a este modesto texto, que pretende difundir más sobre una de las herramientas más poderosas desarrollada por la comunidad estadística a lo largo de su historia. A nosotros nos toca agradecer a nuestros maestros, tanto en la UNAM como en el IPN, que nos formaron. Agradecemos el valioso aporte de nuestros estudiantes de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, del Programa de Posgrado de Alimentos del Centro de la República Mexicana (PROPAC) con sede en la Universidad Autónoma de Querétaro, de la maestría en Ingeniería de Calidad de la Universidad Iberoamericana campus León y del Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología CONACYT, con sede en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial en Querétaro. Agradecemos a los investigadores y empresas que han pensado como útil nuestra asesoría. El primer autor agradece al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica en donde durante un año de estancia se le brindó el espacio para la escritura parcial de este material. Finalmente, pero no por último, agradecemos profundamente a nuestros centros de trabajo, la Universidad Autónoma de

Querétaro y el Centro de Investigación en Matemáticas, por dar el espacio para la escritura del presente texto.

Eduardo Castaño Tostado
Jorge Domínguez Domínguez

