

FREDDY GAVILÁNEZ LUNA

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas consideraciones y alternativas



PRIMERA EDICIÓN



1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

Freddy Gavilánez Luna

Autor



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

AUTOR

Freddy Carlos Gavilánez Luna

Magíster en Estadística Aplicada;

Magíster en Riego y Drenaje;

Doctor en Ciencias Ambientales;

Ingeniero Agrónomo;

Universidad Agraria del Ecuador;

Guayaquil, Ecuador;

 fgavilanez@uagraria.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0002-7861-514X>

1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

REVISORES

ACADÉMICOS

Aldo José Loqui Sánchez

Doctor en Educación;
Magíster en Riego y Drenaje;
Docente Facultad de Ciencias Agrarias;
Universidad de Guayaquil;
Guayaquil, Ecuador

✉ aldo_loqui@hotmail.com

🆔 <https://orcid.org/0000-0001-8953-5105>

Yhony Alfredo Valverde Lucio

Ingeniero Agropecuario;
Magíster en Gestión de Proyectos socio productivos;
Especialista en Metodología de investigación;
Doctorante de Biociencias agroalimentarias;
Universidad Estatal del Sur de Manabí;
Jipijapa, Ecuador;

✉ yhonny.valverde@unesum.edu.ec

🆔 <https://orcid.org/0000-0002-9792-9400>

CATALOGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

AUTOR: Freddy Gavilánez Luna

Título: Precisión en los experimentos agrícolas

Subtítulo: Algunas consideraciones y alternativas

Descriptor: Agricultura; Investigación agrícola; Biotecnología

Código UNESCO: 31 Ciencias Agrarias

Clasificación Decimal Dewey/Cutter: 630/G244

Área: Ingeniería Agrícola

Edición: 1^{ra}

e-ISBN: 978-84-9052-543-2

Editorial: Díaz de Santos, 2025

Ciudad, País: Madrid, España

ISBN: 978-9942-654-06-9

Editorial: Mawil Publicaciones de Ecuador, 2024

Ciudad, País: Quito, Ecuador

Formato: 148 x 210 mm.

Páginas: 329

DOI: <https://doi.org/10.26820/978-9942-654-06-9>

URL: <https://mawil.us/repositorio/index.php/academico/catalog/book/105>

Texto para docentes y estudiantes universitarios

El proyecto didáctico: **Precisión en los experimentos agrícolas**, es una obra colectiva escrita por varios autores y publicada en coedición por MAWIL y Editorial Díaz de Santos; publicación revisada bajo la modalidad de pares académicos y por el equipo profesional de la editorial siguiendo los lineamientos y estructuras establecidos por el departamento de publicaciones de MAWIL de New Jersey.

© Reservados todos los derechos. La reproducción parcial o total queda estrictamente prohibida, sin la autorización expresa de los autores, bajo sanciones establecidas en las leyes, por cualquier medio o procedimiento.

Director Académico: Lcdo. Alejandro Plúa Argoti

Dirección Central MAWIL: Office 18 Center Avenue Caldwell; New Jersey

07006 **Gerencia Editorial MAWIL-Ecuador:** Mg. Vanessa Pamela

Quishpe Morocho **Dirección de corrección:** Mg. Yamara Galanton.

Editor de Arte y Diseño: Lic. Eduardo Flores, Arq. Alfredo Díaz

Corrector de estilo: Lic. Marcelo Acuña Cifuentes

1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

Dedicatoria



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



Dedicatoria

A mi imprescindible cimiento de antología: Betty, Samantha y Freddy...

A León y a la memoria de Carmen...

A mis queridos alumnos de la Universidad Agraria del Ecuador...

1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

Índices

Contenidos



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



Prólogo ----- 24

CAPÍTULO I

EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS ----- 29
El diseño de experimentos ----- 30
Distribuciones experimentales ----- 32
Factores de estudio en la agronomía ----- 36
Experimentos de adaptabilidad de cultivos ----- 36
Experimentos sobre nutrición vegetal ----- 38
Experimentos relacionados con plaguicidas ----- 41
Experimentos relativos a ciertas prácticas culturales ----- 48

CAPÍTULO II

LA UNIDAD EXPERIMENTAL ----- 49
El tamaño de la parcela en los experimentos agrícolas ----- 50
Factores de influencia en la dimensión de parcelas experimentales ----- 51
Mapa de heterogeneidad de suelo ----- 54
Métodos analíticos aplicados en los ensayos en blanco
para establecer el tamaño de las unidades de muestreo ----- 56
Método de máxima curvatura ----- 56
Métodos multivariados en la definición de los tamaños de parcela ----- 59
Método de máxima curvatura bivariada ----- 60
Método de Hatheway ----- 61

CAPÍTULO III

TAMAÑO MUESTRAL ----- 64
Muestra estadística ----- 65
Consideraciones de la muestra estadística ----- 66
Tipos de muestra ----- 67
Muestras probabilísticas o aleatorias ----- 67
Muestras no probabilísticas o escogidas ----- 68
Tamaño de la muestra ----- 69
Factores que determinan el tamaño de una muestra ----- 69
Tamaño de muestra de poblaciones infinitas para estimar una media ----- 71
Tamaño de la muestra de poblaciones infinitas para estimar
un valor porcentual (proporción) ----- 73
Tamaño de la muestra de poblaciones finitas ----- 74
Tamaño de muestra para experimentos ----- 79
Tamaño de muestra para experimentos de dos tratamientos ----- 84
Tamaño de muestra para experimentos con más de dos tratamientos ----- 86
Tamaño de muestra por diferencia mínima significativa (intervalo de confianza) ----- 87
Recomendación empírica para definir el número de repeticiones ----- 89

Tamaño de muestra por el criterio empírico de los
grados de libertad del error experimental ----- 91

CAPÍTULO IV

VARIABLES Y ALGUNAS ALTERNATIVAS DE ANÁLISIS----- 95
Variables agronómicas de respuesta en los ensayos experimentales ----- 96
¿Qué es la unidad de muestreo?----- 107
Error experimental y el ajuste de datos----- 108
Importancia de los supuestos de normalidad, homocedasticidad
e independencia en la precisión experimental ----- 112
Ajuste o estabilización de la varianza intragrupos----- 122
Análisis de covarianza ----- 128
Análisis de varianza multivariado ----- 134
Análisis de varianza con submuestreo----- 145

CAPÍTULO V

DISTRIBUCIONES CON BLOQUES INCOMPLETOS ----- 150
Distribución en bloques incompletos balanceados ----- 151
Distribución en bloques incompletos parcialmente balanceados----- 159
Distribución en latice ----- 162
Distribución alfa - latice ----- 172
Diseños con doble bloqueo: alternativas a la distribución en cuadro latino----- 176
Distribuciones resolubles de bloques incompletos----- 178

CAPÍTULO VI

DISTRIBUCIONES CON BLOQUES ANIDADOS O MODIFICADOS ----- 183
Conjunto de experimentos replicados en el espacio (localidad) y en el
tiempo (temporada)----- 184
Experimentos replicados en el espacio (localidad) ----- 185
Experimentos replicados en el tiempo (temporada) ----- 192
Experimentos replicados en el espacio (localidad) y en el tiempo (temporada)----- 198
Distribución de bloques aumentados ----- 205
Distribución en cuadro latino con réplicas----- 208
Distribución en cuadro latino modificado ----- 216

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS ----- 222
Algunas consideraciones sobre el diseño de los experimentos agronómicos----- 223
Sobre el tipo de distribución experimental----- 223
Conveniencia de un experimento factorial sobre un ensayo de un solo factor por turno --- 225
Sobre los tratamientos----- 227
Sobre las variables de respuesta ----- 229
Sobre las herramientas estadísticas----- 230

Prueba de Kruskal - Wallis -----235
Prueba de Friedman -----239
Recomendaciones sobre las labores culturales en los experimentos-----242

CAPÍTULO VIII

ALGUNAS ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN-----246
Arreglos experimentales para optimización -----247
Arreglos factoriales San Cristóbal-----249
Diseño central compuesto -----255
Experimento factorial 2^k con una sola repetición -----263
Experimentos 2^k con una sola repetición en la agronomía -----266
Experimentos factoriales fraccionados -----274
Factorial 2^k fraccionado a un medio-----276
Experimento factorial 2^k fraccionado a la cuarta parte-----284
Experimentos en bloques con efectos confundidos -----288
Experimento en franjas-----296

CAPÍTULO IX

UTILIDAD ECONÓMICA DE LOS TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES -----305
Recomendaciones a partir de la rentabilidad de los tratamientos -----306
Definición de términos utilizados en la valoración económica de los tratamientos -----308
Tasa de retorno marginal -----310
Relación beneficio - costo-----313
Rendimiento óptimo económico -----315

ANEXOS-----317

BIBLIOGRAFÍA -----327

1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

Índices

Tablas



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



Tabla 1.1. Distribuciones experimentales básicas -----	33
Tabla 1.2. Escala cualitativa para valoración del control de malezas -----	42
Tabla 1.3. Escalas de severidad de la sigatoka negra en banano -----	45
Tabla 2.1. Coeficientes de variación para diferentes combinaciones de dimensiones parcela para un cultivo de yuca -----	57
Tabla 2.2. Definición del tamaño de parcela aplicando el test F de Fisher para diferencias significativas de $P < 0,05$ -----	59
Tabla 2.3. Dimensiones y tamaño de parcela (unidad de muestreo) para varios experimentos -----	62
Tabla 3.1. Tamaños de muestras para dos niveles de confianza y distintos errores admisibles considerando poblaciones infinitas -----	74
Tabla 3.2. Tamaños de muestra de poblaciones finitas para estimar proporciones considerando una varianza de $[0,5(1 - 0,5)]$ -----	75
Tabla 3.3. Esquema del análisis de varianza para un diseño completamente al azar. -----	93
Tabla 4.1. Datos de altura de planta (cm) -----	114
Tabla 4.2. Datos predichos o esperados -----	115
Tabla 4.3. Valores calculados para la elaboración de los gráficos de normalidad y homocedasticidad -----	116
Tabla 4.4. Análisis de varianza realizado en SPSS bajo un modelo de bloques completos al azar -----	119
Tabla 4.5. Análisis de normalidad realizado en SPSS -----	121
Tabla 4.6. Reporte del análisis de homocedasticidad de SPSS -----	122
Tabla 4.7. Variables con y sin ajuste a distribuciones normales -----	123
Tabla 4.8. Transformaciones sugeridas para estabilización de varianzas -----	124
Tabla 4.9. Datos de control de malezas a los 10dda (%) -----	126
Tabla 4.10. Análisis de varianza con los datos sin transformar -----	127
Tabla 4.11. Datos de control de malezas a los 10dda con transformación arcoseno -----	127
Tabla 4.12. Análisis de varianza con los datos transformados. -----	127
Tabla 4.13. Datos de producción en kg/racimo (Y) y diámetro del tallo (cm) como covariable (X) ³¹ -----	130
Tabla 4.14. Datos de longitud de guía (Y_1) y diámetro del fruto (Y_2) -----	135
Tabla 4.15. Estructura del análisis de varianza para una distribución completamente al azar con submuestreo -----	146
Tabla 4.16. Estructura de análisis de varianza para una distribución de bloques completos al azar con submuestreo -----	147
Tabla 4.17. Datos sobre la altura de planta (m) de banano con dos submuestras por parcela -----	148
Tabla 4.18. Análisis de varianza para una distribución de bloques completos al azar del ejemplo de aplicación 4.6 con submuestreo -----	148
Tabla 4.19. Análisis de varianza para una distribución de bloques completos al azar del ejemplo de aplicación 4.6 sin considerar el submuestreo -----	149

Tabla 5.1. Estructura del análisis de varianza para una distribución de bloques incompletos balanceados -----	155
Tabla 5.2. Datos de nitratos (ppm) de un ensayo bajo una DBIB del ejemplo de aplicación 5.1 -----	156
Tabla 5.3. Análisis de varianza para una DBIB del ejemplo de aplicación 5.1 -----	157
Tabla 5.4. Análisis de varianza obtenido con Minitab -----	158
Tabla 5.5. Medias ajustadas y error estándar de la media obtenidos con Minitab -----	158
Tabla 5.6. Aplicación de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) realizada con Minitab -----	158
Tabla 5.7. Esquema de un experimento bajo una DBIPB -----	160
Tabla 5.8. Grupos de asociados en 3, 2 y 1 bloques -----	160
Tabla 5.9. Datos del rendimiento de ocho variedades de papa (kg/parcela) bajo una DBIPB -----	161
Tabla 5.10. Análisis de varianza de los datos del ejemplo de aplicación 5.2 sobre un experimento realizado bajo una DBIPB (salida de Minitab) -----	161
Tabla 5.11. Prueba de Tukey para las medias del ejemplo de aplicación 5.2 (salida de Minitab) -----	162
Tabla 5.12. Datos (kg/parcela) ordenados del ejemplo de aplicación 5.3 -----	166
Tabla 5.13. Análisis de varianza considerando una DBCA -----	166
Tabla 5.14. Análisis de varianza con los datos del ejemplo de aplicación 5.3 considerando una DLS -----	170
Tabla 5.15. Promedios corregidos del ejemplo de aplicación 5.3 -----	171
Tabla 5.16. Esquema de análisis de varianza para una distribución alfa – latice -----	172
Tabla 5.17. Análisis de varianza para el ejemplo de aplicación 5.4, considerando una distribución de bloques incompletos con arreglo alfa – latice -----	175
Tabla 5.18. Comparación de medias utilizando el test de Tukey ($p < 0,05$) para el ejemplo de aplicación 5.4 -----	175
Tabla 5.19. Datos de incremento de altura (cm) en plantas de banano de un experimento bajo un DR-C -----	176
Tabla 5.20. Análisis de varianza de los datos del ejemplo de aplicación 5.5 realizado bajo una distribución renglón – columna (cuadrado de Youden) -----	178
Tabla 5.21. Prueba de Tukey ($p < 0,05$) aplicado a las medias del ejemplo de aplicación 5.5 -----	178
Tabla 5.22. Análisis de varianza del ejemplo de aplicación 5.6 -----	181
Tabla 6.1. Esquema de análisis de varianza para un mismo experimento replicado en el espacio (localidad) bajo una DBCA -----	186

Tabla 6.2. Rendimientos de papa en experimento desarrollado en la Localidad 1 de la zona de estudio -----	187
Tabla 6.3. Rendimientos de papa en experimento desarrollado en la Localidad 2 de la zona de estudio -----	187
Tabla 6.4. Rendimientos de papa en experimento desarrollado en la Localidad 3 de la zona de estudio -----	187
Tabla 6.5. Sumatorias para análisis de localidad, según los bloques-----	188
Tabla 6.6. Sumatorias para análisis de localidad, según los tratamientos (variedades) -----	188
Tabla 6.7. Análisis de varianza con efecto de bloques anidados en localidades del ejemplo de aplicación 6.1 -----	189
Tabla 6.8. Resultados de los análisis de varianza por localidad del ejemplo de aplicación 6.1 -----	191
Tabla 6.9. Separación de medias por localidad con la aplicación de la prueba de Tukey-----	192
Tabla 6.10. Esquema de análisis de varianza para un mismo experimento replicado en el tiempo (temporada) bajo una DBCA-----	193
Tabla 6.11. Rendimientos de caña de azúcar (t/ha) obtenidos en la temporada 1 -----	194
Tabla 6.12. Rendimientos de caña de azúcar (t/ha) obtenidos en la temporada 2-----	194
Tabla 6.13. Rendimientos de caña de azúcar (t/ha) obtenidos en la temporada 3-----	194
Tabla 6.14. Sumatorias para obtención de los efectos individuales y de interacción entre tratamientos y bloques -----	194
Tabla 6.15. Sumatorias para obtención de los efectos individuales y de interacción entre temporadas y bloques -----	195
Tabla 6.16. Sumatorias para obtención de los efectos individuales y de interacción entre tratamientos y temporadas-----	195
Tabla 6.17. Análisis de varianza del ejemplo de aplicación 6.2-----	197
Tabla 6.18. Resultados de los análisis de varianza por temporada del ejemplo de aplicación 6.2 -----	197
Tabla 6.19. Separación de medias por temporada con la aplicación de la prueba de Tukey-----	197
Tabla 6.20. Esquema de análisis de varianza para un experimento replicado en las mismas localidades durante varias temporadas, utilizando una DBCA-----	198
Tabla 6.21. Esquema de análisis de varianza para un experimento replicado en diferentes localidades durante varias temporadas, utilizando una DBCA-----	199
Tabla 6.22. Rendimientos de maíz (kg/ha) en la localidad "Guamaní" en los años 1, 2 y 3 -----	200

Tabla 6.23. Rendimientos de maíz (kg/ha) en la localidad "Belén" en los años 1, 2 y 3-----	200
Tabla 6.24. Sumatorias para obtener la interacción de tratamientos por temporada-----	201
Tabla 6.25. Sumatorias para obtener la interacción de tratamientos por localidad-----	201
Tabla 6.26. Sumatorias para obtener la interacción de temporada por localidad-----	201
Tabla 6.27. Sumatorias para obtener la interacción de segundo orden entre tratamientos, localidades y temporadas-----	201
Tabla 6.28. Sumatorias para obtener la suma de cuadrados de bloques anidados en la interacción de localidad por temporada-----	202
Tabla 6.29. Análisis de varianza del ejemplo de aplicación 6.3-----	204
Tabla 6.30. Resultados de los análisis de varianza por localidad del ejemplo de aplicación 6.3-----	204
Tabla 6.31. Aplicación de la prueba de Tukey para la separación de medias por localidad del ejemplo de aplicación 6.3-----	205
Tabla 6.32. Detalle del cálculo del factor de ajuste de bloques (B_{aj})-----	207
Tabla 6.33. Rendimiento ajustado-----	207
Tabla 6.34. Análisis de varianza solo para obtención del cuadrado medio del error experimental-----	208
Tabla 6.35. Fórmulas para calcular el error estándar de medias para pruebas de comparación entre tratamientos-----	208
Tabla 6.36. Grados de libertad para diseños en cuadro latino replicados, según los casos A, B y C-----	211
Tabla 6.37. Formas de cálculo de las sumas de cuadrados para diseños en cuadro latino replicados, según los casos A, B y C-----	211
Tabla 6.38. Análisis de varianza del ejemplo de aplicación 6.5 sobre DCL con réplica bajo el caso C-----	214
Tabla 6.39. Tratamientos de un experimento bajo una DCLM-----	218
Tabla 6.40. Datos de peso de 100 semillas (g) de un experimento bajo una DCLM-----	219
Tabla 6.41. Análisis de varianza para el ejemplo de aplicación 6.6-----	221
Tabla 7.1. Magnitud de los grados de libertad del error experimental entre los análisis de varianza de una DCA y una DBCA-----	224
Tabla 7.2. Esquema del ANDEVA para el análisis de las tres dosis de NO ₃ K-----	225
Tabla 7.3. Esquema del ANDEVA para el análisis de las dosis de CO ₃ Ca-----	226
Tabla 7.4. Esquema del ANDEVA para el análisis del factorial A x B-----	226
Tabla 7.5. Fuentes de variación y modelos lineales de las distribuciones experimentales básicas-----	233

Tabla 7.6. Número de insectos muertos/planta -----	236
Tabla 7.7. Número de larvas de <i>S. frugiperda</i> muertas/planta -----	240
Tabla 8.1. Combinaciones factoriales en arreglo San Cristóbal para dos y tres factores -----	250
Tabla 8.2. Datos de rendimiento (kg/ha) de maíz para un arreglo San Cristóbal con fertilizantes -----	251
Tabla 8.3. Codificación de las dosis -----	252
Tabla 8.4. Análisis de varianza de los tratamientos (fórmulas) estudiados -----	252
Tabla 8.5. Descripción de la variables regresoras (efectos lineales, cuadráticos e interacción) y de la variable dependiente -----	252
Tabla 8.6. Estadísticas de la regresión -----	253
Tabla 8.7. Análisis de varianza para la regresión -----	253
Tabla 8.8. Coeficientes del modelo de regresión y las pruebas de significancia para cada uno de ellos -----	253
Tabla 8.9. Clasificación de promedios del rendimiento (kg/ha), según el test de Tukey -----	254
Tabla 8.10. Análisis de varianza con separación de factores -----	254
Tabla 8.11. Niveles bajo y alto de los fertilizantes -----	258
Tabla 8.12. Arreglo factorial bajo el DCC con sus niveles y sus variables codificadas -----	258
Tabla 8.13. Rendimiento (t/ha) bajo el arreglo DCC -----	259
Tabla 8.14. Combinaciones factoriales (tratamientos) e interacciones dobles del tipo 2^5 -----	265
Tabla 8.15. Número de tratamientos (combinaciones factoriales), efectos principales y efectos secundarios generados por experimentos factoriales del tipo 2^k , hasta $k = 5$ factores -----	267
Tabla 8.16. Contrastes, efectos y sumas de cuadrados para cada factor e interacción doble -----	269
Tabla 8.17. Análisis de varianza inicial -----	270
Tabla 8.18. Análisis de varianza definitivo -----	272
Tabla 8.19. Promedios del rendimiento (kg/Parcela) por cada nivel factorial -----	273
Tabla 8.20. Cuantificación de los efectos producidos por varios experimentos del tipo 2^k -----	275
Tabla 8.21. Fracción principal del experimento factorial 2^{4-1} -----	279
Tabla 8.22. Experimento factorial fraccionario 2^{5-1} con generador $I = +ABCDE$ y los rendimientos del cultivo en unidades de kg/parcela -----	279
Tabla 8.23. Contrastes y sumas de cuadrados para cada efecto principal e interacción doble -----	280
Tabla 8.24. Análisis de varianza considerando una sola réplica para un factorial fraccionado a la mitad del tipo 2^{5-1} con 8 efectos principales en el error experimental -----	282

Tabla 8.25. Análisis de varianza considerando una sola réplica para un factorial fraccionado a la mitad del tipo 2^{5-1} con nueve efectos principales en el error experimental -----	282
Tabla 8.26. Niveles para un experimento factorial 2^{5-2} -----	285
Tabla 8.27. Efectos aliados del factorial fraccionado 2^{5-2} -----	285
Tabla 8.28. Efectos aliados del factorial fraccionado 2^{5-2} hasta las interacciones dobles -----	286
Tabla 8.29. Matriz para un factorial fraccionado 2^{5-2} -----	286
Tabla 8.30. Contrastes, efectos y sumas de cuadrados (SC) para cada efecto principal de un factorial fraccionado 2^{5-2} -----	287
Tabla 8.31. Análisis de varianza considerando una sola réplica para un factorial fraccionado 2^{5-2} -----	288
Tabla 8.32. Arreglos ortogonales para un experimento factorial 2^2 -----	289
Tabla 8.33. Formación de bloque con efecto confundido para las interacciones ABC y ABCD en experimentos del tipo 23 y 24, respectivamente -----	291
Tabla 8.34. Bloques de confusión para un experimento 24, confundiendo primero la interacción ABCD y luego la interacción BCD -----	292
Tabla 8.35. Factores y niveles del ejemplo de aplicación 7.6 -----	292
Tabla 8.36. Tratamientos del ejemplo de aplicación 8.6 -----	292
Tabla 8.37. Arreglos ortogonales* para un experimento con tres factores a dos niveles cada uno -----	293
Tabla 8.38. Datos del rendimiento de arroz (kg/parcela) del ejemplo de aplicación 8.6. -----	294
Tabla 8.39. Sumas de cuadrados para los factores y las interacciones del ejemplo de aplicación 8.6 -----	295
Tabla 8.40. Análisis de varianza para los factores principales e interacciones dobles con la confusión del efecto de la interacción ABC -----	295
Tabla 8.41. Análisis de varianza sin la confusión del efecto de la interacción triple ABC, bajo una distribución de bloques completos al azar -----	296
Tabla 8.42. Niveles de los factores evaluados -----	298
Tabla 8.43. Matriz de datos organizados del ejemplo 8.7 -----	299
Tabla 8.44. Matriz de la suma de datos de cada nivel del factor A de acuerdo a cada repetición -----	299
Tabla 8.45. Matriz de la suma de datos de cada nivel del factor B de acuerdo a cada repetición -----	299
Tabla 8.46. Matriz de las interacciones de los factores A y B -----	300
Tabla 8.47. Análisis de varianza el ejemplo de aplicación 8.7 sobre un experimento en franjas -----	303
Tabla 8.48. Análisis de varianza del ejemplo de aplicación 8.7 realizado con el software Infostat -----	304

Tabla 9.1. Ejemplo de Presupuesto Parcial para un experimento sobre la valoración del efecto de 5 dosis de nitrógeno en arroz -----	311
Tabla 9.2. Tasa de retorno marginal-----	312
Tabla 9.3. Relación beneficio/costo de los tratamientos -----	313
Tabla 1A. Áreas de curva normal estándar con escala Z. -----	318
Tabla 2A. Valores críticos de la distribución t de student para distintos niveles de significancia α -----	319

1^{RA} EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

Índices

Figuras



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



Figura 2.1 Esquema de líneas de igual fertilidad en un mapa de heterogeneidad de suelo-----	55
Figura 2.2. Relación entre el coeficiente de variación y las dimensiones (ancho x largo) de las unidades de muestreo -----	57
Figura 2.3. Determinación de parcela experimental (unidad de muestreo) para ensayos de arroz -----	58
Figura 2.4. Descripción gráfica de la metodología de Hatheway-----	62
Figura 3.1. Esquema sobre la variabilidad del tamaño de una muestra n respecto del tamaño de una población N conocida-----	70
Figura 3.2. Error máximo admisible o distancia entre la media muestral y la media de su población infinita correspondiente-----	71
Figura 3.3. Ubicación del valor crítico de la variable y su correspondiente escala Z -----	82
Figura 3.4. Magnitud de la potencia -----	83
Figura 3.5. Incremento de la potencia de la prueba por el incremento del tamaño muestral -----	84
Figura 3.6. Esquema de la diferencia mínima entre dos promedios a partir de la cual se establece variación significativa entre dos tratamientos (DMS)-----	88
Figura 3.7. Esquema de la relación entre la varianza intragrupos (CM_E) y los grados de libertad del error experimental-----	92
Figura 4.1. Esquema de la medición de altura de plantas -----	99
Figura 4.2. Esquema de la formación de macollos en un cereal	
Figura 4.3. Detalle de la unidad de muestreo dentro de una unidad experimental (parcela)-----	101
Figura 4.4. Gráfica de probabilidad normal-----	116
Figura 4.5. Gráfica para verificar homocedasticidad-----	118
Figura 4.6. Secuencia en el software SPSS para realizar el análisis de varianza y la verificación gráfica de la normalidad y homocedasticidad-----	119
Figura 4.7. Gráfica de residuos reportado por el software SPSS para verificar normalidad y homocedasticidad-----	120
Figura 4.8. Secuencia en el software SPSS para realizar el análisis de normalidad con las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk -----	121
Figura 4.9. Secuencia en el software SPSS para realizar el análisis de homocedasticidad mediante el test de Levene -----	122
Figura 4.10. Ingreso de datos en el Infostat -----	131
Figura 4.11. Secuencia del análisis en Infostat-----	131
Figura 4.12. Secuencia para la realización del análisis de varianza en Infostat -----	132
Figura 4.13. Secuencia para la realización del análisis de covarianza en Infostat -----	132
Figura 4.14. Proceso para la obtención de correlación entre las variables longitud de guía y diámetro del fruto-----	136

Figura 4.15. Secuencia para la obtención del análisis de varianza multivariado (ANDEVAM) -----	137
Figura 4.16. Clasificación de las variables dentro de la pestaña para la realización del ANDEVAM -----	137
Figura 4.17. Definición del modelo del ANDEVAM, considerando una distribución de bloques completos al azar -----	138
Figura 4.18. Selección del test de Tukey dentro de la pestaña <i>Post hoc</i> -----	140
Figura 4.19. Secuencia de pasos para verificar la normalidad mediante el test de Shapiro - Wilk en SPSS -----	142
Figura 4.20. Definición del modelo, considerando sólo el factor principal para verificar homocedasticidad -----	143
Figura 4.21. Selección de la pestaña para el análisis de homocedasticidad -----	144
Figura 5.1. Esquema de una distribución de bloques incompletos balanceados (DBIB) con cuatro tratamientos aleatorizados en tres unidades experimentales por bloque -----	153
Figura 5.2. Estructura de los datos de un experimento alfa – latice previo al análisis en un software estadístico -----	174
Figura 5.3. Escala lineal tipo hedónica -----	179
Figura 5.4. Esquema parcial de la matriz de datos para su análisis en un software -----	180
Figura 5.5. Análisis gráfico de residuos para los datos del ejemplo de aplicación 5.6 -----	181
Figura 6.1. Esquema de un experimento de seis tratamientos, bajo una distribución de bloques completos al azar y replicado en tres localidades (bloques anidados en localidad) -----	185
Figura 6.2. Esquema de la base de datos para la realización del análisis en un software estadístico -----	190
Figura 6.3. Salida del software Infostat, con el análisis de varianza y la prueba de Tukey -----	191
Figura 6.4. Esquema de la distribución de bloques aumentados del ejemplo de aplicación 6.4. -----	206
Figura 6.5. Esquema de un diseño en cuadro latino con cuatro tratamientos y dos réplicas, utilizando las mismas filas o las mismas columnas (a); o con diferentes filas y columnas (b) -----	210
Figura 6.6. Estructura de un diseño cruzado de tres tratamientos aplicados bajo una distribución de cuadro latino (3 x 3) con dos réplica -----	216
Figura 6.8. Aleatorización de los grupos por columna en el diseño DCLM -----	217
Figura 6.9. Croquis de ubicación de 12 tratamientos en una DCLM -----	218
Figura 6.10. Croquis de ubicación de los 18 tratamientos del ejemplo de aplicación 6.6. -----	219
Figura 7.1. Verificación gráfica de la falta de normalidad y de homocedasticidad -----	237
Figura 7.2. Ingreso de datos a Infostat para la realización del test de Kruskal – Wallis -----	238
Figura 7.3. Secuencia de pasos en el Infostat para la realización del test de Kruskal-Wallis -----	238

Figura 7.3. Estructura de la base de datos en Infostat para la realización del test de Friedman-----	241
Figura 7.4. Ubicación del test de Friedman en el software Infostat-----	241
Figura 8.1. Matriz de puntos experimentales en un arreglo San Cristóbal para dos factores-----	249
Figura 8.2. Matriz de puntos experimentales en un arreglo San Cristóbal para tres factores-----	250
Figura 8.3. Esquema de la matriz de puntos experimentales en un arreglo central compuesto para dos y tres factores-----	256
Figura 8.4. Superficie de contorno y de respuesta para los factores nitrógeno y fósforo-----	261
Figura 8.5. Superficie de contorno y de respuesta para los factores nitrógeno y potasio-----	261
Figura 8.6. Superficie de contorno y de respuesta para los factores fósforo y potasio-----	262
Figura 8.7. Identificación de niveles para los cuales el rendimiento es máximo-----	263
Figura 8.8. Indicación del postulado "80/20" de Pareto-----	272
Figura 8.9. Promedios registrados por cada nivel del factor B-----	273
Figura 8.10. Promedios registrados por la interacción de los factores A y C-----	273
Figura 8.11. Promedios registrados por la interacción de los factores A y D-----	274
Figura 8.12. Esquema de un diseño factorial 2^3 fraccionado a la mitad-----	276
Figura 8.13. Diagrama de Pareto para identificar los efectos de importancia-----	281
Figura 8.14. Efectos principales de los factores A, B, C y D-----	283
Figura 8.15. Efectos de las interacciones dobles AC y CE-----	284
Figura 8.16. Diagrama de Pareto para identificar los efectos principales en un factorial 2^{5-2} -----	287
Figura 8.17. Efectos principales por niveles-----	288
Figura 8.18. Esquema de un bloque (repetición) de un experimento factorial en franjas-----	297
Figura 8.18. Esquema de la estructura de datos y del modelo respectivo para un experimento en franjas en el software Infostat-----	303
Figura 9.1. Curva de dosis de nitrógeno versus beneficio neto-----	312
Figura 9.2. Curva de dosis de nitrógeno versus la relación B/C-----	314
Figura A1. Curva de operación característica para experimentos de dos tratamientos, como prueba de dos colas y 0,05 de significancia (Montgomery, 2005)-----	320
Figura A2. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 1 grado de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).-----	320

.....

Figura A3. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 2 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	321
Figura A4. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 3 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	321
Figura A5. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 4 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	322
Figura A6. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 5 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	322
Figura A7. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 6 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	323
Figura A8. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 7 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	323
Figura A9. Curva de operación característica para el análisis de varianza, bajo el criterio de efectos fijos, con 8 grados de libertad en el numerador (V_1) y con 6 o más grados de libertad en el denominador (error experimental) (V_2) (Montgomery, 2005).....	324
Figura A10. Estructuras en latice (cuadrados) balanceados para experimentos con 9, 16 y 25 tratamientos (Cochran y Cox, 1978).....	325
Figura A11. Estructuras en latice rectangulares no balanceados para experimentos con 12, 20 y 30 tratamientos (Cochran y Cox, 1978).....	326

1ª EDICIÓN

PRECISIÓN EN LOS EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

Algunas Consideraciones y Alternativas

Prólogo



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



PRÓLOGO

La agricultura es una de las actividades humanas más diversas, la cual, por necesidad, debe cambiar continuamente para hacer producir los cultivos de la forma más eficientemente posible. En esta búsqueda por mejorar los rendimientos de las cosechas, toma contundencia a inicios del siglo XX, desde la perspectiva *fisheriana*, una de las herramientas del método científico fundamental, como es la experimentación. Los experimentos agrícolas, también llamados ensayos agrícolas, llevados a cabo mediante el debido protocolo, son los que han permitido establecer muchas alternativas aplicables a la agricultura y además han venido mejorándose continuamente. Por ello, el rigor científico de los experimentos en su planificación protocolaria es lo que los caracteriza dentro de la eficiencia y la objetividad, lo que a su vez está ligado a la precisión experimental; esta última, un componente que debe ser fundamental y subyacente de los experimentos para que éstos tengan la eficacia necesaria en la detección de los efectos de las alternativas de prueba.

La precisión de los experimentos es uno de los aspectos fundamentales que hace posible detectar diferencias entre los distintos tratamientos que se evalúan en un ensayo, cuya máxima ocurrencia depende básicamente de un oportuno diseño, de un adecuado manejo experimental y de un consecuente procedimiento para la medición de las variables de respuesta. En este sentido, un experimento preciso nos protege de caer en decisiones erradas como la de negar una alternativa que en un escenario determinado tiene efectos reales (error tipo II), sin embargo, por la falta de control de la varianza interna del ensayo son obviados a nivel experimental. Esta falta de precisión crea así un falso negativo que desechará, posiblemente, alguna oportunidad de mejorar la productividad de algún cultivo o, incluso, de afianzar o refutar una teoría fundada.

Un experimento preciso permite lograr eficiencia en los recursos que se destinan a la investigación, ya que al poder discernir claramente los efectos de las distintas alternativas que se prueban en un ensayo desde una primera experiencia, es posible acortar los tiempos e ir delineando relativamente rápido la vía de un proceso de investigación; evitando así el desarrollo de experimentos adicionales con fines de confirmación que, por lo general, hacen muy costoso el proceso. Al tener experimentos sensibles, con un control adecuado del error experimental, indirectamente es posible ampliar los programas de investigación a nivel institucional dentro de cualquier ciencia, pues quedan recursos que podrían invertirse en ensayos de otros procesos de indagación.

En pro de esa necesaria precisión experimental en los ensayos agrícolas se ha escrito este texto, explicando en sus nueve capítulos varios métodos y algunas consideraciones que el investigador podría tomar en cuenta, tanto en la planeación y desarrollo como en la toma, análisis e interpretación de sus datos. Es así como también se han incluido metodologías de la experimentación industrial, utilizados en optimización de procesos que, a pesar de tener fases no tan prácticas para aplicarse en la agricultura, se detallan para que se reconozcan componentes importantes de éstas. En este sentido se expone, por ejemplo, un caso de los diseños de segundo orden para generar superficies de respuesta, con el fin de que el investigador pueda adaptarlas parcialmente a la experimentación agrícola y así tomar decisiones más precisas.

Se inicia con el capítulo I haciendo una explicación sobre las distribuciones experimentales¹, sus fundamentos de uso y una descripción sobre los distintos tipos de experimentos que se desarrollan en la agronomía y que podrían aportar a una mayor precisión en los resultados. Con esta perspectiva, es preciso indicar que, si bien el manejo de un ensayo es de mucha

¹ Se prefiere utilizar en este texto la definición de DISTRIBUCIÓN EXPERIMENTAL haciendo referencia a lo que comúnmente se llama DISEÑO EXPERIMENTAL, dado que, bajo el criterio del autor, estos términos holísticamente son dos cosas distintas.

importancia, la selección de una distribución experimental que esté en consecuencia con un determinado ambiente en donde se desarrollará la experiencia puede ser incluso mucho más importante que dicho manejo. No hay que olvidar que, dentro del diseño o planeación de un experimento, la selección de la distribución se hace antes que el manejo.

En el capítulo II del texto se explica detalladamente sobre las diferentes metodologías para definir el tamaño de las unidades experimentales, pasando desde los mapas de heterogeneidad del suelo hasta la descripción del método de Hatheway; temáticas que, en la bibliografía a nivel regional, y especialmente a nivel local, son muy escasas, siendo de enorme importancia en la precisión de los experimentos. En el capítulo III se exponen las técnicas para seleccionar tanto los diferentes tipos de muestreo como la definición de los tamaños muestrales, incluyéndose métodos para investigaciones observacionales, así como para las de tipo experimental.

En el capítulo IV se señalan algunas consideraciones sobre las variables más comúnmente valoradas en los ensayos. También se precisan algunas alternativas para verificar normalidad y homocedasticidad de datos, además de las técnicas de ajustes para estabilizar las varianzas, utilizando de soporte algunos programas de estadística como *Infostat*, *IBM SPSS statistics* y *Minitab*. Igualmente, se detalla una alternativa adicional de ajuste como lo es el análisis de covarianza; así como el análisis de varianza multivariado para utilizarse cuando se tienen variables dependientes relacionadas que podrían involuntariamente incrementar, en la práctica, la probabilidad del error tipo I. Como parte final de este capítulo se incluye la descripción de un modelo de análisis de varianza que considera la variabilidad debido al submuestreo, presentado como otra alternativa para minimizar el error experimental al sustraer la variabilidad que ocurre al interior de las propias unidades experimentales.

Algunas de las distribuciones en bloques incompletos se tratan en el capítulo V. Este apartado describe varias alternativas de uso en cuanto a distribuciones que utilizan bloques que incluyen sólo una parte de un número elevado de tratamientos que se prevén evaluar en un ensayo, cuya característica principal es la de poder controlar de forma eficaz la heterogeneidad del suelo; a diferencia de los ensayos con bloques completos que pierden precisión al ampliarse extensamente en el campo. Se detallan temáticas relacionadas a distribuciones con bloques incompletos balanceados y parcialmente balanceados, distribuciones en latice, distribuciones en alfa - latice, algunas alternativas de distribución de cuadro latino y terminando con una explicación rápida sobre distribuciones resolubles de bloques incompletos. Complementariamente, en el capítulo VI se incluyen algunas distribuciones con bloques anidados por características de replicación en espacio y tiempo, experimentos exploratorios con bloques aumentados, además de cuadrados latinos replicados y modificados.

En el capítulo VII se especifican algunas consideraciones a tener en cuenta sobre el diseño de experimentos agrícolas, relacionadas al propio tipo de distribución experimental, a la conveniencia de los arreglos factoriales, a los tratamientos, a las variables de respuesta y a las herramientas estadísticas. Así también, se incluye información sobre las pruebas no paramétricas, análogas a los análisis de varianza para una distribución completamente al azar y de bloques completos al azar; concluyendo con algunas indicaciones sobre las labores culturales que se realizan en los experimentos.

Subsecuentemente, en el capítulo VIII se describen algunos arreglos experimentales (o diseño de tratamientos factoriales) para optimización, tales como los factoriales incompletos San Cristóbal y el Central Compuesto; este último utilizado en la metodología de Superficie de Respuesta. Igualmente, se hace una exposición sobre los factoriales 2^K con una sola réplica y fraccionados, los cuales son utilizados a nivel exploratorio y en procesos de optimización; siendo todos, arreglos factoriales que pueden ser adaptados para utilizarse en los ensayos agrícolas. También se incluye la temática de los factoriales que se realizan en bloques con

efecto de confusión (también con bloques incompletos), como alternativas de control de la heterogeneidad del suelo. Asimismo, se ha visto conveniente incluir como último tema de este capítulo lo referente a los experimentos en franjas, alternativa ideada para experiencias en las cuales se valoran dos factores que tienen cierta restricción al ser distribuidos dentro de las unidades experimentales, de allí que se ubiquen en franjas para un mejor control de los efectos de traslape entre tratamientos.

Finalmente, el capítulo IX se ha estructurado tomando en consideración el gran dilema entre lo que es significancia estadística y significancia práctica, definida esta última a través del beneficio económico que pueden ofrecer los tratamientos de un ensayo. En forma breve, se hace una descripción de la metodología de la tasa de retorno marginal como una opción para definir la recomendación de tratamientos de un ensayo en función de la utilidad económica de cada uno de ellos; además, se incluyen temas como la relación beneficio-costos y lo concerniente al rendimiento óptimo económico. La necesidad de incluir esta temática viene dada por su importancia en gran parte de los experimentos agrícolas, ya que éstos comúnmente se desarrollan en ambientes altamente volubles en espacio y tiempo, por consiguiente, podría ocurrir que alternativas con efectos estadísticamente significativos inoslayablemente deben relegarse porque no presentan ninguna ventaja en términos de rentabilidad para el agricultor.

No es de menos indicar que este documento se ha propuesto para contrarrestar ciertos criterios arraigados que muchas veces restan precisión y/o exactitud a un ensayo, como el de creer que todo dato porcentual debe ser sometido a un ajuste angular, o el de medir el número de macollos por m² en siembras de arroz directa cuando no se lo ha voleado adecuadamente, o incluso el de seguir utilizando una distribución de bloques en un mismo campo cuando en experimentos previos no se han detectado diferencias significativas en la fuente de bloqueo. Estos son solo algunos de los elementos que han servido de fundamento para la redacción de este texto.

La obra se ha concebido como un complemento al diseño de experimentos agrícolas, aportando con descripciones conceptuales y de ejemplos en algunos casos, de tal forma que aquel que realiza investigación agrícola adquiera y/o amplíe el razonamiento integral en la definición de los ensayos, partiendo del supuesto de que el lector tiene un conocimiento previo del diseño experimental en esta ciencia. Se ha tratado de abarcar, al menos, las más importantes alternativas y metodologías a las que puede recurrir quien diseña un experimento agrícola, con el propósito de que los resultados experimentales tengan la mayor precisión posible. Queda a disposición esta humilde obra, esperando que sea un aporte importante en la planeación, desarrollo y éxito de sus experimentos.

Freddy Gavilánez Luna

Todo experimento eficiente es eficaz, pero no todo experimento eficaz es eficiente. La eficacia sólo depende de la precisión, la eficiencia de la precisión y de la exactitud. ¡Te allí la importancia de la base teórica, de la estructura del diseño y del manejo de un experimento! ¡Te allí la diferencia respecto de una aparente tautología!!

CAPÍTULO I

EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

El éxito en la precisión de un experimento se fundamenta en su adecuado diseño y en el rigor científico de su manejo, entendiéndose como éxito que dicha precisión sea absoluta y no relativa. Por lo tanto, también es fundamental la base teórica, empírica e intuitiva del investigador...



Madrid - Buenos Aires - México - Bogotá



El diseño de experimentos

Cuando se ha identificado una problemática, sea ésta de aplicación práctica o de conocimiento y se decide buscar su solución evaluando una o varias alternativas de prueba, en esas circunstancias se está experimentando. Desde esta perspectiva, un experimento se realiza para identificar una posible solución que se establece al momento de evaluar los efectos de unos tratamientos, cuya objetividad y precisión se logran cuando se lo lleva a cabo con rigor científico; esto quiere decir que, tanto su planeación como su desarrollo, así como los resultados y conclusiones a los que se arribe, se fundamentan en un protocolo metodológico previamente establecido y bajo la concepción del método científico. Esta acepción contextual de experimento difiere con los de características netamente empíricas, que también permiten arribar a resultados, pero éstos en la mayoría de las veces no tienen una base científicamente explicativa que produzcan un conocimiento integral.

La agronomía tal vez sea una de las ciencias que más requiere de la realización de experimentos, debido al ambiente tan diverso sobre el que se desarrollan los cultivos y a la demanda constante de incrementar la producción de alimentos bajo términos de eficiencia. Sin embargo, y en concordancia con lo indicado en el párrafo anterior, un experimento requiere toda una parafernalia doctrinal para su diseño; partiendo desde la verificación del área experimental y su ambiente, la definición de cuáles y cuántos serán los tratamientos, sus repeticiones, el tipo de distribución, las variables a medirse, el manejo del cultivo durante la experiencia, hasta el tipo de herramienta estadística a utilizarse. De allí que cuando se habla de diseño experimental no sólo comprende el tipo de distribución a emplearse, sino el establecimiento y la definición de los límites de todos los elementos antes mencionados que permitan, a su vez, determinar claramente el efecto de los tratamientos de cuyas respuestas se tiene una idea hipotética.

Diseñar un experimento agrícola (o en cualquier otra ciencia) es contextualizar y conceptualizar una planificación a seguir, originado de una problemática para la cual se plantean unos objetivos fundamentados en consideraciones hipotéticas que vienen a constituirse en el impulso del investigador, a través de las cuales prevé conjugar la teoría y los hechos, de tal forma que se pueda solucionar dicha problemática. En esta sistematización del método científico se busca pasar del planteamiento deductivo al inductivo, realizando recomendaciones generales para los agricultores que les permitan mejorar productiva y rentablemente su actividad. Para este fin, el diseño de un experimento debe ser eficiente en el sentido de controlar el error experimental y eficaz para la comprobación de las hipótesis planteadas (Pantoja, 1989); lo que consecuentemente deberá permitirle al investigador extraer la mayor información posible de un ensayo con la mínima inversión económica, dado lo costoso que puede resultar una investigación y las limitaciones económicas que siempre existen.

El diseño de experimentos es una de las herramientas principales del método científico que se ha establecido con el propósito de producir conocimiento o de resolver problemas específicos, el cual, bajo la focalización de este método, se desarrolla dentro de límites lógicos y de objetividad. En este sentido, su fundamento reside en la relación de los métodos deductivo-inductivo establecidos por Galileo Galilei en el siglo XVI y cuya aplicación práctica, considerando elementos de control experimental como la aleatorización, empezó a difundirse a inicios del año 1930 por Ronald Fisher. El diseñar un experimento consiste en una definición o cambio deliberado de alternativas a probarse en un proceso productivo como el agrícola (o cualquier otro), bajo parámetros rigurosos que permitan tener la certeza de que el cambio que causen dichas alternativas de prueba no sea producto de efectos casuales. Dada la complejidad de fenómenos y ambientes sumamente variables que rodean a las ciencias biológicas, antes que en otras ciencias, la ortodoxia del método científico tal vez sea requerida con mayor intensidad en esta área si queremos alcanzar resultados contundentes.

Aparte del protocolo en el manejo experimental, para complementar el rigor científico de los ensayos en general, éstos deben desarrollarse bajo tres principios fundamentales. El primero de ellos es la *aleatorización* en la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales (o viceversa), lo cual protege al investigador de caer fácilmente en el error I (α); el mismo que, según se vaya explicando en párrafos y capítulos posteriores, podría ser el más costoso dentro de la investigación agrícola. Además, la aleatorización es la que procura la independencia de los residuos, uno de los tres supuestos que demanda la aplicación de pruebas de la estadística paramétrica.

El segundo principio del diseño de experimentos es la *repetición*. Si los tratamientos de un experimento no tienen repeticiones se hace imposible valorar efectivamente el error experimental, de allí que sería muy riesgoso confiar en las respuestas que se obtengan en este tipo de experimento. Sólo las repeticiones, que no deben confundirse con réplicas de medición², son las que ofrecen precisión matemática a un experimento (la precisión empírica viene del manejo del ensayo), ya que permiten controlar el error II (β) y aumentar la potencia estadística de una prueba. No obstante, cuando se realizan experimentos de tipo exploratorios con más de un factor de estudio, utilizando sólo dos niveles por factor y que no sean tan comunes en la agronomía, puede optarse por realizar una sola repetición; en este caso, se utilizan los efectos de las interacciones triples o de mayor grado, que generalmente resultan no significativos y complicados de explicar, para formar la fuente del error experimental. Corrientemente, lo último puede realizarse cuando el ensayo contiene cuatro o más factores de exploración.

Finalmente, el tercer principio es la formación de *bloques* (bloqueo) en un experimento, también llamado en algunos casos como *control local*. Este principio específicamente está referido a distribuciones que se aplican en ambientes no controlados, tales como las de bloques completos e incompletos al azar o cuadrados latinos que se utilizan en ensayos de campo; y por su requerimiento de homogeneidad en las condiciones de suelo, no rige para las distribuciones completamente al azar. Un ejemplo de la necesidad de bloqueo experimental se da cuando se realiza un ensayo en un suelo con una pendiente, en donde puede existir una diferencia nutricional que influya de manera importante en los resultados; situación ante la cual una distribución como la de bloques al azar permitirá tener un mejor control de esta fuente de variación secundaria, reduciendo la influencia de dicho efecto al formar pequeños bloques homogéneos, de tal forma que esta variabilidad se vea reflejada entre dichos bloques y no entre los tratamientos.

Es oportuno indicar que, en la búsqueda de precisión en los experimentos, la planificación o diseño de éstos tomando en cuenta todas las previsiones del caso es fundamental. Por ello, su estructura debe ampararse bajo la percepción de gente que, por un lado, entienda sobre el fenómeno de estudio y, por otro, lo pueda describir. Los investigadores que estarán al frente de un ensayo podrán tener el conocimiento sobre lo que están indagando, pero muchas veces la estructura o el marco estadístico del experimento no lo definen claramente; o, en el peor de los casos, no consideran ciertos aspectos del diseño que al final lo pueden hacer muy impreciso. En este caso, la asistencia de un biometrista³ al momento de diseñar el experimento

² No debe confundirse la diferencia elemental entre la repetición de un tratamiento y lo que se llama réplica de medición. Una repetición viene a constituirse en una unidad experimental (parcela) sobre la que se aplica un tratamiento y son las que permiten estimar el error experimental en un ensayo cuando se tienen dos o más repeticiones; mientras que una réplica no es más que medir una variable dos o más veces dentro de una misma unidad experimental. Ejemplos prácticos de réplicas son las mediciones de varias plantas de una misma unidad experimental para obtener la altura de planta, cuya media (estimador de su valor) de dichas réplicas constituye el dato observado. Las repeticiones o unidades experimentales de los tratamientos son las que hacen posible valorar el error experimental; y las réplicas u observaciones al interior de las unidades experimentales sólo permiten valorar el error de muestreo.

³ Podríamos decir que lo más adecuado es que este profesional, además de tener un conocimiento estadístico, tenga la formación del área científica a la cual pertenece el experimento a desarrollar; esto es, el biometrista debe entender

siempre será fundamental para la efectividad de detección que tenga el ensayo; de allí la importancia de lo mencionado por Fisher, cuando dijo que “consultar a un estadístico después de que un experimento ha sido terminado, en general, puede no ser más que pedirle un examen *post mortem*; pues él puede quizás decir de qué murió el experimento”.

Distribuciones experimentales

Para el diseño de experimentos se tienen algunas alternativas de distribución básica que raudamente se mencionaron en uno de los párrafos del tema anterior y que deben ser seleccionadas, en el caso de la agronomía, de acuerdo al ambiente en donde se desarrollará la experiencia; de tal forma que se busque minimizar el error experimental. Estas distribuciones, debido a su capacidad de bloqueo de fuentes de variación secundaria⁴, pueden clasificarse de manera general en la forma indicada en la tabla 1.1.

Cabe aquí mencionar la importancia del principio de la aleatorización cuando no se detecta, en el ambiente experimental, alguna fuente de variación secundaria que produzca un efecto perturbador, pues sólo este principio minimiza dicho efecto. Así también es necesario indicar que, si en el contexto del experimento a desarrollar, el investigador identifica potenciales fuentes de variación secundaria, éstas podrían ser controladas con distribuciones que utilizan estructuras de bloques; de allí lo fundamental en el discernimiento indubitable sobre las circunstancias en que deberá utilizarse una distribución experimental dada. Existen también casos de fuentes de variación secundaria que no se pueden controlar con la distribución experimental, no obstante, pueden tratarse como covariables y aplicar un análisis de covarianza para nulificar el efecto perturbador de éstas. De esto último se realiza una explicación en el capítulo IV.

Una de las fuentes de variación secundarias principales (la más importante) que puede afectar los resultados de un experimento es el suelo, debido a su inexorable heterogeneidad. Por ello es que una distribución completamente al azar (DCA) se recomienda cuando se realizan experimentos en macetas, para reproducción de plantas o análisis de nutrientes, que generalmente se llevan a cabo en viveros o incluso en invernaderos; ensayos en los cuales no se evidencian fuentes con necesidad de bloqueo, ya que, por ejemplo, el suelo que se coloca en dichas macetas es homogenizado previamente. Una DCA es una distribución que también se utiliza a nivel de laboratorio, como en la reproducción de plantas *in vitro*, en donde también se tiene un ambiente prácticamente controlado. Su ventaja principal es la generación del mayor número de grados de libertad del error experimental, lo que comparativamente lo define como la distribución de mayor precisión estadística. Si bien su uso no se recomienda para experimentos que se realizan en campo, por su característica de no controlar ninguna fuente de variación secundaria, podrían utilizarse en este ambiente siempre que el suelo en donde se haya previsto el desarrollo del ensayo presente una relativa homogeneidad en cuanto a fertilidad, pendiente o cualquier otra característica física o edáfica del mismo.

el fenómeno para que su aporte en los resultados del ensayo tenga la eficacia necesaria. En la experimentación agrícola, no sólo basta con conocer sobre estadística, hay que tener los fundamentos para hacer las recomendaciones pertinentes en cuanto al diseño, desarrollo, medición de variables y análisis de los datos del experimento.

⁴ Las fuentes de variación secundarias son los factores que no son el objeto de estudio en los experimentos. Son efectos confirmados o probables debido a causas como, por ejemplo, la pendiente de un terreno, que el investigador identifica y bloquea con alguna distribución experimental como la de bloques completos o incompletos al azar o la de cuadro latino. Estas fuentes también se conocen como *variables de “ruido”*, debido a que pueden incluir en la variable respuesta una variación que no es atribuible a los tratamientos; por ello, al aplicar alternativas que bloqueen o nulifiquen su efecto, se denominan como *variables de ruido controladas*. En algunos textos, a estas variables secundarias, plenamente identificadas en un experimento, se las conocen también como variables “*NUISANCE*” (tontería), dado que su importancia, al ser variables de interés secundario dentro de un experimento, radica en que ellas sean controladas y no influyan en la respuesta del efecto de interés.

Tabla 1.1. Distribuciones experimentales básicas.

Ambiente controlado		Ambiente no controlado*	
Distribución completamente al azar (DCA)	Sin bloqueo de fuentes secundarias	Distribución de bloques completos al azar (DBCA)	Un solo bloqueo
		Distribución en cuadro latino (DCL)	Doble bloqueo
		Distribución en cuadro grecolatino (DCGL)	Triple opción de bloqueo

*Como distribución básica, en estos ambientes también se incluyen los de bloques incompletos.

La distribución de bloques completos al azar (DBCA) es la que más se utiliza en los experimentos de campo, en algunas veces no tanto por la presencia de fuentes de variación secundaria que sean evidentes en el suelo del área de ensayo, sino más bien como prevención de que existan los efectos de estas fuentes y puedan incidir en las respuestas de los tratamientos. Está indicada para contrarrestar sólo una fuente secundaria en experimentos con cultivos anuales de distancias de siembra reducidas, pues permite un solo bloqueo para afectaciones que pueden ser por pendiente del terreno, heterogeneidad en la fertilidad del suelo, cercanías a esteros o ríos o cualquier otra característica que se vea amenazante a la precisión en la determinación de los efectos de los tratamientos. Su mayor ventaja reside en el control que puede realizar de una fuente secundaria identificada en el área experimental, que es minimizada al formar bloques (que a su vez son las repeticiones) compactos, a manera de miniexperimentos, lo que consecuentemente evita una mayor afectación por la heterogeneidad del suelo y permite una comparación sin interferencia de efectos extraños entre los tratamientos; pues es de esta manera que hace posible reducir el error experimental. Su amplia utilización también se debe a cuestiones económicas, ya que el uso preventivo de bloques evita realizar experimentos en blanco o de uniformidad que duplican el tiempo y el costo de los ensayos.

A pesar de que el uso de una distribución experimental con bloqueo puede ser innecesario en algunos casos (si la fuente de bloqueo no tiene efectos significativos), ya que estadísticamente restan claridad a un ensayo al disminuir sus grados de libertad del error experimental⁵, su utilización permitirá definir en posteriores experimentos de campo la posibilidad de optar por la DCA; siendo esta última la distribución que comparativamente tiene una mayor precisión estadística. Asimismo, el uso de distribuciones con bloques se presenta como una gran alternativa cuando se tienen experimentos relativamente grandes, en donde algunas labores experimentales (riego, control de malezas, podas, medición de variables) no pueden realizarse en un solo día y, por lo tanto, una buena opción es llevarlas a cabo parcialmente, pero con bloques terminados; completando todo el experimento en el menor tiempo posible. El bloqueo también permite controlar fuentes de variación que pueden ser introducidas al ensayo cuando se utiliza distinta mano de obra para su manejo; en esta condición, la asignación de bloques completos a una misma persona permitirá controlar esta posible fuente de error.

La distribución en cuadro latino (DCL) se recomienda cuando el experimento involucra a cultivos de distancias de siembra amplias como mangos, aguacates, limones, cacao, palma africana, entre otros. Su mayor ventaja es la de poder controlar dos fuentes de variación secundarias (doble bloqueo), que pueden estar presentes en el suelo cuando el área de ensayo se extiende ampliamente y consecuentemente se incrementa la heterogeneidad en el suelo. Por cuestiones de precisión al generar escasos grados de libertad en el error experimental cuando

⁵ Los grados de libertad del error experimental se definen por diferencia de entre las distintas fuentes de variación que se hayan considerado en el modelo del análisis de varianza. Así, por ejemplo, en el caso de una distribución de bloques completos al azar, se deducen por: G. libertad del error experimental (GL_E) = G. libertad del total (GL_T) – G. libertad de tratamientos (GL_t) – G. libertad de repeticiones (GL_R).

se tienen 4 tratamientos o menos, es una distribución no recomendable; sin embargo, esta precisión puede mejorarse cuando esta distribución se repite dos o tres veces en el mismo lote (entiéndase que se repite dentro de un mismo espacio, pero ocupando distintas parcelas), modificando su nombre a cuadro latino replicado. Asimismo, cuando se tienen más de 7 tratamientos, la limitación más importante que se presenta en los cuadros latinos está referida a los costos de realización del ensayo, debido al incremento exponencial de unidades experimentales cada vez que aumenta un tratamiento. En el caso de la distribución en cuadro grecolatino (DCGL), que es una versión aumentada del DCL, no es de uso común en los experimentos agrícolas; no obstante, su ventaja principal es la de poder controlar tres fuentes de variación secundaria.

Las distribuciones experimentales indicadas son fundamentales en los ensayos que se realizan mayoritariamente para producción de conocimiento. En estos experimentos, su característica es la estrictez del método científico; a diferencia de otros ensayos que persiguen propósitos fundamentalmente de comercio, de allí que los ensayos experimentales con cultivos puedan distinguirse según los fines de la información que generan. Bajo esta distinción, los experimentos se pueden clasificar en dos grupos; los que se realizan con fines demostrativos y los que se realizan con fines netamente investigativos, a estos últimos, Steel & Torrie (1960), definen como experimentos críticos.

Un experimento que se realiza con fines demostrativos, en su contexto no es para producir conocimiento, más bien se realizan para exhibir resultados ya conocidos (De La Loma, 1966); en donde se comparan generalmente uno, dos o hasta tres tratamientos como máximo, junto a un tratamiento testigo. Los ensayos demostrativos comúnmente son realizados por productores de semillas y expendedores de agroquímicos, con el fin de convencer a los agricultores de la zona, en donde se ha llevado a cabo el ensayo, de que la nueva variedad o híbrido, o el nuevo producto, son mejores del que comúnmente utilizan y que pertenecen a la competencia.

En los ensayos demostrativos, en concordancia al propósito que persiguen, es necesario que el tratamiento que se quiere demostrar (vender) sea evidentemente mucho mejor que el tratamiento testigo; de tal forma que, con sólo ver la producción en el campo, sea suficiente para que el agricultor del sector decida optar por el cambio de la nueva propuesta. Son experimentos que, al igual que los de investigación, necesitan de un manejo riguroso en cuanto a las demás labores culturales, si lo que se pretende es que los resultados sean exclusivos efectos de los tratamientos. Generalmente se desarrollan con pocos tratamientos (máximo 4) y cada uno de ellos se aplica en parcelas únicas, relativamente grandes y homogéneas. Dada la gran diferencia que deberán tener los tratamientos que se evalúan en los ensayos demostrativos, la varianza interna de los mismos no se valora rigurosamente.

En los experimentos que se realizan con fines de investigación, comúnmente no se conoce lo que podría resultar al final de la experiencia; se realizan bajo un rigor científico, tal vez mucho más exigente que el rigor de los ensayos demostrativos. Pueden tener pocos o muchos tratamientos y son desarrollados generalmente por instituciones de investigación o por las universidades. Es fundamental el cumplimiento de los principios de aleatorización⁶, repetición y bloqueo; los cuales ineludiblemente deberán considerarse para poder verificar los efectos de los tratamientos y separarlos de los efectos de fuentes secundarias que pueden incrementar el error experimental. En estos tipos de experimentos es fundamental el cuidado de la varianza interna.

⁶ Este principio, junto con la selección intencional de los factores y/o niveles de estudio, definen básicamente lo que se conoce como *experimento verdadero* o *formal*; aparte de cumplir con los principios de bloqueo (cuando es necesario) y repetición, además del rigor en el cuidado de la uniformidad de las diferentes labores que se realizan en los experimentos agrícolas.

La aleatorización es el principio que protege a cualquier ensayo contra el cometimiento del error tipo I⁷. El sorteo en la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales, o viceversa, disminuirá la probabilidad de rechazar una hipótesis nula que sea verdadera; esto evitará la facilidad de aceptar alternativas (variedades, dosis de fertilizantes o de otros agroquímicos, distancias de siembra, etc.) que, en la realidad, no mejoran la producción de algún cultivo. La repetición es el segundo principio que tiene la particularidad de darle precisión a un experimento, ya que mientras más repeticiones tiene un tratamiento, más se reduce el error experimental. Las suficientes repeticiones protegen a cualquier experimento de caer en el error tipo II, esto es, la aceptación de una hipótesis nula que es falsa; no obstante, si bien en la agronomía es menos importante que el error I, su cometimiento no permitirá detectar alguna alternativa (tratamiento) que en la realidad podría mejorar el rendimiento de un cultivo. Lo que no debe olvidar el investigador es que sólo la repetición permite estimar el error experimental aleatorio, fuente de variabilidad que siempre existirá en un ensayo. Las repeticiones son las que establecen si las diferencias encontradas entre tratamientos se deben al efecto real de éstos, o son diferencias casuales inherentes a las unidades experimentales.

Por último, el bloqueo es el principio aplicable a los experimentos de campo o que se realizan en condiciones no controladas (este principio no aplica en experimentos bajo ambientes controlados y/o de material experimental homogéneo), con el propósito de soslayar aparentes o comprobadas fuentes de variación secundarias que el investigador observa en el área de prueba y que podrían incrementar el error experimental. El bloqueo es una de las características de las distribuciones como la DBCA, la DCL y la DCGL, que controlan una, dos y hasta tres fuentes de variación secundarias, respectivamente. Asimismo, este último principio también permite disminuir la probabilidad de caer en el error II, ya que con él se controla de mejor manera el error experimental al dividir un experimento en bloques compactos, lo que hace que se limite más efectivamente la heterogeneidad del suelo y el efecto de ésta se evidencie mayoritariamente entre los bloques antes que tenga incidencia en la precisión del ensayo.

Si bien un experimento distribuido en bloques es eficaz en mejorar la precisión de un ensayo cuando existen fuentes de variación secundaria reales en un suelo con una variabilidad (heterogeneidad) en una dirección, su función puede quedar sin efecto cuando se tiene un alto número de tratamientos. Esta condición hace que los bloques se extiendan una longitud considerable en el terreno, permitiendo que la heterogeneidad del mismo actúe con mayor persistencia e incremente sustancialmente el error experimental. En esta situación, indicar un número máximo de tratamientos no tiene cabida, debido a que existen varias condicionantes para este propósito; este número máximo dependerá del factor (es) de estudio, del tipo de cultivo, del espacio de terreno experimental, de las variables a medirse y del tamaño de la unidad experimental.

Una alternativa para conservar o mejorar la precisión en un ensayo con bloqueo cuando éste tiene un importante número de tratamientos es el uso de distribuciones con bloques incompletos, siendo los más conocidos las distribuciones en latices. Este es un tipo de distribución experimental que generalmente se la utiliza con exclusividad en el área de la agronomía para investigar un número elevado de tratamientos, porque permite controlar, en el suelo o en el espacio experimental, la heterogeneidad que se acrecienta a medida que un experimento se extiende en el campo; situaciones en donde distribuciones como la DBCA pierden eficacia al tener bloques con mayor variación.

⁷ En los resultados de un experimento se tienen dos posibles sucesos de error. Uno de ellos se conoce como Error I y se comete cuando se rechaza una hipótesis nula verdadera; el otro se conoce como Error II y sucede cuando se acepta una hipótesis nula que es falsa. En la mayoría de las ciencias, se diseñan los ensayos con mayor cuidado hacia el error I, relegando al error II, debido a que, en términos de costos económicos, caer en el primero puede hacer que la rentabilidad de la actividad agrícola en vez de aumentar se reduzca.

En la distribución en latice, conocida también como distribución de bloques incompletos y en la cual los tratamientos también son asignados aleatoriamente, cada uno de los bloques contienen una parte del total de tratamientos que se investigan, lo cual constituye la característica principal de este arreglo experimental. Es una distribución que está indicada para estudios sobre mejoramiento de plantas, en donde se tiene una gran cantidad de variedades o líneas que son producto de cruces y de procesos de hibridación que requieren ser evaluados simultáneamente. Bajo la circunstancia mencionada, la distribución en latice es más eficaz que la DBCA por cuanto los bloques no contienen a todos los tratamientos, permitiendo consecuentemente tener grupos de parcelas (unidades experimentales) más homogéneos, debido a que la extensión de las repeticiones o bloques del experimento se reduce; además de ser una alternativa experimental de menor costo por cuanto generan un menor número de unidades experimentales, contrario a distribuciones como, por ejemplo, la DCL.

Factores de estudio en la agronomía

Llevar a cabo el diseño de un experimento implica el análisis de todas las circunstancias o la situación coyuntural que rodeará al mismo. Bajo esta óptica, los experimentos que se realizan dentro de la agronomía pueden definirse relativamente como los más complicados debido al ambiente muy variable que los rodean. Un experimento que se realiza a campo abierto tiene múltiples factores secundarios, menos controlables que incontrolables, que deben tenerse en cuenta si se quiere llegar a resultados contundentes y con el mínimo error. Esta situación es diferente para los experimentos industriales, en donde las condiciones de la experiencia prácticamente son de laboratorio; o los relacionados a la salud, si bien tienen también sus fuentes de variación secundaria las cuales son controladas por la propia unidad experimental (una persona), estas son menores con relación a los experimentos agronómicos.

La experimentación agrícola básicamente se fundamenta en el rendimiento de los cultivos, especialmente cuando se persiguen fines demostrativos. Estos rendimientos, a su vez, dependen de varios factores que los dominan. En forma general, considerando los aspectos que el investigador puede controlar, los experimentos agrícolas pueden clasificarse, según los factores de estudio, en la siguiente forma:

1. Experimentos de adaptabilidad de cultivos
2. Experimentos sobre nutrición vegetal
3. Experimentos relacionados con plaguicidas
4. Experimentos relativos a ciertas prácticas culturales

Los ensayos que se llevan a cabo para evaluar los factores antes mencionados están fundamentados, relativamente, en hipótesis de investigación de poca duración en el tiempo. Así, por ejemplo, un experimento sobre fertilizantes sintéticos permite tener resultados que pueden cambiar, incluso de una cosecha a otra, debido a que el nivel nutricional de un suelo varía en el tiempo; luego una dosis de fertilizantes que hoy es la adecuada, mañana no podría ser así. Además, los resultados de un experimento específico bajo condiciones edafoclimáticas determinadas, tienen aplicación exclusiva sólo para dichas condiciones; de allí que, si éstas cambian al replicar una experiencia, muy difícilmente se obtendrán los mismos resultados en experimentos similares. De allí que se diga que la investigación agrícola, por naturaleza, es localizada.

Experimentos de adaptabilidad de cultivos

Las condiciones ambientales son variables en el espacio, más que en el tiempo; de allí que las especies vegetales también tengan sus preferencias del medio que las rodea en donde su

expresión es la máxima. En este sentido, las diferentes variedades o híbridos de plantas de cultivo pueden diferir en cuanto a sus rendimientos de acuerdo a la influencia climática.

Los experimentos de adaptabilidad de cultivos, específicamente de variedades y de híbridos, no es más que seleccionar un determinado grupo de plantas de un mismo género para sembrarlas en una zona de condiciones agroclimáticas establecidas, de tal forma que se pueda verificar el material vegetativo que presente la mayor respuesta productiva. En estos experimentos, el factor de estudio lo constituyen las variedades sometidas a comparación; esto es, los tratamientos corresponden a cada una de estas variedades, en las cuales se evalúa su expresión productiva y fenotípica en un ambiente específico. Es un requisito muy importante estar seguro de que el material genético considerado para el estudio corresponde a una semilla certificada⁸; si este requerimiento no se cumple, los resultados que se obtengan no serán los correspondientes a un tipo de germoplasma determinado, cuyo error podrá hacer que se seleccione materiales no adecuados para una región específica.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en esta clase de experimentos es lo relacionado al *efecto de borde* de las parcelas. Las hileras contiguas de distintas variedades pueden facilitar la polinización cruzada (alogamia); es decir, puede ocurrir que el polen de una variedad se deposite en el estigma de la flor de otra variedad, originando un material hibridado cuyo rendimiento no representa a las variedades evaluadas, constituyendo esto en una fuente error (De la Loma, 1966). Para soslayar este inconveniente, se hace necesario tener dentro de la parcela las suficientes hileras de plantas que sirvan como efecto de borde, de tal forma que las hileras que se encuentran dentro de la mal llamada área útil de parcela⁹ no tengan este efecto de alogamia.

El efecto de borde también puede servir para proteger sobre la influencia de la cobertura o competencia que unas variedades pueden hacer sobre otras. En estos experimentos se podrían tener especies de mayor altura y, por lo tanto, mayor cobertura foliar, que harán que especies de menor tamaño no puedan desarrollar su total expresión agronómica. Esta situación también obliga a tener hileras de plantas que reciban este efecto, dejando hileras libres en el área útil para realizar las mediciones respectivas.

El uso de materiales vegetativos empleados como testigos, constituye un elemento importante en estas experiencias, especialmente cuando las semillas y el mantenimiento del cultivo necesitan de una mayor inversión. Generalmente, tener un material de mayor rendimiento para una zona agrícola demanda también gastos extras, el cual, si a la postre no resulta rentable, no será una alternativa para el cambio de semilla.

En estos experimentos, dado que el objetivo es, además de evaluar el rendimiento, hacer una caracterización del material vegetal, se deben medir algunas variables complementarias que definen la expresión fenotípica de la especie en cuanto a la idoneidad para una zona determinada. En este sentido, también se evalúan características como resistencia a ciertas enfermedades imperantes por las condiciones ambientales propicias de la zona; precocidad para definir el periodo de siembra; y algunas otras características como altura de planta,

⁸ Cuando se trata de ensayos con rigor científico, este requisito es ineludible. El uso de una semilla no certificada incrementa la probabilidad de cometer el error tipo II de la estadística. En otras palabras, existe una mayor probabilidad de que el gasto en la investigación sea en vano, a pesar de que los tratamientos que se evalúen tengan efectos reales.

⁹ La costumbre de los biometristas agrícolas es la de llamar *parcela útil* al espacio dentro de cada unidad experimental de un ensayo en donde se evalúan las variables de respuesta; sin embargo, en un experimento de campo, aun los bordes que rodean a estas "parcelas útiles" también son útiles (en la realidad toda el área experimental es útil). En términos más acordes, es mejor definirías como UNIDAD DE MUESTREO; de hecho, es así como en este texto se define a esta área en algunos párrafos.

rendimiento por planta, número de frutos por planta, características morfológicas de los frutos, etc.

En relación con el tipo de distribución requerido para llevar a cabo estos ensayos, generalmente se utiliza la distribución de bloques completos al azar; no obstante, cuando los materiales vegetativos a estudiar son numerosos, una alternativa que permite un mejor control sobre la variabilidad que introduce el suelo, es el uso de una distribución en latice simple o diseño de bloques incompletos que fueron creados con este propósito.

Los resultados de este tipo de experimentos permiten hacer las recomendaciones sobre las distintas variedades o híbridos que deberán cultivarse en zonas determinadas, cuyas condiciones hacen posible obtener la mayor producción; sin embargo, si no existe el debido acompañamiento en cuanto a un acertado manejo agronómico (con aplicación tecnológica comprobada), de nada servirá tener el mejor material genético para una zona dada. En consecuencia, habrá que realizar experimentos complementarios sobre el manejo cultural (como los que se detallan a continuación), con el fin de que el mejor material genético sea explotado a su máxima capacidad.

Experimentos sobre nutrición vegetal

Los experimentos agronómicos cuyos resultados de aplicación son de poca duración son los que se llevan a cabo con los fertilizantes, por ello se dicen que son de hipótesis rápidamente cambiables. Los resultados de estos experimentos tienen una fuerte influencia del estado edafológico del suelo, por consiguiente, tomar sus resultados de referencia después de unas dos a tres temporadas puede resultar inadecuado. Las condiciones nutricionales y de humedad de un suelo son tan móviles que inclusive podrían hacer que la fórmula fertilizante que resulte experimentalmente efectiva, en la subsecuente aplicación práctica a nivel de campo, presente efectos obsoletos.

Los ensayos sobre nutrición son experimentos con la mayor afectación de factores secundarios que aquellos en donde se realizan estudios de adaptabilidad. A la gran influencia que tiene el suelo sobre los resultados se une la potencial fuente de variación concerniente a la misma expresión genética de la semilla utilizada; por lo tanto, la recomendación respecto de esto es el uso de semilla certificada, de tal forma que no se confundan los efectos de mayor significancia con el mismo comportamiento agronómico intrínseco del cultivo, sino que sea producto de la aplicación de una determinada dosis de fertilizantes que se esté probando. A estas potenciales fuentes de variación también pueden unirse, y de hecho tienen mucha importancia, la frecuencia (épocas) y forma de aplicación de los fertilizantes; situación que está relacionada específicamente con la eficiencia de los diferentes tipos de nutrientes.

Cuando se evalúa más de un nutriente, la alternativa más adecuada para este tipo de experimento es el uso de un planteamiento factorial, en donde simultáneamente se valore el efecto de varios de estos nutrimentos. En este caso, si se realizan estudios de dosis equidistantemente espaciadas, son factibles los análisis regresionales, desde los cuales pueden establecerse las dosis de máximo rendimiento; o, en el mejor de los casos, los puntos de máximo rendimiento desde una superficie de respuesta generada a partir de una combinación de fertilizantes (experimento factorial). Además, utilizar un arreglo factorial en experimentos que involucran plantas cuando hay más de un factor actuando simultáneamente, permitirá valorar el efecto de la interacción de los factores que es muy importante, dado que está inmerso un organismo biológico que responde mejor a las interacciones antes que a causas individuales.

En relación al párrafo que antecede, es útil la indicación del procedimiento de análisis estadístico a seguir que se realiza cuando se evalúan dosis de nutrientes. Existe el criterio común de aplicar una valoración cualitativa de los efectos, utilizando en primera instancia el

análisis de varianza (ANDEVA) y luego las pruebas de comparación múltiple (pruebas *post hoc*) con las que definen al tratamiento (dosis) “ganador”. Sin embargo, en estos tipos de ensayos cabe la identificación de cuándo se tratan de factores cualitativos y cuándo representan a factores cuantitativos. Factores cualitativos en experimentos con fertilizantes son los casos en donde se comparan diferentes tipos (fuentes) de nutrientes, épocas o frecuencias de aplicación o incluso formas de aplicación; por lo tanto, el procedimiento más adecuado para establecer el tratamiento ganador es el indicado anteriormente (ANDEVA - prueba *post hoc*).

Cuando se trata de factores cuantitativos, esto es, cuando se evalúan dosis de fertilizantes y la variable de respuesta también es de tipo cuantitativa (por ejemplo, el rendimiento), lo más acorde a esta situación es la búsqueda de funciones continuas de respuesta, ante lo cual los análisis de regresión múltiple para definir funciones de producción se presentan como la alternativa estadística con mucha mayor explicación que un simple ANDEVA; cuyo panorama que le ofrece al investigador esta última herramienta estadística, es sólo de valoración cualitativa. Un modelo de regresión múltiple aplicado en estos casos, además de brindar información de los efectos de los factores de forma independiente y de interacción (que es lo único que hará un ANDEVA simple para un experimento factorial), también permitirá conocer cómo es la respuesta del cultivo de acuerdo a los incrementos subsecuentes de las dosis de nutrientes, en qué niveles el rendimiento es máximo o dónde éste se define como un óptimo económico. Adicionalmente, un modelo de regresión múltiple también hace posible incluir otros factores de producción, como ciertos fenómenos climáticos o edafológicos que tienen incidencia significativa y que pueden ser valorados en un modelo específico que, al final, definirá una dosis de nutrientes con mayor validez externa.

A sabiendas de que la respuesta fisiológica de las plantas a los nutrientes no es directamente proporcional, el planteamiento de evaluación estadística cuantitativa en los ensayos sobre dosis de fertilizantes demanda un conocimiento amplio de los requerimientos nutricionales de los cultivos; para lo cual el investigador deberá fundamentarse en una vasta revisión bibliográfica y empírica, de tal forma que le permita deducir los niveles de prueba que incluyan al rendimiento máximo y que sea posible definir el tipo de función de respuesta, a partir de la cual se establezcan dichos límites máximos. En este contexto, para poder verificar los efectos de la interacción entre los factores de interés siempre será beneficioso que se planifique bajo un arreglo factorial.

Por otro lado, si bien existe la suficiente ventaja de los arreglos factoriales sobre aquellos ensayos en donde se evalúa un solo factor a la vez, como así se lo demuestra en el capítulo 6, también debe tenerse presente que, tratar de desarrollar experimentos con múltiples factores y niveles en la agricultura, tiene sus límites en cuanto a la precisión y al componente económico que pueden hacerlo inviable. Ante esta situación, el investigador podría recurrir al uso de diseños con efectos confundidos que hacen posible disminuir sustancialmente el número de unidades experimentales; considerando para este propósito que las interacciones de tres o más factores en la práctica no contribuyen a un entendimiento claro de estas fuentes de variación en la respuesta de un cultivo y, por lo tanto, pueden mezclarse (confundirse) con el efecto de los bloques cuando se utiliza una DBCA. La segunda opción por la que puede optar el investigador es la selección arbitraria de algunos tratamientos (combinaciones factoriales) de interés para éste; sin embargo, esta opción podría causar que no se evalúen efectos importantes en el ensayo y se pierda información valiosa. Una tercera alternativa para contrarrestar las limitaciones del desarrollo de experimentos factoriales con todos sus niveles e interacciones es la utilización de ciertos arreglos factoriales incompletos, establecidos específicamente para procesos estadísticos de optimización; los cuales inicialmente se crearon para experimentos industriales, pero que, con cierta pericia y salvedad, podrían aplicarse en ensayos agronómicos. Algunos de estos arreglos factoriales incompletos para optimización se indican en el capítulo 7.

La necesidad de evaluar la rentabilidad inmediata de los tratamientos en esta clase de experimentos es fundamental, ya que sólo la verificación de que alguna dosis de nutrientes ofrece una mayor ganancia que otra se constituye en la razón para cambiar la dosificación que comúnmente se utiliza en la fertilización. Para este propósito, una técnica muy útil, difundida en su momento por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), es el análisis de la *tasa de retorno marginal*, una alternativa viable que permite establecer las dosis de nutrientes que producirán los cambios más rentables. Para complementar esta técnica y tener una visión integral de la rentabilidad de los tratamientos, se puede optar por obtener también la relación beneficio-coste de cada uno de ellos cuando el experimento involucra a cultivos anuales¹⁰, con el propósito de definir el tratamiento de mayor utilidad económica. Adicionalmente, una alternativa de análisis, cuando se evalúan cuantitativamente fertilizantes, es la elaboración de funciones de producción; a partir de las cuales se establecen las dosis de máximo rendimiento y las dosis óptimas económicas. Lo ideal en la fase de aplicación práctica de los resultados de un experimento agrícola es que un tratamiento estadísticamente ganador deberá ser, también, rentablemente ganador.

Al igual que en el caso de los experimentos de adaptación de variedades o híbridos, las parcelas en las cuales se llevarán a cabo estos experimentos son relativamente las más pequeñas; por lo que, en cultivos como el maíz, cada unidad experimental podría contener un mínimo de tres hileras de plantas, en donde la hilera del medio servirá para la evaluación del efecto de los tratamientos. En el caso del arroz, bajo un sistema de cultivo tradicional en donde las plantas se mantienen en inundación durante todo su ciclo, hay que realizar muros de protección en cada unidad experimental para evitar el traslape de las diferentes dosis que se aplican en las parcelas adyacentes; además de tener un suficiente borde periférico que aisle el cruce de nutrientes a través del mismo suelo de forma interna.

En cuanto a la necesidad de utilizar tratamientos testigos, salvo que el suelo en donde se prevea desarrollar el ensayo esté recién incorporado a la actividad agrícola (llamado suelo virgen) o a su vez el cultivo no demande excesivas cantidades de nutrientes, no será necesario utilizar testigos absolutos; pues es esperable que en tierras mono-cultivadas por años, constituidos en lotes de tierra con grandes pérdidas de su fertilidad, el rendimiento de cultivos comerciales sea drásticamente menor. Por otro lado, en la mayoría de los casos, recurrir a los testigos convencionales (la dosis que comúnmente utiliza el agricultor), permitirá verificar la necesidad del cambio hacia una nueva fórmula de fertilizantes.

Tanto para pruebas de un solo tipo de nutriente a distintas dosis (experimento unifactorial) como para experimentos en donde se evalúen combinaciones de nutrientes (experimento factorial), la distribución experimental básica que comúnmente se utiliza es la de bloques completos (o también los incompletos) al azar. Para estos tipos de experimentos, una alternativa interesante de aplicar para evaluar al menos los macronutrientes N, P y K, pero no con el arreglo de un factorial clásico (totalmente cruzado), sino como uno incompleto, es el llamado arreglo *San Cristóbal* (Rojas, 1961); el mismo que fue ideado para experimentos con fertilizantes en caña de azúcar. Un factorial incompleto que también puede ser interesante utilizar, con muchas más ventajas que el San Cristóbal, es el *diseño central compuesto* que se utiliza en la metodología de superficie de respuesta; esta última, ampliamente aplicada en experimentos industriales.

¹⁰ En cultivos anuales, la definición de la utilidad económica de los mismos puede realizarse incluyendo todos los valores que forman el costo de producción de una especie determinada. Bajo este enfoque, será mejor identificar, en un experimento dado, cuánto es la ganancia por cada unidad monetaria invertida en cada uno de los tratamientos evaluados, lo que puede establecerse con una visión total al determinar la relación beneficio-coste de estos últimos. Esta visión no puede lograrse con metodologías que sólo valoran el costo del tratamiento, el cual es separado del ingreso económico total, dejando de lado el resto de costos de las actividades culturales (las que no son motivo de estudio) como preparación de suelos, riego, control de malezas, fertilización, etc.

En el caso de estudios de fertilizantes en cultivos definidos como perennes y con distanciamientos relativamente amplios (mango, palma africana, guayaba, limones, etc.), la recomendación es utilizar las distribuciones en cuadro latino; dado que el área que se determina para el experimento puede extenderse de manera importante y, por lo tanto, esto hará que también se incremente la variabilidad del suelo en sus dos direcciones. En estos ensayos, la unidad experimental generalmente corresponde a una planta, sobre la cual se evalúan las variables de respuesta. La propiedad de restringir dos fuentes de ruido (en doble dirección) de la distribución en cuadro latino la hacen muy indicada para estos tipos de experimentos (incluidos los de ciclo corto), pues controlan de mejor forma la heterogeneidad del suelo y, por ende, el error experimental que ésta causa.

Lo que hasta aquí se ha explicado hace referencia a fertilizantes de tipo edáficos o básicos; sin embargo, en los actuales momentos existen un sinnúmero de productos de aplicación foliar que contienen micronutrientes y/o estimulantes que parcialmente favorecen un mejor proceso metabólico y, por lo tanto, pueden favorecer incrementos en el rendimiento de los cultivos. A este respecto, existe un error muy común cuando se realizan experimentos utilizando bioestimulantes y/o fertilizantes de aplicación foliar bajo el criterio de complementariedad a la fertilización edáfica; no obstante, si verdaderamente existe un efecto de estos productos, la idea en la definición de los tratamientos deberá considerarse como un suplemento. De esto último se deduce que las dosis de fertilizantes que se definan como tratamientos, deberán establecerse en forma decreciente, si lo que se quiere es mejorar la rentabilidad.

Tanto para experimentos en donde se utilicen fertilizantes foliares (o algún estimulante) como en los casos en donde los tratamientos representan algún producto supuestamente nutricional de origen orgánico, siempre será necesario utilizar los testigos absolutos; ya que existen en el mercado una serie de estos productos, cuyos efectos apenas mejoran el rendimiento de los cultivos en algunos casos, o en otros solamente son líquidos inertes que no sirven para nada. En estos experimentos, sólo el testigo absoluto permitirá vislumbrar si es mejor no aplicar ninguno de estos productos.

Es necesario indicar que el requerimiento de borde en las parcelas, cuando el experimento consiste en aplicaciones de nutrientes (u otros agroquímicos) en forma foliar, deberá ser un poco más amplio que los bordes considerados en experimentos con aplicación edáfica. En esta circunstancia, por motivos de condiciones climáticas como el viento, o incluso una mala aplicación foliar, pueden hacer que los tratamientos tengan un mayor traslape entre parcelas contiguas, lo que podría confundir el efecto real de cada uno de ellos.

Experimentos relacionados con plaguicidas

Los experimentos que se realizan con plaguicidas son los que ofrecen resultados, comúnmente, con la mayor variabilidad. Tanto las malezas como los insectos, o las enfermedades, generalmente inciden negativamente de forma localizada dentro de un cultivo (heterogénea); de allí que en la recomendación sobre el tamaño de la parcela deberá considerarse esta característica, dándole la extensión suficiente para poder observar el efecto de algún plaguicida que se esté probando. No obstante, para la evaluación de plaguicidas siempre será necesario tener una infestación significativa en los cultivos que incida de manera importante en la producción de los mismos para poder observar el efecto de los agroquímicos. Si esta infestación es leve o nula y no se utilizan testigos absolutos, se podría llegar a la conclusión errónea de creer que dichos plaguicidas son eficaces cuando en la realidad no lo sean.

Para la evaluación de los herbicidas selectivos, en el caso de cultivos anuales y en condiciones de post-emergencia, siempre será necesario el uso de un tratamiento testigo en donde no se utilice el plaguicida y las malezas sean controladas de forma manual. Este tratamiento testigo

permitirá evaluar algún efecto de fitotoxicidad que manifieste el cultivo cuando reciba la aplicación del producto y que de alguna manera debe reflejarse en el rendimiento, y no únicamente a escasos días posteriores a la aplicación de los herbicidas, luego de lo cual se logra apreciar visualmente cierto efecto de resentimiento que muestra el cultivo y que luego desaparece.

Si bien las evaluaciones de control de los herbicidas se realizan de forma cualitativa y/o cuantitativa¹¹, las dos alternativas terminan reportando el resultado en forma porcentual, tanto de manera general como de forma específica por cada maleza presente. Una vez obtenidos los datos de cada unidad experimental, éstos generalmente se relacionan con una escala nominal estándar, establecida por la Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM), cuyos rangos se detallan en la tabla 1.2.

La utilización de un testigo absoluto en experimentos en donde se emplean herbicidas pre-emergentes (conocidos como mata semillas) es de suma importancia. Si no existe este testigo, jamás se podrá conocer qué clase de malezas pudo controlar el plaguicida. Para llevar a cabo estos experimentos de pre-emergencia, deben seleccionarse lotes en donde previamente se conozca que existe una proliferación masiva y pertinaz de malezas, de tal modo que sea factible la valoración del efecto herbicida con esta característica.

Tabla 1.2 Escala cualitativa para valoración del control de malezas

Nivel de control (%)	Valoración cualitativa
0 - 40	Ninguno o pobre
41 - 60	Regular
61 - 70	Suficiente
71 - 80	Bueno
81 - 90	Muy bueno
91 - 100	Excelente

Fuente: ALAM (1974).

En algunos casos, la evaluación del control de malezas realizado por los herbicidas en un estudio experimental se efectúa bajo un criterio netamente subjetivo, a partir de la observación que realiza el evaluador en cada unidad experimental; para lo cual debe tenerse la suficiente experticia y tratar la información con la mayor objetividad posible. Si esta forma de valoración se ejecuta cuando el área sobre la cual se aplican los productos de prueba tiene una cobertura de las malezas poco uniforme, el dato que se obtenga podría estar totalmente desubicado; por ello, para este tipo de experimentos deben utilizarse áreas en donde la presencia de estas arvenses tenga una cobertura total del suelo. Cuando existe esta cobertura total, se facilita la realización de evaluaciones más objetivas, utilizando para ello marcos cuadrados (100 cm x 100 cm) en cada unidad experimental y dentro los cuales solamente se hace una cuantificación proporcional de cada tipo de maleza presente en dicho marco.

Otra alternativa para cuantificar el efecto de herbicidas en forma general sobre las malezas, es determinando el peso de la masa foliar existente luego de aplicado el agroquímico, lo cual servirá para la comparación respectiva con el testigo absoluto.

¹¹ En realidad, las formas de evaluación de efectos de herbicidas en las malezas son de tipo semi-cuantitativa o cuantitativa. La primera es por estimación visual (cualitativa), cuya valoración al final se traduce en un valor porcentual (cuantitativa) mediante una escala. La segunda es mediante conteo de malezas dentro de marcos cuadrados o rectangulares al interior de las unidades experimentales, lo que al final se reporta también en porcentaje.

Las valoraciones económicas de los experimentos con herbicidas, generalmente se realizan basados únicamente en los costos de los tratamientos (costos variables), ya que éstos son experimentos relativamente rápidos y no se llega hasta la producción del cultivo. El procedimiento se fundamenta en los días a control de la maleza utilizando umbrales técnicos entre aplicaciones sucesivas del plaguicida; de allí que aquella dosis o producto que tenga la mayor cantidad de días a control, traducidos a costos, sea el tratamiento más económico. Cuando el experimento se realiza con cultivos perennes, o incluso con cultivos anuales en donde se evalúa el rendimiento, una metodología muy práctica para valorar económicamente los tratamientos es mediante la técnica de presupuesto parcial del CIMMYT.

Los datos obtenidos en experimentos con herbicidas, cuando se evalúa su efecto sobre las malezas, se expresan en forma porcentual, y por ende muchas veces no hay un ajuste normal de los errores; más bien éstos (en muchos casos) tienen distribución binomial. Dado que esta es una variable que puede tener una importante dispersión, a veces, para lograr homocedasticidad de los errores y verificar la eficacia del análisis de varianzas se recomienda el cambio de escala de los datos a una de tipo angular (ajuste arco-seno). Un error común de muchos biometristas relacionados con experimentos de malezas, es su uso sin restricción del ajuste angular sólo por el hecho de tener datos porcentuales; sin embargo, hay que tener presente que el análisis de varianzas tiene cierta robustez que hace que admita cierto grado de dispersión y, en la mayoría de situaciones, no es necesaria dicha transformación. Una transformación angular (o cualquier otra) realizada de manera indiscriminada a los datos, más bien puede favorecer la presencia del error tipo I de la estadística cuando el grado de significancia es estadístico y no práctico. Cabe mencionar que en las situaciones en donde se realizan estos u otros ajustes de varianzas, en las publicaciones debe hacerse constar las medias de los datos sin ajuste, realizando la explicación respectiva; ya que presentar un promedio ajustado puede confundir al lector.

La comprobación de normalidad y de igualdad de varianzas puede realizarse de forma gráfica planteando los residuos o errores versus la probabilidad (normalidad), o los residuos versus los valores predichos (homocedasticidad); o también mediante pruebas analíticas como la de Shapiro-Wilks o la de Levene, las cuales son pruebas estadísticas para verificar normalidad y homocedasticidad, respectivamente.

Cuando se realizan experimentos con insecticidas, los requerimientos de unidades experimentales o parcelas relativamente grandes son una necesidad, si es que realmente se quiere encontrar resultados. Una parcela grande tendrá, a su vez, una unidad de muestreo de mayor dimensión, en donde se podrán tener datos menos dispersos cuando se evalúe, por ejemplo, la presencia de insectos muertos después de la aplicación del plaguicida. Asimismo, a la cuantificación de insectos muertos, puede complementarse la evaluación de plantas afectadas dentro de cada unidad experimental, lo que en muchos casos es una variable más representativa cuando se requiere valorar la incidencia del insecto y éste es tan móvil que será complicado encontrarlo muerto en las plantas.

Cada parcela debe tener el suficiente borde perimetral que proteja al experimento de efectos de traslape de tratamientos, especialmente cuando se evalúa la presencia de insectos muertos. La toma de datos puede realizarse por plantas dentro de la unidad de muestreo, como por ejemplo la presencia de *Spodoptera frugiperda* (cogollero) en maíz; o a su vez, utilizando marcos cuadrados de 1 m de lado como en el caso de la evaluación de *Oebalus insularis* (chinche del arroz) en el cultivo de arroz sembrado al voleo. Incluso el efecto de algún insecticida puede evaluarse solamente en la parte de una planta (que se constituye a su vez en la unidad experimental) como, por ejemplo, la presencia del trips (*Trix* sp.) en banano y su daño conocido como la mancha roja; para lo cual las evaluaciones se realizan en los racimos.