



Aplicación e interpretación del diseño de experimentos en cultivos perennes - Café

Esther Cecilia Montoya Restrepo



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

80 años de Ciencia
para la Caficultura colombiana



Aplicación e interpretación del diseño de experimentos en cultivos perennes- Café

Esther Cecilia Montoya Restrepo*



Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

80 años de ciencia para la caficultura colombiana

*Investigadora senior. E-mail: esthercecilia.montoya@cafedecolombia.com



Comité Nacional

Ministro de Hacienda y Crédito Público
José Manuel Restrepo Abondano

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Rodolfo Enrique Zea Navarro

Ministra de Comercio, Industria y Turismo
María Ximena Lombana Villalba

Director del Departamento Nacional de Planeación
Luis Alberto Rodríguez Ospino

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Marcela Urueña Gómez

Período 1° enero/2019 - diciembre 31/2022

José Eliecer Sierra Tejada (Antioquia)
José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)
Eugenio Vélez Uribe (Caldas)
Danilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)
Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)
Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)
Ruber Bustos Ramírez (Huila)
Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)
Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)
Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)
Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)
Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)
Héctor Santos Galvis (Santander)
Luis Javier Trujillo Buitrago (Tolima)
Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General
Roberto Vélez Vallejo

Gerente Administrativo y Financiero
Juan Camilo Becerra Botero

Gerente Comercial
Juan Camilo Ramos Mejía

Gerente Técnico
Hernando Duque Orrego

Director Investigación Científica y Tecnológica
Álvaro León Gaitán Bustamante

Comité Editorial Cenicafé

Pablo Benavides M.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.
Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina Vinasco
Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín L.
Ing. Agrónoma, Esp. M.Sc.

Diseño

Carmenza Bacca R.

Fotografías

Archivo Cenicafé

Impresión

ISBN 978-958-8490-46-5

ISBN 978-958-8490-47-2 (En línea)

DOI 10.38141/cenbook-0009

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

© FNC - Cenicafé - FoNC





Como citar:

Montoya, E. C. (2021). Aplicación e interpretación del diseño de experimentos en cultivos perennes -
Café. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0009>



Índice

- 6** Presentación
- 10** Prólogo
- 14** Introducción
- 18** El Método Científico Con Visión Estadística
- 30** Conceptos de muestreo y su relación con el tipo de investigación
- 40** Confiabilidad de los resultados en la investigación explicativa
- 48** Diseño experimental completamente aleatorio
- 68** Diseño experimental bloques completos al azar
- 88** Diseño experimental cuadrado latino
- 96** Diseño experimental en latice balanceado
- 108** Literatura citada



Presentación



La investigación científica aplicada a la caficultura es efectiva en la medida en que se generen recomendaciones confiables, repetibles e integradas a los sistemas de producción, que puedan ser adoptadas por sus beneficios económicos, ambientales y sociales, que le aportan a toda la cadena del café y que se transfieran a los productores, de una manera clara y efectiva, para promover los cambios técnicos que cierran el ciclo de mejora continua por innovación y desarrollo.

Dentro de este trabajo de generar conocimiento científico es crucial la identificación precisa de los problemas a resolver, para dedicarles eficientemente la capacidad humana y los recursos, y a partir de allí formular objetivos claros de investigación, con diseños experimentales que permitan responder a las preguntas en condiciones tan complejas como son las de los cultivos agrícolas, donde un sinnúmero de variables está afectando de manera simultánea el comportamiento de las plantas, y las respuestas son estocásticas y no determinísticas, y donde es prioritario identificar y entender relaciones de causalidad que aumenten la productividad, reduzcan los costos y resulten en mayor valor agregado del café.

Es por esto que el acompañamiento de la estadística es indispensable para pasar de las observaciones y las anécdotas a las deducciones razonadas y a las recomendaciones técnicas. En un negocio donde cada decisión cuesta dinero, los márgenes de ganancia están definidos por centavos de dólar, y donde los recursos para investigación deben ser usados para causar el mayor impacto posible, es imperativo aplicar toda la fortaleza de las matemáticas para obtener inferencias basadas en el cálculo de probabilidades, utilizando el poder del dato numérico.

En este escenario de conmemoración de las ocho décadas de actividad ininterrumpida de Cenicafé, la obra “Aplicación e interpretación del diseño de experimentos en cultivos perennes – Café” es una contribución muy valiosa que resume las experiencias y conocimientos de la investigadora Esther Cecilia Montoya Restrepo, Estadística con maestría en Investigación de Operaciones y Estadística, quien no solo lideró investigaciones desde la Disciplina de Biometría de Cenicafé, durante más de 30 años, sino que cumplió una labor inestimable asesorando las investigaciones del Centro, proveyendo el soporte estadístico en el cual se fundamentan numerosos estudios y recomendaciones que han forjado a la caficultura del siglo XXI.

En los capítulos del libro se encontrarán desarrollados temas tan cruciales

como el método científico, el muestreo, la confiabilidad de los resultados y el diseño experimental, enmarcados en la investigación de la agronomía de un cultivo perenne, como lo es el café, convirtiéndose así en un referente para las generaciones presentes y futuras de investigadores, que seguirán trabajando con seriedad, paciencia y relevancia para llevar oportunamente la tecnología y la innovación a miles de familias productoras; familias que continúan esa tradición con orgullo y con la visión de contar con la ciencia como el aliado permanente para que su caficultura siga siendo la mejor del mundo.

Álvaro León Gaitán B.

Director Cenicafé

Junio de 2021

A close-up photograph of coffee plants in a plantation. The image shows several large, vibrant green leaves with prominent veins. In the center, a stem features a small, yellowish-green coffee bud. The background is a blurred expanse of a coffee plantation under a bright sky.

Prólogo



“Un científico tiene la libertad –y debe tomársela- de plantear cualquier cuestión, de dudar de cualquier afirmación, de busca cualquier evidencia, de corregir errores...”

Roberto Oppenheimer

“El experimentador que ignora lo que busca, nunca comprenderá lo que encuentre.”

Claudio Bernard.

Hay algunos criterios que pueden ser tenidos en cuenta y dan pauta para evaluar la calidad de un hallazgo o resultado en una investigación, tales como, la coherencia entre el objetivo y el problema de investigación, la descripción clara de un diseño metodológico, donde se especifiquen las unidades de análisis, las técnicas de medición, las variables a medir y su tratamiento estadístico, entre otros, reflejan la construcción de un proceso de investigación sistemático, con el cual se busca la comprensión de un tema de interés para explicar de manera objetiva y racional los fenómenos observados, es un proceso del que se vale la ciencia, para ayudar a contener las percepciones propias del investigador para no anteponer sus prejuicios sobre las evidencias empíricas.

Un proceso de investigación riguroso, pero no rígido, conlleva a la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. No obstante, un prerrequisito para lograr superar o trascender el problema de la subjetividad, así como la validez y la confiabilidad, son las bases conceptuales que se tengan de los elementos básicos de la estadística y el método científico, con lo que es factible sortear las particularidades

de los objetos y problemas de estudio. Entender el proceso sistemático de la investigación es tener la habilidad de saber leer e interpretar los resultados obtenidos, en otras palabras, una forma de interactuar con las diferentes áreas del conocimiento, utilizando el lenguaje técnico y universal de los datos.

Denodadamente, la autora, aprovechando su formación estadística, además de su trayectoria investigativa y experiencia en análisis de datos, inicia con un “diálogo” obligado entre la estadística y el método científico, llevando al lector a una visión holística, que soporta el quehacer de un científico, entendido no solo como el que formula preguntas y busca sus respuestas, sino aquel que, impulsado por la curiosidad, rigurosidad y vocación por la ciencia, adquiere el compromiso de la discusión y comprobación de ideas.

De manera desinteresada y como retribución por la oportunidad de aprender de café en compañía de científicos que han formulado y validado todo tipo de hipótesis acerca de este cultivo, en la experiencia obtenida, se vislumbra en sus capítulos, conceptos, aplicación, análisis, interpretación y presentación de resultados obtenidos a partir de diferentes modelos de diseños experimentales, utilizados para

responder a preguntas planteadas a través de la comprobación de sus hipótesis de investigación.

En definitiva, es un libro que está pensado para comprender la teoría de los diseños experimentales a partir de la aplicación práctica, ilustrando el proceso y génesis de la investigación, la importancia de la planeación y elección del método adecuado de análisis estadístico en investigaciones de tipo explicativas, llevado al lector, con ejemplos contextualizados y de aplicación real, a comprender que, más allá de mostrar Tablas y Figuras que impacten, es aplicar el principio de parsimonia, que apunta a simplificar la interpretación y presentación de resultados de manera transparente, sin ambigüedad. El legado de la autora con el libro es compartir y extender su experiencia, para quienes deseen aplicar el método científico y la estadística, independiente de cuál sea el objeto de estudio y campo de aplicación.

Rubén Darío Medina Rivera

Estadístico Informático, M.Sc.

Investigación operativa y Estadística

Líder Disciplina de Biometría - Cenicafé

Introducción





Investigar es un proceso, que va desde la concepción de la idea, desarrollar la investigación hasta entregar los resultados al usuario final, a través de la publicación o de la ejecución misma de ellos, asegurando su reproducibilidad y aplicación, con la confiabilidad requerida, en el caso que se tenga la certeza en la evaluación de la hipótesis estadística, con la cual se confirma o rechaza la hipótesis de investigación.

El desarrollo de la investigación, además del conocimiento de los expertos, requiere como herramientas el método científico y la estadística, las cuales, en su coherencia y adecuada aplicación, garantizan resultados confiables. Es por ello que, todo investigador debe ser usuario de ellas.

Por lo tanto, en el primer tema del libro se trata el método científico con una visión estadística, estableciendo la relación entre las hipótesis de investigación y los estadísticos de prueba con los cuales se confirman o rechazan, teniendo en cuenta el tipo de investigación. En el segundo tema se establecen conceptos de muestreo de acuerdo con el tipo de investigación, para finalmente abordar el concepto de confiabilidad de resultados en la investigación de tipo explicativa, soporte fundamental en el desarrollo de los temas restantes, haciendo énfasis en la aplicación y la interpretación del diseño de experimentos.

Los diferentes modelos del diseño de experimento estadístico, tienen su fundamento matemático en los modelos lineales (Kutner et al., 1996), pero su aplicación e interpretación está sujeta a la complejidad del tema a investigar y el tipo de cultivo (perenne o anual), entre otros. Es por ello, que se ilustra con ejemplos, para usuarios de la estadística,

la aplicación e interpretación de los diseños experimentales que he tenido la oportunidad de recomendar, en la amplia experiencia como asesor estadístico y con el conocimiento adquirido sobre el cultivo de café.

Finalmente, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todos y cada uno de los caficultores, a la Federación Nacional de Cafeteros y al Centro Nacional

de Investigaciones de Café, Cenicafé, por la oportunidad que he tenido de crecer como persona y profesionalmente y por su apoyo en la elaboración de éste libro, con el cual se espera que usuarios de la estadística tengan un inicio en la aplicación del diseño de experimentos, acompañado de la adecuada aplicación del método científico, como estrategia para analizar e interpretar objetiva y sistemáticamente, diferentes procesos de investigación.

El método científico con visión estadística

$$\frac{(\bar{Y}_i - \bar{M} \hat{\mu})^2}{n-1}; S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m_i - 1}; pa$$
$$\hat{(\pi)} = N^2 \left(\frac{N-n}{Nn} \right) \sum_{i=1}^n$$

La investigación científica se fundamenta en la aplicación del método científico, el cual en general, consiste en observar, formular preguntas como consecuencia de la observación acerca del cómo y el por qué, proponer una hipótesis como una posible respuesta a las preguntas, corroborar experimentalmente dicha hipótesis o refutarla, y llegar a las conclusiones que puedan hacerse extensivas (teorías) y que puedan ser aprovechadas para el beneficio del hombre y su entorno. De esta descripción, relativamente sencilla, podría deducirse que un gran número de personas aplican el método científico, aunque no estén conscientes de ello.

El método científico es una herramienta y filosofía de trabajo, que le ayuda al investigador en forma sistemática a planear, ejecutar, interpretar y presentar resultados de sus trabajos, optimizando los recursos y el tiempo empleado.

En la planeación, según Selltiz et al. (1976), el problema de investigación consiste en formularlo específicamente en términos concretos y explícitos, y según Ackoff (2002), cuando se plantea correctamente, él está parcialmente resuelto.

Una vez definido el problema de investigación, se plantean los objetivos y las preguntas, se justifica la investigación y se establece su viabilidad. Los objetivos deben expresarse con claridad y deben ser alcanzables, es decir, son las guías del estudio; su redacción debe iniciarse con un verbo en infinitivo y deben describir lo que se va a entregar una vez se haya terminado la investigación.

El problema debe plantearse a través de una o varias preguntas de investigación, las cuales deben ser precisas y en su formulación no deben utilizarse términos ambiguos ni abstractos.

Ejemplos

Con el objetivo “Evaluar prácticas silviculturales y de manejo de *Corthylus zulmae* en plantaciones de aliso”, el investigador al finalizar su investigación podrá decir las prácticas evaluadas con las que puede manejarse *Corthylus zulmae* en plantaciones de aliso; mientras que con el objetivo “Determinar el estado de humedad del suelo con el cual ocurra el movimiento en masa”, el investigador se compromete a definir la tensión y humedad volumétrica del suelo, para que ocurra el movimiento masal.

Para el caso del objetivo “Evaluar prácticas silviculturales y de manejo de *Corthylus zulmae* en plantaciones de aliso”, una pregunta de investigación podría ser: ¿La implementación de prácticas silviculturales y de manejo de *Corthylus zulmae* disminuirá las poblaciones del insecto en el campo?

Una pregunta asociada al objetivo “Determinar el estado de humedad del suelo con el cual ocurra el movimiento en masa”, podría ser: ¿Los suelos de las Unidades San Simón y Doscientos responden a los mismos estados de tensión y humedad volumétrica para que ocurra movimiento masal? Como puede observarse en estos dos ejemplos, el objetivo y las preguntas de investigación deben estar relacionadas en su planteamiento.

Además de los objetivos y de las preguntas de investigación, es necesario justificar el estudio, exponiendo las razones. La mayoría de las investigaciones se efectúan con un propósito definido, no se hacen por capricho de una persona; y ese propósito debe ser lo suficientemente fuerte para que se justifique su realización. Entre los criterios para evaluar el valor potencial de una investigación, están:

- ♦ La conveniencia del estudio, es decir, para qué sirve.
- ♦ La relevancia social o pertinencia del alcance social, se refiere a identificar los beneficiarios de los resultados de la investigación.
- ♦ Implicaciones prácticas, como resolver algún problema.
- ♦ Valor teórico, implica definir si se llenará algún vacío de conocimiento o si se podrán generalizar los resultados a principios más amplios, o definir si se va a desarrollar una teoría o si con los resultados podrán sugerirse ideas o hipótesis para futuros estudios.
- ♦ Utilidad metodológica, cuando los resultados ayudan a crear un nuevo instrumento para recolectar o analizar datos, o para la definición de un concepto, variable o relación entre variables o el cómo estudiar una población.

En general, las investigaciones se clasifican en tres tipos: exploratorios, descriptivos y explicativos. Sin embargo, para evitar confusiones, se describirán los tipos de investigaciones de acuerdo con la clasificación que plantea Dankhe (1986): investigaciones exploratorias, descriptivas, correlacionales y explicativas.

Esta clasificación es importante, debido a que del tipo de investigación depende la estrategia para su desarrollo, es decir, el diseño experimental, los datos que se recolectan, la manera de obtenerlos, el diseño de muestreo y otros componentes del proceso de investigación. En la práctica, cualquier estudio puede incluir más de uno de estos cuatro tipos de investigación y su clasificación depende de los objetivos del investigador y el alcance del mismo.

Las investigaciones de tipo exploratoria, anteceden a los otros tres tipos de investigación, y su objetivo es el de familiarizarse con tópicos desconocidos o poco estudiados o desarrollar métodos que se requieren utilizar en estudios más profundos. Por ejemplo, la propuesta de un método para la medición del contenido de humedad del grano de café pergamino, en un secador solar y la determinación del error de medición, se clasifica como una investigación exploratoria. De igual manera, la evaluación de un método de muestreo para el diagnóstico de la infestación por broca.

Las investigaciones de tipo descriptivo, por lo general, fundamentan las investigaciones de tipo correlacional, y se aplican para analizar cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno y sus componentes, sin alterar los individuos de la población. Por ejemplo, cuando se quiere determinar las características de una variedad de café (número de ramas, número de nudos y altura del tallo, entre otras), en diferentes sitios, a través de la estimación del parámetro promedio por árbol y la comparación entre sitios, se está abordando una investigación de tipo descriptivo.

Las investigaciones de tipo correlacional, a su vez, proporcionan información

para llevar a cabo los estudios de tipo explicativos. Como su nombre lo indica, son estudios que vinculan o relacionan diversas características de una misma población o entre poblaciones, o son investigaciones que se desarrollan para demostrar que algunas características no están relacionadas. En el caso de determinar cuáles de las características del suelo (pH, Mg, Cu, P, entre otros minerales) están correlacionadas y con cuál de ellas puede estimarse una o más de las otras características de interés, para futuros estudios, se está abordando una investigación de tipo correlacional.

Las investigaciones de tipo explicativo, explican las razones o causas que provocan los fenómenos, una vez se alteren las condiciones de los individuos de la población y son estudios más estructurados, que los anteriormente descritos. Por ejemplo, el evaluar el efecto de cinco fertilizantes en el incremento de la producción de café, requiere del diseño de una investigación de tipo explicativo.

Las propuestas de investigación, además de identificar el tipo o tipos de ellas, pueden tener una o varias hipótesis, o no tenerlas, como en el caso de las investigaciones de tipo exploratorio. Lo que debe quedar claro, es el hecho que las hipótesis son guías precisas para la propuesta de investigación o fenómeno a estudiar, y en ellas deben quedar explícitas las variables a estudiar, las cuales a su vez, deben ser definidas en dos formas: conceptual y operacionalmente.

La forma conceptual de la variable, se refiere a la descripción en otros términos, tomada de diccionarios o de libros especializados; y la definición operacional es el procedimiento que describe las

actividades que deben realizarse para medirla.

Algunas variables no requieren la definición conceptual (por ejemplo, género, edad, ingreso, entre otras), pero siempre deben definirse operacionalmente.

La variable pérdida de suelo o erosión, conceptualmente la FAO, la define como la pérdida absoluta del suelo y de los nutrientes de la capa superficial; y la actividad para medirla (definición operacional) implica tomar un perfil del suelo y en uno de sus horizontes medir el espesor, mínimo en dos tiempos, para determinar la diferencia del espesor o pérdida de suelo.

Una vez definidas las variables en la planeación de la investigación, se formulan las hipótesis de trabajo o de investigación; en su enunciado, deben tener como mínimo una variable y son sólo proposiciones sujetas de ser verificadas con datos (comprobación empírica).

El investigador al plantear las hipótesis desconoce si son o no verdaderas. Formular una hipótesis no implica que tenga que ser corroborada con la ejecución de la investigación. Muchos investigadores descalifican los trabajos de investigación cuando no se corroboran las hipótesis, por eso temen plantearlas. Si una investigación fue bien llevada y con la información obtenida no se corroboran las hipótesis, entonces dicha investigación sirvió para negar lo que se propuso, como una posible respuesta a la pregunta de investigación.

En síntesis, las hipótesis pueden ser verdaderas o no, pueden comprobarse o no, es decir, las hipótesis son sólo proposiciones sujetas a comprobación y verificación en la realidad. En ellas se proponen las posibles respuestas a las preguntas de investigación y sustituyen a los objetivos y preguntas de investigación para guiar el estudio.

Ante la pregunta de investigación: ¿Los suelos de las unidades San Simón y Doscientos responden a los mismos estados de tensión y humedad volumétrica para que ocurra movimiento masal?, un planteamiento de la hipótesis asociada a esta pregunta, como una posible respuesta sería: “Los valores medios de la tensión y la humedad volumétrica, son iguales para los suelos de las Unidades San Simón y Doscientos, al momento en que ocurra un movimiento masal”.

Las hipótesis deben reunir ciertos requisitos, teniendo presente que se refieren a una situación real, entre ellos están:

- ♦ Los términos o variables deben ser comprensibles, precisos y concretos.
- ♦ La relación entre variables, debe ser clara y verosímil (lógica), es decir, debe quedar explícito cómo se relacionan las variables.

- ♦ Los términos de la hipótesis y la relación planteada entre ellos, deben ser observables y medibles, es decir, tener referentes en la realidad. **Las hipótesis científicas no incluyen aspectos morales ni aspectos que no puedan medirse en la realidad.** Por ejemplo, en la hipótesis “A mayor grado de escolaridad, mayor sensatez”, la sensatez no es medible dado que es una cualidad que implica buen juicio, prudencia y madurez, en los actos y decisiones de una persona.

Existen diversas formas de clasificar las hipótesis, entre ellas están: hipótesis de investigación, hipótesis nulas, hipótesis alternativas e hipótesis estadísticas.

Las hipótesis de investigación son una posible respuesta a las preguntas de investigación y pueden ser descriptivas, correlacionales, diferencia entre grupos y relación de causalidad. **Las hipótesis descriptivas** se utilizan en investigaciones de tipo descriptivo (la altura promedio de la Variedad Castillo® Naranjal es 1,6 m). **Las hipótesis correlacionales** especifican relaciones entre dos o más variables, correspondiendo a los estudios de tipo correlacional y no sólo pueden establecer la relación entre dos variables, si no cómo están asociadas, alcanzando el nivel predictivo y parcialmente el explicativo (a mayor temperatura, mayor producción). **Las hipótesis de diferencia entre poblaciones** se formulan en investigaciones cuyo fin es comparar grupos. Por ejemplo: “La variedad Colombia produce más café que la variedad Caturra”. Cuando el investigador no tiene bases para suponer a favor de qué grupo será la diferencia, formula una hipótesis simple de diferencia de grupos, por ejemplo: “La producción de café de la variedad Colombia es diferente a la producción de café de la variedad Caturra”. **Las hipótesis que establecen relaciones de causalidad**, no solamente

afirman las relaciones entre dos variables y cómo se dan dichas relaciones, sino el efecto del manejo de variables exógenas sobre las variables endógenas o de respuesta. Por ejemplo: con el fertilizante AX, se incrementa la producción de café en al menos un 30%.

Las hipótesis nulas son la negación de las hipótesis de investigación y las **hipótesis alternativas**, como su nombre lo indica, son posibilidades alternas entre las hipótesis de investigación y las hipótesis nulas, es decir, ofrecen otra descripción o explicación distinta a las que proporcionan estos tipos de hipótesis.

Hipótesis de investigación:
La calificación de la calidad en taza del café depende de la proporción de frutos verdes en la masa cosechada; hipótesis nula: la calificación de la calidad en taza del café no depende de la proporción de frutos verdes en la masa cosechada; hipótesis alterna: la calificación de la calidad en taza del café depende de la bonificación entregada al operario por la recolección.

Las **hipótesis estadísticas** son la transformación de las hipótesis de investigación en símbolos estadísticos. Se formulan cuando la información a recolectar para corroborarlas, son variables de naturaleza cuantitativa. Básicamente hay tres tipos de hipótesis estadísticas, correspondiendo a la clasificación de las hipótesis de investigación: de estimación, de correlación y de diferencia de medias.

Con la evaluación de la **hipótesis estadística de estimación** se corroboran o no, las hipótesis de trabajo formuladas en las investigaciones de tipo descriptiva.

entre dos variables es una ρ , y la hipótesis estadística asociada al estadístico de prueba para la correlación es:

$$H_0: \rho_{xy} = 0 \text{ Vs } H_a: \rho_{xy} \neq 0$$

En una investigación de tipo descriptivo se formuló como hipótesis de investigación o de trabajo que, “el café producido en la Sierra Nevada de Santa Marta tiene en promedio un factor de conversión de café cereza a café pergamino de 0,20”, es decir, que de cada cinco kilogramos de café cereza se obtiene un kilogramo de café pergamino seco. Ante esta hipótesis de investigación y una vez definida la unidad de muestreo y el número de ellas para estimar el promedio, el estadístico de prueba t , tiene la estructura para representar este planteamiento, a través de la hipótesis estadística, de la siguiente manera:

$$H_0: \mu = 0,2 \text{ vs. } H_a: \mu \neq 0,2$$

Si se mantiene la hipótesis nula asociada a este estadístico de prueba, se estaría corroborando la hipótesis de investigación o de trabajo.

Un investigador quiere corroborar, con información, la relación lineal entre la temperatura y el nivel de infestación de una plaga. Para ello, toma varios lotes sembrados con café, en diferentes pisos térmicos, con diferentes promedios de temperatura media diaria. A los tres meses después de la floración, evalúa el nivel de infestación en cada lote (Y) y lo relaciona con la temperatura media diaria ocurrida entre la floración y tres meses después (X). Estima el coeficiente de correlación lineal y evalúa la hipótesis estadística

$$H_0: \rho_{xy} = 0 \text{ Vs } H_a: \rho_{xy} \neq 0$$

Si rechaza la hipótesis nula estaría corroborando la hipótesis de investigación: existe relación lineal entre la infestación y la temperatura.

La **hipótesis estadística de correlación** traduce en términos estadísticos, una correlación entre dos o más variables objetivo de una investigación de tipo correlacional. El símbolo de correlación

Con las **hipótesis estadísticas de la diferencia de medias** se compara la estimación de un parámetro entre dos o más grupos. Por ejemplo, para la hipótesis de investigación “la Variedad Colombia produce más café que la variedad Caturra”, en símbolos estadísticos sería:

$$H_0: \mu_{\text{Colombia}} - \mu_{\text{Caturra}} = 0 \text{ VS } H_a: \mu_{\text{Colombia}} - \mu_{\text{Caturra}} > 0$$

Y su evaluación se hace a través del estadístico de prueba t , para la diferencia de medias de dos poblaciones, de tal manera que si la hipótesis nula es rechazada se estaría corroborando la hipótesis de investigación.

Con lo expuesto anteriormente se resalta el valor que tienen las hipótesis para la investigación, además de cumplir con las siguientes funciones:

- ♦ Son las guías de la investigación y le dan un orden y lógica al desarrollo de la misma.
- ♦ Tienen una función descriptiva y explicativa, según sea el caso. Cada vez que una hipótesis recibe evidencia empírica en su favor o en contra, dice algo acerca del fenómeno al cual está asociado o hace referencia. Si la evidencia es en su favor, la información sobre el fenómeno se acentúa; pero si la evidencia es en su contra, se descubre algo acerca del fenómeno que no se conocía antes.
- ♦ Corroboran teorías, si se aporta evidencia en favor de una hipótesis. Cuando varias hipótesis reciben evidencia en su favor, la teoría va haciéndose más robusta.
- ♦ Sugieren teorías. Puede ocurrir que como resultado de una prueba de hipótesis puedan construirse las bases para ellas.

Una vez definido el tipo de investigación a realizar y establecidas las hipótesis de investigación o los lineamientos para el estudio, el investigador debe concebir la manera práctica y concreta de responder a las preguntas de investigación. Esto

implica seleccionar o desarrollar un diseño de investigación y aplicarlo al contexto particular de su estudio.

El **diseño de investigación** se refiere al plan o estrategia que el investigador debe emplear para alcanzar los objetivos, responder las preguntas y analizar la certeza de las hipótesis de trabajo planteadas.

Los diseños de investigación pueden ser experimentales o no experimentales. Los diseños de investigación experimentales a su vez, se clasifican en: experimentos puros, pre-experimentos y cuasi-experimentos.

El término experimento, definido por Hernández et al. (1998), como un estudio en el que se manejan deliberadamente una o más variables exógenas o independientes (supuestas causas), para analizar las consecuencias sobre una o más variables de respuesta o endógenas (supuestos efectos), dentro de una situación de control, **es sólo aplicable para los experimentos puros.**

En cambio, si se asume el término experimento, como tomar una acción y después observar las consecuencias, entonces los experimentos puros, los pre-experimentos y los cuasi-experimentos estarían clasificados dentro de este término.

En un **experimento puro** hay un manejo intencional de una o más variables independientes o exógenas, para medir el efecto que ellas tienen en la variable dependiente o endógena. Además, debe existir control o validez interna de la situación experimental, es decir, si en el experimento se observa que una o más variables independientes hacen variar a las dependientes, la variación de estas

últimas se debe al manejo de ellas y no a otros factores o causas.

Lograr el control en un experimento, es separar la influencia de otras variables sobre las variables dependientes, para que así se defina realmente, si las variables independientes establecidas tienen efecto en las dependientes. Por ejemplo, cuando se aplica un diseño experimental de bloques completos al azar, el factor de bloqueo hace las veces de control del experimento, para medir el efecto como tal de los tratamientos.

La variable independiente o exógena es la que se considera como supuesta causa en una relación entre variables, es la condición antecedente, y al efecto provocado por dicha causa se le denomina variable dependiente o endógena.

En la planeación de la investigación para un experimento puro debe definirse cómo se va a manejar la variable exógena y cómo se va a medir la variable o variables endógenas. Manejar, en este contexto, es hacer variar o dar distintos valores a la variable independiente.

Con los experimentos puros se busca tener validez interna y externa, y para ello se utiliza el diseño experimental estadístico, lo cual implica asignación aleatoria de las unidades experimentales. Un experimento con **validez interna** genera resultados confiables, pero ésta es sólo una parte de la validez de un experimento, en adición a ella, es deseable que se tenga **validez externa,** la cual se refiere a qué tan generalizables son los resultados de un experimento a situaciones no experimentales y a otros sujetos o poblaciones. La ejecución de este tipo de experimentos debe responder a la pregunta: ¿A cuáles poblaciones,

ambientes, variables y situaciones pueden aplicarse?

Hay dos contextos donde puede ejecutarse un experimento puro: laboratorio y campo. En el experimento ejecutado en el laboratorio se controlan la mayoría de las variables independientes, de tal manera que el error experimental es mínimo (ambiente controlado). En cambio, el experimento realizado en el campo implica una situación real, en la cual, sólo un mínimo de variables independientes puede controlarse, según lo permita la situación (ambiente natural o no controlado).

La diferencia esencial entre ambos contextos es la realidad con la cual se llevan a cabo, de tal manera que, en los experimentos de laboratorio, generalmente se logra un control más riguroso que en los experimentos de campo, pero estos últimos suelen tener mayor validez externa.

A diferencia del experimento puro, en el **pre-experimento** el grado de control es mínimo, un ejemplo de ello son los **estudios de caso,** con los cuales no debe hacerse generalización, porque sólo hacen una medición a nivel de grupo, en el cual no hay control y no se logra establecer con certeza la causalidad.

Los **diseños cuasi-experimentales** manejan, al menos, una variable independiente para ver su efecto y relación con una o más variables dependientes y solamente difieren de los “experimentos puros” en el grado de seguridad o confiabilidad, ya que los sujetos no son asignados aleatoriamente. Por lo tanto, los diseños cuasi-experimentales se utilizan cuando no es posible asignar los sujetos en forma aleatoria a los grupos que recibirán los tratamientos. La falta de aleatorización

genera problemas de validez interna y externa, por lo tanto, debe tenerse cuidado en no caer en interpretaciones erróneas, tratándolas con fines explicativos, y más bien limitarse a propósitos descriptivos y correlacionales.

En resumen, los diseños de investigación experimentales, se clasifican dependiendo del grado de control y aleatoriedad, es decir, de su validez interna y externa.

El **diseño de investigación no experimental** es aquel donde no se hacen variar intencionalmente las variables independientes, es decir, se observa el fenómeno tal y como se da en su contexto natural, para después analizarlas. El diseño de investigación no experimental se clasifica en diseño transversal o transeccional y diseño longitudinal.

En el diseño de investigación transversal o transeccional, se recolectan datos en un sólo momento o en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Ellos se clasifican en descriptivos y correlacionales o causales. **El diseño de investigación transeccional descriptivo**, tiene como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan una o más variables, por lo tanto, son estudios descriptivos y cuando se establecen hipótesis, éstas son también descriptivas.

Los diseños de investigación transeccionales correlacionales, describen relaciones entre dos o más variables en un momento determinado o tiempo determinado; por lo tanto, los diseños de investigación correlacionales causales

pueden limitarse a establecer relaciones entre variables, sin precisar sentido de causalidad o pueden pretender analizar relaciones de causalidad.

Los **diseños de investigación longitudinales** analizan cambios a través del tiempo en determinadas variables o en las relaciones entre éstas, es decir, se recolectan datos a través del tiempo en puntos o períodos específicos (fechas de muestreo), para hacer inferencias respecto al cambio, sus determinantes y consecuencias. Los diseños de investigación longitudinales suelen dividirse en tres tipos: de tendencia, de análisis evolutivo de grupos y de panel.

Los **diseños de investigación de tendencia**, son aquellos que analizan cambios a través del tiempo, dentro de alguna población en general. Los **diseños de investigación de evolución de grupo** se centran en el estudio de grupos de individuos vinculados de alguna manera, por ejemplo, la edad. Su diferencia con el diseño de investigación de tendencia, radica en el hecho que la población de éste último se divide en grupos para observarlos y estudiarlos a través del tiempo, aunque algunos individuos dejen de pertenecer a los grupos. Los **diseños de investigación de panel** son similares a los diseños de investigación de tendencia y de evolución de grupo, sólo que el mismo grupo de sujetos es medido en todos los tiempos o momentos (fechas de muestreo).

En la Tabla 1 se ilustra, de acuerdo con el tipo de investigación, la hipótesis de investigación asociada y el diseño de la investigación que se podría aplicar.

Tabla 1. Hipótesis de investigación y diseño de la investigación, de acuerdo con el tipo de investigación.

Tipos de investigación	Hipótesis de investigación	Diseño de la investigación
Exploratorio <ul style="list-style-type: none"> Familiarizarse con tópicos desconocidos o poco estudiados. Desarrollar métodos a utilizar en estudios más profundos. 	<ul style="list-style-type: none"> No se establecen, se formulan conjeturas 	<ul style="list-style-type: none"> Transeccional descriptivo Preexperimental
Descriptivo <ul style="list-style-type: none"> Analizar cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno y sus componentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Descriptiva 	<ul style="list-style-type: none"> Pre-experimental Transeccional descriptiva
Correlacional <ul style="list-style-type: none"> Establecer si hay relaciones o vínculos de diversos fenómenos 	<ul style="list-style-type: none"> Diferencia de grupos sin atribuir causalidad Correlacional 	<ul style="list-style-type: none"> Cuasi-experimental Transeccional correlacional Longitudinal (no explicativa)
Explicativo <ul style="list-style-type: none"> Encontrar las razones o causas que provocan los fenómenos. 	<ul style="list-style-type: none"> Diferencia de grupos atribuyendo causalidad Causales 	<ul style="list-style-type: none"> Experimental Cuasi-experimental, longitudinal y transeccional causal.

Fuente: Hernández et al. (1998),

En resumen

Los diseños de investigación experimental y no experimental se utilizan para el avance del conocimiento y, en ocasiones, resulta más apropiado uno u otro, dependiendo del problema que se quiere resolver con el desarrollo de la investigación, los objetivos y el alcance esperado de los resultados.

Conceptos de muestreo y su relación tipo de investigación



Población



Muestra





con el

Por lo general, medir una característica a todos y cada uno de los individuos de una población, para describirla a través de uno o más parámetros, es costoso, en términos del tiempo empleado y la oportunidad de la medición. Como solución a la obtención de una estimación que se aproxime al parámetro, está el tomar un conjunto de individuos de la población o muestra, con la cual, además de la estimación del parámetro, se tiene un error que define la precisión de la estimación, con una probabilidad de ocurrencia asociada a él.

En la muestra, quien van a ser seleccionado para hacer la medición, depende de precisar claramente el problema a solucionar y los objetivos de la investigación.

En las investigaciones de tipo exploratorio, descriptivo y correlacional, al individuo o elemento de la muestra con quien se hace la selección se le denomina unidad de muestreo. Mientras que en las investigaciones de tipo explicativo se le denomina unidad experimental, dado que es la unidad que va a ser asignada aleatoriamente a los tratamientos, en la cual va a ser aplicado el tratamiento y con la cual se va hacer la inferencia estadística.

Si el instrumento de medición requiere de varias sub-muestras, no debe involucrarse la información del instrumento con la información de la unidad de muestreo o la unidad experimental para el análisis estadístico, debido a que el error de medición es diferente al error experimental. El error de medición es inherente al instrumento, mientras que el error experimental se genera de aquellos factores que no se controlan en el proceso de investigación.

Para seleccionar los individuos de la población que hacen parte de la muestra pueden utilizarse los siguientes **métodos de muestreo estadístico**: aleatorio, sistemático, estratificado y por conglomerados. En la aplicación de cualquiera de ellos debe disponerse del marco de muestreo, es decir, la identificación de cada uno de los individuos que hacen parte de la población.

El **método de muestreo aleatorio** se aplica cuando cada muestra de tamaño n tiene la misma probabilidad de ser seleccionada, en otras palabras, cuando las unidades de muestreo no tienen alguna agrupación en la población, de acuerdo con el parámetro de interés.

Para estimar la producción en kilogramos de café cereza de una hectárea, con su intervalo, en la Estación Experimental Naranjal, a partir de una muestra de 30 árboles, la selección es aleatoria, dado que la producción de los árboles no tiene un patrón de agrupación en la hectárea, siempre y cuando ellos hayan sido sembrados en la misma fecha.

El **método de muestreo sistemático** se utiliza cuando los elementos de la población llevan un orden por cualquier criterio; consiste en seleccionar aleatoriamente un elemento de los primeros K del marco de muestreo y después cada K -ésimo elemento, donde K es igual al cociente entre el número de elementos de la población y el número de elementos de la muestra. Con este método se recorren todos los elementos del marco de muestreo. Es utilizado para la estimación puntual de los parámetros y no para la estimación por intervalos, dado que la estimación de la varianza es sesgada.

Para determinar el contenido de materia orgánica de un lote (sin intervalo), una vez definido el tamaño de muestra, la selección del número de sitios (unidad de muestreo) puede hacerse bajo un muestreo sistemático.

El **muestreo estratificado** se utiliza cuando en la población hay separación de los elementos en grupos y la característica a evaluar es homogénea dentro de cada grupo y heterogénea entre grupos. Para su aplicación hay que identificar los estratos, el número de elementos de cada estrato (N_i) y tener una estimación de la varianza asociada al parámetro de interés, en cada uno de ellos. Una vez identificados los estratos y determinado el tamaño de muestra se hace la selección aleatoria de los individuos en todos y cada uno de los estratos. Con este método de muestreo puede estimarse el parámetro para cada estrato y para la población.

En la estimación de la proyección de producción de café en Colombia se tienen como estratos las zonas cafeteras de Colombia (Norte, Centro Norte, Centro Sur y Sur).

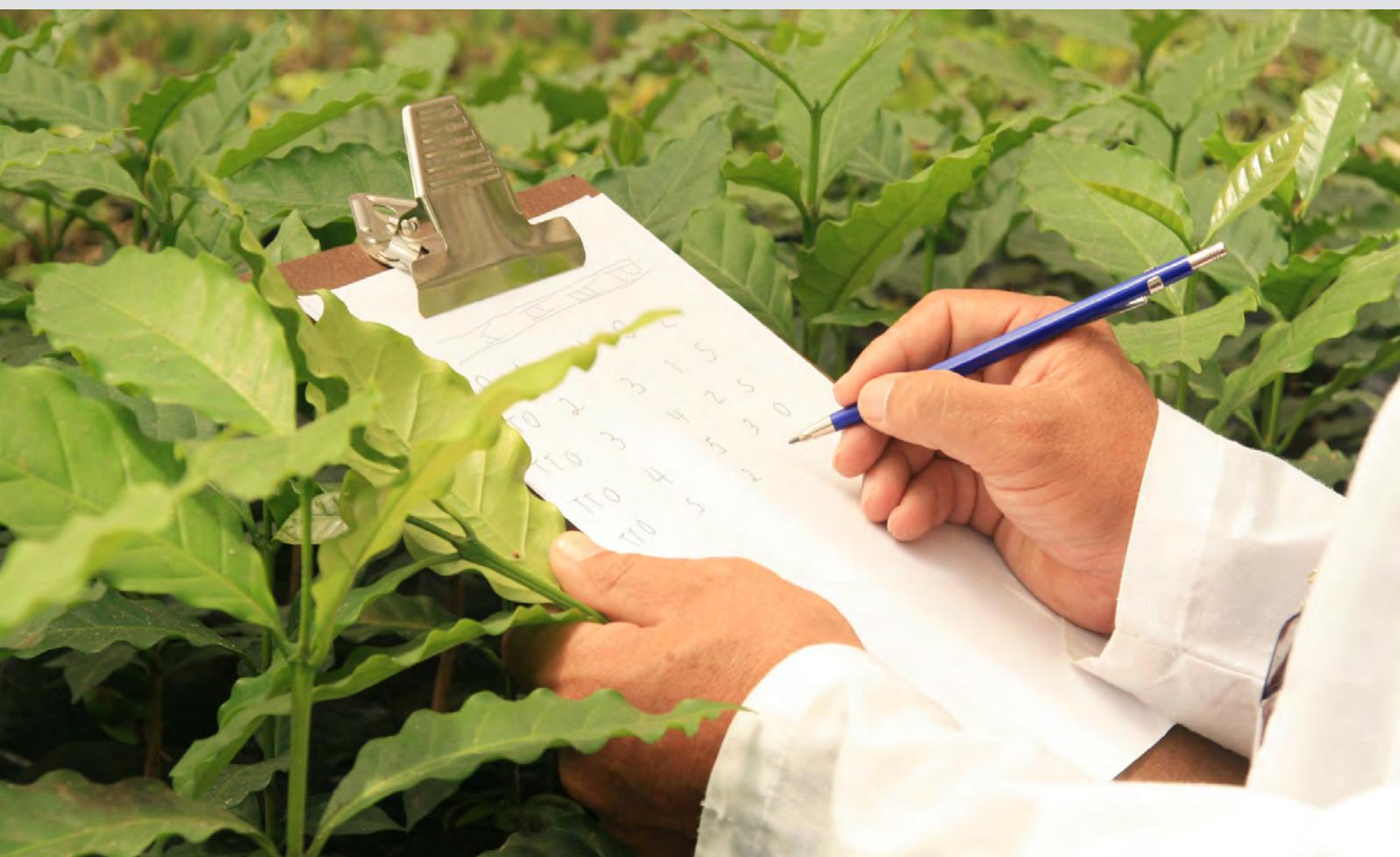
El **muestreo por conglomerado** se aplica por lo general, cuando no se encuentra disponible o es costoso obtener el marco de muestreo que liste todos y cada uno de los elementos de la población, es decir, la población se agrupa en colección de elementos (conglomerados) fáciles de identificar y de listar. Mientras que en el

muestreo estratificado los grupos (estratos) deben ser heterogéneos, en el muestreo por conglomerados los grupos deben ser homogéneos (entre conglomerados), en la característica a evaluar. Una vez se tenga el marco de muestreo con los conglomerados identificados, se seleccionan aleatoriamente m de ellos y, dentro de cada conglomerado seleccionado, se toman aleatoriamente n individuos que, a su vez, conformarán la muestra. Este ejemplo de selección se conoce como un muestreo de una etapa.

Cada método para seleccionar la muestra está asociado con un **diseño de muestreo**,

Para el diagnóstico de broca y roya, en cada departamento cafetero (población), se utiliza un muestreo por conglomerados (dos etapas), donde la primera etapa es el distrito y la segunda etapa es el lote de un predio cafetero.

el cual consiste en establecer: el objetivo del muestreo, la población, el marco de muestreo, el parámetro de interés, el error de estimación, la probabilidad asociada al error de estimación, el método de muestreo (forma de selección), la estructura del



estimador y la estructura de la varianza asociadas al parámetro de interés (Tabla 2), y además definir el instrumento de medición.

asume normalidad, se aplican las fórmulas presentadas en la Tabla 3, con las cuales la probabilidad asociada al error fijado, es mínima del 75%.

Es responsabilidad del investigador fijar el error de estimación y si asume normalidad, la probabilidad asociada a él. Si no se

La estimación de la varianza asociada al parámetro de interés (σ^2) se obtiene de los resultados de otras investigaciones,

Tabla 2. Estructura de los estimadores para cada parámetro, de acuerdo con el método de muestreo.

Método de Muestreo	Parámetro	Estructura del estimador	Estructura de la varianza
Aleatorio	Promedio	$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$	$\hat{V}(\bar{y}) = \frac{S^2}{n} \left(\frac{N-n}{N} \right)$
	Total	$\hat{T} = N \bar{y}$	$\hat{V}(\hat{T}) = N^2 \left(\frac{S^2}{n} \right) \left(\frac{N-n}{N} \right)$
	Proporción	$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$	$\hat{V}(\hat{p}) = \frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n-1} \left(\frac{N-n}{N} \right)$
	Razón	$r = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$	$\hat{V}(\hat{r}) = \left(\frac{N-n}{Nn} \right) \left(\frac{1}{\mu_x^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - r x_i)^2}{n-1}$
Estratificado	Promedio	$\bar{y}_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L N_i \bar{y}_i$	$\hat{V}(\bar{y}_{st}) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^L N_i^2 \left(\frac{N_i - n_i}{N_i} \right) \frac{S_i^2}{n_i}$
	Total	$\bar{y}_{st} = \sum_{i=1}^L N_i \bar{y}_i$	$\hat{V}(N \bar{y}_{st}) = \sum_{i=1}^L (N_i^2) \left(\frac{N_i - n_i}{N_i} \right) \frac{S_i^2}{n_i}$
	Proporción	$\hat{p}_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L N_i \hat{p}_i$	$\hat{V}(\hat{p}_{st}) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^L N_i^2 \left(\frac{N_i - n_i}{N_i} \right) \left(\frac{\hat{p}_i (1 - \hat{p}_i)}{n_i - 1} \right)$
Sistemático	Promedio	$\bar{y}_{sis} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$	$\hat{V}(\bar{y}_{sis}) = \frac{S^2}{n} \left(\frac{N-n}{N} \right)$
	Total	$\hat{T} = N \bar{y}_{sis}$	$\hat{V}(\hat{T}) = N^2 \left(\frac{S^2}{n} \right) \left(\frac{N-n}{N} \right)$
	Proporción	$\hat{p}_{sis} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$	$\hat{V}(\hat{p}_{sis}) = \frac{\hat{p}_{sis}(1-\hat{p}_{sis})}{n-1} \left(\frac{N-n}{N} \right)$

Continúa...

... continuación Tabla 2

Método de Muestreo	Parámetro	Estructura del estimador	Estructura de la varianza
Conglomerados	Promedio	$\bar{y}_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$	$\hat{V}(\bar{y}_c) = \left(\frac{N-n}{Nn\bar{M}^2}\right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} m_i)^2}{n-1}$
	Total	$\hat{T}_c = M \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$	$\hat{V}(\hat{T}_c) = N^2 \left(\frac{N-n}{Nn}\right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} m_i)^2}{n-1}$
	Proporción	$\hat{P}_c = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$	$\hat{V}(\hat{P}_c) = \left(\frac{N-n}{Nn\bar{M}^2}\right) \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \hat{p} m_i)^2}{n-1}$
	<p>a_i : Número de elementos que poseen la característica en el conglomerado i N : Número de conglomerados en la población n : Número de conglomerados seleccionados aleatoriamente en la muestra m_i : Número de elementos en el conglomerado i</p> <p>$M = \sum_{i=1}^N m_i$: Número de elementos de la población; $\bar{M} = \frac{M}{N}$</p>		

Fuente: Scheaffer et al. (1986). Para el parámetro proporción, Y_i toma valor de uno cuando el individuo cumple con la característica y cero en caso contrario.

y en el caso de no ser posible, estimarla como: $(\text{rango}/4)^2$, donde el rango, es la diferencia entre el valor máximo posible y el mínimo posible de la característica para la cual se va a determinar el tamaño de muestra, de acuerdo con el conocimiento del investigador.

El **instrumento de medición** está relacionado con el proceso de recolección de datos de la muestra, donde la palabra medir implica vincular conceptos abstractos con indicadores empíricos.

Entre los factores que afectan la **confiabilidad y validez del instrumento** están: la improvisación, la utilización de instrumentos desarrollados en el

extranjero, que no han sido validados o calibrados, y no tener presentes las condiciones en las que puede aplicarse el instrumento. Un instrumento de medición es confiable y válido cuando el error de medición tiende a cero, es decir, cuando al aplicar el instrumento se obtiene un error mínimo de medición. Debe tenerse presente que, a mayor error al medir, el valor que se observa se aleja más del valor real o verdadero.

El **diseño de muestreo** se define dependiendo del alcance de la investigación o estudio.

Si se trata del diagnóstico de cualquier plaga o enfermedad, en un lote dado, por



Para el concepto altura de la planta de café, el **indicador** sería la medición en centímetros; la **confiabilidad del instrumento** (el metro), se refiere al hecho de obtener un resultado igual cuando se aplica repetidamente el instrumento a la misma planta de café; y la **validez** implica que con el instrumento se mida el concepto (característica de interés), en este caso la altura de la planta de café.

Tabla 3. Fórmulas para determinar el tamaño de la muestra, de acuerdo con el método de muestreo y el parámetro.

Método de Muestreo	Parámetro	Tamaño de muestra (n)	D
Aleatorio	Promedio	$\frac{N \sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2}$	$\frac{B^2}{4}$
	Total		$\frac{B^2}{4N^2}$
	Proporción	$\frac{Npq}{(N-1)D + pq}$	$\frac{B^2}{4}$
Estratificado	Promedio	$\frac{\sum_{i=1}^l \frac{N_i^2 \sigma_i^2}{w_i}}{N^2 D + \sum_{i=1}^l N_i \sigma_i^2}$	$\frac{B^2}{4}$
	Total		$\frac{B^2}{4N^2}$
	Proporción	$\frac{\sum_{i=1}^l \frac{N_i^2 p_i q_i}{w_i}}{N^2 D + \sum_{i=1}^l N_i p_i q_i}$	$\frac{B^2}{4}$
Sistemático	Promedio	$\frac{N \sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2}$	$\frac{B^2}{4}$
	Total		$\frac{B^2}{4}$
Conglomerados	Promedio	$\frac{\sigma_c^2 C}{CD + \sigma_c^2}; \hat{\sigma}_c^2 = S_c^2 = \frac{\sum_{i=1}^c (y_i - \bar{y} m_i)^2}{c-1}$	$\frac{B^2 \bar{M}^2}{4}$
	Total		$\frac{B^2}{4C^2}$
	Proporción	$\frac{C \sigma_c^2}{CD + \sigma_c^2}; \sigma_c^2 = S_c^2 = \frac{\sum_{i=1}^c (a_i - \hat{p} m_i)^2}{c-1}$	$\frac{B^2 \bar{M}^2}{4}$

B = Error de estimación fijado por el investigador; p = proporción del atributo de interés; $q = 1-p$; σ^2 = varianza previa estimada asociada al parámetro; a_i = número de elementos que poseen la característica en el conglomerado i ; N =número de elementos en la población; n = número de elementos seleccionados en la muestra; m_i =número de elementos en el conglomerado i ; C = número de conglomerados en la población; c = número de conglomerados seleccionados aleatoriamente en la muestra; l = número de estratos.

Si el diagnóstico de una plaga o enfermedad es para cada departamento cafetero, puede aplicarse un muestreo por conglomerados en dos etapas, donde la primera de ellas pueden ser los municipios y la segunda etapa los lotes, teniendo como variable, la evaluación de la plaga o enfermedad del lote, cuya estimación puede ser obtenida con un muestreo sistemático de 1 en k . En la estimación del parámetro bajo el muestreo de dos etapas se tiene sólo en cuenta la variación entre lotes y entre municipios y, estos a su vez, se seleccionan aleatoriamente, para obtener una muestra de municipios cafeteros del departamento, y dentro de cada municipio una muestra de lotes, del total de ellos sembrados en café. En el caso que los municipios sean heterogéneos en la característica a evaluar, se aplica un muestreo estratificado, donde en todos y cada uno de los estratos (municipios), se selecciona aleatoriamente n lotes.

lo general se aplica el método de muestreo sistemático de 1 en k , donde las unidades de muestreo son las plantas y el marco de muestreo lo conforma el mapa de campo, es decir, la ubicación y la numeración de todas y cada una de las plantas del lote.

El diagnóstico se clasifica como una investigación de tipo exploratoria-descriptiva y su alcance es la estimación de parámetros, con su varianza, error de estimación y comparación de grupos.

La **evaluación de herramientas**, como métodos de muestreo e instrumentos de medición, entre otros, se clasifican como **investigación de tipo exploratoria**, y su alcance en el análisis es la determinación de error de medición y la probabilidad asociada.

Cuando el investigador aborda un tema nuevo y quiere indagar cuál o cuáles características de naturaleza cuantitativa tienen mayor variabilidad, es una investigación de tipo exploratoria. Para éste caso se puede utilizar el análisis de componentes principales, el cual indica la agrupación de las variables en cada componente, de tal manera que, en las dos primeras componentes quedan aquellas con mayor variabilidad y en la última componente las de menor variabilidad. La aplicación del análisis de componentes principales implica que en todas y cada una de las unidades de observación (seleccionadas aleatoriamente), se midan las variables de tipo cuantitativo asociadas a las características de interés y el número de unidades de observación (muestra), sea mayor que el número de variables a evaluar; además cumplir con los supuestos que requiere la aplicación de dicho análisis.

En el caso de las investigaciones de tipo descriptivo, dado que su objetivo es el describir los individuos de una población a través de una o más características cuantitativas en su condición natural, la selección de las unidades de muestreo es aleatoria y el análisis estadístico, para cada característica, puede contemplar la estimación de las medidas de tendencia central, la varianza, el error estándar, la prueba de normalidad, la estimación de cuantiles, la distribución acumulada y el intervalo de confianza. Como inferencia estadística, se utiliza el estadístico de prueba t , al nivel de probabilidad

establecido, para corroborar que el promedio sea diferente de cero o de un valor fijado. Cuando las características son de carácter cualitativo, se estima la proporción de individuos que cumplan una condición dada, la varianza asociada a la proporción y el estadístico de prueba z , con una probabilidad establecida, para corroborar que dicha estimación sea diferente de cero o de un valor fijado. La selección de las unidades de muestreo es aleatoria.

En las investigaciones de tipo correlacional, las unidades de muestreo se seleccionan aleatoriamente y, en todas y cada una de ellas, se miden las características con las cuales quiere verificarse la correlación lineal en caso de variables cuantitativas, o la dependencia en el caso de variables cualitativas.

La correlación lineal entre dos variables cuantitativas se verifica con la significación del coeficiente de correlación y la comprobación del coeficiente de regresión diferente de cero, dado que, en muchas ocasiones, para estimaciones del coeficiente de determinación mayores del 80%, el coeficiente de regresión es cero, según prueba de t , lo cual implica que la variación de la variable dependiente no está explicada por la variación de la

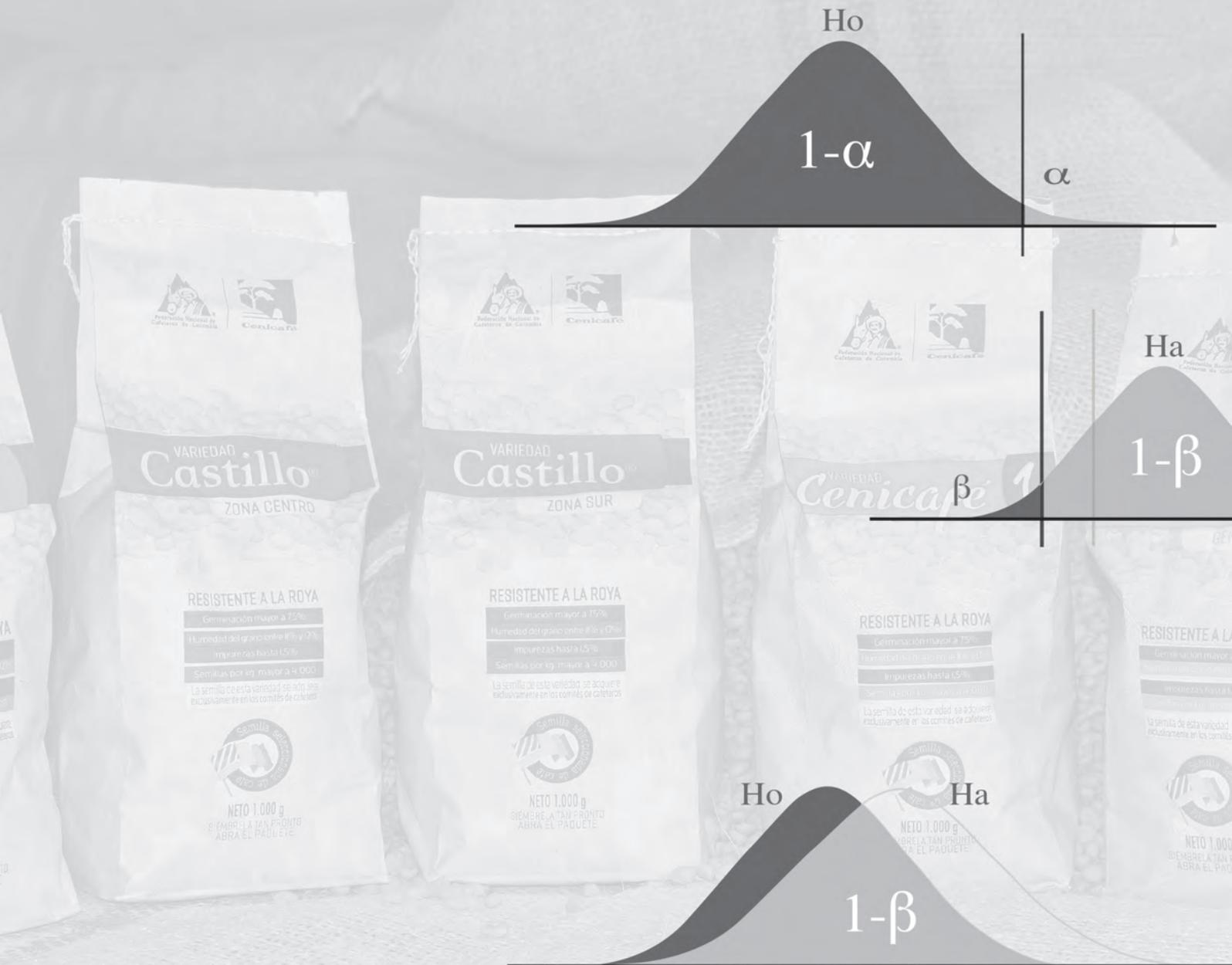
variable independiente. Para el caso de variables cualitativas, la asociación se evalúa a través del estadístico de prueba Chi cuadrado, con un nivel de significación establecido.

En las investigaciones de tipo explicativo, dado que se aplica el concepto de experimento puro y el diseño estadístico de experimentos, se requiere la asignación aleatoria de las unidades experimentales a los tratamientos, con lo cual se logra la validez interna (confiabilidad) y externa de las investigaciones (generalización de los resultados).

En los experimentos puros, entre los diseños estadísticos experimentales que se aplican están: completamente aleatorio, completamente aleatorio en arreglo factorial, bloques completos al azar, bloques completos al azar en arreglo factorial, bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas, cuadrado latino, conmutativo y látice.

En los capítulos subsecuentes se tratará la filosofía de aplicación de diseños estadísticos experimentales, la interpretación de su respectivo análisis de varianza, el uso de pruebas de comparación de promedios y la evaluación de tendencias.

Confiabilidad de los resultados en la investigación explicativa



El método científico y la generación de conocimiento tiene implícito la aplicación de la lógica, la objetividad y la comprensión de los fenómenos, con un aspecto esencial: el examen de lo conocido y la formulación de hipótesis de trabajo o de investigación, que se plantean para corroborar experimentalmente.

Una condición formal de una hipótesis de trabajo es formularla de tal manera que la verificación o rechazo de ella pueda ser decidida por observación directa con un procedimiento experimental. La hipótesis de trabajo puede ser la hipótesis nula bajo el estadístico de prueba F (no hay efecto de los tratamientos), o en caso contrario, la hipótesis alterna bajo el mismo estadístico de prueba F (hay efecto de los tratamientos).

Una vez se formula la hipótesis de trabajo o de investigación, el primer paso para evaluarla, en términos de corroborarla o rechazarla, es plantear el modelo experimental y ejecutarlo a través de un modelo material, en una muestra de la población de interés, sometida a ciertas acciones del hombre (tratamientos), con el objetivo de estudiar sus consecuencias.

El experimento tiene en cuenta la concepción teórica del problema y su fundamento en la observación empírica, lo cual implica un diseño consistente con un modelo de análisis. **El diseño** es el plan que determina cómo tomar la información de acuerdo con los objetivos de la investigación, teniendo en cuenta el control de factores. **El modelo de análisis** está conformado por los conceptos y métodos que fundamentan el análisis de la información, para sustentar la generalización de los resultados, a través de la inferencia estadística.

**Certeza en la
decisión sobre la
hipótesis nula
(H_0)**

**Incertidumbre en
la decisión sobre
la hipótesis nula
(H_0)**

El modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio es

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} : Observación j de la variable en el tratamiento i.

μ : Media poblacional asociada a la variable Y.

τ_i : Efecto del tratamiento i.

ε_{ij} : Error experimental en la observación j del tratamiento i.

En síntesis, **el diseño** define la forma y los medios para desarrollar el experimento en la práctica; y el análisis de la información es el objetivo del modelo de análisis, de acuerdo con los datos proporcionados por las observaciones. Sin el modelo de análisis no hay el fundamento para hacer inferencia, por lo tanto, el modelo experimental debe corresponder a una abstracción y concreción de ideas en un ente material y en un ente estadístico matemático, es decir, el modelo experimental cumple con las siguientes características:

1. Material (campo).
2. Formal (modelo – matemático).
3. Probabilístico.

El modelo de análisis a su vez, tiene implícito dos **hipótesis estadísticas**: la hipótesis nula y la hipótesis alterna. Bajo la primera de ellas, se asume que

el promedio de todos los tratamientos aplicados experimentalmente, son iguales estadísticamente, es decir, no hay efecto de tratamientos; bajo la segunda, una vez rechazada la hipótesis nula, implica que al menos el promedio de uno de los tratamientos difiere del promedio de otro tratamiento (hay efecto).

Para tomar la decisión acerca de la hipótesis, el modelo de análisis tiene como herramienta el estadístico de prueba F, de tal manera que, si este es significativo se rechaza la hipótesis nula, y en caso contrario, se mantiene.

Cada hipótesis (la nula y la alterna) tiene una distribución normal asociada, y ellas se cruzan en una región de rechazo. La región de rechazo de la hipótesis nula está definida por el nivel de significación (α), su valor es asumido por el investigador y corresponde a la probabilidad de rechazar la hipótesis nula dado que ella es cierta. La región de rechazo de la hipótesis alterna está determinada por el número de unidades experimentales por tratamiento y corresponde a la probabilidad de rechazar la hipótesis alterna dado que ella es cierta (β), mientras que la probabilidad de aceptar la hipótesis alterna dado que ella es cierta, es la potencia de la prueba ($1 - \beta$), es decir, la potencia de la prueba es la capacidad del estadístico de prueba F para aceptar la hipótesis alterna, cuando es cierta.

En la investigación de tipo explicativa, cuando se mantiene la hipótesis nula debe verificarse que la probabilidad tipo II (β) sea menor del 20%. De no ser así, queda la incertidumbre con respecto a la decisión de mantener o rechazar dicha hipótesis, dado que, la distribución de las dos hipótesis (nula y alterna) están superpuestas, por lo tanto, se sugiere revisar los factores

de control y de variación, el diseño experimental y/o aumentar el número de unidades experimentales.

Cuando se rechaza la hipótesis nula se verifica la potencia de la prueba, la cual equivale a la probabilidad de tener éxito en detectar diferencias entre tratamientos con opción de validarlo posteriormente (seguridad en el resultado), por lo tanto, el valor de la potencia se sugiere sea superior del 80%, para tener la certeza en la decisión de rechazar la hipótesis nula.

En la Tabla 4 se presentan diferentes ejemplos sobre la decisión de la hipótesis nula, el valor del estadístico de prueba F, la suma de cuadrados de tratamientos, el error experimental o cuadrado medio del error, la potencia de la prueba ($1 - \beta$) o el error de tipo II (β), según sea el caso.

La decisión de mantener la hipótesis nula se da cuando la probabilidad asociada al estadístico de prueba F es mayor al nivel de significación (α), fijado por el investigador; y la decisión de rechazarla hipótesis nula se da cuando la probabilidad asociada al estadístico de prueba F es menor del nivel de significación.

En el segundo ejemplo, se mantiene la hipótesis nula, con un valor de β del 82% (superior al 20%), implicando una incertidumbre en la decisión de mantener o no la hipótesis nula, lo que conlleva a dudar si hay o no efecto de los tratamientos; mientras que en el cuarto ejemplo (Tabla 4), para la misma decisión acerca de la hipótesis nula, el valor de β es menor del 20%, lo cual implica la certeza en la decisión de mantener la hipótesis nula, es decir, no hay efecto de tratamientos o los promedios de los tratamientos evaluados son iguales estadísticamente.

En los ejemplos de rechazo de la hipótesis nula (Tabla 4), aun siendo la misma decisión, la confiabilidad de los resultados (potencia de la prueba) en el primero es del 99%, mientras que en el segundo es del 49% (menor del 80%), lo que conlleva a tomar la decisión de efecto de tratamientos sólo con una certeza del 49%.

Para obviar al máximo la circunstancia de unos resultados experimentales no confiables, o a partir de los cuales no haya una decisión contundente acerca de la hipótesis nula (mantenerla o rechazarla), en la planeación del experimento se

Tabla 4. Valores de la potencia o probabilidad de tipo II, de acuerdo con la decisión al evaluar la hipótesis nula asociada al estadístico de prueba F.

Decisión sobre la hipótesis nula	Estadístico de prueba F	Suma de cuadrados de tratamientos	Cuadrado medio del error	β (%)	Potencia de la prueba ($1-\beta$)
Se rechaza	72,80	504,26	2,30		99,0
Se mantiene	0,37	2.274,00	2.071,30	82,0	
Se rechaza	22,60	3.123,52	285,28		49,0
Se mantiene	1,71	48,16	4,68	0,19	

debe determinar el número de unidades experimentales a través de la potencia de la capacidad de la prueba para aceptar la hipótesis alterna, cuando ella es cierta, lo cual implica definir:

- ♦ Población objeto de estudio
- ♦ Número de tratamientos
- ♦ Variable de respuesta
- ♦ Factores de control para reducir el error experimental.
- ♦ Unidad experimental
- ♦ El nivel de significancia o error tipo I (α)
- ♦ Confiabilidad.
- ♦ La diferencia mínima aceptable.
- ♦ Estimación de la varianza asociada a la variable de respuesta, obtenida en investigaciones previas. Cuando no se dispone de esta estimación, puede obtenerse en función del rango de la variable de respuesta, de acuerdo con el conocimiento del investigador, así:

$$\text{Varianza} = \left[\frac{X_{\text{máximo}} - X_{\text{mínimo}}}{4} \right]^2$$

$X_{\text{máximo}}$: es el valor **máximo observado, asociado a la variable de respuesta.**

$X_{\text{mínimo}}$: es el valor **mínimo observado, asociado a la variable de respuesta.**

La hipótesis nula de cualquier modelo de análisis asociado al diseño experimental (bajo el concepto del teorema de Cochran), se evalúa con el estadístico de prueba F calculado (FC). Este estadístico de prueba tiene una distribución F caracterizada por los grados de libertad del numerador (*asociado a los tratamientos*), grados de libertad del denominador (asociado al error experimental) y el parámetro de centralidad (λ).

El parámetro de centralidad (λ), a su vez define si la distribución del estadístico de prueba es centrada o no. Bajo la hipótesis nula, FC es centrada, ya que no existe diferencia entre los promedios de los tratamientos, es decir, no hay efecto de tratamientos. FC es no centrada si λ es diferente de cero, lo cual significa que hay efecto de tratamientos. Por lo tanto, con base en el parámetro de centralidad (λ), se toma la decisión del número de unidades experimentales, de acuerdo con el diseño experimental a utilizar.

En el caso del diseño completamente aleatorio, la estructura del parámetro de centralidad λ , es la siguiente:

$$\hat{\lambda} = \frac{SCT}{2\hat{\sigma}^2}$$

$\hat{\lambda}$: **parámetro de centralidad de la distribución F.**

SCT : **suma de cuadrados de tratamientos.**

$\hat{\sigma}^2$: **varianza asociada al error experimental.**

La magnitud de la varianza asociada al error experimental está dada por al menos una de las siguientes razones: 1. Heterogeneidad de las unidades experimentales; 2. Errores en la medición;

3. Selección incorrecta de los factores de variación, es decir, un planteamiento inadecuado del modelo de análisis, el cual está asociado al diseño experimental.

Para determinar el número de unidades experimentales bajo el modelo de análisis para el diseño completamente aleatorio, se asume que los promedios equidistan en igual proporción de la media general, de tal manera que la expresión de λ se convierte en:

<1>

$$\hat{\lambda} = \frac{tr(C/2)^2}{2\sigma^2}$$

Donde

- r : número de unidades experimentales a determinar.
- t : número de tratamientos a evaluar.
- C : diferencia mínima aceptable entre tratamientos .
- σ^2 : varianza estimada en otras investigaciones, asociada al promedio de la variable de respuesta.

La diferencia mínima aceptable (C), la fija el investigador y se refiere a aquella diferencia entre medias a partir de la cual se considera la diferencia entre dos promedios de tratamientos que justifique su aplicación. Es una decisión que puede apoyarse en conceptos técnicos y/o económicos. El número de tratamientos a evaluar (t) también lo fija el investigador.

Una vez se tenga el valor de λ , se obtiene

<2>

$$\phi = \sqrt{(2\lambda)/t}$$

Donde

- t : Número de tratamientos a evaluar

Con los valores de ϕ y λ (estimados con las expresiones <1> y <2>) y el nivel de significación (α), se identifica en las Tablas de Thung el valor de β (error de tipo II) y con este se determina la confiabilidad como $1-\beta$. Por lo tanto, por análisis de sensibilidad se determina el número de unidades experimentales, de acuerdo con: la varianza estimada en otras investigaciones, asociada al promedio de la variable de respuesta de la investigación a realizar, el número de tratamientos a evaluar, la diferencia mínima aceptable, el nivel de significación y la confiabilidad deseada. Las Tablas de Thung se encuentran en textos de diseño de experimentos, como curvas de potencia de la prueba F para análisis de varianza.

Ejecutado el experimento, se obtiene la estimación de λ y ϕ , a partir de los resultados del análisis de varianza (expresiones <3> y <4>). Con los valores de λ , ϕ , el nivel de significación (establecido en la propuesta de investigación) y los grados de libertad para tratamientos y el error experimental, se obtiene la probabilidad de tipo II (β), en las Tablas de Thung, y con esta la potencia de la prueba ($1-\beta$). Un experimento con decisión confiable, es aquel con una potencia de la prueba mayor del 80%, o una probabilidad de tipo II menor del 20%, según sea la decisión sobre la hipótesis nula.

<3>

$$\hat{\lambda} = \frac{SCT}{2CME}$$

Donde

- SCT : Suma de cuadrados de tratamientos.
- CME : Cuadrado medio del error.

<4>

$$\varphi = \sqrt{(2\hat{\lambda})/t}$$

Donde

t : Número de tratamientos evaluados

Para aplicar el análisis de varianza independientemente del diseño experimental, deben cumplirse los siguientes supuestos:

1. Aditividad. Está implícita en el modelo matemático. Este supuesto implica

que las fuentes de variación son aditivos.

2. Homogeneidad de varianzas. Las varianzas asociadas al promedio de cada uno de los tratamientos deben ser homogéneas. Este supuesto se verifica con la prueba de homogeneidad de varianzas de Bartlett, (manteniendo la hipótesis nula).

3. Normalidad. Los errores experimentales deben tener una distribución normal y ella se corrobora o no, con pruebas de normalidad, como la de Shapiro y Wilk (manteniendo la hipótesis nula).

Cuando no se cumplen los numerales 2 ó 3, se recurre a la transformación de los datos.

Para datos en forma porcentual se sugiere transformarlos a arcoseno raíz de porcentaje

Para datos que implican conteo, se sugiere transformarlos a logaritmo.

En ocasiones, con la transformación de la información se logra una menor varianza, pero no se logra la homogeneidad y la normalidad.

En los siguientes capítulos se ilustra la aplicación de algunos diseños de experimentos en investigación de tipo explicativa.



Diseño experimental completamente aleatorio



Este diseño se aplica cuando en el ambiente experimental hay homogeneidad de las características (variables exógenas) que influyen en la variable de respuesta, o no existen factores a controlar diferentes a los tratamientos. En general, se desarrollan en ambientes de laboratorio o invernadero y en algunos casos en condiciones de campo. La variabilidad generada por los factores no controlables en dichos ambientes, afectan el error experimental.

Una vez definidos los objetivos y planteada la hipótesis de investigación, la aplicación del diseño completamente aleatorio implica:

1. Definir los tratamientos a evaluar.

2. Establecer la unidad experimental.

3. Definir la variable de respuesta con la cual se evaluará el efecto de tratamientos y las variables complementarias. El investigador es quien decide la variable para tomar la decisión con respecto al efecto de tratamientos (variable de respuesta) y las variables con las cuales complementaría la interpretación de la variable de respuesta.

4. Determinar estadísticamente el número de unidades experimentales, de acuerdo con: el número de tratamientos a evaluar, el nivel de significación, la varianza asociada a la variable de respuesta (obtenida en otras investigaciones), la diferencia mínima aceptable entre promedios de tratamientos

Ejemplo No. 1

Con el objetivo de controlar la chinche de la chamusquina del café y bajo la hipótesis de investigación que *"al menos con uno de los hongos se logra más del 70% de mortalidad"*, se evaluó el efecto de siete tratamientos (hongos), con la variable de respuesta porcentaje de chinches muertas, bajo el diseño experimental completamente aleatorio, al nivel del 5%. La unidad experimental estuvo conformada por diez individuos (chinches) y en cada tratamiento se tuvieron ocho unidades experimentales (Figura 1). A los 25 días de aplicados los tratamientos se registró la información relacionada con la variable de respuesta. Se hicieron dos réplicas del experimento (ensayos), es decir, el experimento se llevó a cabo en dos oportunidades en condiciones de laboratorio y en cada una de ellas se tuvo un testigo absoluto (sin aplicación de hongo).

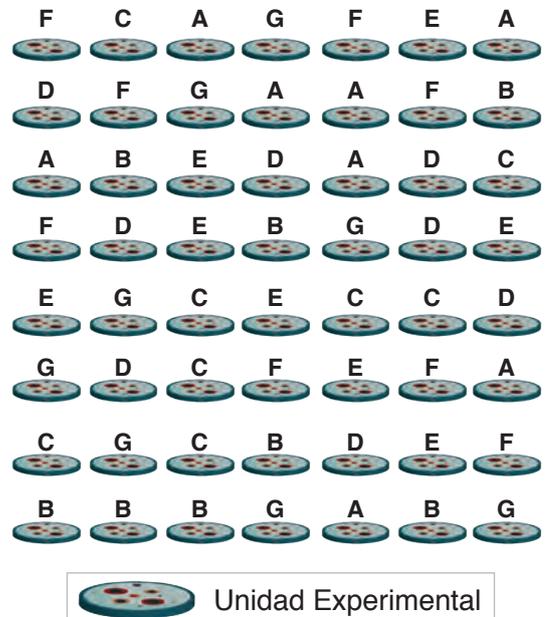


Figura 1. Asignación aleatoria de las unidades experimentales a los tratamientos. Cada letra corresponde a un tratamiento.

y la confiabilidad deseada. Estos criterios deben ser propuestos por el responsable de la investigación.

5. Una vez determinado el número de unidades experimentales por tratamiento (k), hacer lo siguiente:

- Selección aleatoria de los tratamientos.
- Del total de las unidades experimentales, (una vez identificadas y numeradas), seleccionar aleatoriamente las primeras k unidades, para ser asignadas al primer tratamiento seleccionado, según el numeral a.
- Luego, se prosigue con la segunda selección aleatoria de k unidades experimentales, para ser asignadas al segundo tratamiento seleccionado aleatoriamente, y así sucesivamente, hasta completar la asignación de las unidades experimentales a todos los tratamientos. Para la selección aleatoria puede usarse Excel o algún software para análisis estadístico.

6. Aplicar los tratamientos y registrar la información relacionada con la variable de respuesta y las variables complementarias.

A continuación, se ilustrará con ejemplos la aplicación e interpretación del diseño experimental completamente aleatorio.

Cuando el efecto de la aplicación del tratamiento es una variable cualitativa, como en este caso (la chinche muerta), la unidad experimental debe estar conformada por un grupo de unidades de observación (chinchas), con el propósito de tener una variable de respuesta cuantitativa (porcentaje de chinchas muertas), y así aplicar el modelo de análisis bajo el diseño experimental propuesto.

En la Figura 1 se muestra la asignación aleatoria de las unidades experimentales a los tratamientos.

Para reproducir los resultados del Ensayo 1, utilizando cualquier software u hoja electrónica, en la Tabla 5 se presenta la información de la variable de respuesta, en cada una de las unidades experimentales de cada tratamiento.

Tabla 5. Porcentaje de chinchas muertas en cada unidad experimental de cada tratamiento, para el ensayo 1.

Tratamiento	Unidad experimental	Porcentaje de mortalidad	Tratamiento	Unidad experimental	Porcentaje de mortalidad
Hongo 1	1	85,7	Hongo 5	1	14,3
Hongo 1	2	42,9	Hongo 5	2	14,3
Hongo 1	3	85,7	Hongo 5	3	0,0
Hongo 1	4	85,7	Hongo 5	4	14,3
Hongo 1	5	71,4	Hongo 5	5	14,3
Hongo 1	6	85,7	Hongo 5	6	0,0
Hongo 1	7	71,4	Hongo 5	7	0,0
Hongo 1	8	42,9	Hongo 5	8	28,6
Hongo 2	1	71,4	Hongo 6	1	14,3
Hongo 2	2	85,7	Hongo 6	2	0,0
Hongo 2	3	57,1	Hongo 6	3	0,0
Hongo 2	4	100,0	Hongo 6	4	14,3
Hongo 2	5	71,4	Hongo 6	5	28,6
Hongo 2	6	100,0	Hongo 6	6	28,6
Hongo 2	7	71,4	Hongo 6	7	0,0
Hongo 2	8	85,7	Hongo 6	8	0,0
Hongo 3	1	85,7	Hongo 7	1	28,6
Hongo 3	2	71,4	Hongo 7	2	57,1
Hongo 3	3	71,4	Hongo 7	3	71,4
Hongo 3	4	85,7	Hongo 7	4	57,1
Hongo 3	5	100,0	Hongo 7	5	57,1
Hongo 3	6	85,7	Hongo 7	6	57,1
Hongo 3	7	85,7	Hongo 7	7	57,1
Hongo 3	8	57,1	Hongo 7	8	28,6
Hongo 4	1	0,0	Testigo	1	14,3
Hongo 4	2	14,3	Testigo	2	14,3
Hongo 4	3	14,3	Testigo	3	0,0
Hongo 4	4	0,0	Testigo	4	14,3
Hongo 4	5	0,0	Testigo	5	14,3
Hongo 4	6	0,0	Testigo	6	0,0
Hongo 4	7	14,3	Testigo	7	0,0
Hongo 4	8	28,6	Testigo	8	0,0

En la Tabla 6, se resume la información del análisis de varianza para los dos ensayos, con la cual se tienen los criterios de decisión con respecto a la hipótesis nula, asociada al modelo de análisis del diseño experimental completamente aleatorio, a través de la significación o no del valor FC, o estadístico de prueba. Este valor se obtiene del cociente entre los cuadrados medios de tratamientos y error, es decir, para el caso del primer ensayo sería:

$$\text{Cuadrado medio de tratamientos} = 65153,06/7 = 9307,58$$

$$\text{Cuadrado medio del error} = 9897,96/56 = 176,74$$

$$FC = 9307,58/176,74 = 52,66$$

Los **software** estadísticos dan la probabilidad asociada a esta estimación, de tal manera que si es menor al nivel de significación establecido en la planeación de la investigación, se rechaza la hipótesis nula, es decir, se acepta la hipótesis alterna (hay efecto de tratamientos o al menos un promedio de un tratamiento difiere de otro); en este caso, debe evaluarse la confiabilidad, la cual debe ser mayor o igual a la estipulada por el investigador, en la determinación del número de unidades experimentales. Si la probabilidad asociada al valor de FC es igual o mayor al nivel de significación, se mantiene la hipótesis nula, caso en el

cual debe verificarse que la probabilidad de tipo II sea menor del 20%; de no ser así, hay incertidumbre con respecto a la decisión de mantener la hipótesis nula (no hay efecto de tratamientos).

Si no se tiene un **software** que suministre la probabilidad asociada a FC, se busca en una Tabla de valores tabulados para la distribución F, el valor tabulado (F_t) correspondiente al nivel de significación establecido, los grados de libertad de tratamientos (numerador) y grados de libertad del error (denominador); si FC es mayor que F_t , se rechaza la hipótesis nula y se procede a determinar la confiabilidad; en caso contrario, se mantiene la hipótesis nula, y se evalúa la certeza de esta decisión. El cuadrado medio del error es la estimación de la varianza experimental, y el cuadrado medio de tratamientos es la estimación de la varianza asociada a los tratamientos.

De acuerdo con el análisis de varianza presentado en la Tabla 6 la probabilidad asociada al estadístico de prueba (FC) es significativo, es decir, es menor al estipulado por el investigador (nivel de significación de 0,05), lo que indica que hay efecto de tratamientos, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, en otras palabras, al menos un tratamiento difiere de otro tratamiento en su promedio. En este caso se determina la confiabilidad y se procede a aplicar la prueba de

Tabla 6. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, en la evaluación del efecto tratamientos en la mortalidad de la chinche.

Ensayo	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
1	Tratamiento	7	65153,06	52,66	< 0,0001
	Error	56	9897,96		
2	Tratamiento	7	38950,89	31,73	< 0,0001
	Error	56	9821,43		

comparación establecida en la planeación de la investigación.

Si el valor de FC no es significativo (se mantiene la hipótesis nula), no se aplica la prueba de comparación.

Como hay un testigo absoluto y el análisis de varianza indicó efecto de tratamientos se aplica la prueba de Dunnett, para identificar si todos los tratamientos difieren del testigo. En este caso el testigo como tratamiento control, debe reflejar la mortalidad natural, mientras que los otros tratamientos además de ella tienen la mortalidad causada por su efecto, si lo hay (mayor promedio).

En cada uno de los ensayos, la prueba de Dunnett indicó diferencias del promedio del testigo con los promedios del porcentaje de mortalidad de los hongos 1, 2, 3 y 7 (Tabla 7), a favor de estos, es decir, presentaron mayor promedio que el testigo.

Una vez identificados los tratamientos que presentaron mayor promedio con respecto al testigo, se realiza el análisis de varianza solo con ellos y si se rechaza la hipótesis nula se aplica la prueba de Tukey, para identificar el o los tratamientos con el mayor promedio de mortalidad.

El nivel con el cual debe aplicarse la prueba de comparación de promedios debe ser el mismo con el cual se evalúa el estadístico de prueba FC, en este caso es el 5%.

En el primer ensayo los hongos 2 y 3 tienen el mayor promedio de mortalidad con respecto al hongo 7, y en el segundo ensayo el hongo 3 presentó el mayor promedio con respecto a los hongos 1, 2 y 7 (Tabla 7). El hongo 3 fue el único que presentó en los dos ensayos un promedio mayor del 70%, según prueba de *t* al 5%.

Tabla 7. Promedio y coeficiente de variación del porcentaje de chinches muertas, por tratamiento, en cada ensayo.

Ensayo	Tratamiento	Porcentaje de chinches muertas	CV (%)
1	Testigo	7,1	106,9
	Hongo 1	71,4 * AB	26,2
	Hongo 2	80,4 * A	18,9
	Hongo 3	80,4 * A	16,3
	Hongo 4	8,9	119,0
	Hongo 5	10,7	94,3
	Hongo 6	10,7	118,2
	Hongo 7	51,8 * B	29,3
2	Testigo	3,6	185,2
	Hongo 1	41,1 * B	34,5
	Hongo 2	42,9 * B	50,4
	Hongo 3	82,1 * A	15,4
	Hongo 4	7,1	151,2
	Hongo 5	8,9	119,0
	Hongo 6	16,1	57,0
	Hongo 7	25,0 * B	59,1

En cada ensayo: * Diferentes del testigo, según prueba de Dunnett al 5% y letras no comunes implica diferencias entre promedios de tratamientos, sin contar con el testigo, según prueba de Tukey al 5%.

Con este resultado queda corroborada la hipótesis de investigación.

La confiabilidad o potencia de la prueba de cada ensayo fue mayor del 95%, lo que significa que, al repetir 100 veces esta investigación, en las mismas condiciones bajo las cuales se realizó cada ensayo, en al menos en 95 de ellas, el promedio del porcentaje de mortalidad del hongo 3, difiere del promedio del porcentaje de mortalidad de al menos uno de los demás hongos evaluados.

Con estos resultados del análisis estadístico, el investigador tiene los elementos para hacer la discusión técnica, de acuerdo con su conocimiento y el descrito por otros autores.



Ejemplo No.2

En la evaluación de seis tratamientos para el control de la broca del café, dos días después de su aplicación, se llevaron registros cada 48 horas, durante 30 días, del número de brocas emergidas por unidad experimental, conformada por un árbol cubierto con una jaula entomológica. Cada tratamiento fue evaluado con diez unidades experimentales, bajo el diseño experimental completamente aleatorio. Como variable de respuesta se propuso la tasa diaria de emergencia, para evaluar si con al menos uno de los tratamientos se logra una tasa menor, como hipótesis de investigación o de trabajo.

Para obtener la variable de respuesta (tasa diaria de emergencia), en cada unidad experimental, de cada tratamiento, se estableció un modelo de regresión lineal para describir el comportamiento del número de brocas emergidas acumuladas a través del tiempo (en días).

El criterio de tasa diaria como variable de respuesta solo debe ser utilizado cuando en todas las unidades experimentales, de todos los tratamientos, el coeficiente de regresión sea diferente de cero estadísticamente, según prueba de t al 5% y el coeficiente de determinación sea mayor del 0,55. En el caso de no ser así, se recomienda tomar como variable de respuesta el total de brocas emergidas, durante el tiempo experimental (tasa bruta).

Para este ejemplo, en la Tabla 8 se presenta la estimación de la tasa diaria de emergencia y el coeficiente de determinación de las unidades experimentales, de cada uno de los tratamientos. Como se puede apreciar, todas las unidades experimentales de todos los tratamientos tienen una tasa de emergencia diferente de cero ($P\text{-value} < 0,05$) y coeficientes de determinación superiores de 0,55.

El análisis de varianza (Tabla 9), dio una probabilidad asociada al valor FC, mayor a la propuesta por el investigador (0,05), con lo cual se mantiene la hipótesis nula, es decir, no hay efecto de tratamientos, con una probabilidad tipo II del 6,2 %, con lo cual se tiene la certeza que los tratamientos no difieren en sus promedios, variando la tasa media de emergencia por día entre 0,34 y 0,61 broca (Tabla 10), lo que significa que, en promedio por unidad experimental, de los tratamientos evaluados, cada 100 días emergen entre 34 y 61 brocas. Este resultado, no corroboró la hipótesis de investigación o de trabajo.

Ejemplo No. 3

En la evaluación de dos hongos entomopatógenos (tratamientos), para el control de la broca del café, bajo el diseño experimental completamente aleatorio, en condiciones de laboratorio, se registró el porcentaje de mortalidad causada por el hongo (variable de respuesta), en diez unidades experimentales por cada

Se recomienda en la presentación de resultados acompañar la estimación de los promedios, con su respectiva medida de variación, como la varianza, error estándar o coeficiente de variación, con lo cual el lector podrá darse cuenta de lo variable que fue el proceso y, además, es una información valiosa para determinar el número de unidades experimentales en futuras investigaciones que utilicen la misma variable de respuesta.

Tabla 8. Tasa diaria de emergencia de broca por tratamiento y unidad experimental - ejemplo 2.

Tratamiento	Unidad experimental	Tasa diaria emergencia		Coeficiente de determinación
		Estimación	P-value	
1	1	0,3018	6,06301E-06	0,80
1	2	0,1661	1,28246E-05	0,78
1	3	0,2536	9,37388E-05	0,70
1	4	0,6554	3,17325E-08	0,91
1	5	0,2179	0,000356031	0,64
1	6	0,8250	5,80622E-08	0,90
1	7	0,4536	2,16427E-05	0,76
1	8	0,5768	0,00013115	0,69
1	9	0,3232	8,27226E-06	0,79
1	10	0,3357	4,40905E-05	0,74
2	1	0,8321	9,14044E-08	0,90
2	2	0,2875	3,01216E-07	0,88
2	3	0,2714	2,40935E-09	0,94
2	4	0,2875	5,47914E-08	0,90
2	5	0,1875	0,001040561	0,58
2	6	0,2679	3,50228E-05	0,74
2	7	0,4589	1,1771E-07	0,89
2	8	0,2196	3,80418E-05	0,74
2	9	0,2089	4,69805E-07	0,87
2	10	0,3679	3,18088E-06	0,82
3	1	0,3054	6,19647E-10	0,95
3	2	0,1286	7,45154E-07	0,86
3	3	0,5429	1,35703E-07	0,89
3	4	0,4696	1,06857E-07	0,89
3	5	0,4786	4,06473E-07	0,87
3	6	0,2625	1,49625E-05	0,77
3	7	0,2875	2,20342E-05	0,76
3	8	0,5411	4,20158E-05	0,74
3	9	0,2125	1,75034E-06	0,84
3	10	0,4125	2,12695E-06	0,83
4	1	0,1893	0,000702544	0,60
4	2	0,2232	8,54456E-07	0,85
4	3	0,2946	3,7635E-07	0,87
4	4	0,2875	6,25432E-06	0,80
4	5	0,3304	7,84626E-06	0,80
4	6	0,2446	6,73953E-08	0,90
4	7	0,6161	1,05224E-08	0,93
4	8	0,4518	1,16547E-08	0,92
4	9	0,2625	3,01369E-06	0,82
4	10	0,6268	2,46415E-07	0,88
5	1	0,6357	2,3843E-08	0,92
5	2	0,4411	3,53334E-07	0,87
5	3	0,0786	0,00083371	0,59
5	4	0,3643	1,52922E-05	0,77
5	5	0,7393	6,88454E-10	0,95

Continúa...

... continuación Tabla 8

5	6	0,6036	7,42081E-08	0,90
5	7	0,2000	2,42724E-07	0,88
5	8	0,2518	1,99501E-07	0,88
5	9	0,5232	1,48219E-06	0,84
5	10	0,4071	7,28697E-09	0,93
6	1	0,4464	1,83474E-08	0,92
6	2	0,5643	2,79155E-09	0,94
6	3	0,4911	6,01295E-10	0,95
6	4	0,2232	5,51933E-08	0,90
6	5	1,4179	1,02891E-09	0,95
6	6	0,7518	1,28816E-08	0,92
6	7	0,4679	2,51742E-07	0,88
6	8	0,4196	2,37332E-06	0,83
6	9	0,5643	1,57776E-05	0,77
6	10	0,7768	1,15414E-09	0,95

Tabla 9. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, en la evaluación del efecto de tratamientos en la tasa diaria de emergencia de broca del café.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Tratamiento	5	0,512731983	2,2237756	0,065058857
Error	54	2,490136798		

Tabla 10. Promedios y variación para la tasa diaria de emergencia de broca del café, por tratamiento evaluado.

Tratamiento	Tasa diaria de emergencia de broca	Coefficiente de variación (%)
1	0,41	51,8
2	0,34	56,3
3	0,36	39,7
4	0,35	44,9
5	0,42	49,0
6	0,61	53,1

tratamiento y a su vez cada unidad experimental estuvo conformada por diez individuos de broca. Se quería verificar si con el hongo 1, se logra mayor porcentaje de mortalidad (hipótesis de investigación).

El análisis de varianza (Tabla 11) indica efecto de tratamientos, es decir, el estadístico de prueba FC es significativo al nivel fijado por el investigador (5%), con una confiabilidad del 99%. Como el estadístico de prueba FC fue significativo y solo son dos tratamientos, ellos difieren y, de acuerdo con la estimación, la diferencia es a favor del hongo 2 (Tabla 12), dado que presenta el mayor promedio, resultado que no corrobora la hipótesis de investigación. Hay profesionales de la estadística, que sugieren para casos como éste, hacer la prueba de comparación de diferencia mínima significativa (Tablas 11 y 12).



Tabla 11. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, en la evaluación del efecto de tratamientos en el porcentaje de mortalidad de broca.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Tratamiento	1	4462,790305	21,933740	0,000185084
Error	18	3662,404354		

Tabla 12. Promedios y variación para el porcentaje de mortalidad de broca por tratamiento evaluado.

Tratamiento	Promedio	Coefficiente de variación (%)
1	32,3 B	39,07
2	62,2 A	25,28

Letras no comunes implica diferencia entre promedios, según prueba de diferencia mínima significativa, al 5%.

Ejemplo No. 4

Para corroborar la hipótesis de investigación “la masa de café pergamino seco no depende de la interacción sistema de separación y del porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar (nivel)”, se evaluó la separación con zaranda después del despulpado (Sistema 1) y Separación con zaranda después del secado (Sistema 2), con diferentes porcentajes de frutos verdes en la masa a beneficiar (0%, 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30% y 40%), bajo un modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 2 x 8 (dos sistemas de separación y ocho niveles de porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar). La unidad experimental estuvo conformada por 10 kg de café cereza y por cada tratamiento (combinación de sistema y porcentaje de frutos verdes), se tuvieron cuatro unidades experimentales. El café se procesó en un módulo Becolsub 300, con zaranda circular de varillas de 29,7 cm de diámetro, 37,0 cm de longitud y separación entre varillas de 8,0 mm, girando a 30 rpm. Para la limpieza y clasificación del café pergamino seco se utilizó una zaranda de vaivén, con perforaciones oblongas de 4,33 mm x 22,20 mm, con frecuencia de 525 ciclos/min. La variable de respuesta es la masa de café pergamino seco obtenido al final del proceso (kg) y como variables complementarias el porcentaje de pasilla y rendimiento en trilla (cantidad de café pergamino seco, en kilogramos, para obtener un saco de 70 kg de café excelso tipo exportación).

Cuando se tiene un análisis de un modelo factorial, los promedios de la variable de interés y de las complementarias deben ilustrarse bajo dicho esquema, como se presenta en las Tablas 13, 14 y 15, con el objetivo de identificar en la combinación de los factores, los promedios y su variabilidad

y la interpretación de los resultados dados por el análisis de varianza (Tabla 16), el cual debe iniciarse con la evaluación de la interacción y luego con los factores por separado.

Para el caso de la variable de respuesta café pergamino seco (kg), como la probabilidad asociada al FC, para la fuente de variación correspondiente a la interacción es mayor del 0,05, se concluye que no hay efecto de ella, con lo cual queda corroborada la hipótesis de investigación o de trabajo. Como no hay efecto de la interacción, se procede a evaluar el efecto de los factores por separado y de acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 16), para esta misma variable, no hay efecto de los sistemas, pero sí de los niveles de porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar, dado que las probabilidades asociadas son mayor y menor que 0,05, respectivamente. Al revisar los promedios de los niveles, independientemente de los sistemas (Tabla 13), se identifica que a mayor nivel menor valor de la variable de respuesta, pero es necesario verificar esta tendencia estadísticamente; para ello, como los niveles son cuantitativos y son más de seis, se aplica un modelo de regresión lineal, el cual muestra una tendencia lineal, con un coeficiente de regresión negativo, diferente de cero y un coeficiente de determinación del 96,8%.

Este resultado indica que la cantidad de café pergamino seco obtenido al final del proceso disminuye con el aumento del porcentaje de los frutos verdes en la masa a beneficiar, de tal forma que por cada 10 kg de café cereza a beneficiar con 0% de frutos verdes se obtienen 2,02 kg de café pergamino seco, mientras que por la misma cantidad de café a beneficiar (10 kg), si se tiene un 40% de frutos verdes, al final se obtiene 1,42 kg de café pergamino seco (Tabla 13). En resumen, la variable de

Tabla 13. Promedios y variación de la variable de respuesta **café pergamino seco** (kg), para los tratamientos evaluados (sistema por porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar) bajo la estructura del análisis factorial.

Nivel (%)	Sistema 1		Sistema 2		General	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
0	2,07	11,1	1,98	6,1	2,02	8,7
2	1,93	4,7	1,94	7,9	1,93	6,0
5	1,78	7,7	1,90	3,3	1,84	6,4
10	1,84	4,0	1,84	4,6	1,84	4,0
15	1,78	6,4	1,66	11,5	1,72	9,4
20	1,74	1,3	1,68	5,4	1,71	4,1
30	1,55	2,2	1,51	9,2	1,53	6,3
40	1,39	8,6	1,46	9,6	1,42	8,9
General	1,76	12,9	1,75	12,7		

Tabla 14. Promedios y variación del **rendimiento en trilla** (variable complementaria), para los tratamientos evaluados (sistema por porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar) bajo la estructura del análisis factorial.

Nivel (%)	Sistema 1		Sistema 2		General	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
0	127,5	8,84	218,3	64,91	172,9	60,69
2	131,3	17,84	176,8	36,09	154,0	32,92
5	140,8	23,30	192,2	33,46	166,5	32,85
10	134,5	25,51	203,0	43,75	168,8	42,84
15	126,8	11,20	205,3	13,21	166,0	28,01
20	120,0	11,61	206,0	24,18	163,0	35,03
30	134,5	22,85	217,5	21,41	176,0	32,65
40	163,5	34,72	233,8	40,91	198,6	41,24
General	134,8	22	206,6	34,8		

Tabla 15. Promedios y variación del porcentaje de **pasilla** (variable complementaria), para los tratamientos evaluados (sistema por porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar) bajo la estructura del análisis factorial.

Nivel (%)	Sistema 1		Sistema 2		General	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
0	28,8	28,87	49,5	42,98	39,2	47,48
2	28,6	46,73	45,3	41,59	36,9	47,48
5	34,4	42,06	50,0	34,59	42,2	40,19
10	30,1	48,57	49,6	35,58	39,9	45,85
15	28,5	32,61	56,4	9,66	42,5	38,90
20	23,7	39,34	53,4	18,21	38,6	47,12
30	29,4	50,45	54,4	20,39	41,9	43,04
40	38,5	39,30	54,6	24,54	46,6	33,90
General	30,3	39,50	51,6	26,70		

Tabla 16. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial, con la variable de respuesta y complementarias.

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Café pergamino seco	Sistemas	1	0,00275	0,18	0,6742
	Nivel	7	2,268	21,03	< 0,0001
	Sistema x Nivel	7	0,0962	0,89	0,52
	Error	48	0,73955		
Rendimiento	Sistemas	1	82361,82516	22,65	< 0,0001
	Nivel	7	9555,53234	0,38	0,9122
	Sistema x Nivel	7	3698,27609	0,15	0,9938
	Error	48	174551,057		
Pasilla	Sistemas	1	7323,294564	37,35	< 0,0001
	Nivel	7	498,580023	0,36	0,9191
	Sistema x Nivel	7	426,515723	0,31	0,9456
	Error	48	9412,17558		

respuesta (la cantidad de café pergamino seco), no depende de la combinación del porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar y del sistema de separación, o sea nivel*sistema; no hay diferencia entre los promedios de los sistemas, e independientemente del sistema, a mayor porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar (nivel), menor cantidad de café pergamino seco. La confiabilidad del resultado obtenido es del 81,9%. El análisis de varianza, para las dos variables complementarias (rendimiento en trilla y porcentaje de pasilla), no muestra efecto de la interacción ni efecto de los niveles, pero sí hay efecto de los sistemas de separación (Tabla 16), a favor del sistema 1 (zaranda después del despulpado), es decir, que con la zaranda después del despulpado se obtuvo el mejor rendimiento en trilla y menor porcentaje de pasilla (Tablas 14, 15).

En la Figura 2, para la variable café pergamino seco (variable de respuesta), se observa que, para cada nivel (porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar), no hay diferencia entre los dos sistemas de separación, y en general, a mayor nivel menor cantidad de café pergamino seco (kilogramos). En las Figuras 3 y 4 queda evidente para las variables complementarias, el no efecto de la interacción (sistema*nivel) y la diferencia en los dos sistemas de separación.

En términos estadísticos, si se requiere obtener mayor cantidad de café pergamino seco debe tenerse menor porcentaje de frutos verdes en la masa a beneficiar; si se requiere cuidar la calidad (menor rendimiento y menos pasilla), en el caso de la presencia de frutos verdes debe usarse la zaranda después del despulpado.

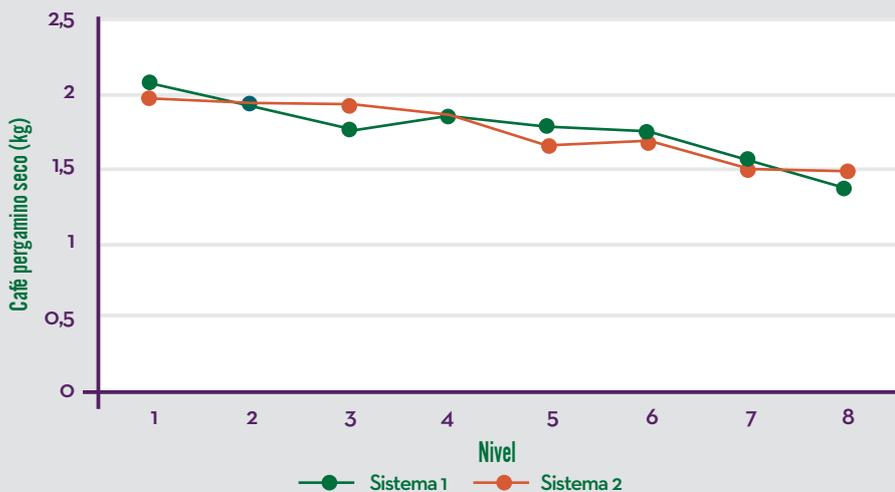


Figura 2. Comportamiento de la variable café pergamino seco (kg), a través de los porcentajes de frutos verdes en la masa a beneficiar (nivel), en cada sistema de separación evaluado.

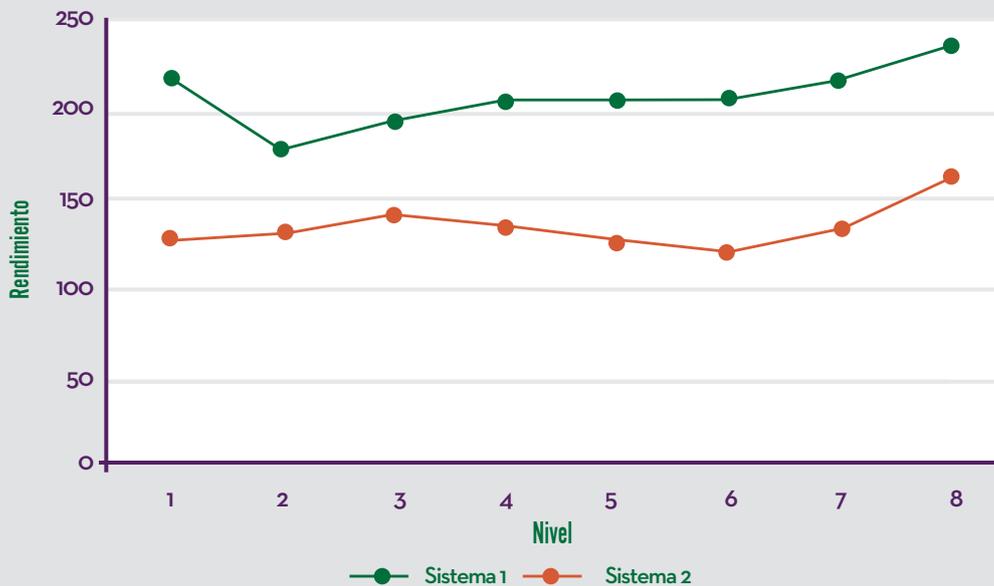


Figura 3. Comportamiento de la variable rendimiento, a través de los porcentajes de frutos verdes en la masa a beneficiar (nivel), en cada sistema de separación evaluado.

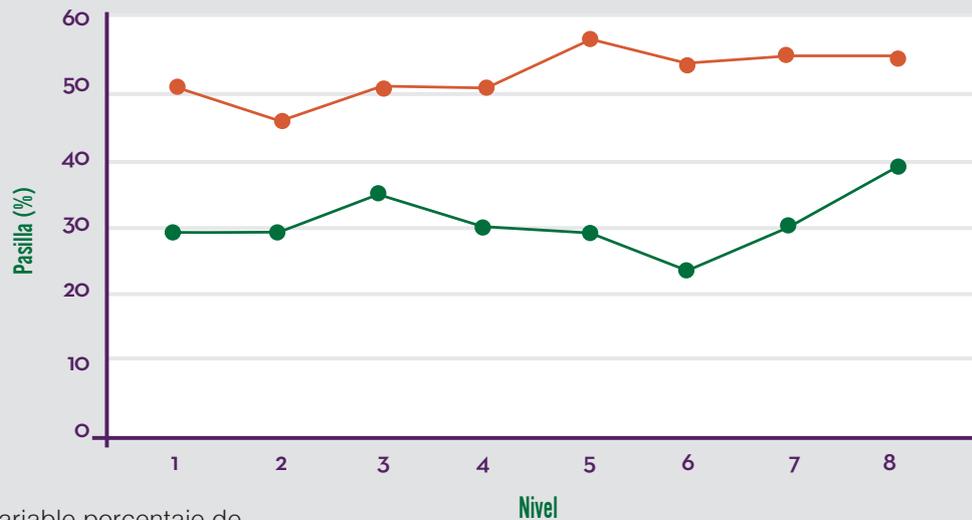


Figura 4.

Comportamiento de la variable porcentaje de pasilla, a través de los porcentajes de frutos verdes en la masa a beneficiar (nivel), en cada sistema de separación evaluado.

Ejemplo No. 5

Para definir el empaque de las frutas de mango vallenato y lulo (casos), es necesario conocer el efecto de la interacción de los planos y los calibres de los frutos en la variable fuerza de ruptura (variable de respuesta), por lo tanto, se evaluaron dichas combinaciones, bajo un modelo de análisis para el diseño completamente aleatorio. A continuación, se ilustra el resultado de cada uno de estos casos.

Para el mango vallenato se evaluó la interacción de tres planos y dos calibres de la fruta (tratamientos). La unidad experimental fue la fruta y por cada combinación se tuvieron diez de ellas.

En la Figura 5 se ilustra el comportamiento del promedio de la variable de respuesta, a través de los calibres, para cada uno de los planos evaluados (Tabla 17). Como puede apreciarse, descriptivamente hay efecto de la interacción, corroborada por la significación del estadístico de prueba FC (Tabla 18), de tal manera que la fuerza de

ruptura para el mango vallenato depende de la combinación plano*calibre, con los mayores promedios en las combinaciones plano ecuatorial 1 con calibre 200-300 y plano ecuatorial 2 con calibre 200-300 (Tabla 17), según la prueba de contraste al 5%. El resultado tiene una confiabilidad del 94%.

Cuando la interacción es significativa, no se evalúan los factores por separado, dado que la respuesta de la variable depende de la combinación de ellos.

Para el caso del lulo, se evaluó la interacción de dos planos y tres calibres de la fruta (tratamientos). La unidad experimental fue la fruta y por cada combinación se tuvieron diez de ellas.

El análisis de varianza no mostró efecto de la interacción (Tabla 19) y la Figura 6 muestra descriptivamente el efecto de ella (Tabla 20); por lo tanto, se evaluó la probabilidad de tipo II, la cual fue del 41%, al ser mayor del 20%, implica que

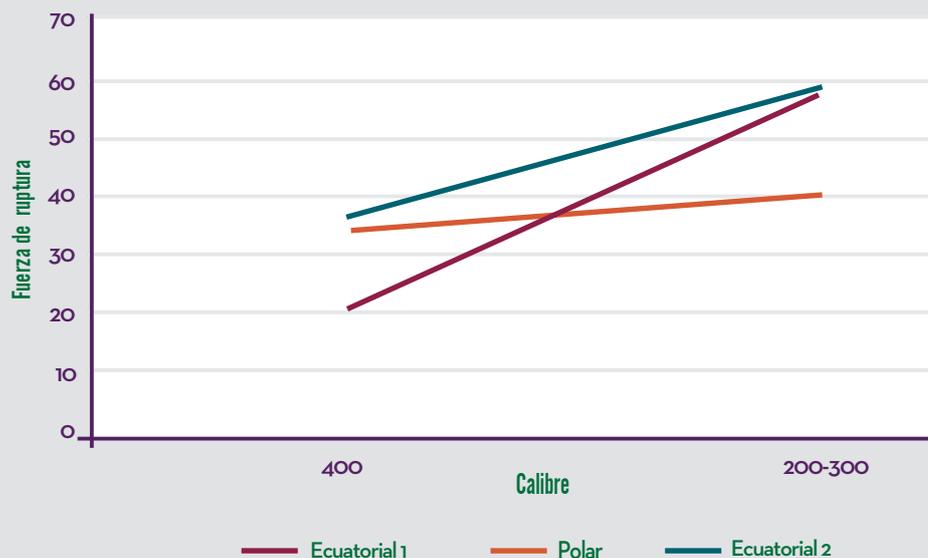


Figura 5. Comportamiento del promedio de la fuerza de ruptura (N) en los calibre para cada plano evaluado en mango.

Tabla 17. Promedio y variación para la variable fuerza de ruptura (N), para cada combinación de calibre y plano evaluado en mango.

Plano	Calibre 400		Calibre 200-300	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
Ecuatorial 1	20,9	30,43	58,2	22,22
Ecuatorial 2	36,4	31,92	58,1	15,67
Polar	34,5	34,11	40,3	15,63

Tabla 18. Resumen del análisis de varianza bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial, con la variable fuerza de ruptura (N) para el mango.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Calibre	1	6.995,6	69,56	< 0,0001
Plano	2	1.068,04	5,31	0,0078
Calibre x Plano	2	2.469,79	12,28	< 0,0001
Error	54	5.430,83		

Tabla 19. Resumen del análisis de varianza bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, en arreglo factorial, con la variable fuerza de ruptura (N) para lulo.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Probabilidad
Calibre	2	15.090,56	8,79	0,0005
Plano	1	699,46	0,82	0,37
Calibre x Plano	2	3.427,09	2,00	0,14
Error	54	46.336,10		

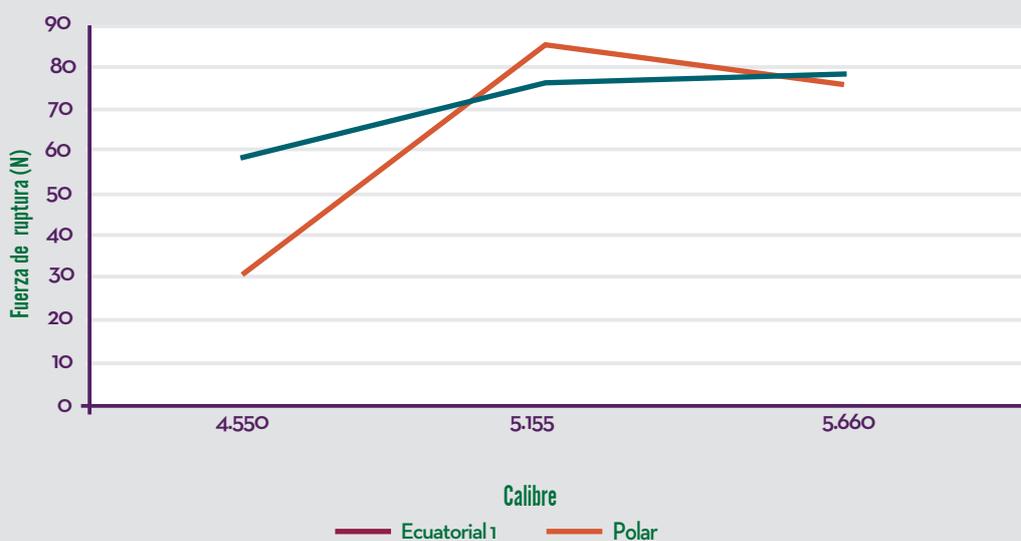


Figura 6. Comportamiento del promedio de la fuerza de ruptura (N) en los calibres (g) para cada plano evaluado en lulo.

Tabla 20. Promedio y variación para la variable fuerza de ruptura (N), para cada combinación de calibre y plano evaluado en lulo.

Calibre	Plano 3cuatorial		Plano polar		General	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
4550	58,6	55,05	31,4	73,48	45,0	68,14
5155	75,8	57,09	84,7	21,52	80,2	40,67
5660	77,9	42,22	75,8	22,40	76,8	33,18

no hay respaldo estadístico para tomar una decisión con respecto a la interacción. Si se fuese ortodoxo, habría que repetir esta investigación, bien sea aumentando

el número de unidades experimentales o replanteando el diseño experimental, en el caso de existir un factor de bloqueo.

Si se omitiese el análisis de la interacción (que no es lo adecuado), el estadístico de prueba FC asociado al factor de variación el plano, no fue significativo, con una probabilidad de tipo II del 41%, por lo tanto, no hay certeza en la decisión con respecto a los planos de la fruta. Para la fuente de variación, los calibres, hay efecto con una confiabilidad del 64%, valor menor al estipulado en la planeación de la investigación, es decir, la investigación no es concluyente en la definición del plano y el calibre con mayor fuerza de ruptura en el caso del lulo.

Ejemplo No. 6

En una estación experimental se tomó un lote sembrado con café Variedad Castillo®, y a partir de los 24 meses de edad, durante tres años, se evaluaron dos tratamientos. El primero de ellos consistió en la aplicación de nitrógeno, dos veces al año, de acuerdo con las recomendaciones del análisis de suelo; el segundo tratamiento consistió en la aplicación de nitrógeno de acuerdo con la clorofila presente en las hojas, medida a partir del equipo SPAD-502 plus, cuya lectura indica en forma porcentual la cantidad de clorofila presente, que a

su vez, está asociada con la cantidad de nitrógeno presente en las hojas, si dicha cantidad fue menor a los requerimientos para el cultivo del café, indicados en la literatura, se aplicó la cantidad de nitrógeno faltante (segundo tratamiento). Por cada tratamiento, se tuvieron 180 unidades experimentales (árboles), asignadas aleatoriamente, de acuerdo con el diseño experimental completamente aleatorio. Cada tratamiento fue aplicado a cada unidad experimental. Como variable de respuesta se tuvo la producción acumulada de café cereza en tres años, por árbol.

De acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 21), no hay efecto de tratamientos, dado que la probabilidad asociada al estadístico de prueba FC, es mayor que el nivel de significación fijado por el investigador (0,05). Cuando se da este resultado, debe verificarse la probabilidad de tipo II, la cual es del 11%, y como es menor del 20%, el investigador tiene la certeza de la igualdad estadística de los promedios de los dos tratamientos, (se mantiene la hipótesis nula), como se observa en la Tabla 22.

Tabla 21. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorio, con la variable producción acumulada en tres años por árbol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Tratamientos	1	1061022,04	0,57	0,4494
Error	358	662386533,90		

Tabla 22. Promedio y error estándar para la variable producción acumulada por árbol (g) en tres años, por tratamiento evaluado.

Tratamiento	Promedio	Error estándar	Número de árboles
1	3.956,3	98,6	180
2	3.847,7	104,1	180

Generalidades

Los componentes del análisis de varianza, asociado al diseño completamente aleatorio, tienen como fuente de variación tratamientos y el error (Tablas 6, 9, 11 y 21) y bajo un arreglo factorial, los tratamientos se descomponen en cada uno de los factores y la interacción (Tablas 16, 18 y 19). Los grados de libertad se refieren, en términos prácticos, a las posibles comparaciones que puedan hacerse, es decir, si se tienen t tratamientos, pueden hacerse $t-1$ comparaciones; en términos estadísticos, los grados de libertad se refieren al rango de la matriz asociada a la forma cuadrática de la fuente de variación.

Cuando en la planeación de la investigación, no se dispone de la estimación de la varianza asociada a la variable de respuesta, para determinar el tamaño de muestra puede utilizarse como estimación de la varianza, el rango que pueda tener la variable de respuesta (de acuerdo con el conocimiento del investigador), dividido por cuatro y este cociente elevado al cuadrado. Si dicho rango no se conoce y se van a evaluar cuatro o menos tratamientos, el número de unidades experimentales debe asegurar como mínimo 24 grados de libertad para la fuente de variación asociada al error; y si se tienen más de cuatro tratamientos, como mínimo deben tenerse seis unidades experimentales por tratamiento. En todos estos casos, deben quedar en la propuesta de investigación los criterios con los cuales se determinó el número de unidades experimentales por tratamiento.

Bajo el diseño experimental completamente aleatorio pueden evaluarse arreglos de tratamientos factoriales, es decir, la combinación que pueden formarse de $K*n$, donde n son

los factores y K los niveles, e implica que cada factor ocurre únicamente a K niveles. Por ejemplo, 2^3 , implica que se tienen tres factores (A, B y C) y cada uno de ellos ocurre únicamente a dos niveles, es decir, se tienen ocho tratamientos, así: $a_0b_0c_0$, $a_0b_0c_1$, $a_0b_1c_0$, $a_0b_1c_1$, $a_1b_0c_0$, $a_1b_0c_1$, $a_1b_1c_0$, $a_1b_1c_1$. Cuando se tiene igual número de niveles para cada factor, el arreglo de tratamientos puede expresarse con $K*n$ y cuando se tiene diferente número de niveles para cada factor se expresa como un arreglo de $X*Y*Z$. Por ejemplo, un arreglo de tratamientos $4*4*3$ significa que dos factores ocurren a cuatro niveles y uno de ellos únicamente a tres niveles, conformándose 48 tratamientos (Ejemplos 4 y 5).

Cuando **el análisis de varianza indica efecto de tratamientos** y la confiabilidad es mayor o igual a la estipulada en la planeación, se establecen cuáles promedios de tratamientos difieren, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- ♦ Si el **modelo es de rango completo**, es decir, si los tratamientos son de naturaleza cuantitativa, se determina la tendencia de la variable de respuesta, a través de ellos, con el estadístico de prueba F. Por ejemplo, si los tratamientos son tres dosis de algún producto, se evalúa la tendencia lineal y de segundo orden; si las dosis son cuatro, se evalúa la tendencia lineal, de segundo y tercer orden; y así sucesivamente. El control del experimento, en este caso se evalúa con el coeficiente de determinación el cual debe ser superior al 80%.
- ♦ Si el diseño es de **rango incompleto**, es decir, si los tratamientos son de naturaleza cualitativa, y dependiendo del objetivo de la investigación, se aplica una prueba de comparación.

Un ejemplo de un diseño de rango incompleto, se tiene cuando se quiere evaluar el efecto de la gallinaza, materia orgánica, entre otros, como fertilizante. Entre las pruebas de comparación están: la prueba de Tukey, con la cual se comparan todos los promedios entre sí, y se aplica cuando se tienen tres o más tratamientos; la prueba de Dunnett con la cual se comparan todos los promedios frente a un testigo absoluto o relativo; la prueba de diferencia mínima significativa, para la comparación de dos promedios; la prueba de contraste con la cual se comparan los promedios por grupos de tratamientos, a través del estadístico de prueba F. Los grupos o contrastes a evaluar deben ser definidos en la etapa de planeación de la investigación y no deben superar el número de tratamientos menos uno. El nivel de significación con el cual se aplican estas pruebas, debe ser el mismo con el cual se evalúa la significación del estadístico de prueba

F, del análisis de varianza. En este caso, el control del experimento se evalúa con el coeficiente de variación, asociado al promedio general de la variable de respuesta; algunos autores proponen que el coeficiente de variación experimental debe tener un valor máximo del 30%.

Cuando **el análisis de varianza no muestre efecto de tratamientos** debe verificarse que el valor de la probabilidad de tipo II sea menor del 20%, con lo cual se tiene la certeza de mantener la hipótesis nula (no hay efecto de tratamientos). En el caso contrario, no hay certeza en la decisión con respecto a la hipótesis nula, es decir, los resultados de la investigación no son concluyentes, caso en el cual se recomienda replantear la investigación, en cuanto al diseño experimental, número de unidades experimentales, instrumentos de medición y variable de respuesta, entre otros.

Cuando la confiabilidad es mayor o igual al 80% o la probabilidad de Tipo II es menor del 20%, según la decisión con respecto a la hipótesis nula, se cumplen todos los supuestos estadísticos para un análisis de varianza, bajo el modelo de análisis del diseño experimental propuesto.

A photograph of a coffee plantation on a hillside. The coffee plants are arranged in rows, and the terrain is sloping upwards. A purple banner is overlaid across the middle of the image, containing the title text. The background shows a clear blue sky with some light clouds.

Diseño experimental bloques completos al azar

T_1

T_i



Los aspectos que afectan la variable de respuesta además de los tratamientos, se separan del error a través de los diseños de experimentos con factores de bloqueo. Cuando se tiene un solo factor de bloqueo se emplea el diseño experimental bloques completos al azar, donde además de la fuente de variación de los tratamientos está la de los bloques. Este diseño se aplica en ambientes de campo y laboratorio.

Bajo el diseño de bloques completos al azar pueden tenerse tratamientos en arreglo factorial, en parcelas divididas, en parcelas subdivididas y en parcelas sub divididas. En los arreglos factoriales, si la interacción es significativa, no se evalúan los factores por separado.

En el arreglo de parcelas divididas, dentro de cada bloque se asignan aleatoriamente las parcelas principales (Pp), y dentro de cada parcela principal van todos los tratamientos asignados aleatoriamente; en este caso, el efecto de bloques y las Pp se evalúa con el cuadrado medio de la interacción $Pp \times \text{bloques}$ (error a) y el efecto de los tratamientos y de la interacción simple $Pp \times \text{tratamiento}$ se evalúa con la interacción $\text{bloque} \times Pp \times \text{tratamiento}$ (error b), como se ilustra en la Tabla 34. El primer factor que se analiza es la interacción $Pp \times \text{tratamiento}$, si es significativa implica

El efecto de las parcelas principales se evalúa con el cuadrado medio de la interacción parcelas principales por bloques

El efecto de la doble interacción parcela principal por bloques por sub-parcela, se evalúa con el error experimental.

que la estimación de la variable de respuesta depende de la combinación Pp*tratamiento, por lo tanto, no debe evaluarse el efecto por separado de Pp y tratamiento.

En el arreglo de parcelas subdivididas, además de las parcelas principales, dentro de ellas hay subparcelas y dentro de cada subparcela todos los tratamientos (Trat), en ambos casos asignados aleatoriamente. Los bloques y parcela principal (Pp), se evalúan con la interacción bloques*Pp; el efecto de las subparcelas (Subp) y la interacción simple Subp*Pp se evalúa con la interacción Subp*bloque(Pp), donde bloque(Pp) es el factor parcelas principales dentro de bloques; el efecto de tratamientos se evalúa con la interacción Trat*bloque*, el efecto de la interacción Trat*Pp se evalúa con la interacción de segundo orden Trat*bloque*Pp; las interacciones Trat*Subp y Trat*Subp*Pp se evalúan con la interacción Trat*Subp*bloque(Pp). El orden del análisis del efecto de los factores de variación es el siguiente: Trat*Subp*Pp, si no es significativo, se evalúan Trat*Subp, Trat*Pp y Subp*Pp, si no son significativas, se evalúan los factores por separado (Tabla 38).

El arreglo de parcelas sub sub divididas, no es recomendable dada la dificultad en la interpretación de interacciones de tercer orden, cuando son significativas.

Una vez se tenga el objetivo y la hipótesis de investigación, la aplicación del diseño bloques completos al azar implica:

1. Definir los tratamientos a evaluar, sin arreglo o con arreglo de tratamientos (factorial, parcelas divididas y subdivididas).
2. Identificar el factor de bloqueo.
3. Definir la parcela experimental, la cual puede estar conformada por una unidad de muestreo, por ejemplo, un árbol o un grupo de unidades de muestreo (varios árboles). En el caso de existir más de una unidad de muestreo debe definirse si todas hacen parte de la toma de información (parcela experimental); en el caso que sea una parte, entonces estas conforman la parcela efectiva.
4. Definir la variable de respuesta con la cual se evaluará el efecto de tratamientos y las variables complementarias. El investigador indica la variable de mayor peso para tomar una decisión acerca del mejor tratamiento (variable de respuesta) y las variables complementarias que ayudarían en la interpretación de la respuesta de los tratamientos o tomar una decisión sobre ellos, en el caso que no haya efecto con la variable de respuesta.
5. Determinar estadísticamente el número de bloques, de acuerdo con: el número de tratamientos a evaluar, el nivel de significación, la varianza asociada a la variable de respuesta (obtenida en otras investigaciones), la diferencia mínima aceptable entre los promedios de los tratamientos y la confiabilidad deseada. Estos criterios deben ser propuestos por el responsable de la investigación.
6. Una vez determinado el número de bloques, la instalación de los tratamientos bajo este diseño debe ser la siguiente:

- ♦ En todos y cada uno de los bloques deben instalarse todos los tratamientos; si se tiene arreglo factorial, todas las combinaciones que implique el arreglo deben quedar en todos y cada uno de los bloques; si se tiene arreglo de parcela divididas, todas las parcelas principales deben quedar en todos y cada uno de los bloques y dentro de cada parcela principal, deben quedar todos los tratamientos a evaluar (sub parcelas).
- ♦ Dentro de cada bloque o parcela principal, según sea el caso, se hace la asignación aleatoria de los tratamientos (Figuras 7 y 8).

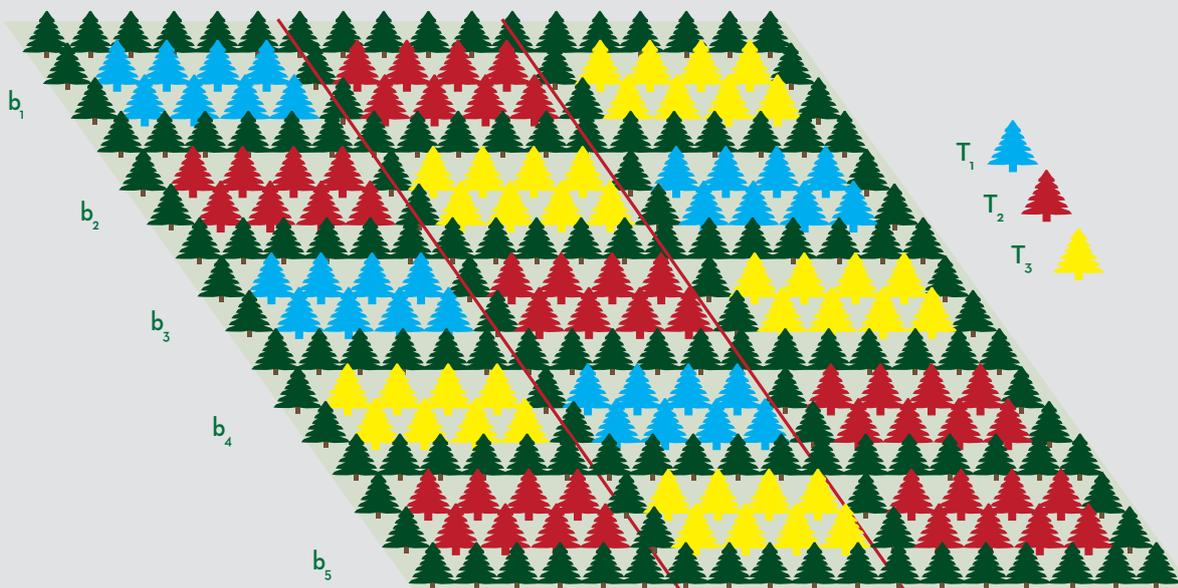


Figura 7. Ilustración de la aplicación del diseño experimental bloques completos al azar (sin arreglo de tratamientos).

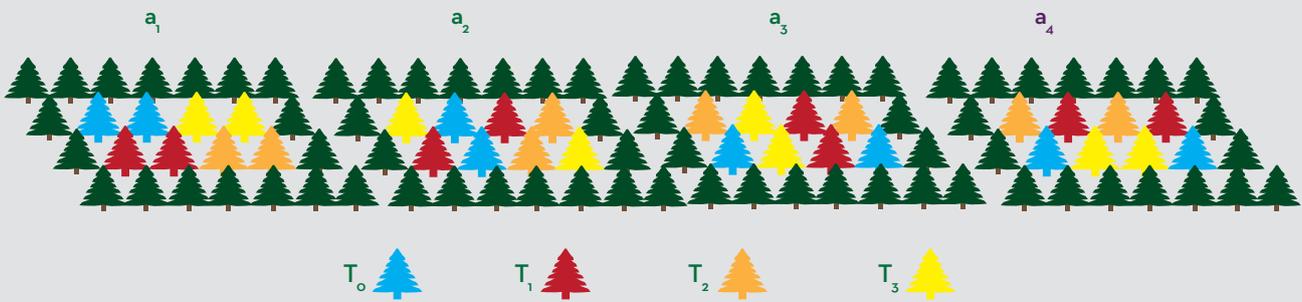


Figura 8. Ilustración de la aplicación del diseño experimental bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, en un bloque. Donde a: Parcela principal y T: sub parcela.

- ♦ Una vez identificados los bloques y dentro de ellos asignados aleatoriamente los tratamientos a las parcelas experimentales, se hace la aplicación de los mismos, teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 6 y la toma de información, con la cual será evaluado el efecto de ellos.

A continuación, se ilustrará con ejemplos, la aplicación e interpretación del diseño experimental bloques completos al azar, sin arreglo de tratamientos y con arreglo de tratamientos (factorial, parcelas divididas y parcelas subdividas).

Ejemplo No. 1 Sin arreglo de tratamientos

Un especialista en fitotecnia, planeó y desarrolló una investigación para evaluar diferentes sistemas de renovación del cultivo del café (objetivo), partiendo de la siguiente hipótesis: “La producción de café cereza depende del sistema de renovación”. Para alcanzar el objetivo y evaluar dicha hipótesis, aplicó nueve alternativas de renovación, teniendo como factor de bloqueo la combinación de dos sitios contrastantes por clima y suelo, y el gradiente de fertilización dentro de cada sitio (ocho), para un total de 16 bloques. Durante el desarrollo de la investigación se hizo el manejo agronómico recomendado por Cenicafé.

La parcela experimental estuvo conformada por 28 plantas de café Variedad Castillo® y la parcela efectiva por diez plantas. La variable de respuesta fue la producción acumulada de dos cosechas de café cereza (g). En la planeación se formuló que la hipótesis de trabajo

sería corroborada si al menos uno de los siguientes contrastes (comparación por grupos de tratamientos) fuera significativo, según la prueba de *f* al 5%.

Contraste	Descripción del contraste
1	tratamientos 1, 2, 3 y 4 vs tratamientos 5 y 6
2	tratamientos 1, 2, 3 y 4 vs tratamientos 8 y 9
3	tratamientos 1, 2, 3 y 4 vs tratamiento 7
4	tratamientos 5 y 6 vs tratamientos 8 y 9
5	tratamientos 5 y 6 vs tratamiento 7
6	tratamiento 7 vs tratamientos 8 y 9

El gradiente de fertilización es un factor de bloqueo para aquellas investigaciones donde la producción es la variable de respuesta, dado que la fertilización es uno de los factores que influye en ella. El bloque es transversal a la pendiente del terreno, de tal manera que las parcelas experimentales de todos los tratamientos dentro del bloque tengan las mismas características del suelo y que entre los bloques ellas sean diferentes (Figura 7).

En la Tabla 23 se ilustra la estimación del promedio y error estándar de la variable de respuesta, para cada uno de los tratamientos evaluados, y en la Tabla 24 se presenta el promedio y el error estándar para los grupos que conforman la comparación a través de los contrastes, con la prueba *F*.

El error para evaluar tanto el efecto de bloques como el de tratamientos, es la

varianza asociada a la interacción bloques por tratamientos. El análisis de varianza (Tabla 25) indicó efecto de bloques y

efectos de tratamientos, dado que la probabilidad asociada a cada uno de estos factores es menor del 5% (0,05),

Tabla 23. Promedio y error estándar de la **producción acumulada en café cereza por parcela efectiva** (diez plantas), en cada tratamiento evaluado.

Tratamiento	Número de bloques	Producción acumulada Promedio (g)	Error estándar
1	16	79.146,7	2.898,6
2	16	85.778,4	5.145,7
3	16	78.573,8	1.717,2
4	16	74.814,8	2.557,0
5	16	76.376,2	3.838,7
6	16	79.057,7	2.748,5
7	16	57.563,8	3.015,2
8	16	74.142,7	2.988,1
9	16	75.103,9	3.709,3

Tabla 24. Promedio y error estándar de la **producción acumulada en café cereza por parcela efectiva** (diez plantas) en cada grupo de tratamientos que conforman los contrastes.

Grupo de tratamientos	Producción acumulada Promedio (g)	Error estándar
1,2,3 y 4	79.578,4	1.699,5
8 y 9	74.623,3	2.344,4
5 y 6	77.716,9	2.334,7

Tabla 25. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en la evaluación del efecto de tratamientos con la variable **producción acumulada de café cereza por parcela efectiva** (diez plantas).

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados (SC)	FC	Pr > F
Bloques	15	5347811347	2,34	0,0057
Tratamientos	8	7453882940	6,12	< 0,0001
Error	120	18276597715		
Contraste				
1	1	73921406	0,49	0,48
2	1	523796354	3,44	0,07
3	1	6203421926	40,73	< 0,0001
4	1	153128250	1,01	0,32
5	1	4332250104	28,4	< 0,0001
6	1	3104283096	20,38	< 0,0001

nivel establecido en la planeación de la investigación, para evaluar el estadístico de prueba F, asociado a los factores de variación. Cuando hay efecto de bloques significa que el diseño experimental fue el adecuado, es decir, para el caso de esta investigación, el separar del error lo inherente a los sitios y el gradiente de fertilización dentro de cada sitio contribuyó a tener un error experimental menor, evidenciando el efecto de los tratamientos como tal.

Como el análisis de varianza mostró efecto de tratamientos se procede a evaluar cada uno de los contrastes (Tabla 25). El análisis indica que tres de los cinco, son significativos, es decir, el promedio del tratamiento 7 difiere del promedio de: los tratamientos 1, 2, 3 y 4 (contraste 3), tratamiento 5 y 6 (contraste 5), y tratamientos 8 y 9 (contraste 6). La confiabilidad de los resultados de esta investigación es del 87%, valor esperado en la planeación (mayor del 80%), al determinar estadísticamente el número de bloques en 16.

Con estos resultados se alcanzó el objetivo y como al menos uno de los contrastes fue significativo, se corroboró la hipótesis de la investigación.

Nota

El investigador puede proponer tantos contrastes como $t-1$ tratamientos sean evaluados. El contraste es la prueba de comparación de mayor rigor estadístico.

Ejemplo No. 2 Sin arreglo de tratamientos

Un investigador especialista en suelos evaluó en una de las estaciones experimentales de Cenicafé, siete

fertilizantes en la producción de café (objetivo), bajo el diseño experimental bloques completos al azar. El factor de bloqueo lo constituyó el gradiente de fertilización. La parcela experimental estuvo conformada por 50 plantas, de las cuales las 24 plantas centrales conformaron la parcela efectiva. Dentro de cada bloque, los tratamientos fueron asignados aleatoriamente (Figura 9). El número de bloques (siete) fue determinado estadísticamente, de acuerdo con los siguientes criterios: varianza estimada en 6112274,7, asociada al promedio experimental de café cereza por parcela efectiva de 24 plantas, diferencia mínima aceptable de 3.500 gramos de café cereza, nivel de significación (probabilidad tipo I) del 5% y una confiabilidad mayor del 90%.

Las parcelas experimentales dentro de cada bloque se conformaron desde la siembra de café Variedad Castillo®, con una densidad de 10.000 plantas por hectárea. A los 18 meses después de la siembra se inició la aplicación de los

BI	T3	T6	T4	T1	T5	T7	T2
BII	T5	T7	T1	T2	T3	T4	T6
BIII	T3	T1	T6	T5	T7	T2	T4
BIV	T7	T6	T2	T5	T4	T3	T1
BV	T3	T1	T6	T2	T4	T5	T7
BVI	T4	T3	T2	T7	T1	T5	T6
BVII	T2	T4	T3	T6	T5	T1	T7

Figura 9. Asignación aleatoria de los tratamientos, en cada uno de los bloques.

tratamientos con el manejo experimental correspondiente. La producción acumulada de café cereza por parcela efectiva, durante cuatro años de producción, a partir del segundo año de establecimiento, fue la variable de respuesta. Con los resultados de la investigación se quería verificar que con al menos uno de los fertilizantes se lograba incrementar la producción de café cereza en más del 10%, con respecto a la fertilización recomendada (hipótesis de investigación).

En la Tabla 26 se presenta la estimación del promedio de producción acumulada por parcela efectiva, de cada uno de los tratamientos evaluados con su respectivo error estándar. El análisis de varianza mostró efecto de bloques y no mostró efecto de tratamientos (Tabla 27). El hecho de existir efecto de bloques, significa que

el criterio de gradiente de fertilidad como factor de bloqueo, justifica la aplicación del diseño. Dado que no hubo efecto de tratamientos se evaluó la probabilidad de tipo II, la cual fue superior del 20% (36%), indicando que no hay certeza en la decisión con respecto a la hipótesis nula y, por lo tanto, no hay evidencia con criterio estadístico para corroborar o no la hipótesis de investigación. Este resultado principalmente, se debe al número de bloques, el cual fue determinado con base en una varianza observada en otra investigación inferior a la obtenida en ésta, es decir, al definir estadísticamente el número de bloques, la certeza en la decisión de la hipótesis estadística queda sujeta al hecho que se logre igual o menor varianza a la utilizada, en la determinación del número de ellos.

Tabla 26. Promedio y error estándar para la producción acumulada (g) de café cereza por parcela efectiva (24 plantas), en cada tratamiento evaluado.

Tratamiento	Número de bloques	Producción acumulada	Error estándar
1	7	95597,9	6750,8
2	7	101170,4	4897,4
3	7	82834,9	9127,0
4	7	94306,3	9913,5
5	7	84902,0	13803,2
6	7	90074,0	10307,7
7	7	77458,0	12508,4

Tabla 27. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en la evaluación del efecto de fertilizantes con la variable producción acumulada de café cereza por parcela efectiva (24 plantas).

Fuente de Variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	FC	Pr > F
Bloques	6	12202678203	4,21	0,0025
Tratamientos	6	2851692329	0,98	0,45
Error	36	17381104845		

Ejemplo No. 3

Con arreglo factorial de tratamientos

Con el objetivo de evaluar una canastilla, para recoger frutos del suelo durante el repase, (que se hace una vez termina la cosecha), se propuso un diseño experimental de bloques completos al azar, en arreglo factorial 2x5 (dos condiciones de la parcela y cinco cantidades de frutos en el plato del árbol). El factor de bloqueo estuvo representado en el operario, para separar del error experimental su actitud y destreza en el manejo de la canastilla, y así evaluar el efecto de la interacción de los factores descritos. La canastilla fue utilizada por 15 operarios, en cada uno de los tratamientos o combinación de factores descritos en la Tabla 28 y la unidad de trabajo estuvo conformada por el plato del árbol (sitio). Antes de aplicar los tratamientos, se recogieron los frutos en la unidad de trabajo, garantizando así la conformación de los tratamientos, para evaluar la hipótesis de investigación. “La recogida de los frutos del plato del árbol con la canastilla es independiente de la condición del lote y de la cantidad de frutos en él.”

Para ilustrar la importancia en la definición de la variable de respuesta desde la planeación de la investigación, haciéndola explícita en el enunciado de la hipótesis, se mostrará el resultado con el número de frutos no recogidos y la proporción de frutos recogidos con la canastilla (variables de respuesta). Además, en dicha investigación se tuvo como variable complementaria el tiempo invertido en recoger los frutos utilizando la canastilla. Por lo tanto, se tienen dos tipos de variables, la primera una variable discreta y las dos últimas, variables continuas.

En la Tabla 29 se presenta el análisis de varianza para las variables citadas. Con cada una de ellas, el análisis muestra efecto del factor de bloqueo, es decir, es adecuado no incluir en la variación del error, la actitud y la destreza de los operarios en el manejo de la canastilla.

Para el número de frutos no recogidos (variable discreta), la interacción de la condición del lote por el número de frutos en el plato del árbol (Tabla 29), es significativa, es decir, la respuesta a esta variable depende de la combinación de los factores, como se aprecia en la Figura 10, donde el menor número de frutos no

Tabla 28. Descripción de los tratamientos en arreglo factorial.

Tratamiento	Condición del lote	Cantidad de frutos en el plato del árbol
1	Sin plateo	3
2		6
3		9
4		12
5		15
6	Con plateo	3
7		6
8		9
9		12
10		15

recogidos se registró en la combinación parcela sin plateo y tres frutos en el plato del árbol y en la combinación parcela con plateo para tres, seis y nueve frutos en el plato del árbol (Tabla 30). Una vez se tenga la evidencia gráfica de la interacción, esta debe ser corroborada a través de una prueba de contraste, como lo fue para este caso, donde las combinaciones con el menor número de frutos no recogidos (en conjunto), mostraron diferencia con respecto a las demás, según el estadístico de prueba F (valor de FC en 134,56 y una probabilidad asociada de 0,0001).

Con la variable de respuesta porcentaje de frutos recogidos con la canastilla (variable continua), el análisis de varianza (Tabla 29), no mostró efecto de la interacción, pero sí de los factores por separado. Por lo tanto, se aplicó la prueba de diferencia mínima significativa para comparar los promedios de la condición del lote, mientras que, en el caso del número de frutos en el plato del árbol se evaluó la tendencia lineal, cuadrática, cúbica y de cuarto grado, con el estadístico de prueba F (Tabla 31).

Tabla 29. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en arreglo factorial, con las variables número de frutos no recogidos, porcentaje de frutos recogidos en el plato del árbol con la canastilla y tiempo invertido (s).

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	FC	Pr > F
Número de frutos no recogidos	Operario	14	144,960	10,354	3,670	<0,0001
	Parcela	1	240,667	240,667	85,280	<0,0001
	Frutos	4	601,427	150,357	53,280	<0,0001
	Parcela x Frutos	4	91,533	22,883	8,110	<0,0001
Porcentaje de frutos recogidos con la canastilla	Operario	14	18.873,222	1.348,087	3,800	<0,0001
	Parcela	1	27.083,095	27.083,095	76,380	<0,0001
	Frutos	4	8.297,481	2.074,370	5,850	0,0002
	Parcela x Frutos	4	691,638	172,909	0,490	0,7448
Tiempo (s)	Operario	14	291,914	20,851	2,810	0,0011
	Parcela	1	127,402	127,402	17,180	<,0001
	Frutos	4	977,561	244,390	32,950	<,0001
	Parcela x Frutos	4	27,651	6,913	0,930	0,4477

Tabla 30. Promedio y error estándar para la variable número de frutos no recogidos del plato del árbol por recolector y sitio, en cada uno de los factores de la interacción evaluados (condición del lote y frutos en el plato del árbol).

Frutos en el plato del árbol	Condición del lote			
	Sin plateo		Con plateo	
	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar
3	1,1	0,24	0,3	0,11
6	2,2	0,44	0,8	0,20
9	3,9	0,61	1,7	0,42
12	6,3	0,67	3,3	0,42
15	8,7	0,73	3,4	0,58

De acuerdo con la prueba de diferencia mínima significativa, el lote con plateo, independientemente del número de frutos en el plato del árbol, tiene el mayor promedio de la proporción de frutos recogidos (Tabla 31). La evaluación de las tendencias indicó que, a mayor número de frutos en el plato del árbol, menor es la proporción de frutos recogidos con la canastilla, tendencia lineal negativa (Figura 10).

La hipótesis de investigación, queda evaluada desde el punto de vista estadístico, siempre y cuando la interacción no sea significativa. Quien lea despreviamente los resultados presentados en la Tabla 29, concluye que con una variable de respuesta no se corrobora la hipótesis y con la otra sí se corrobora. Si se lee bien, se habla de la recogida de los frutos del plato con la canastilla y para este ejemplo, la variable de respuesta que describe esta circunstancia es el porcentaje de frutos

Figura 10.

Comportamiento del número de frutos no recogidos, de acuerdo con el número de frutos en el plato del árbol y la condición del lote.

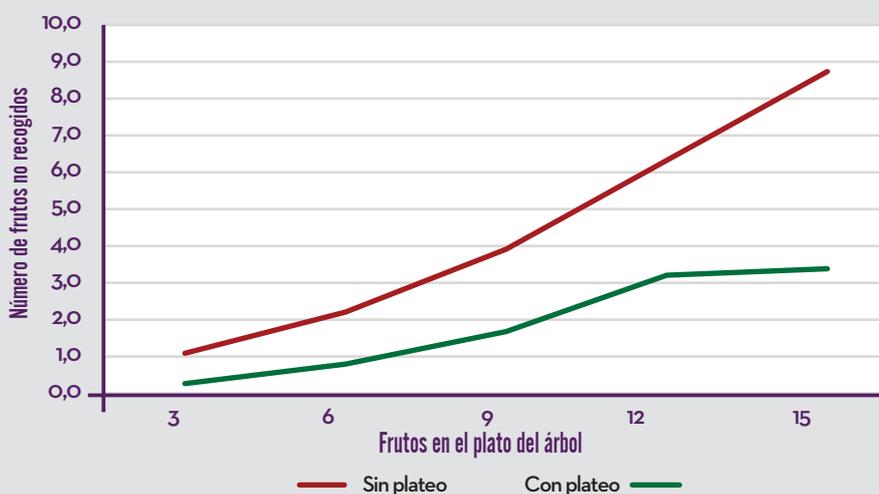


Tabla 31. Promedio y error estándar, para la variable **proporción de frutos recogidos del plato del árbol con la canastilla** por recolector y sitio, para cada uno de los factores de la interacción evaluados (condición del lote y frutos en el plato del árbol).

Frutos en el plato del árbol	Condición del lote				Promedio (porcentaje)	Error estándar
	Sin plateo		Con plateo			
	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar		
3	64,4	8,30	91,1	3,90	77,8	5,1
6	63,3	7,50	86,7	3,30	75,0	4,5
9	57,0	6,80	80,7	4,70	68,9	4,6
12	47,2	5,60	72,8	3,50	60,0	4,0
15	42,2	4,90	77,3	3,90	59,8	4,4
Promedio (porcentaje)	54,9 B	3,10	81,7 A	1,90		

Para la condición del lote, letras no comunes implica diferencia entre promedios, según prueba diferencia mínima significativa al 5%

recogidos y no el número de frutos no recogidos del plato con la canastilla. Es muy importante, desde la planeación de la investigación, tener la claridad sobre la variable de respuesta con la cual se va a evaluar la hipótesis de investigación o de trabajo. Para este ejemplo, y de acuerdo con las dos variables de respuesta planteadas, el enunciado de la hipótesis debe ser “la proporción de frutos del plato del árbol recogidos con la canastilla es independiente de la condición del lote y de la cantidad de frutos en él”.

El análisis de varianza para la variable complementaria no mostró efecto de la interacción pero sí de los factores por separado, y la prueba de comparación de diferencia mínima significativa mostró diferencias a favor del lote con plateo, es decir, presentó el menor tiempo invertido para recoger frutos del plato del árbol con la canastilla (Tabla 32). La prueba de F indicó una tendencia cuadrática en el tiempo invertido en la labor de recoger los frutos con la canastilla en relación con el número de frutos en el plato del árbol, independientemente de la condición del

lote. Los resultados de esta investigación tienen una confiabilidad mayor del 95%.

Ejemplo No. 4

Con arreglo de tratamientos en parcelas divididas

Para evaluar el efecto del tipo de secado de la semilla (tratamientos), de tres variedades (parcela principal), en la producción del número de plantas en almácigo para ser trasplantadas, se propuso el diseño en bloques completos al azar bajo el arreglo de parcelas divididas, donde el factor de bloqueo correspondió a la condición ambiental ocurrida durante la etapa de almácigo. Se establecieron cinco almácigos (bloques), en diferentes épocas, y en cada uno de ellos se sembraron 400 plántulas (chapolas), provenientes de semillas de tres variedades, secadas al sol y en un secador de flujos concurrentes intermitente (tratamientos).

Tabla 32. Promedio y error estándar, para la variable tiempo invertido en la labor de la recogida de frutos del plato del árbol con la canastilla, para cada uno de los factores de la interacción evaluados (condición del lote y frutos en el plato del árbol).

Frutos en el plato del árbol	Condición del lote				Promedio	Error estándar
	Sin plateo		Con plateo			
	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar		
3	6,5	0,70	3,9	0,29	5,2	0,4
6	9,3	0,76	7,5	0,48	8,4	0,4
9	11,4	0,99	8,7	0,49	10,0	0,5
12	11,9	0,86	11,5	0,91	11,7	0,6
15	13,1	0,49	11,3	1,17	12,3	0,6
Promedio	10,5 A	0,43	8,6 B	0,46		

Letras no comunes, implica diferencia entre los promedios de la condición del lote, según prueba de diferencia mínima significativa al 5%

En la Tabla 33 se presenta la información del número de plantas aptas para ser trasplantadas en el campo, por cada uno de los factores mencionados y en la Tabla 34 se observa la información relacionada con el análisis de varianza.

El primer análisis que debe hacerse es el correspondiente a las parcelas principales (variedades), en este caso la probabilidad asociada al valor del FC indica que no hay efecto de variedades (Tabla 34) ni

efecto de los bloques (almácigos), con una probabilidad tipo II del 75%, por lo tanto, la decisión acerca de la igualdad estadística de los promedios de las variedades en el número de plantas aptas para ser trasplantadas es incierta (Tabla 35).

El segundo análisis corresponde a la interacción variedades x tipos de secado (parcelas principales por sub parcelas). En este caso la interacción no es significativa,

Tabla 33. Número de plantas aptas para ser trasplantadas, de cada almácigo (bloque), variedad y tipo de secado.

Bloque (Almácigo)	Variedad					
	1		2		3	
	Flujos concurrentes	Sol	Flujos concurrentes	Sol	Flujos concurrentes	Sol
1	292	260	271	183	301	203
2	318	200	296	223	279	273
3	299	203	350	188	343	193
4	272	150	325	197	279	214
5	304	181	366	179	271	217

Tabla 34. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en arreglo de parcelas divididas, con la variable número de plantas aptas para ser trasplantadas.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Bloque	4	2.451,7	0,77	0,57
Variedad	2	622,1	0,39	0,68
Error (a)	8	6.352,9		
Tipo secado	1	75.200,1	67,65	<0,0001
Variedad x tipo de secado	2	3.525,3	1,59	0,244
Error (b)	12	13.338,6		
Total	29	101.490,7		

Tabla 35. Promedio y error estándar, para la variable número de plantas aptas para ser trasplantadas por variedad y por tipo de secado.

Variedad	Tipo de secado					
	Flujos concurrentes		Sol		Promedio	Error estándar
	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar		
1	297,0	7,56	198,8	17,98	247,9	18,77
2	321,6	17,33	194,0	7,85	257,8	23,08
3	294,6	13,09	220,0	13,91	257,3	15,35
Promedio	304,4A	7,81	204,3B	8,01		

Entre tipos de secado, letras no comunes, implica diferencia entre promedios, según prueba de diferencia mínima significativa, al 5%.

por lo tanto, se procede a evaluar el efecto del tipo de secado (sub parcelas), siendo significativo (Tabla 33), a favor del secado de flujos concurrentes (Tabla 35), con una diferencia de 100 plantas con respecto al secado al sol, según la prueba de diferencia mínima significativa, al 5%. Este resultado tiene una confiabilidad mayor del 95%.

Ejemplo No. 5 Con arreglo de tratamientos en parcelas sub divididas

Para evaluar el efecto de las técnicas de desprendimiento de frutos de café, el patrón de concentración de los frutos maduros en la rama y el porcentaje de madurez, en el desempeño operativo de los recolectores, se aplicó el diseño experimental bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas con dos subdivisiones, donde se tuvo como primer factor las técnicas de desprendimiento (parcela principal), los patrones de concentración como segundo factor (sub parcela) y el porcentaje de madurez como tratamientos.

El factor de bloqueo fue el operario, es decir, cada uno de ellos (cinco operarios) hizo el proceso de recolección con todas las técnicas de desprendimiento y con cada técnica todos los patrones de concentración y en cada patrón de concentración todos los porcentajes de madurez.

Con esta investigación se quería evaluar la siguiente hipótesis: “Existe un patrón de concentración de frutos maduros en las ramas con el cual el operario incrementa la eficiencia en más de un 100%, manteniendo la eficacia y la calidad”.

Las técnicas de desprendimiento manual (Pp) evaluadas fueron las siguientes:

- ♦ **Desprendimiento masivo** (desprendimiento no selectivo generalizado). En esta técnica se le pidió al recolector que realizara un desprendimiento generalizado en la rama, desde el lugar donde encontraba el primer fruto maduro hasta el último, deslizando su mano del tronco hacia afuera.
- ♦ **Desprendimiento parcial con repase** usando el método tradicional (desprendimiento localizado no selectivo con repase selectivo). En esta

técnica se le pidió al recolector que hiciera un desprendimiento localizado solo en aquellos nudos donde se encontraba concentrada la maduración y en aquellos donde se presentaba una mayoría de frutos verdes, realizara un desprendimiento selectivo usando el método tradicional de seis *therbligs* o micromovimientos.

- ♦ **Desprendimiento parcial con repase usando el método mejorado** (desprendimiento localizado no selectivo con repase selectivo). En esta técnica se le pidió al recolector realizar la cosecha de igual forma que se hizo en el caso anterior, pero la recolección selectiva debía hacerse con el método mejorado compuesto de cuatro *therbligs*.
- ♦ **Método mejorado** (sistema selectivo). En esta técnica se le pidió al recolector seguir las recomendaciones del método mejorado.
- ♦ **Método tradicional** (sistema selectivo). En esta técnica se le pidió al recolector realizar la labor como tradicionalmente él lo hace.

En todas las técnicas de desprendimiento se usó el dispositivo para recolección lengua corta, propuesto por Vélez et al. (1999), excepto en el método tradicional donde se usó el canasto o coco y dependiendo de la técnica de desprendimiento se siguieron los movimientos propuestos con el método mejorado.

En un lote por cosechar se hizo la caracterización de los patrones de concentración y porcentajes de madurez, dando como resultado los descritos en las Tablas 36 y 37.

En el lote donde fue hecha la caracterización, se le asignó aleatoriamente a cada recolector el grupo de árboles, para aplicar cada técnica de desprendimiento, en todos los porcentajes de frutos maduros y en los tres patrones de madurez (Tabla 37), y estos a su vez fueron señalados en una rama del árbol a cosechar.

La información registrada en cada rama señalada del árbol asignado, fue la siguiente:

- ♦ Tiempo de desprendimiento.
- ♦ Número de frutos desprendidos.
- ♦ Número de frutos maduros iniciales en la rama.
- ♦ Porcentaje de frutos maduros y verdes de los frutos desprendidos (masa cosechada).
- ♦ Porcentaje de frutos maduros desprendidos con base en el número de frutos maduros iniciales en la rama.

Con esta información se conformaron las variables de respuesta asociadas a los indicadores de eficiencia, eficacia y calidad, es decir: gramos de frutos recolectados por segundo, porcentaje de frutos maduros desprendidos y porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada, respectivamente, para evaluar el desempeño operativo de los recolectores, objetivo de la investigación.

El análisis de varianza, con cada una de las variables de respuesta, indicó:

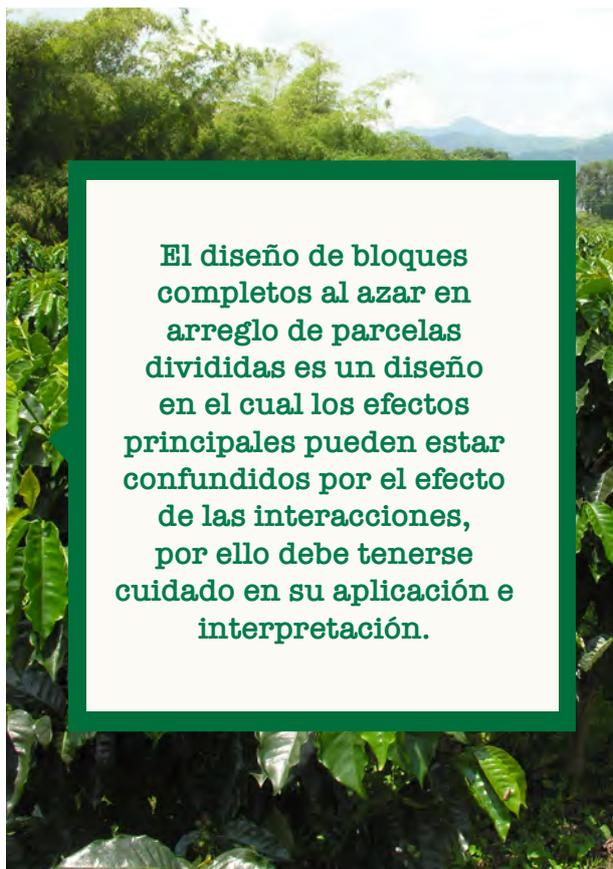
- ♦ Para la variable asociada al indicador de eficiencia (Tabla 38): no hay efecto

Tabla 36. Descripción de los patrones de concentración de frutos maduros (patrón).

Patrón de concentración	Descripción	Ejemplo
1/3	Concentración de la maduración en un tercio de la rama. La concentración puede presentarse en cualquier tercio.	
2/3 C	Concentración de la maduración en dos tercios contiguos de la rama.	
3/3	Concentración de la maduración en los tres tercios de la rama.	

Tabla 37. Descripción de la combinación porcentaje de frutos maduros en la rama y patrón de concentración, para cada una de las técnicas de desprendimiento (Pp).

Porcentaje de frutos maduros en la rama (Pm)	Patrón de concentración
(25% - 40%)	1/3
	2/3 C
	3/3
(40% - 55%)	1/3
	2/3 C
	3/3
(55% - 70%)	1/3
	2/3 C
	3/3
(70% - 85%)	1/3
	2/3 C
	3/3



El diseño de bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas es un diseño en el cual los efectos principales pueden estar confundidos por el efecto de las interacciones, por ello debe tenerse cuidado en su aplicación e interpretación.

de la interacción de segundo orden (patrón de concentración * técnica de desprendimiento* porcentaje de madurez); incertidumbre en la interacción porcentaje de madurez por técnica de desprendimiento; y efecto de la interacción patrón de concentración*técnica de desprendimiento.

- ♦ Para la variable porcentaje de frutos maduros desprendidos (eficacia) no hay efecto en ninguna de las combinaciones ni de los factores por separado (Tabla 39).
- ♦ Para la variable asociada al indicador de calidad hay efecto de la interacción porcentaje de madurez por técnica de desprendimiento (Tabla 40).

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza, la hipótesis de investigación no fue corroborada, dado que la eficiencia depende de la interacción patrón de

Tabla 38. Resumen del análisis de varianza, con la variable **gramos de frutos recolectados por segundo** (eficiencia), bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en arreglo de parcelas con dos subdivisiones.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Bloque	4	1.297,5	2,56	0,078
Pp	4	24.737,1	48,8	<0,0001
Bloque * Pp	16	2.027,2		
Subp	2	660,6	21,33	<0,0001
Subp * Pp	8	2.557,1	20,6	<0,0001
Subp * Bloque (Pp)	40	619,5		
Trat	3	188,1	1,24	0,3384
Trat * Bloque	12	607,1		
Trat * Pp	12	1.168,8	2,46	0,0138
Trat * Bloque * Pp	48	1.903,1		
Trat * Subp	6	111,7	0,30	0,934
Trat * Subp * Pp	24	527,2	0,36	0,997
Trat * Subp * Bloque(Pp)	120	7.368,03		

Pp: Técnicas de desprendimiento; Subp: patrón de concentración; Trat: Porcentaje de madurez.

Tabla 39. Resumen del análisis de varianza, con la variable **porcentaje de frutos maduros desprendidos** (eficacia), bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en arreglo de parcelas con dos subdivisiones.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr>F
Bloque	4	10,7	1,50	0,2503
Pp	4	1,3	0,19	0,9397
Pp * Bloque	16	28,8		
Patrón	2	0,8	0,41	0,6666
Patron* Pp	8	7,6	0,87	0,5469
Patrón * Bloque(Pp)	40	43,7		
pm	3	0,94	0,48	0,702
PmxBloque	12	7,9		
Pm * Pp	12	12,8	0,81	0,6422
Pm * Bloque * Pp	48	63,9		
Pm * Patrón	6	7,5	1,13	0,3518
Pm * Pp * Patrón	24	30,1	1,13	0,3263
Pm * Patron * Bloque(Pp)	120	133,7		

Pp: Técnicas de desprendimiento; Patrón: patrón de concentración; Pm: Porcentaje de madurez.

Tabla 40. Resumen del análisis de varianza, con la variable **porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada (calidad)**, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental bloques completos al azar, en arreglo parcelas con dos subdivisiones.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr>F
Bloque	4	580,2	2,31	0,10226
Pp	4	51.266,4	203,95	<,0001
Pp*Bloque	16	1005,4		
Patrón	2	36,9	0,44	0,6497
Patrón* Pp	8	582,2	1,72	0,1237
Patrón*Bloque(Pp)	40	1.693,1		
pm	3	2.615,9	33,05	<0,0001
Pm*Bloque	12	316,6		
Pm*Pp	12	10.187,9	17,06	<0,0001
Pm*Bloque*Pp	48	2.388,7		
Pm*Patrón	6	375,4	1,45	0,2012
Pm*Pp* Patrón	24	1.262,9	1,22	0,2391
Pm* Patron * Bloque(Pp)	120	5.177,4		

Pp: Técnicas de desprendimiento; Patrón: patrón de concentración; Pm: Porcentaje de madurez.

concentración de frutos maduros por la técnica de desprendimiento. En las Tablas 41 y 43 se presenta el promedio y variación para las variables asociadas a los indicadores de eficiencia y calidad, en los factores de la interacción significativa; y en la Tabla 42 el promedio y variación para la variable asociada a la eficacia, en todos los factores, dado que no hubo efecto de la interacción ni de los factores por separado.

El diseño de bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas,

es considerado como un diseño en el cual los efectos principales pueden estar confundidos, por el efecto de las interacciones, por ello, debe tenerse cuidado en su aplicación e interpretación: en la aplicación, la definición de las parcelas principales y subparcelas, requiere conocimiento de su efecto como tal, mientras que el efecto de los tratamientos y la interacción con aquellas se desconoce; y en la interpretación el cuidado con la significación de las interacciones que evalúan las Pp, Subp y tratamientos, según el caso del arreglo.

Tabla 41. Promedio y coeficiente de variación para la variable **gramos de frutos recolectados por segundo** (eficiencia), por recolector, en cada técnica de desprendimiento y patrón de concentración de los frutos en la rama.

Técnicas de desprendimiento	Patrón de concentración de los frutos maduros en la rama					
	1/3		2/3C		3/3	
	Media	CV(%)	Media	CV(%)	Media	CV(%)
1	8,5	32,5	8,4	41,4	8,1	40,9
2	7,9	66,5	9,3	52,2	9,9	80,6
3	22,0	43,1	28,8	54,7	39,6	45,0
4	7,7	32,0	8,2	46,8	6,7	22,3
5	5,6	22,7	5,6	21,3	5,6	30,8

Tabla 42. Promedio y coeficiente de variación para la variable **porcentaje de frutos maduros desprendidos** (eficacia), por recolector, en cada técnica de desprendimiento, por patrón de concentración de los frutos maduros en la rama y por porcentaje de madurez.

Técnicas de desprendimiento	Patrón de concentración	Porcentaje de madurez	Frutos maduros desprendidos (%)	
			Promedio	Coefficiente de Variación
1	1	32,5	100,0	0,0
1	1	47,5	100,0	0,0
1	1	62,5	99,3	1,6
1	1	77,5	100,0	0,0
1	2	32,5	99,1	2,0
1	2	47,5	99,6	0,8
1	2	62,5	100,0	0,0
1	2	77,5	100,0	0,0
1	4	32,5	100,0	0,0
1	4	47,5	100,0	0,0

Continúa...

... continuación Tabla 42

1	4	62,5	100,0	0,0
1	4	77,5	100,0	0,0
2	1	32,5	100,0	0,0
2	1	47,5	100,0	0,0
2	1	62,5	99,5	1,1
2	1	77,5	99,5	1,1
2	2	32,5	100,0	0,0
2	2	47,5	99,3	1,6
2	2	62,5	98,7	2,9
2	2	77,5	100,0	0,0
2	4	32,5	100,0	0,0
2	4	47,5	99,1	2,1
2	4	62,5	100,0	0,0
2	4	77,5	100,0	0,0
3	1	32,5	100,0	0,0
3	1	47,5	100,0	0,0
3	1	62,5	100,0	0,0
3	1	77,5	97,9	4,8
3	2	32,5	100,0	0,0
3	2	47,5	100,0	0,0
3	2	62,5	100,0	0,0
3	2	77,5	100,0	0,0
3	4	32,5	99,7	0,6
3	4	47,5	100,0	0,0
3	4	62,5	100,0	0,0
3	4	77,5	100,0	0,0

Tabla 43. Promedio y coeficiente de variación para la variable **porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada** (calidad), por recolector, en cada técnica de desprendimiento y porcentaje de madurez.

Técnicas de desprendimiento	Porcentaje de madurez							
	32,5		47,5		62,5		77,5	
	Media	CV(%)	Media	CV(%)	Media	CV(%)	Media	CV(%)
1	16,0	62,3	19,7	36,6	19,8	34,9	14,1	37,7
2	14,7	76,1	18,6	51,3	17,9	40,5	16,2	38,7
3	56,0	27,3	43,2	16,2	30,4	25,7	17,6	29,9
4	1,7	177,1	1,1	148,5	1,7	136,5	1,7	160,1
5	1,2	242,7	1,1	196,4	1,3	134,7	1,4	235,7



Diseño experimental
cuadrado latino

A

B

B

C

C



D

En el diseño experimental cuadrado latino la variabilidad que se quiera separar del error, se hace con dos factores de bloqueo, hileras y columnas; mientras que, en un diseño de bloques completos al azar, la variabilidad que se quiere separar del error se hace en un solo factor de bloqueo.

La limitación del diseño cuadrado latino, consiste en que cada tratamiento aparece sólo una vez en cada hilera y únicamente una vez en cada columna, es decir, hay tantas repeticiones como tratamientos a evaluar, por lo tanto, para cuadros pequeños, debe incluirse más de un cuadro en el mismo experimento, con el fin de tener un error con más grados de libertad.

Tres cuadros de 3x3 y dos cuadros de 4x4, generan 10 y 15 grados de libertad para el error, respectivamente, sin que ello garantice una confiabilidad mayor del 80%.

Bajo el modelo de análisis para el diseño experimental cuadrado latino, el efecto de los dos factores de bloqueo o doble agrupamiento, es el de sustraer del error experimental todas las diferencias que se den entre hileras y las diferencias entre columnas. Por lo tanto, el experimento debe ser ejecutado, de tal manera que, en las hileras y columnas deben quedar las fuentes que generen mayor variación y así disminuir el error experimental. En experimentos desarrollados en el campo, con este diseño, por ejemplo, se controlan fertilidad y sombrío, mientras que en condiciones de laboratorio pueden controlarse la temperatura y la luminosidad.

En la Figura 11 se ilustra la asignación de cinco tratamientos, correspondiente a un cuadrado latino de 5x5, donde cada hilera y cada columna del cuadro, son una repetición completa.

Un diseño derivado del cuadrado latino es el conmutativo, el cual tiene ventajas cuando se evalúan dos tratamientos en la misma unidad experimental, donde el número de repeticiones (columnas) debe

ser un múltiplo de los tratamientos y la hilera es la parte de la unidad experimental que le corresponde al tratamiento.

Ejemplo No. 1 Cuadrado latino simple

Para evaluar el efecto de cinco tratamientos en la desinfección del sustrato para la siembra de semillas de café, el investigador identificó que en el sitio donde se realizaría este experimento no había homogeneidad en la luminosidad y la temperatura, por lo tanto, se asignaron aleatoriamente los tratamientos de acuerdo con un diseño en cuadrado latino de 5x5, donde la unidad experimental estuvo conformada por 350 semillas sembradas en el sustrato. Las columnas representaron el factor luminosidad y las hileras la temperatura. A los tres meses de sembradas las semillas se evaluó el porcentaje de chapolas aptas para pasar a la etapa de almácigo.

En la Tabla 44, además del porcentaje de chapolas de cada unidad experimental, se presenta la disposición de los tratamientos de acuerdo con el diseño aplicado, dado que es importante tener presente la forma cómo se evaluaron los tratamientos para aplicar el modelo de análisis correspondiente (análisis de varianza).

		<i>Columnas</i>				
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Hileras</i>	<i>1</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>A</i>
	<i>2</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>
	<i>3</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>E</i>
	<i>4</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>B</i>
	<i>5</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>D</i>

Figura 11. Asignación de cinco tratamientos bajo el diseño experimental de un cuadrado latino de 5x5.

Tabla 44. Porcentaje de chapola en cada unidad experimental y disposición de los tratamientos, de acuerdo con el diseño cuadrado latino 5x5.

Hileras	Columnas				
	1	2	3	4	5
1	63,4 (1)	20,9 (2)	6,3 (3)	92,0 (4)	16,6 (5)
2	89,1 (4)	50,3 (1)	33,7 (2)	32,0 (5)	8,0 (3)
3	18,6 (3)	24,3 (5)	88,3 (4)	55,1 (1)	21,7 (2)
4	45,7 (2)	93,4 (4)	24,9 (5)	13,1 (3)	52,9 (1)
5	22,0 (5)	19,1 (3)	57,4 (1)	37,7 (2)	70,6 (4)

La cifra entre paréntesis se refiere al número del tratamiento.

Dicho análisis indicó el efecto de tratamientos al 5%, separando del error, aquello que pudiere haber sido afectado por la luminosidad y por la temperatura (Tabla 45). La prueba de comparación de

Tukey al 5% indicó que con el tratamiento 4 se asegura el mayor porcentaje de chapolas aptas para pasar a la etapa de almácigo (Tabla 46).

Tabla 45. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental cuadrado latino 5x5, en la evaluación del efecto de tratamientos con la variable porcentaje de chapolas aptas para pasar a la etapa de almácigo.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Hileras	4	106,28	0,66	0,6309
Columnas	4	569,95	3,54	0,039
Tratamientos	4	17.270,92	107,37	<0,0001
Error	12	482,54		
Total	24	18.429,69		

Tabla 46. Promedio y error estándar del porcentaje de chapolas aptas para pasar a la etapa de almácigo, por tratamiento evaluado.

Tratamientos	Promedio	Error estándar
1	55,8 B	2,2
2	31,9 C	4,7
3	13,0 D	2,6
4	86,7 A	4,1
5	23,9 DC	2,4

Letras no comunes indica implica diferencia entre promedios según prueba de Tukey al 5%.

un diseño experimental en cuadrado latino repetido, donde las hileras correspondieron a los recolectores, las columnas a los días de recolección y los tratamientos a los dispositivos para asistir la recolección manual. El diseño se repitió en seis estaciones experimentales, durante una cosecha pico de recolección. Antes de realizar la evaluación de los dispositivos, se entrenaron los recolectores en la ejecución del método mejorado para la recolección del café, actividad que tuvo una duración de una jornada de trabajo.

Ejemplo No.2

Cuadrado latino repetido

Con el propósito de contribuir a la optimización operativa de la cosecha manual del café, se evaluaron tres dispositivos para asistir la recolección manual, partiendo de la hipótesis que “con al menos uno de los dispositivos se disminuye el porcentaje de frutos caídos al suelo durante la recolección y se incrementa el rendimiento operativo del proceso”.

En la evaluación operativa de los tres dispositivos de recolección, se empleó

Las variables de respuesta, con las cuales se evaluó la hipótesis de investigación, fueron:

- ◆ Kilogramos de café cosechado en cinco árboles contiguos (unidad de trabajo), asociada al indicador de rendimiento
- ◆ Porcentaje de frutos caídos al suelo durante la recolección, por unidad de trabajo. Para registrar la información de esta variable, antes de realizar la cosecha, se recogieron los frutos del suelo de cada una de las unidades de trabajo.

En cada réplica (cuadro) se aplicó un cuadrado latino de 3x3, es decir, tres recolectores, en tres días de recolección, utilizaron los tres dispositivos de recolección, en las unidades de trabajo asignadas aleatoriamente. Cada cuadro fue aplicado en condiciones ambientales diferentes (estaciones) y en lotes de diferente pendiente, densidad y edad del cultivo.

El análisis de varianza, al nivel del 5% (Tabla 47), indicó que:

- Para la variable porcentaje de frutos caídos al suelo durante la recolección, no hay efecto de los recolectores (hileras) ni de los días de recolección (columnas), pero sí mostró efecto de los dispositivos y la prueba de comparación de Tukey (Tabla 48), indicó que con el dispositivo Lengua Corta, el promedio de frutos caídos al suelo es mayor, lo cual se explica porque la captación de frutos es menor, es decir, con este dispositivo, mayor número de frutos

desprendidos caen al suelo, lo que no ocurre con el dispositivo boca grande (menor promedio), dado que el área de captación es mayor.

- Para la variable kilogramo de café recolectado por hora, hay efecto de los cuadros y de los factores de bloqueo (recolectores y días de recolección), pero no de los dispositivos, lo cual indica que el rendimiento operativo no depende del dispositivo, pero sí depende de: - los movimientos ejecutados por los recolectores, quienes fueron entrenados para aplicar el método mejorado (hileras); - y de las condiciones del lote a cosechar, representados por las estaciones (cuadros).

Estos resultados sólo corroboraron la hipótesis de investigación con respecto a lo planteado con la variable frutos caídos al suelo durante la recolección, con el dispositivo boca grande (Figura 12).

Tabla 47. Resumen del análisis de varianza bajo el modelo de análisis para el diseño experimental cuadrado latino 3x3 repetido, para la evaluación del efecto de dispositivos de recolección en el rendimiento operativo y el porcentaje de frutos dejados en el suelo.

Variable	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Frutos caídos al suelo durante la recolección (%)	Cuadros	5	48,66	2,73	0,0457
	Cuadros (hileras)	12	46,04	1,08	0,4228
	Cuadros (columnas)	12	21,08	0,49	0,8970
	Dispositivos	2	111,38	15,63	<0,0001
	Error	22	78,37		
	Total	53	305,53		
Kilogramo de café recolectado por hora (rendimiento operativo)	Cuadros	5	147,43	51,97	<0,0001
	Cuadros (hileras)	12	27,46	4,03	0,0023
	Cuadros (columnas)	12	18,36	2,70	0,0210
	Dispositivos	2	2,66	2,35	0,1191
	Error	22	12,48		
	Total	53	208,41		

Tabla 48. Promedios y error estándar para las variables frutos en el suelo y kilogramo de café recolectado por unidad de trabajo-operario, con cada uno de los dispositivos evaluados.

Dispositivos	Frutos caídos al suelo durante la recolección (%)		Café recolectado por hora (kg)	
	Promedio	Error estándar	Promedio	Error estándar
Boca grande	0,73 C	0,15	6,82 A	0,46
Lengua corta	4,24 A	0,68	6,68 A	0,48
Lengua larga	2,50 B	0,37	6,29 A	0,47

Para cada variable, letras no comunes implica diferencia entre promedios, según prueba de Tukey al 5%.



Figura 12. Dispositivos evaluados: a) lengua larga; b) lengua corta; c) boca grande.

Ejemplo No. 3 Conmutativo

Para evaluar una derribadora neumática en la recolección de café, frente al método manual de cosecha (métodos), se seleccionaron cinco recolectores, en una primera fase de entrenamiento para su uso. Cada recolector aplicó los dos métodos (derribadora y tradicional), en la misma

unidad experimental (árbol), en otras palabras, cada método se aplicó en la mitad del árbol (hileras), una vez realizada la asignación aleatoria. La evaluación se hizo en 60 árboles (columnas), de tercera cosecha de un lote de café Variedad Castillo®, seleccionados aleatoriamente durante la semana pico de recolección, es decir, cada operario hizo la recolección con los dos métodos en 12 árboles, asignados aleatoriamente. Para cada hilera, columna

y método, se registró el porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada, variable de respuesta con la cual se quería evaluar la hipótesis de investigación: *“con la derribadora neumática se supera el porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada con respecto al método manual tradicional, en más de un 30%”*.

El análisis de varianza (Tabla 49) mostró efecto de las hileras y columnas, lo cual

indica que se aplicó un diseño adecuado en la evaluación de los métodos, con una confiabilidad mayor del 95% en la certeza de la diferencia entre ellos, a favor de la recolección manual, con un menor porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada (Tabla 50). Dado que hay diferencia entre los promedios de los dos métodos y que descriptivamente esta diferencia sobrepasa al 30% (79,6%), se corrobora la hipótesis de investigación.

Tabla 49. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental conmutativo, en la evaluación de dos métodos de recolección con la variable porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	FC	Pr > F
Columnas	59	2.146,80	2,09	0,0028
Hileras	1	388,80	22,34	<0,0001
Método	1	1.920,0	110,34	<0,0001
Error	58	1.009,20		
Total	119	5.464,80		

Tabla 50. Promedio y error estándar para el porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada, en cada método de recolección evaluado.

Método	Promedio	Error estándar	Mínimo observado	Máximo observado
Derribadora neumática	8,64 A	0,27	4,8	12,00
Recolección manual	1,76 B	0,09	0,65	3,12

Letras no comunes implica diferencia entre promedios según prueba de diferencia mínima significativa al 5%.



Diseño experimental en látex
balanceado



En el diseño látice balanceado, el número de tratamientos a evaluar debe ser un cuadrado ($t = k^2$). Su estructura está conformada por $k+1$ repeticiones y dentro de cada repetición por k hileras y k columnas. El total de hileras a través de todas las repeticiones, conforman los bloques ($k * (k+1)$).

Bajo este diseño cada par de tratamientos ocurre sólo una vez en un mismo bloque, lo que trae como consecuencia que cada par de tratamientos son comparados con el mismo grado de precisión. Este aspecto lo diferencia de los otros diseños en látice. En la Figura 13 se ilustra la asignación de los tratamientos, en cada repetición y bloque para un látice de 3x3 (diseño base), donde cada repetición tiene k hileras y k columnas, es decir, en cada bloque solo hay tres tratamientos, lo que le confiere el nombre de bloque incompleto, caso que no ocurre con el diseño de bloques completos al azar, en el cual todos los

Bloque	Repetición 1			Bloque	Repetición 2		
1	1	2	3	4	1	4	7
2	4	5	6	5	2	5	8
3	7	8	9	6	3	6	9
Bloque	Repetición 3			Bloque	Repetición 4		
7	1	5	9	10	1	8	6
8	7	2	6	11	4	2	9
9	4	8	3	12	7	5	3

Figura 13. Asignación de los tratamientos, en cada repetición y bloque para la evaluación de nueve tratamientos bajo del diseño experimental en látice balanceado 3x3 (diseño base). Tomado de Cochran y Cox (1990).

tratamientos son asignados aleatoriamente en el bloque.

Los látices balanceados pueden aplicarse para el siguiente número de tratamientos: 9, 16, 25, 49, 64 y 81. En el diseño base de cada uno de ellos, el número de repeticiones son 4, 5, 6, 8, 9, y 10, respectivamente, y el tamaño o unidades por bloque son 3, 4, 5, 7, 8 y 9, respectivamente.

Como se observa este diseño es rígido en cuanto al número de tratamientos y el número de repeticiones; sin embargo, Cochran y Cox (1990), sugieren para la evaluación de nueve tratamientos, tener ocho o 12 repeticiones, para 16 tratamientos diez repeticiones, y para 25 tratamientos 12 repeticiones.

El diseño base para el látice balanceado 3x3 tiene cuatro repeticiones. Para lograr 12 repeticiones, el diseño base se repite tres veces.

La recomendación de repetir el diseño base confiere confiabilidad a los resultados, y más aún cuando la variable de respuesta pueda tener coeficientes de variación mayores del 40%.

Para evaluar tratamientos bajo este diseño el criterio más importante, en el arreglo experimental de ellos, es la homogeneidad de las unidades dentro del mismo bloque; es más importante tener bloques homogéneos que repeticiones homogéneas.

En la Tabla 51, se ilustran los grados de libertad para las fuentes de variación, bajo el modelo de análisis del diseño látice balanceado. El error para evaluar el efecto de tratamientos, se descompone en bloques ajustados y error intra-bloque. Cuando el cuadrado medio correspondiente a bloques ajustados (E_b) es menor que el cuadrado medio correspondiente al error intra-bloque (E_c) y/o la eficiencia es menor del 105%, no se ajustan los promedios de los tratamientos; **cuando la eficiencia es mayor del 105%**, debe aplicarse el factor de ajuste (U), al promedio de cada tratamiento, para corregir la competencia entre ellos, objetivo del diseño como tal.

El factor de ajuste se obtiene de la siguiente forma (Expresión <5>):

$$U = (E_b - E_c) / (E_b k^2) \quad \langle 5 \rangle$$

Donde

E_b : Cuadrado medio de bloques ajustados

E_c : Cuadrado medio del error intra-bloque

k : Raíz cuadrada del número de tratamientos a evaluar

La eficiencia de este diseño, se obtiene como el cociente entre el cuadrado medio del error y el error efectivo (Expresiones <6> y <7 >).

$$\text{Eficiencia} = \text{CME} / \text{Error efectivo} \times 100 \quad \langle 6 \rangle$$

Donde:

CME : cuadrado medio asociado al error

$$\text{Error efectivo} = E_c (1 + (k U)) \quad \langle 7 \rangle$$

Una eficiencia mayor de 105% indica que el diseño en látice aplicado, tiene un error experimental menor que uno de bloques completos al azar con $k+1$ bloques y, en este caso, según Hinkelmann and Kempthorne (2005), debe aplicarse el factor de ajuste (U), para corregir los promedios de cada uno de los tratamientos.

mínima significativa, es decir, se compara el promedio de cada tratamiento con cada uno de los promedios de los otros tratamientos. En caso contrario, puede aplicarse una prueba de comparación múltiple, Tukey o Dunnett, según lo requerido por el investigador en la propuesta de investigación.

Ejemplo No. 1

Con el objetivo de seleccionar de ocho genotipos, aquellos con menor altura con respecto a un testigo, se evaluaron nueve tratamientos bajo el diseño experimental látice balanceado 3×3 , aplicando en el área experimental la distribución indicada en la Figura 13, una vez hecha la asignación aleatoria de los tratamientos. La parcela efectiva estuvo conformada por diez plantas, desde el momento de la siembra. Como variable de respuesta se tuvo la altura promedio por planta en cada parcela efectiva, a los 36 meses de edad del cultivo.

El látice balanceado es un diseño utilizado por los mejoradores de plantas, en las pruebas regionales, para seleccionar los materiales que conformarán una variedad, separando en la evaluación la competencia que pudiere existir entre ellos. En el grupo de materiales a evaluar, por lo general, se incluye una variedad de la cual se tiene la información de la característica que se quiere mejorar (testigo).

Cuando se corrigen los promedios con el factor de ajuste, la prueba de comparación sugerida es la de diferencia

A partir de los resultados del análisis de varianza (Tabla 52), se obtiene la eficiencia, de la siguiente manera:

Tabla 51. Grados de libertad para las fuentes de variación bajo el modelo de análisis para el diseño látice balanceado.

Fuentes de variación	Grados de libertad
Repeticiones	k
Tratamientos	$k^2 - 1$
Error	$k(k^2 - 1)$
Bloques ajustados	$K^2 - 1$
Error intrabloque	$(k - 1)(k^2 - 1)$
Total	$k^3 + k^2 - 1$

$$U = (Eb - Ec)/(Eb k^2) = (0,03655 - 0,01590)/(0,03655 \times 9)$$

$$U = 0,02065/0,32895 = 0,062775$$

$$\text{Error efectivo} = Ec (1 + (k U)) = 0,01590 \times (1 + (3 \times 0,062775)) = 0,01889$$

$$\text{Eficiencia} = CME/\text{Error efectivo} \times 100 = 0,02278/0,01889 \times 100 = 120,5\%$$

Tabla 52. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental látice balanceado 3x3, en la selección de genotipos por la variable altura promedio por planta a los 36 meses de edad del cultivo.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	FC	Pr>F
Repeticiones	3	0,01598733	0,00532	0,23	0,871
Tratamientos	8	0,66483939	0,08310	3,65	0,006
Error	24	0,54683417	0,02278		
Bloques ajustados	8	(0,29249)	0,03655		
Error intrabloque	16	(0,2544)	0,01590		
Total	35,0	1,22766086			

La eficiencia estimada en 120,5% significa que el diseño en látice aplicado tiene un error experimental menor en un 20,5% que un diseño de bloques completos al azar con cuatro bloques.

el factor de ajuste (U), para corregir cada uno de los promedios de la altura de las plantas de los tratamientos (Tabla 53), como se describe a continuación y de acuerdo con lo indicado en la Figura 14:

Con esta eficiencia y dado que el análisis de varianza (Tabla 52) muestra efecto de tratamientos, un cuadrado medio de bloques ajustados (Eb) mayor, descriptivamente, que el cuadrado medio correspondiente al error intra-bloque (Ec), se requiere aplicar

- ♦ Para cada tratamiento se suma el total de las alturas registradas (valor T de la Tabla 53),
- ♦ Se toman los totales de los bloques de cada repetición donde se encuentre

Bloque	Repetición 1			Totales	Bloque	Repetición 2			Totales
1	1	2	3	5,222	4	1	4	7	4,005
	1,798	1,635	1,789			1,340	1,344	1,321	
2	4	5	6	4,559	5	2	5	8	4,568
	1,730	1,185	1,644			1,825	1,285	1,458	
3	7	8	9	4,255	6	3	6	9	5,022
	1,131	1,526	1,598			1,762	1,721	1,539	
Bloque	Repetición 3			Totales	Bloque	Repetición 4			Totales
7	1	5	9	4,25	10	1	6	8	4,564
	1,621	1,326	1,303			1,603	1,512	1,449	
8	2	6	7	4,994	11	2	4	9	4,45
	1,598	1,780	1,616			1,480	1,526	1,444	
9	3	4	8	4,401	12	3	5	7	4,554
	1,576	1,512	1,313			1,725	1,222	1,607	

Figura 14. Valores registrados de altura por planta, de acuerdo con el diseño experimental registrado en la Figura 13.

el tratamiento (valor B de la Tabla 53). Por ejemplo, para el tratamiento 9, sería 17,977

- ♦ Se obtiene $W = k T - (k + 1) B + G$, donde G es la sumatoria de todos los valores de la variable registrada, que para este ejemplo es 54,844
- ♦ Luego, se determina el total ajustado (TA) para cada tratamiento como $T + (U \times W)$, donde U es el valor de ajuste (0,062775).

- ♦ El total ajustado de cada tratamiento se divide por $k + 1$, en este caso por 4 y esta estimación corresponde al promedio corregido (Tablas 53 y 54).

La identificación de los genotipos con menor promedio de altura de la planta (Tabla 54), se hace de acuerdo con el valor de diferencia mínima significativa de 0,2061, al 5%; para ello, se obtiene con cada promedio corregido, la diferencia con cada uno de los demás promedios corregidos; si dicha diferencia es superior

Tabla 53. Estimaciones para obtener el promedio corregido de altura por planta, para cada genotipo evaluado.

Tratamiento (Genotipo)	T	B	W	TA	Promedio corregido
1	6,362	18,041	1,766	6,473	1,61
2	6,538	19,234	-2,478	6,382	1,59
3	6,852	19,199	-1,396	6,764	1,69
4	6,112	17,415	3,52	6,333	1,58
5	5,018	17,931	-1,826	4,903	1,22
6	6,657	19,139	-1,741	6,548	1,63
7	5,675	17,808	0,637	5,715	1,42
8	5,746	17,788	0,93	5,804	1,45
9	5,884	17,977	0,588	5,921	1,48

Tabla 54. Promedio y coeficiente de variación (%), para la producción acumulada (kilogramos de café cereza), de cuatro años productivos en diez plantas (parcela efectiva), para los genotipos evaluados.

Tratamiento (Genotipo)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio corregido
1	1,59	11,87	1,61
2	1,63	8,76	1,59
3	1,71	5,55	1,69
4	1,53	10,34	1,58
5	1,25	5,03	1,22
6	1,66	6,96	1,63
7	1,42	16,62	1,42
8	1,44	6,21	1,45
9	1,47	8,75	1,48

a 0,2061, significa que los dos promedios son diferentes, a favor del que tenga el menor promedio, para el caso de esta investigación.

El testigo en este experimento es el tratamiento 3 y las diferencias del promedio corregido de cada uno de los demás tratamientos (genotipo), con respecto al promedio corregido del testigo son: 0,08 para el genotipo 1 (tratamiento 1); 0,1 para el genotipo 2; 0,11 para el genotipo 4; 0,47 para el genotipo 5; 0,06 para el genotipo 6; 0,27 para el genotipo 7; 0,24 para el genotipo 8; y 0,28 para el genotipo 9. Aquellas diferencias mayores de 0,2061, corresponden a los genotipos 5, 7, 8 y 9.

En conclusión, los genotipos seleccionados por la característica menor altura, con respecto al testigo, son el 5, 7, 8 y 9, una vez corregido el promedio por el efecto de competencia.

Ejemplo No. 2

Con el objetivo de seleccionar los genotipos más productivos de 48 materiales resistentes a la roya de cafeto, teniendo como referencia la variedad Caturra (testigo), ellos fueron evaluados bajo el diseño experimental látice balanceado 7x7 (48 genotipos más el testigo), con ocho repeticiones.

El primer paso para aplicar este diseño, después de seleccionar el área experimental (campo), es asignar aleatoriamente el número del tratamiento a los genotipos y testigo, para luego disponer

la distribución de ellos en el campo, tanto en las repeticiones y en los bloques, de acuerdo con lo ilustrado en la Figura 15. La instalación del experimento tuvo como factor de bloqueo, a través de las repeticiones, el gradiente de fertilización, factor importante a separar del error experimental, en el caso de producción. En cada repetición y bloque (Figura 15), la parcela efectiva estuvo conformada por diez plantas; durante el desarrollo del experimento, desde siembra hasta cuatro años de producción, se hizo el manejo agronómico correspondiente, llevando registros de la incidencia por roya (variable complementaria) y de producción en café cereza de la parcela efectiva. La variable de respuesta fue el acumulado de cuatro años de producción de café cereza de cada parcela efectiva.

Dado que la eficiencia es menor de 105%, no hay que aplicar el valor de ajuste para corregir el promedio de los genotipos, es decir, no hay competencia entre los materiales con la variable producción, para las condiciones de este experimento, en el cual se separó del error, el gradiente de fertilización (efecto de repeticiones), evidenciando efecto de los genotipos, con una confiabilidad mayor del 95% (Tabla 55).

Ante estos resultados, se aplicó la prueba de Dunnett, con los promedios sin corregir, al 5%, para identificar los genotipos con mayor producción con respecto al genotipo 28 (testigo absoluto), dando como resultado la selección de 14 genotipos (Tabla 56), cumpliéndose así el objetivo de la investigación.

Bloque	Repetición 1						
1	1	2	3	4	5	6	7
2	8	9	10	11	12	13	14
3	15	16	17	18	19	20	21
4	22	23	24	25	26	27	28
5	29	30	31	32	33	34	35
6	36	37	38	39	40	41	42
7	43	44	45	46	47	48	49

Bloque	Repetición 2						
8	1	8	15	22	29	36	43
9	2	9	16	23	30	37	44
10	3	10	17	24	31	38	45
11	4	11	18	25	32	39	46
12	5	12	19	26	33	40	47
13	6	13	20	27	34	41	48
14	7	14	21	28	35	42	49

Bloque	Repetición 3						
15	1	9	17	25	33	41	49
16	43	2	10	18	26	34	42
17	36	44	3	11	19	27	35
18	29	37	45	4	12	20	28
19	22	30	38	46	5	13	21
20	15	23	31	39	47	6	14
21	8	16	24	32	40	48	7

Bloque	Repetición 4						
22	1	37	24	11	47	34	21
23	15	2	38	25	12	48	35
24	29	16	3	39	26	13	49
25	43	60	17	4	40	27	14
26	8	44	31	18	5	41	28
27	22	9	45	32	19	6	42
28	36	23	10	46	33	20	7

Bloque	Repetición 5						
29	1	30	10	39	19	48	28
30	22	2	31	11	40	20	49
31	43	23	3	32	12	21	21
32	15	44	24	4	33	13	42
33	36	16	45	25	5	34	14
34	8	37	17	46	26	6	35
35	29	9	38	18	47	27	7

Bloque	Repetición 6						
36	1	23	45	18	40	13	35
37	29	2	24	46	19	41	14
38	8	30	3	25	47	20	42
39	36	9	31	4	26	48	21
40	15	37	10	32	5	27	49
41	43	16	38	11	33	6	28
42	22	44	17	39	12	34	7

Bloque	Repetición 7						
43	1	16	31	46	12	27	42
44	36	2	17	32	47	13	28
45	22	37	3	18	33	48	14
46	8	23	38	4	19	34	49
47	43	9	24	39	5	20	35
48	29	44	10	25	40	6	21
49	15	30	45	11	26	41	7

Bloque	Repetición 8						
50	1	44	38	32	26	20	14
51	8	2	45	39	33	27	21
52	15	9	3	46	40	34	28
53	22	16	10	4	47	41	35
54	29	23	17	11	5	48	12
55	36	30	24	18	12	6	49
56	43	37	31	25	19	13	7

Figura 15.

Asignación de los tratamientos, en cada repetición y bloque para la evaluación de 49 tratamientos bajo del diseño experimental en látice balanceado 7x7. Tomado de Cochran y Cox (1990).



Tabla 55. Resumen del análisis de varianza, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental látice balanceado 7x7 en la evaluación genotipos resistentes a la roya del café, con la variable producción acumulada (kilogramos de café cereza), de cuatro años productivos en diez plantas (parcela efectiva).

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	FC	Pr > F
Repeticiones	7	11.826,86	1.689,55	54,92	<0,0001
Genotipos	48	43.833,23	913,19	29,68	<0,0001
Error	336	10.337,58	30,76		
Bloques ajustados	48	(1.838,13)	38,29		
Error intrabloque	288	(8.499,45)	29,51		
Total	391	65.997,67			

Tabla 56. Promedio y coeficiente de variación (%), para la producción acumulada (kilogramos de café cereza), de cuatro años productivos en diez plantas (parcela efectiva), para los genotipos evaluados.

Genotipo	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Genotipo	Promedio	Coefficiente de variación (%)
1	67,1	21,1	25	63,7	17,6
2	65,8	13,7	26	75,3*	8,3
3	43,9	1,6	27	63,1	18,5
4	59,3	4,3	28	58,8	5,1
5	62,1	3,8	29	63,8	16,2
6	57,1	2,8	30	72,9*	7,2
7	59,3	2,5	31	50,4	11,4
8	43,2	8,8	32	77,0*	5,5
9	38,8	5,7	33	72,9*	15,6
10	51,5	24,3	34	67,1	18,2
11	46,8	6,3	35	72,8*	18,8
12	48,2	9,8	36	62,4	17,5
13	53,5	8,4	37	75,3*	12,7
14	66,1	17,4	38	74,2*	4,7
15	52,6	9,8	39	37,4	10,6
16	56,6	11,9	40	64,5	13,7
17	60,1	25,8	41	76,9*	19,4
18	53,1	26,4	42	70,9*	5,0
19	68,4*	12,7	43	50,5	7,3
20	53,8	5,1	44	63,2	13,8
21	54,5	0,7	45	80,7*	14,6
22	59,1	8,7	46	80,3*	1,8
23	52,5	3,4	47	70,2*	11,1
24	64,1	14,0	48	69,0*	1,3
			49	61,0	2,1

* Promedio mayor al promedio del testigo (genotipo 28), según prueba de Dunnett al 5%

PARA RECORDAR...

De acuerdo con el objetivo y pregunta de investigación, seleccionar la variable de respuesta y con ella definir la unidad experimental o parcela efectiva, según sea el caso.

El planteamiento de la hipótesis debe incluir la variable de respuesta.

Determinar el número de unidades experimentales o bloques, con los siguientes criterios: varianza asociada a la variable de respuesta registrada en experimentos previos; diferencia mínima aceptable, confiabilidad de los resultados, y nivel de significación.

Estos tres últimos criterios son definidos o establecidos por el investigador.

De la experiencia en la aplicación e interpretación del diseño de experimentos en investigaciones de tipo explicativo, se recomienda tener presente en la planeación los siguientes aspectos:

Selección del diseño experimental, de acuerdo con lo requerido por el investigador y su conocimiento sobre la variable de respuesta, variables no controlables y variables complementarias.

Fechas de muestreo o de medición, definiendo si para cada fecha aplicaría el análisis de varianza, bajo del modelo de análisis para el diseño experimental elegido o si con las fechas de muestreo, se obtiene la variable de respuesta (tasa) y los criterios con los cuales ella se obtendría.

PARA RECORDAR...

En la instalación del experimento:

- ♦ Hacer el mapa de campo del área experimental, con la asignación aleatoria de los tratamientos a las unidades o parcelas experimentales, de acuerdo con el diseño experimental definido.
- ♦ Llevar el registro de la información planeado.
- ♦ Hacer análisis parciales de la información, para detectar posibles errores en la toma de información o si es del caso y lo amerita, suspender la investigación, con lo cual se ahorraría tiempo y dinero.

Al finalizar la investigación:

- ♦ Hacer el análisis de acuerdo con el diseño planeado e instalado en el campo, es decir, si en el documento de la propuesta de investigación quedó un diseño completamente aleatorio y en el campo el diseño instalado fue bloques completos al azar, el análisis de varianza debe hacerse para el diseño de bloques completos al azar. No tiene ninguna confiabilidad estadística datos analizados bajo un modelo de análisis diferente al desarrollado en el campo o laboratorio.
- ♦ Cuando el análisis de varianza no muestra efecto de tratamientos y la probabilidad tipo II es mayor del 20%, quiere decir que hay incertidumbre en la decisión con respecto a la hipótesis nula del estadístico de prueba F, por lo tanto, se debe revisar si hubo fallas en el control experimental o si el número de unidades experimentales fue insuficiente y con estos elementos de juicio tomar la decisión de repetir o no el experimento.
- ♦ Cuando el análisis de varianza muestra efecto de tratamientos y la varianza experimental y la confiabilidad es mayor y menor respectivamente, que las establecidas para la determinación del número de unidades experimentales, queda bajo la responsabilidad del investigador dar por concluida o no la investigación.
- ♦ Se recomienda entregar resultados de investigación con una confiabilidad mayor del 80%.

Literatura citada

- Ackoff, R. L. (2002). *El Arte de resolver problemas* (C. A. García, Trad.). Editorial Limusa.
- Cochran, W. (1980). *Técnicas de muestreo*. Continental S.A.
- Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1990). *Diseños experimentales (2a. ed.)*. Trillas.
- Dankhe Gordon L. (1986). *Investigación y comunicación*. Mc Graw Hill. Madrid (España).
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (1998). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2005). *Design and Analysis of Experiments: Advanced Experimental Design (Volume 2)*. John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/0471709948
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C., Neter, J., & Li, W. (1996). *Applied linear statistical models*. McGraw-Hill Irwin.
- Scheaffer, R. L., Medenhall, W., & Ott, L. (1986). *Elementos de muestreo* (N. Grepe, Ed.; G. Rendón & J. R. Gómez, Trads.). Grupo Editorial Iberoamericana.
- Selltiz, C., Wrightsman, L. S., & Cook, S. W. (1976). *Métodos de investigación en las relaciones sociales (3a ed.)*. Ediciones Rialp.
- Vélez, J.C., Montoya, E.C., & Oliveros, C.E. (1999). Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual de café. Chinchiná (Colombia). Boletín Técnico Cenicafé, 21,.1-91. <http://hdl.handle.net/10778/593>

