

# Contenido

## **1 Principios para el diseño de investigaciones 1**

- 1.1 El legado de Sir Ronald A. Fisher 1
- 1.2 Planeación de la investigación 2
- 1.3 Experimentos, tratamientos y unidades experimentales 3
- 1.4 La hipótesis de investigación genera el diseño de los tratamientos 5
- 1.5 Control local de errores experimentales 8
- 1.6 Replicar para obtener experimentos válidos 16
- 1.7 ¿Cuántas réplicas? 18
- 1.8 Aleatorizar para tener inferencias válidas 20
- 1.9 Eficiencia relativa del diseño de experimentos 24
- 1.10 De los principios a la práctica: un caso de estudio 26

## **2 Comenzando con diseños totalmente aleatorizados 37**

- 2.1 Construcción del diseño de investigación 37
- 2.2 Cómo aleatorizar 39
- 2.3 Preparación de los registros de datos para el análisis 41
- 2.4 Un modelo estadístico para la experimentación 42
- 2.5 Estimación de los parámetros del modelo con mínimos cuadrados 47
- 2.6 Suma de cuadrados para identificar fuentes de variación importantes 50
- 2.7 Modelo de efectos del tratamiento 53
- 2.8 Grados de libertad 54
- 2.9 Resumen en la tabla de análisis de varianza 55
- 2.10 Pruebas de hipótesis sobre modelos lineales 56
- 2.11 Pruebas de significancia y pruebas de hipótesis 58
- 2.12 Errores estándar e intervalos de confianza para medias de tratamientos 59
- 2.13 Diferente número de réplicas de los tratamientos 60
- 2.14 ¿Cuántas réplicas para la prueba  $F$ ? 63
- Apéndice 2A.1 Valores esperados 70
- Apéndice 2A.2 Cuadrados medios esperados 71

### 3 Comparación de tratamientos 73

- 3.1 La comparación de tratamientos responde las preguntas de la investigación 73
- 3.2 Planeación de comparaciones entre los tratamientos 74
- 3.3 Curvas de respuesta para los factores de tratamiento cuantitativos 83
- 3.4 Las comparaciones múltiples afectan las tasas de error 91
- 3.5 Inferencia estadística simultánea 94
- 3.6 Comparaciones múltiples con el mejor tratamiento 98
- 3.7 Comparación de todos los tratamientos con un control 104
- 3.8 Comparaciones en pares de todos los tratamientos 107
- 3.9 Resumen de comentarios sobre las comparaciones múltiples 115
- Apéndice 3A Funciones lineales de las variables aleatorias 121

### 4 Diagnóstico de la concordancia entre los datos y el modelo 123

- 4.1 Un análisis válido depende de suposiciones válidas 123
- 4.2 Efectos de la falta de cumplimiento de las suposiciones 123
- 4.3 Los residuales son la base de las herramientas de diagnóstico 124
- 4.4 Búsqueda de residuos inusitados con los residuales 131
- 4.5 Transformaciones estabilizadoras de la varianza para datos con distribuciones conocidas 133
- 4.6 Transformaciones con exponentes para estabilizar varianzas 135
- 4.7 Generalización del modelo lineal 140
- 4.8 Evaluación de modelos por medio de gráficas de residuales vs valores ajustados 141
- Apéndice 4A Datos para el ejemplo 4.1 147

### 5 Experimentos para estudiar las varianzas 148

- 5.1 Modelos con efectos aleatorios para las varianzas 148
- 5.2 Un modelo estadístico para las componentes de la varianza 151
- 5.3 Estimaciones puntuales de las componentes de la varianza 152
- 5.4 Estimaciones de intervalos para las componentes de la varianza 153
- 5.5 Cursos de acción con estimaciones de varianzas negativas 155
- 5.6 La correlación intraclases indica similitud dentro de los grupos 155
- 5.7 Diferentes números de observaciones en los grupos 157
- 5.8 ¿Cuántas observaciones para estudiar las varianzas? 158
- 5.9 Submuestras aleatorias para reunir datos para el experimento 159
- 5.10 Uso de las estimaciones de la varianza para asignar muestras 163
- 5.11 Números diferentes de réplicas y submuestras 164
- Apéndice 5A Cálculo de los coeficientes para los cuadrados medios esperados de la tabla 5.9 174

**6 Diseños factoriales 175**

- 6.1 Experimentos eficientes con diseños factoriales 175
- 6.2 Tres efectos de los factores 177
- 6.3 Modelo estadístico para dos factores 181
- 6.4 Análisis para dos factores 183
- 6.5 Uso de curvas de respuesta para los factores de tratamiento cuantitativos 190
- 6.6 Tres factores de tratamiento 199
- 6.7 Estimación de la varianza del error con una réplica 205
- 6.8 ¿Cuántas réplicas se requieren para probar los efectos de un factor? 208
- 6.9 Réplicas desiguales en los tratamientos 208
- Apéndice 6A Mínimos cuadrados para diseños factoriales 225

**7 Diseños factoriales: modelos aleatorios y mixtos 232**

- 7.1 Efectos aleatorios para diseños factoriales 232
- 7.2 Modelos mixtos 237
- 7.3 Diseños de factores anidados: una variación del tema 243
- 7.4 Diseños de factores cruzados y anidados 251
- 7.5 ¿Cuántas réplicas? 255
- 7.6 Reglas para los cuadrados medios esperados 255

**8 Diseños de bloques completos 263**

- 8.1 Uso de bloques para aumentar la precisión 263
- 8.2 Los diseños de bloques completos aleatorizados usan un criterio de bloqueo 264
- 8.3 Los diseños de cuadrado latino usan dos criterios de bloqueo 275
- 8.4 Experimentos factoriales en diseño de bloques completos 289
- 8.5 Datos faltantes en diseños por bloques 291
- 8.6 Experimentos realizados varias veces 292
- Apéndice 8A Selección de cuadrados latinos 307

**9 Diseños de bloques incompletos: introducción 310**

- 9.1 Bloques incompletos de tratamientos para reducir el tamaño de los bloques 310
- 9.2 Diseños de bloques incompletos balanceados (BIB) 312
- 9.3 Cómo aleatorizar los diseños de bloques incompletos 313
- 9.4 Análisis de diseños BIB 315
- 9.5 Diseño renglón-columna para dos criterios de bloque 320
- 9.6 Reducción del tamaño del experimento con diseños parcialmente balanceados (BIPB) 322
- 9.7 Eficiencia de los diseños de bloques incompletos 325
- Apéndice 9A.1 Algunos diseños de bloques incompletos balanceados 330
- Apéndice 9A.2 Algunos diseños de cuadrados latinos incompletos 332
- Apéndice 9A.3 Estimaciones de mínimos cuadrados para diseño BIB 336

## 10 Diseño de bloques incompletos: diseños resolubles y cíclicos 339

- 10.1 Diseños resolubles para ayudar a manejar el experimento 339
- 10.2 Diseños resolubles renglón-columna para dos criterios de bloque 342
- 10.3 Los diseños cíclicos simplifican la construcción de diseños 345
- 10.4 Elección de diseños de bloques incompletos 352
- Apéndice 10A.1 Planes para diseños cíclicos 360
- Apéndice 10A.2 Arreglos generadores para diseños  $\alpha$  361

## 11 Diseños de bloques incompletos: tratamientos factoriales 362

- 11.1 Aprovechamiento de los diseños de tratamientos factoriales 362
- 11.2 Factoriales  $2^n$  para evaluar muchos factores 363
- 11.3 Diseños de bloque incompletos para factoriales  $2^n$  369
- 11.4 Método general para crear bloques incompletos 378
- 11.5 Diseños de bloques incompletos para factoriales  $3^n$  383
- 11.6 Observaciones finales 387
- Apéndice 11A Planes para diseños de bloques incompletos para factoriales  $2^n$  390

## 12 Diseños factoriales fraccionarios 391

- 12.1 Reducción del número de corridas experimentales con diseños fraccionados 391
- 12.2 Fracción de un medio del factorial  $2^n$  393
- 12.3 Resolución del diseño relacionada con la aleatorización 398
- 12.4 Análisis de diseños  $2^{n-1}$  de media réplica 399
- 12.5 Fracciones de un cuarto de factoriales  $2^n$  406
- 12.6 Construcción de diseños  $2^{n-p}$  con resolución III y IV 409
- 12.7 Genichi Taguchi y la mejora de la calidad 413
- 12.8 Observaciones finales 415
- Apéndice 12A Planes de diseño factoriales fraccionarios 421

## 13 Diseños con superficie de respuesta 423

- 13.1 Descripción de respuestas con ecuaciones y gráficas 423
- 13.2 Identificación de los factores significativos con factoriales  $2^n$  426
- 13.3 Diseños para estimar superficies de respuesta de segundo orden 431
- 13.4 Estimación de la superficie de respuesta cuadrática 440
- 13.5 Exploración de superficies de respuesta 444
- 13.6 Diseños para mezclas de ingredientes 447
- 13.7 Análisis de experimentos con mezclas 453
- Apéndice 13A.1 Estimación de mínimos cuadrados de los modelos de regresión 463
- Apéndice 13A.2 Localización de coordenadas para el punto estacionario 466
- Apéndice 13A.3 Forma canónica de la ecuación cuadrática 467

**14 Diseños de parcelas divididas 469**

- 14.1 Parcelas de distintos tamaños en el mismo experimento 469
- 14.2 Dos errores experimentales para dos tamaños de parcelas 472
- 14.3 Análisis para diseños de parcelas divididas 473
- 14.4 Errores estándar para las medias de los factores de tratamiento 478
- 14.5 Características del diseño de parcelas divididas 480
- 14.6 Eficiencia relativa de las comparaciones de subparcelas y parcelas completas 481
- 14.7 Diseño con doble subdivisión de parcelas para tres factores de tratamiento 483
- 14.8 Diseño de bloques divididos 483
- 14.9 Información adicional sobre diseños de parcelas divididas 486

**15 Diseños con mediciones repetidas 492**

- 15.1 Estudios de tendencias en el tiempo 492
- 15.2 Relaciones entre las mediciones repetidas 495
- 15.3 Una prueba para la suposición Huynh-Feldt 498
- 15.4 Análisis de varianza univariado para mediciones repetidas 499
- 15.5 Análisis cuando no se cumplen las suposiciones del análisis univariado 502
- 15.6 Otros experimentos con propiedades de mediciones repetidas 509
- 15.7 Otros modelos para la correlación entre mediciones repetidas 511
- Apéndice 15A.1 Prueba de esfericidad de Mahculy 518
- Apéndice 15A.2 Ajuste de grados de libertad para el análisis de varianza de mediciones repetidas 519

**16 Diseños cruzados 520**

- 16.1 Suministro de todos los tratamientos a cada unidad experimental 520
- 16.2 Análisis de diseños cruzados 524
- 16.3 Diseños balanceados para estudios cruzados 530
- 16.4 Diseños cruzados para dos tratamientos 536
- Apéndice 16A.1 Codificación de archivos de datos para estudios cruzados 545
- Apéndice 16A.2 Suma de cuadrados del tratamiento para los diseños balanceados 547

**17 Análisis de covarianza 550**

- 17.1 Control local con una covariada medida 550
- 17.2 Análisis de covarianza para diseños totalmente aleatorizados 553
- 17.3 Análisis de covarianza para diseños de experimentos bloqueados 565
- 17.4 Consecuencias prácticas del análisis de covarianza 570

**Referencias 576****Apéndice de tablas 587****Respuestas a ejercicios seleccionados 633****Índice 661**