FREDDY GAVILÁNEZ LUNA

DISEÑOS
y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS para EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS



DIAZ DE SANTOS

DISEÑOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

FREDDY GAVILÁNEZ LUNA

DISEÑOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA EXPERIMENTOS AGRÍCOLAS

DIAZ DE SANTOS

Madrid • Buenos Aires • México • Bogotá

© Freddy Gavilanez Luna, 2021 (Versión papel)
© Freddy Gavilanez Luna, 2021 (Versión electronica)

Reservados todos los derechos.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley ,cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (art.270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto de los citados derechos.

Ediciones Díaz de Santos
Email:ediciones@editdiazdesantos.com
www.editdiazdesantos.com

ISBN: 978-84-9052-350-6 (Libro electrónico)
ISBN: 978-84-9052-319-3 (Libro en papel)

Dedicado a mi esposa Betty y a mis amados hijos,
Samantha y Freddy.

A mis alumnos de grado y posgrado.

ÍNDICE

Dedicatoria ..... **V**

Prólogo ..... **IX**

Capítulo 1. Conceptualizaciones del diseño experimental 1

Capítulo 2. Muestra estadística 31

Capítulo 3. Análisis de varianza y sus condiciones complementarias 53

Capítulo 4. Pruebas estadísticas para el análisis de una y de dos muestras 75

Capítulo 5. Diseño completamente aleatorio y condiciones para la funcionalidad del análisis de varianza 115

Capítulo 6. Pruebas de comparación de medias 165

Capítulo 7. Experimentos unifactoriales con bloqueo 199

Capítulo 8. Experimentos con más de un factor de estudio 261

Capítulo 9. Experimentos factoriales con diseños modificados 315

Capítulo 10. Alternativas fundamentadas en el análisis de varianza 383

Capítulo 11. Modelos de regresión 421

Capítulo 12. Regresión de los experimentos 489

Capítulo 13. Rentabilidad de los tratamientos experimentales 507

Capítulo 14. Pruebas de distribución libre 523

Capítulo 15. Optimización experimental 561

Capítulo 16. Evaluación sensorial 603

Bibliografía 629

ANEXOS 631

PRÓLOGO

Desde la era del periodo neolítico la agricultura ha venido sufriendo cambios cada vez más exigentes debido al crecimiento y desarrollo de las sociedades. En la Edad Media los adelantos por hacer más eficiente esta actividad han sido evidentes. Ya sea con el uso del buey y de ciertos aperos, la agricultura estableció la conversión del hombre desde un estilo de vida nómada a un estilo más sedentario, con la obligación ya no sólo de ser un cosechador sino también un productor de sus propios alimentos. Con la aparición del tractor en el siglo XIX, en consonancia con la era industrial y tratando de responder a una explosión demográfica exigente, la agricultura ha realizado un salto vertiginoso en cuanto a sus niveles de productividad. Sin embargo, dado que la frontera agrícola no puede ni debe crecer al mismo ritmo de la población, además de que los suelos cultivados continuamente vienen sufriendo severos problemas de erosión en cuanto a su fertilidad y la agricultura en general arrastra importantes problemas de contaminación, se crea la necesidad de inventar alternativas de cultivo mucho más eficientes. En la búsqueda de esta eficiencia es cuando se da origen al diseño experimental agrícola, allá por el año 1919, en la *Rothamsted Experimental Station* de Inglaterra de la mano de su pionero, el científico inglés Ronald Aylmer Fisher.

El diseño de experimentos, ampliamente difundido en prácticamente todas las ciencias de la actualidad, se ha constituido en una de las herramientas fundamentales del desarrollo agrícola. Además de ser la vía para lograr el mejoramiento productivo de un cultivo, es un elemento importante para llevar a cabo una agricultura sostenible y a la vez sustentable, que haga posible mantener a todo un contingente de seres humanos que crece de forma exponencial.

La agronomía, una ciencia que es la encargada de darle las alternativas tecnológicas a la agricultura, está muy estrecha e inherentemente unida al diseño experimental; de hecho, gran parte de la fundamentación científica del cultivo de plantas prácticamente se deduce de una adecuada planificación experimental. Es así como gracias al diseño experimental hoy contamos con especies vegetales más resistentes a las plagas, variedades e híbridos de mayor productividad, diversos agroquímicos con sus respectivas dosis técnicamente probadas, distancias de siembra de cultivos más o menos adecuadas, manejo de la nutrición vegetal relativamente apropiada y demás labores agrícolas, cuyo aspecto técnico fue establecido por éste. No obstante, la exigencia pertinaz de que continuamente el proceso agro-productivo mejore, hacen que las técnicas experimentales no pierdan vigencia y más bien se modifiquen para este propósito.

Como profesor de Diseño Experimental de una universidad que fue concebida para encargarse básicamente del ámbito agropecuario y en consecuencia a ese espíritu académico de difundir el conocimiento no sólo a ese grupo de estudiantes que se forman en sus aulas, sino también a todo aquel profesional, técnico o investigador que está relacionado directa o indirectamente con el agro, he dedicado un tiempo a escribir este texto. Una obra que ha sido realizada con toda la dedicación y tratando de plasmar el mayor fundamento práctico, teórico y científico del diseño experimental; para que sirva de guía en la búsqueda de las mejores alternativas, eficientes y rentables, las cuales queden finalmente

a disposición de nuestros agricultores. Una obra que podrá tener un precio económico, pero en lo personal, nada comparable con el tiempo invaluable e irreversible que es aquel tiempo de estar una tarde, en un fin de semana, en un pequeño parque de mi pueblo con mi esposa y mis dos hijos. Una obra que está dedicada a mi querida Universidad, en donde me he formado profesionalmente y a la cual con esto trato de retribuirle lo que me ha brindado. Una obra que fue pensada y desarrollada en honor a todos esos alumnos agrarios, tanto del tercer como del cuarto nivel, algunos de los cuales orgullosamente han sido mis alumnos, con el propósito de que tengan una humilde fuente de consulta no sólo para su periplo como estudiantes, sino también como profesionales agrónomos encargados de mejorar nuestra agricultura ante un mundo que exige cada vez más alimentos.

En esta primera edición se ha tratado de cubrir los diferentes aspectos del diseño experimental. Se inicia en el Capítulo 1 haciendo una explicación conceptual de los tipos de investigación, así como definiendo la mayoría de términos que se utilizan en esta rama científica. Seguidamente, en el Capítulo 2 se detalla parcialmente la teoría muestral, resaltando los tamaños muestrales para estudios descriptivos y para los estudios experimentales.

En el Capítulo 3 se han tratado de detallar todos los fundamentos del análisis de varianza, herramienta estadística fundamental dentro de los experimentos. Además, se han descrito en forma rápida ciertas características de los tres tipos de distribución de variables que comúnmente encontramos en los experimentos agrícolas. Subsiguientemente, en el Capítulo 4 se describen las herramientas estadísticas para evaluar experimentos con uno y dos tratamientos (una y dos muestras) mediante dos de las principales pruebas paramétricas, tales como la prueba de Z y la t de Student.

El Capítulo 5 está compuesto básicamente de dos temas, el primero tiene que ver con todo lo relacionado al diseño completamente al azar y el segundo con las condiciones de funcionalidad del análisis de varianza y demás pruebas de la estadística paramétrica, de allí que se indiquen los procedimientos para valorar la normalidad, homocedasticidad e independencia de los datos a través de los residuos. Asimismo, algunas de las pruebas de comparación de medias, sean bajo el criterio *a priori* o *a posteriori*, se detallan en el Capítulo 6.

Todo lo que corresponde a los diseños experimentales de campo se indica en el Capítulo 7, exponiendo lo concerniente al diseño de bloques completos al azar, al diseño en cuadro latino, al diseño en cuadro grecolatino y al diseño en látice simple.

Los Capítulos 8 y 9 tratan sobre los experimentos factoriales de dos y tres factores, asimétricos y simétricos. En estos capítulos también se incluyen los factoriales modificados tales como el de arreglo en parcelas divididas, parcelas subdivididas, los experimentos en franjas, los factoriales con efecto confundido y los experimentos replicados. Seguido, en el Capítulo 10 se exponen dos herramientas estadísticas basadas en el análisis de varianza para variables de respuesta relacionadas y corrección de datos por covariables, tales como el análisis de varianza multivariado y el análisis de covarianza, respectivamente.

En los Capítulos 11 y 12 se detallan temas relacionados a la regresión lineal, no lineal, simple y múltiple, así como la información respectiva sobre el uso de la regresión en los experimentos. La valoración económica de los tratamientos experimentales, uno de los temas más importantes que rigen para casi toda investigación experimental agrícola, es lo que se expone en el Capítulo 13, resaltando las metodologías que en su momento fueron propuestas por el Centro Internacional de Maíz y Trigo (CIMMYT).

En el Capítulo 14 se han compendiado algunas de las pruebas estadísticas no paramétricas que se utilizan con datos experimentales que no cumplen con los criterios de normalidad, homocedasticidad e independencia, llamadas también de distribución libre. Se han

considerado pruebas análogas a las tradicionales paramétricas, describiendo aquellas que se utilizan para una, dos y más muestras, con escalas que al menos sean de tipo ordinal.

Asimismo, en el Capítulo 15 se exponen metodologías de optimización experimental, que si bien son utilizadas a nivel industrial, también podrían ser utilizadas en el ámbito agropecuario para mejorarlo. Entre estas alternativas están los experimentos factoriales 2^K, el diseño robusto y la metodología de superficie de respuesta. Destacable en ésta última, el uso del diseño de tratamientos conocido como central compuesto, arreglo factorial que bien puede ser utilizado de forma eficaz en los ensayos relacionados a fertilizantes.

Finalmente, y en consideración de aquellos estudiantes que están vinculados con la ingeniería de los alimentos, se expone en el Capítulo 16 un tema relacionado a las pruebas sensoriales en los alimentos, no con el argumento completo como se lo haría en un texto sobre esta ciencia dado que la característica sensorial de un producto es compleja y decisiva al momento de la difusión del mismo, pero si haciendo una exposición de aspectos importantes de la evaluación sensorial, con énfasis en las pruebas que están relacionadas con el consumidor.

Como lo he mencionado al inicio, en esta obra he tratado de conjugar el criterio teórico con el práctico a través del componente conceptual de cada tema y con la consiguiente explicación de ejemplos, cuya mayoría han sido casos reales tomados de varios estudios de tesis de grado y de ensayos experimentales particulares que al final coadyuven para que el entendimiento de esta herramienta del método científico sea plenamente receptado. Queda a disposición este modesto texto que, a pesar de tener una fuerte base intuitiva, aspiro que lo que se ha descrito sea de gran utilidad, especialmente a toda esa juventud involucrada con el sector agrícola que llevan ese brío y ansias por mejorar cada día más nuestra agricultura.

Freddy Gavilánez Luna

I

CONCEPTUALIZACIONES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Introducción

El diseño de experimentos es el punto de llegada del método de investigación científica. Existen diferentes tipos de investigación que tienen sus límites conectados. En donde termina el uno empieza el otro, interrelacionándose para explicar un fenómeno de manera integral. El método experimental, una herramienta que explica un fenómeno desde sus causas hasta sus correspondientes efectos, utiliza infinidad de definiciones y principios que todo investigador debe conocer y entender. Los principales criterios conceptuales son los que se detallan en este capítulo, como parte introductoria al método experimental en particular y al diseño de experimentos en general.

TIPOS DE INVESTIGACIÓN

Investigación científica

El método científico, dado su carácter analítico, empírico y más que todo sistemático, hace uso de diversas formas procedimentales de investigación para llegar al descubrimiento de una verdad que es relativa en casi todos los problemas científicos. En este sentido, se han descrito varios tipos de investigación cuya clasificación todavía se discute por la diversidad de criterios que existen al respecto. Sin embargo, la primera clasificación de la investigación científica la divide en dos formas generales: la investigación pura o básica y la investigación aplicada.

Las investigaciones básicas permiten obtener las teorías, leyes o principios que rigen el comportamiento de un fenómeno. Un ejemplo de investigación de este caso es lo que realizó Newton para deducir sus tres leyes del movimiento o de la fuerza. Alrededor de los resultados de las investigaciones básicas se ubican las diversas investigaciones aplicadas, que son las que hacen uso de las teorías que ofrecen las primeras para utilizarlas en situaciones específicas con el fin de solucionar un determinado problema. La investigación aplicada es la que comúnmente se realiza en la práctica, de allí que exista una diversidad de opiniones para su clasificación. Un enfoque pragmático de clasificación de esta última es el que considera a la dimensión del tiempo como elemento clasificatorio, por ello tenemos una primera clasificación definiéndolas como investigación histórica (estudia información del pasado), investigación descriptiva (estudia el presente) e investigación experimental (estudia hacia el futuro).

Investigación histórica

La investigación histórica es aquella que hace uso de sucesos pasados, basada en documentos que deben ser cuidadosamente analizados en cuanto a su veracidad para que los resultados tengan el rigor necesario. Estas fuentes documentales pueden ser de origen primario y secundario. En este tipo de investigación se ubican también los estudios de modalidad predictiva, que basados en hechos pasados se llega a la obtención de modelos matemáticos que permitirán la realización de pronósticos sobre el comportamiento de un fenómeno. A la investigación histórica también se la conoce como *investigación bibliográfica*.

Investigación descriptiva

La investigación descriptiva estudia la condición actual de un individuo, comunidad o algún fenómeno específico, realizando una descripción exacta y objetiva de sus principales características. Permite conocer cómo es y en qué estado se encuentra el fenómeno motivo de estudio, mediante sus principales atributos cuantitativos y/o cualitativos. En esta definición también se ubican los *Estudios Exploratorios*[1], que tienen como propósito hacer una descripción aproximada de un fenómeno desconocido de una manera superficial del cual se tiene escasa o ninguna información. Estos estudios exploratorios propician investigaciones subsecuentes, de naturaleza descriptiva propiamente dicha y con mucha mayor certeza, que van a permitir identificar plenamente el fenómeno del cual no se tiene conocimiento. Los estudios exploratorios permiten formular la pregunta de investigación de manera más precisa y el planteamiento de una hipótesis en las investigaciones que se realicen posteriormente, ya que a nivel de exploración no se conoce al fenómeno estudiado, por lo tanto, será difícil entrar con este tipo de investigación planteando de lleno una hipótesis sobre algo desconocido. Entre las investigaciones descriptivas, también se ubican a los estudios de *Análisis Correlacional*, que involucra la medición de dos o más variables sobre la población de estudio, con el propósito de verificar si entre ellas existe algún tipo de relación.

Las investigaciones descriptivas pueden realizarse en dos modalidades. Una modalidad es en forma *Transeccional o Transversal*, en donde el fenómeno o situación se mide replicado en el espacio y por una sola vez. Un ejemplo para esta modalidad corresponde a un estudio de medición de metales pesados en las aguas de un río, tomando muestras en distintos puntos del mismo y por una única ocasión. Una segunda modalidad es la que se realiza en forma *Longitudinal*, en la cual un fenómeno o situación específica se mide en un mismo espacio (o punto), pero replicado en el tiempo. Un ejemplo de esta última modalidad podría ser el mismo estudio antes mencionado, pero con un solo punto de muestreo realizado a través del tiempo. Estas dos formas de evaluar un fenómeno pueden coexistir dentro de una misma investigación.

Los estudios descriptivos masivamente utilizan técnicas a base de encuestas, que por conveniencia deben ser estructuradas, además de ser validadas, de tal forma que permitan cuantificar una situación con la mayor objetividad posible. También se utilizan listas de chequeo (*check list*) que permiten definir una situación dada. En otros casos se mide una o varias características en forma cuantitativa, mediante técnicas rigurosas de laboratorio, que permitirán establecer en qué situación se encuentran un fenómeno o una característica de interés. Por ello, la investigación

[1] Las investigaciones que tienen característica exploratoria pueden estar presentes tanto en las de tipo descriptivo (consideradas como no experimentales) como en las experimentales. Pues su ocurrencia depende del nivel de profundidad o de evidencia previa existente, lo cual es común afrontar en los dos tipos de investigaciones mencionadas.

descriptiva puede basarse en el *diseño de encuesta* o en el *diseño observacional*, o utilizar ambas al mismo tiempo, dependiendo del ámbito del estudio.

Bajo el contexto indicado, las investigaciones descriptivas se desarrollan ya sea a partir de medir variables cualitativas y/o variables de característica cuantitativa. El planteamiento de las hipótesis de investigación en estudios descriptivos puede darse de forma relativa, tiene carácter opcional y no existe una obligación de su uso ya que es dependiente del conocimiento previo que el investigador tenga sobre el objeto de estudio; todo esto aun en las investigaciones que, siendo no experimentales, tienen cierta profundidad explicativa cuando a partir de las variables dependientes evaluadas se ha tratado de identificar las causas de sus ocurrencias.

Investigación experimental

La investigación experimental, en su concepción rigurosa, se la planifica para obtener resultados futuros. En este caso el investigador manipula una o más variables, que en una relación funcional es la variable independiente X, para observar y medir los efectos en una unidad experimental sobre la cual actúa dicha variable. Los efectos son los resultados que, en la misma relación funcional, representa a la variable dependiente Y. A diferencia de los tipos de investigación antes mencionados, en donde sólo se miden efectos, en la investigación experimental los efectos medidos son producto de la alteración o manipulación que realiza el investigador sobre la variable independiente. El ambiente bajo el cual se desarrolla una investigación experimental deberá ser extremamente controlado por el investigador, permitiendo que sólo la variable independiente X varíe.

La característica fundamental de las investigaciones experimentales es la validez interna que deben poseer y que se consigue con el control de la variabilidad que rodea al desarrollo de las mismas, mediante la abstracción de fuentes de ruido que son identificadas por el investigador; y con el control de la varianza que podrían ocasionar fuentes de variabilidad no identificadas, a través del principio fundamental de la aleatorización.

Generalmente toda investigación experimental se plantea alrededor de una hipótesis, la cual se establece a partir de alguna fundamentación teórica, empírica (dada por un experto) o a través de pruebas preliminares que ofrecen una visión de lo que podría ocurrir al manipular la variable independiente. Estos primeros experimentos de ubicación son de característica exploratoria, por ello es que no se puede admitir que una investigación se encasille únicamente dentro de una determinada clasificación.

Dado que en un estudio experimental es el investigador el que modifica una o más características del objeto de estudio, bajo este criterio de manipulación o ausencia de manipulación de variables, las investigaciones también se las clasifica de manera general en *investigación experimental* o *no experimental*. Dentro de esta última clasificación se ubican también las investigaciones históricas y descriptivas.

Existe también un tipo de clasificación intermedia entre la investigación experimental y no experimental que se conoce como *Investigación Cuasi-experimental*. Una investigación cuasi-experimental comparte, en términos prácticos, la misma concepción de la investigación experimental; pero es menos eficiente que ésta debido a que no se puede cumplir con uno de los tres principios básicos de la investigación experimental que corresponde a la aleatorización en la asignación de la variable independiente a cada unidad experimental. En estos tipos de investigación no existe un control de la varianza externa a la que están expuestas las unidades

experimentales, de allí que las conclusiones que se obtengan de este tipo de investigación tienen un mayor margen de error respecto de las que se obtienen de una investigación experimental. Un ejemplo de una investigación cuasi-experimental puede ser el estudio de tres variedades de maíz, cada una sembrada en localidades distintas. En este ejemplo la aleatorización no es completa, debido a que de una localidad sólo se obtendrán datos de una sola variedad; en consecuencia, no hay un control de la varianza que representa el suelo sobre el cual se desarrolla el cultivo.

En esta parte vale mencionar otro tipo de investigación en donde se analiza una relación de causa y efecto, en hechos ya ocurridos por factores o variables identificadas pero que no han sido manipuladas por el investigador. Bajo este criterio se ubica la *Investigación No Experimental Ex – Post - Facto*. Debido a que este tipo de investigación se encarga de medir efectos, ya sean de carácter retrospectivos o prospectivos utilizando información del pasado o del presente, respectivamente, se la conoce también como *Investigación Correlacional*. Un ejemplo de esta investigación puede ser el nivel de cadmio en un río y los casos de cáncer en la población que vive a los alrededores de dicho río.

Tanto la investigación descriptiva como la de carácter exploratoria, son las que mayoritariamente propician todo un ciclo de investigaciones subsecuentes y a partir de las cuales se presenta la necesidad de la investigación experimental que explique el fenómeno objeto de estudio. Por ejemplo, una valoración agro-socioeconómica de un cultivo va a permitir identificar si los bajos rendimientos están relacionados por problemas de un mal manejo de la fertilización; si existe este problema, el paso siguiente es proponer una nueva investigación de carácter experimental en donde se evalúen varias dosis de fertilizantes.

Con lo que se ha indicado, queda claro que atendiendo al criterio del nivel o profundidad de una investigación cualquiera, éstas se pueden dividir en investigaciones *exploratorias, descriptivas, correlacionales* y *explicativas*. En este orden, estos tipos de investigación se desarrollan en situaciones de simbiosis, lo que se obtiene de un estudio exploratorio le sirve a un estudio descriptivo; estos últimos resultados le servirán a los estudios correlacionales para establecer las relaciones entre las variables de interés. Finalmente, todo lo evaluado por estos tres tipos de investigación confluyen en los estudios explicativos, los cuales permitirán llegar a un nivel más profundo del conocimiento sobre un problema concreto, al poder establecer no sólo el efecto producido sino también la causa que lo ocasiona. Las investigaciones explicativas van mucho más allá que las exploratorias, descriptivas y correlacionales; son más estructuradas debido a que éstas, tal como su denominación lo indica, explican la causa de un fenómeno, la condición en la que se desarrolla este fenómeno y su relación con otra u otras variables de interés.

En forma general el investigador no se restringe a un sólo tipo de investigación, de forma consciente o a veces también en forma inconsciente, utiliza más de un tipo de investigación de tal manera que logra establecer la dimensión real de lo que quiere conocer sobre una problemática determinada.

De acuerdo a lo mencionado, si imparcialmente se considera el nivel de contacto con el objeto de estudio, todas las investigaciones pueden pertenecer ya sea a las de tipo experimental o a las no experimentales. Es justamente la investigación experimental en la que terminan convergiendo la mayoría de las investigaciones. El método de investigación experimental, que al fin y al cabo constituye también una investigación explicativa por el hecho de involucrar a la relación de causa –efecto, requiere de toda una planificación que deberá ser llevada a cabo bajo rigurosos controles y para lo cual se recurre a un diseño experimental.

EL MÉTODO EXPERIMENTAL

Cuando se ha desarrollado un producto nuevo, como por ejemplo algún tipo de herbicida, éste debe ser probado en diferentes dosis, de tal forma que se obtenga la más adecuada para el control eficaz de las malezas. Las dosis que se utilicen en la experiencia deberán tener un criterio respaldado en fuentes investigativas y bibliográficas relacionadas, que consideren la concentración del ingrediente activo. Luego de realizada la experiencia, el investigador ya podrá advertir qué dosis de tal herbicida es la más adecuada para adjuntarla a la etiqueta y que sea de aplicación general para los agricultores. El ejemplo práctico descrito en este párrafo hace tangible los dos métodos de razonamiento científico en los que reside la investigación experimental: el *Método Deductivo* y el *Método Inductivo*.

El método deductivo se hace presente cuando se parte de principios o de leyes generales bajo los cuales se desarrolla un fenómeno, las mismas que sirven para llegar a conclusiones sobre una situación concreta. En otras palabras, el razonamiento deductivo es aquel que va de lo general a lo particular. En el ejemplo mencionado, es justamente este razonamiento el que se aplica para seleccionar las dosis de prueba del herbicida, ya que dichas dosis no podrían ser seleccionadas sin revisar evaluaciones previas relacionadas e indicadas en la literatura; o en los casos exploratorios, sin hacer evaluaciones preliminares.

Por otro lado, el método inductivo se lo desarrolla cuando se estudian situaciones o fenómenos determinados, de los cuales se obtienen resultados que se pueden aplicar a toda la población involucrada. En este caso, el razonamiento inductivo va de lo específico a lo general. Este razonamiento también es aplicable al ejemplo con el cual se empezó este tema, ya que una vez que se establezca la dosis más adecuada de dicho herbicida, entonces se podrá hacer una recomendación de tal dosis para que la apliquen todos los agricultores que hagan uso del mencionado producto dentro de la zona de estudio.

El método experimental es la alternativa de investigación por excelencia, diseñado para producir conocimiento o resolver problemas específicos, mediante condiciones empíricas previa y voluntariamente alteradas con el propósito de observar respuestas que requiere conocer el investigador. Fue inicialmente difundido por Galileo Galilei (siglo XVI) como un método inductivo-experimental debido a que hace uso de un experimento debidamente planificado, con miras a comprobar alguna hipótesis establecida. El razonamiento inductivo que se utiliza en el método no puede desligarse del razonamiento deductivo previo, ya que la experiencia planificada necesita de criterios deductivos que eviten llegar a soluciones salidas de algún contexto lógico.

En el método experimental, en forma general, lo que se hace es estudiar los efectos que causan los cambios deliberados que se realizan en una situación dada de un fenómeno, haciendo uso de un adecuado diseño experimental y de eficientes herramientas estadísticas inferenciales, de tal manera que se puedan diferenciar en una forma real y objetiva dichos efectos.

La ciencia agropecuaria es una de las disciplinas que comúnmente recurre al método experimental en busca de lograr mayores rendimientos y rentabilidad, especialmente en los últimos tiempos en donde la globalización y la explosión demográfica cada vez hacen progresivas e insoslayables exigencias alimentarias. Esto ocasiona que el desarrollo de experimentos sea uno de los elementos más importantes de la investigación científica, que hace posible solucionar diferentes problemas agropecuarios dirigidos al aspecto de productividad. En este contexto, el método científico se vuelve fundamental en las investigaciones que tienen relación con las ciencias biológicas debido a la mayor variabilidad a la que se exponen los experimentos en estas áreas. Asimismo, algo que debe resaltarse por su importancia en la planificación experimental coherentemente diseñada es

la característica de sostenibilidad del ambiente, pues la eficiencia que se encuentra implícita en el manejo de los factores de prueba en la actividad agrícola contribuirá a dicha sostenibilidad.

Fases del método experimental

El método experimental no involucra una concepción holística de una de las alternativas que nos ofrece la investigación científica, más bien comprende una serie de etapas que están bien definidas y que, sinérgicamente cumplidas de forma objetiva y precisa, son fundamentales para que un experimento sea informativamente exitoso. Entre las principales fases que en forma lógica deben observarse y cumplirse para llevar a cabo un experimento están las siguientes:

Identificación del problema: el punto de partida para plantear cualquier tipo de investigación es la identificación de un problema real y recurrente que requiere solución. Estos problemas pueden estar relacionados a la falta de conocimiento o a una situación negativa particular, cuyos resultados de las investigaciones que se hayan desarrollado para solucionarlos generarán, ya sea una teoría o una aplicación práctica, respectivamente. Tratar de llevar a cabo un experimento sin definir el problema a solucionarse es como tomar una medicación sin saber qué pretendemos sanar en nuestro cuerpo. La formulación del problema es el que origina el tema de investigación.

Planteamiento de los objetivos: con la identificación y formulación del problema de investigación, además de haber revisado algunos antecedentes (si es que los hubiera) sobre la temática a investigar, consecuentemente se podrán deducir los objetivos experimentales que deberá tener la investigación. Los objetivos son el punto de llegada de una investigación, los cuales deben tener su contribución en el proceso dinámico o afianzador de la ciencia. Estos objetivos deben describirse de una forma clara, concisa y precisa; evitando vaguedades y/o ambigüedades, de tal manera que se evite confundir el propósito real del experimento.

Planteamiento de la hipótesis de investigación: debido a que se está tratando con un estudio basado en el método experimental, será necesario el planteamiento de una o más hipótesis de investigación. Esta hipótesis es la suposición del investigador respecto de la respuesta que espera suceda al final de la experiencia. Para plantear una hipótesis debe haber información preliminar de otras investigaciones similares que el investigador tiene que revisarla, caso contrario, si es un estudio que no tiene antecedentes (inédito) no será posible suponer los efectos y correspondientemente no podrá deducirse una hipótesis. No obstante, puede recurrirse a experimentos preliminares que permitan conjeturar dicha hipótesis, de allí que se mencione que todos los experimentos contienen una o más hipótesis. En este sentido, una hipótesis se deducirá a partir de toda una fundamentación teórico y/o práctica que trate sobre el tema a investigar. Al final, no nos olvidemos que una hipótesis es lo que impulsa a cualquier investigador para demostrar un resultado que viene a ser la conjugación entre la teoría y los hechos.

Selección de los tratamientos a evaluarse: el investigador deberá seleccionar cuidadosamente los tratamientos que van a ser evaluados, pues de esto dependerá en gran medida el éxito del experimento. Cuando sólo se está interesado en una variable independiente (o factor), el ensayo tendrá la característica de ser univariante o unifactorial; sin embargo, cuando se han identificado más de una variable independiente, el experimento tendrá la característica de ser factorial. En el primer caso, los niveles que se definan del factor corresponderá a los tratamientos; mientras que en el segundo caso, la combinación de niveles de los factores considerados serán los tratamientos. La selección se realizará de acuerdo al problema o fenómeno de estudio, a las diferencias que el investigador quiere encontrar, al tipo de experimento, a la época de estudio, y fundamentalmente, a la disposición de recursos económicos. De nada sirve seleccionar un sin número de tratamientos

que a la *postre* no contribuirán con los objetivos de la investigación, por el contrario, la harán ineficiente. La selección de los tratamientos también se fundamenta en un consecuente marco teórico y/o experiencias prácticas.

Selección del diseño experimental: el punto de partida para seleccionar un determinado diseño experimental es el ambiente en donde se va a realizar el experimento. Es necesario identificar las potenciales fuentes de variación secundarias que podrían afectar las respuestas que se obtengan al final de la experiencia, definiendo la necesidad de realizarlo en ambientes controlados (laboratorio) o en ambientes no controlados. En el caso de los experimentos agropecuarios y debido al rango de validez de las conclusiones, generalmente se realizan experimentos en ambientes no controlados (en el campo), cuyas respuestas son más reales que aquellas que provengan de experimentos que se realizan en ambientes controlados. La identificación de las potenciales fuentes de variación que pueden afectar un experimento se realiza tanto a nivel de espacio como de tiempo, de allí que los ensayos agrícolas realizados en medios no controlados (en el campo) se estructuran en bloques (control local) con el fin de que el efecto de fuentes de variabilidad que pueden ser por la heterogeneidad del suelo, pendientes, sombras y drenajes superficiales, sean deslindados del efecto de los tratamientos y circunscriptos únicamente a los bloques. En todo caso, el diseño experimental seleccionado deberá permitir separar las potenciales fuentes de variación secundarias (llamadas también de ruido) para que no tergiversen los resultados del experimento, consiguiendo de esta manera reducir el error experimental en general y el error tipo II (negación de un efecto real) en particular.

Algo que se debe indicar en este punto es lo correspondiente a todo lo que realmente involucra la concepción de diseño experimental. Si bien en todo el libro se hará mención con esa definición a las diferentes formas de distribución que se hacen de los tratamientos a las unidades experimentales (o viceversa), como es el caso de los completamente al azar, bloques al azar y cuadrado latino, el diseño experimental es la contextualización y conceptualización de toda la planificación con la cual se llevará a efecto un experimento. Bajo esta apreciación, el diseño experimental comprende desde la misma identificación del problema, que es el que establece los límites de éste, pasando por la verificación del área experimental y su ambiente, la definición de cuáles y cuántos serán los tratamientos, sus repeticiones, el tipo de distribución, las variables a medirse, el manejo del cultivo durante la experiencia, hasta el tipo de herramienta estadística a utilizarse. Por ello, un adecuado diseño experimental puede requerir la asesoría multidisciplinaria de varios profesionales relacionados al objeto de estudio.

Selección de la unidad experimental: la selección de la unidad experimental va a depender del objeto de estudio y de la afectación que pueda realizar el ambiente en donde se llevará a cabo el experimento. Para los experimentos de agronomía, una unidad de experimental puede estar constituida por una parcela (cultivos con pequeñas distancias de siembra) o por una sola planta (cultivos con grandes distancias de siembra); en el caso de animales, habrá que considerar el peso o el estado fisiológico de cada uno de ellos. La experiencia de otros experimentos similares es de gran valor para tomar una decisión. Por las características singulares que tienen los experimentos agrícolas, especialmente los realizados con cultivos de ciclo corto y en condiciones no controladas, cuya unidad experimental es una parcela, habrá que considerar un efecto que es único para esta área de investigación conocido como *efecto de borde*. El efecto de borde corresponde a las hileras de plantas y sus cabeceras que rodean al área desde donde se toman los datos de las diferentes variables de respuesta, todo lo cual se encuentra dentro de una misma parcela. A esta superficie dentro de la cual se miden las variables en cada parcela, comúnmente se la identifica como *área útil* o *parcela útil*.

Selección del número de repeticiones: las repeticiones de cada tratamiento que un experimento puede contener casi exclusivamente estará en función de la cantidad de recursos económicos con

que se cuente. Sin embargo, otra limitante fuerte y propia que tienen los experimentos agrícolas, que se realizan en el campo, es la variabilidad o heterogeneidad que el suelo manifiesta de manera progresiva cada vez que el área experimental se extiende. Bajo este contexto, si el número de repeticiones aumenta, también lo hace el experimento y la fuente de variación que es el suelo se hace cada vez más difícil de controlar. Además, existe variabilidad intrínseca entre unas mismas plantas que demandan un número de repeticiones elevado para poder detectar diferencias significativas entre tratamientos, de allí que los experimentos agrícolas estén sometidos a la llamada variabilidad combinada *genotipo versus ambiente*. No obstante, si se consideran estas condiciones y el grado de certidumbre que los datos revelan, el número de repeticiones deberá ser el suficiente como para obtener un mínimo de grados de libertad en el error experimental que le den la suficiente potencia a la inferencia deducida a partir de una prueba estadística, como es el caso del análisis de varianza. Un experimento sin repeticiones jamás permitirá valorar el error experimental, salvo la alternativa de tener uno con arreglo factorial en experimentos exploratorios, que tenga interacciones triples o más, cuyos efectos pueden acumularse en el error experimental y permitir una estimación aproximada de esta fuente de variación.

Es importante que el investigador conozca que, el hecho de tener un número relativamente elevado de repeticiones generando más allá de los suficientes grados de libertad del error experimental, no le asegura una mejor precisión. La relación entre el error experimental y las repeticiones no es lineal, ésta tiene tendencia potencial negativa; es decir, existe un cierto límite a partir de la curva en donde el aumento de repeticiones no causa ninguna disminución importante del error experimental. En este sentido, tener un número de repeticiones más allá del necesario sólo hará que se encarezca el ensayo y que la supuesta precisión sirva sólo para detectar efectos poco importantes en términos prácticos, que al final podrían inducir a tomar una decisión equivocada y muy riesgosa, dado que por antonomasia se estaría cometiendo el error tipo I de la estadística.

Selección de las variables a medirse: las variables de respuesta que se van a evaluar en un experimento deben estar en concordancia con el fenómeno o tema de estudio. Estas variables deben ser las necesarias para describir o explicar completamente el problema evaluado y a la vez permitir el cumplimiento de los objetivos previamente establecidos. Los instrumentos que se utilicen para la medición en lo posible deben ser únicos (un solo instrumento para medir una variable) y debidamente calibrados para evitar algún tipo de error. En este caso es importante considerar cómo es el comportamiento de la variable, ya que generalmente vamos a encontrar variables que se ajustan a la distribución normal y en la cual son aplicables las pruebas estadísticas paramétricas; y en otros casos, vamos a encontrar variables que tienen una relativa dispersión, que inevitablemente deben utilizar escalas ordinales y que no se ciñen a una distribución normal (muchas se ciñen a distribuciones binomiales y de Poisson), las mismas que requerirán de algún tipo de ajuste para estabilizar las varianzas, o de pruebas estadísticas no paramétricas.

Análisis de los datos e interpretación de los resultados: los datos obtenidos del experimento deben analizarse utilizando las herramientas estadísticas que estén acorde con el diseño experimental utilizado. Tal como se indicará más adelante, la primera herramienta estadística de uso general en los experimentos es el análisis de varianza, el cual es eficiente siempre que los datos cumplan con los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia; lo que hace que sea un requerimiento la comprobación de estos supuestos antes de aplicar este test o cualquier otra prueba estadística paramétrica. Posteriormente habrá que realizar una clasificación de los tratamientos a través de alguna prueba de comparación múltiple respecto de las medias. Finalmente, con los resultados deberá comprobarse la hipótesis y definirse la relación con los hechos previamente establecidos. Las conclusiones que se deduzcan luego del análisis deben tomarse con cierta reserva, aún si un resultado es estadísticamente significativo. Hay que tener

presente que, para lograr respuestas contundentes, un experimento debe ser replicado en el espacio y en el tiempo. No debe olvidarse que en los experimentos se trabajan con pequeñas muestras y no con poblaciones, por consiguiente, las conclusiones que se establezcan siempre tendrán una probabilidad latente de estar equivocadas.

Elaboración del informe de investigación: este informe debe ser organizado, completo, claro, legible y fácilmente entendible. Hay que indicar que no siempre los resultados pueden ser significativos. Si la hipótesis nula no se rechaza, esto no quiere decir que el experimento fracasó, por el contrario, este resultado puede confirmar la presencia de acciones ineficientes que facilitarían la toma de alguna decisión importante. Por ejemplo, si tuviéramos un ensayo en el cual se evalúan tres dosis de riego y la más alta corresponde a la que comúnmente se ha venido aplicando, en el caso de que no existan diferencias significativas entre estas dosis, es evidencia de que se ha estado derrochando recursos económicos en el riego. Sin embargo, en ciertos casos experimentales en donde no se obtuvieron diferencias significativas, existen múltiples situaciones que podrían haber contribuido a ello; entre éstas están el no cumplimiento de los principios de aleatoriedad, de bloqueo, de independencia o incluso de que los tratamientos fueron mal seleccionados y no permitieron discernir diferencias importantes entre ellos.

Algunas otras consideraciones relacionadas al método experimental

Cuando el investigador está en la fase de seleccionar el diseño experimental, los tratamientos, las repeticiones que requiere cada tratamiento y el tipo de análisis estadístico que debe realizar, aun conociendo sobre esta temática, siempre se tendrá un aporte si se recurre a la ayuda de personas expertas sobre este método de investigación científica. La selección de un adecuado diseño experimental reviste cierta complejidad respecto de ciertas condiciones de variabilidad, que a veces no son detectadas por la persona a cargo del estudio, pero sí lo hace un experto en esta área. Además, en el procedimiento estadístico de los datos, nada es concluyente; existen diferentes riesgos que sólo pueden reducirse si se seleccionan los criterios y herramientas estadísticas más idóneas.

En el caso de establecer las variables que se evaluarán como indicadoras de los efectos de los tratamientos, además de la ayuda de un estadístico, será necesario del aporte de personas que tengan conocimiento sobre el tema a investigar. Por ejemplo, si el experimento trata sobre métodos de encalado de suelos agrícolas, una gran ayuda se tendría en la asesoría de una persona experta sobre el tema como lo es un edafólogo; éste es el que podría hacer una recomendación acertada de las variables indicadoras que deberán medirse. En cualquier situación, las variables a medirse siempre tendrán que responder a los objetivos previamente establecidos y a la (s) hipótesis bajo la cual se realizó el ensayo.

Otro aspecto que debe de cuidarse para lograr que los resultados de un experimento tengan la confianza necesaria es el relacionado con la parte humana del investigador. En la obtención de los datos debe procederse con sumo cuidado, si existen datos salidos de un margen de variación intuitivamente normal, deberán en lo posible volver a medirse para descartar algún error de medición. Asimismo, mientras se utilicen criterios y herramientas objetivas en la medición de variables, las conclusiones tendrán una mayor validez. Si la medición insoslayablemente debe realizarse cualitativamente, es un menester que quién la realice tenga la experiencia necesaria para evitar, en la medida de lo posible, resultados subjetivos y sesgados que harán que todo el experimento sea un fiasco.

DISEÑO EXPERIMENTAL Y LOS EXPERIMENTOS

El mejoramiento de una condición específica requiere de modificaciones consecuentes que permitan lograr cambios sustanciales e importantes respecto de la situación actual, en este sentido se recurre a un experimento, de tal forma que modificando la causa negativa debidamente identificada se logren cambios satisfactorios. Por ejemplo, si el problema radica en el uso ineficiente de los fertilizantes nitrogenados en un cultivo determinado, podemos planificar un experimento en donde se utilicen varias dosis y/o frecuencias de aplicación de estos fertilizantes, con el fin de establecer los niveles adecuados de estos factores

Las herramientas inherentes a los diseños experimentales son las pruebas estadísticas, si se obvian éstas, el experimento solo no tendrá aquel criterio científico de objetividad. Los resultados que se extraigan de un experimento jamás podrán ser iguales, entonces si nos basamos únicamente en la diferencia numérica de los datos, se hará uso de criterios netamente subjetivos que invalidarán la experiencia. No es lo mismo una diferencia basada en los números que una diferencia establecida por pruebas estadísticas; en estas últimas se valora la casualidad de un efecto (error experimental) y se determina la participación real de los cambios introducidos, con el propósito de establecer diferencias significativas entre las distintas alternativas que se evalúan en el experimento.

En el sentido conceptual y práctico sobre los experimentos, estos pueden definirse como la acción o conjunto de acciones, llamados tratamientos[2], que modifican una determinada situación o fenómeno, con el propósito de medir los efectos correspondientes; los cuales deben estar contenidos en una hipótesis que empíricamente se comprueba. Todo experimento, con el debido rigor científico, aporta a la formulación o al refuerzo de una teoría cuya validez general estará determinada por la réplica del experimento.

Tal como ya se lo mencionó, un experimento se plantea para producir conocimiento o para solucionar un problema específico. Si el experimento se lo ha diseñado para producir conocimiento, éste generalmente se lo realiza a nivel de laboratorio, bajo estrictas condiciones controladas; mientras que, si el propósito es solucionar un problema, se busca que el experimento se desarrolle dentro de las condiciones que rigen a la realidad de dicho problema. Un ejemplo para el primer caso puede ser el interés de conocer con cuánto nitrógeno el cultivo de maíz ofrece los mayores rendimientos, para esto se tendrá que utilizar macetas con suelo homogéneo, inerte y sin presencia de dicho elemento. Si se toma este mismo ejemplo para explicar el segundo caso, con el propósito de establecer la dosis más adecuada de nitrógeno, se tendrán que considerar condiciones externas que están fuera del control del investigador como es el caso del clima imperante o el tipo de suelo sobre el cual se realiza la experiencia. En cualquier situación, un experimento se caracteriza por el hecho de que el investigador tiene un sumo cuidado de las fuentes de variación externas o secundarias del mismo que las tiene plenamente identificadas, para lo cual, o bien las controla (ambiente controlado) o bien las separa de las fuentes principales (con el diseño y el tipo de análisis). Si no se tiene cuidado de las fuentes externas, entonces la investigación es netamente observacional.

El diseño de un experimento es la planificación organizada y sistemática de todas las acciones debidamente previstas y analizadas, ya sea en el tiempo y/o en el espacio, que permitirán arribar a resultados consecuentes con el problema que dio origen a la investigación. Dependiendo de las condiciones dentro de las cuales se realizará la experiencia, el diseño experimental debe considerar si estas condiciones representan potenciales fuentes de variación, con el propósito de

[2] Dentro del diseño de experimentos y tal como se lo expondrá más adelante, un tratamiento hace referencia a uno de los cambios de un factor de estudio (variable independiente), utilizado en varios niveles; o también a una combinación de cambios o de niveles de dos o más factores (experimento factorial) que se prueban en un experimento.

separar sus efectos de los que verdaderamente producen los tratamientos. De lo que cualquier investigador debe estar consciente es que se diseña un experimento en el sentido de experimentar con el factor de estudio y no al revés; es decir, no se debe llevar a cabo una experiencia buscando adaptar dicho factor a algún diseño experimental determinado.

En cualquier condición en la cual se lleve a cabo un experimento, sea a nivel de laboratorio o a nivel de campo, el manejo de los otros factores que los rigen deben ser muy cuidadosamente controlados y/o considerados. Sin embargo, en cualquier caso, siempre existirá variación entre los datos dentro de un mismo grupo al que se aplicó un mismo tratamiento. Toda esta variación que no corresponde al efecto de los tratamientos en un ensayo rigurosamente manejado es la varianza no explicada, que se conoce como error experimental.

Mencionando un poco de historia, el diseño experimental tuvo sus orígenes allá por los años 20 – 30 del siglo XX, con su promotor primogénito Ronald A. Fisher y sus pioneros estudios sobre agronomía, descritos en su importante obra "*The desing of experiment*". Es decir, el diseño experimental nació con la agronomía. Actualmente esta herramienta fundamental del método científico ha sido ingentemente mejorado y modificado, y su uso se ha extendido prácticamente a todas las ciencias conocidas.

El diseño de un experimento, dentro de todo su contexto, involucra tres actividades bien definidas. La primera tiene que ver con la selección del tipo de diseño experimental que permita discernir claramente las respuestas que busca el investigador, para lo cual el diseño debe ser lo más eficientemente posible; esto es, deberá permitir obtener toda la información necesaria, pero de la forma menos complicada. Lo último, en muchos casos se logra seleccionando el diseño más simple. La segunda actividad que se debe realizar dentro del diseño de experimentos es la selección y manejo analítico de los datos, lo que implica el uso de pruebas estadísticas que sean contundentes y a la vez estén en consonancia con el tipo de variable medida. La tercera actividad, producto de las dos primeras, tiene que ver con la adecuada interpretación de los resultados, considerando los niveles de incertidumbre y validez de los mismos. La primera y la tercera de estas actividades revisten una relativa dificultad de realización, debido a que se tiene que seleccionar un diseño acorde a las condiciones en las que se llevará a cabo el experimento y la complejidad que se puede presentar si el experimento es un multifactorial (varios factores estudiándose al mismo tiempo). La segunda actividad es sólo cuestión de realizar cálculos matemáticos de forma mecánica, ante lo cual actualmente se pueden encontrar varios programas computacionales de estadística que realizan este trabajo.

Un diseño experimental, idóneamente seleccionado y adecuadamente planeado, debe permitir obtener la mayor información posible de forma concisa y clara, con el mínimo de costo y de la manera más fácil. Consecuentemente, existe eficiencia en un diseño experimental cuando proporciona los suficientes conocimientos con gran precisión, pero a partir de un número mínimo de datos.

Un componente fundamental en la eficiencia de un diseño experimental es el manejo del mismo. Encontrar respuestas con la mayor exactitud posible depende también del criterio consciente y objetivo del investigador. Además, una investigación obligadamente requiere que las personas involucradas en el experimento tengan una idea bien definida desde el inicio respecto de lo que se va a evaluar, de la forma de medición y recolección de la información. Adicionalmente, deberán poseer por lo menos una concepción teórica del análisis posterior que se harán con los datos.

PRINCIPIOS DE LOS EXPERIMENTOS

Un experimento se planifica con el propósito de descubrir algo que no es conocido, lo que bajo el contexto del método experimental, sirve para probar una hipótesis. Por lo tanto, todo experimento debe ser manejado con un criterio netamente objetivo, teniendo los suficientes sujetos de estimación y aislando las potenciales fuentes de variación identificadas que podrían afectar los resultados de dicho experimento. El rigor científico de un experimento, para que sea considerado como tal al momento de establecer el tipo de diseño, se fundamenta sobre el prolijo cuidado que realice el investigador, pero bajo tres principios fundamentales que los rigen. Estos principios son: la aleatorización, la repetición y el bloqueo.

La aleatorización

La aleatorización consiste en la distribución al azar de los tratamientos a las unidades experimentales o viceversa, lo cual también involucra a la recolección de las muestras. La asignación u orden de corrida de los tratamientos en forma aleatoria evita obtener respuestas sesgadas en un experimento, que podrían a la vez afectar contundentemente la conclusión que se establezca luego de realizado un ensayo.

Si en un escenario determinado los efectos de dos o más tratamientos sometidos a prueba en un experimento son los mismos, la falta de aleatorización podría inducirnos a declarar supuestas diferencias significativas en donde no existen, especialmente en unidades experimentales que tienen cierta tendencia significativamente heterogénea. En este caso, existe una gran probabilidad de rechazar una hipótesis de igualdad de medias (hipótesis nula) que es real, a favor de alguna alternativa que más que beneficio produzca una pérdida de utilidad. En este contexto, se dice que se ha cometido el error tipo I, cuya forma de combatirlo está exclusivamente relacionado con la aleatorización.

La falta de una asignación al azar también restringe el uso de las pruebas estadísticas por excelencia como lo es el análisis de varianza, debido a la falta de independencia que revelarían los datos cuando el material experimental está cargado; de allí que este principio que debe cumplir la información de cada variable de respuesta ocurra sólo con la aleatorización. En términos prácticos, la aleatorización es una forma de prorratear el sesgamiento que pudieran tener las unidades experimentales, de tal forma que se minimice el efecto de cualquier fuente de variación adicional y lo correspondiente al error experimental del ensayo.

La repetición

La repetición es la aplicación de un tratamiento, dos o más veces, dentro de un experimento. Las repeticiones de un tratamiento permiten tener una mayor confiabilidad sobre el efecto real de dicho tratamiento. En el análisis estadístico, la repetición nos permite separar la variación debida al efecto de los tratamientos de la variación que no se deben a éstos y que se conoce como el error experimental; de allí que a un tratamiento que no tenga repeticiones jamás se le podrá estimar la variabilidad ajena a dicho tratamiento (varianza no explicada). Dicho de otra forma, si no existen repeticiones de un tratamiento no se podrá estimar la magnitud de la variación que corresponde exclusivamente a su efecto.

El número de repeticiones que debe tener un tratamiento depende de múltiples condiciones. Entre estas condiciones está el aspecto económico, el tipo de cultivo, las diferencias que se desean detectar, el comportamiento de los datos y el ambiente sobre el que se realiza el experimento. Por ejemplo, si consideramos la última condición, en los experimentos agrícolas que se realizan a

campo abierto y dado que el suelo es una fuente de variación fuera del control del investigador, no nos podemos dar el lujo de tener múltiples repeticiones de los tratamientos. Tener un número importante de repeticiones hace que la superficie experimental se extienda y se exponga a una mayor heterogeneidad, aunque aparentemente se logra una mayor precisión al disminuir el error típico de la media; sin embargo, existe cierto límite práctico a partir del cual el aumento de repeticiones no tiene un aporte efectivo a la precisión.

El bloqueo

El bloqueo, o también llamado control local, permite separar fuentes de variación secundarias; por ello se constituye en una forma de controlar y reducir el error experimental. Es muy utilizado en la agronomía cuando se realizan los experimentos de campo (en ambientes controlados no se requiere bloqueo), en el cual el suelo muestra alguna condición que podría afectar el efecto de los tratamientos. Para una mayor explicación sobre la función del bloqueo, veamos el siguiente ejemplo. Un experimento debe obligadamente realizarse al pie de un cerro, cuya pendiente del terreno es importante; de allí que esta diferencia de nivel se constituya en una fuente de variación, debido a que podría haber un gradiente de fertilidad (Figura 1.1).

Un desnivel pronunciado ocasionará que el rendimiento que produzca un cultivo esté influenciado por la pendiente del terreno. Es en esta condición en donde una excelente alternativa de control de un experimento será realizar bloques compactos de parcelas, de tal manera que cada uno de estos bloques se los analice estadísticamente con el propósito de separar la variación atribuida a la pendiente del terreno, minimizando el error experimental y logrando que las variedades del ejemplo se manifiesten sin ningún efecto perturbador que le reste precisión al ensayo. El bloqueo, en situaciones como éstas, permite tener una mayor eficiencia en el experimento, en el sentido de que coadyuva a la sensibilidad para detectar los efectos entre tratamientos en el caso de que existan. Tal como se explicará en el capítulo correspondiente, lo más recomendable para llevar a cabo un experimento bajo estas condiciones (ejemplo mencionado) es utilizar un diseño de bloques completos al azar.

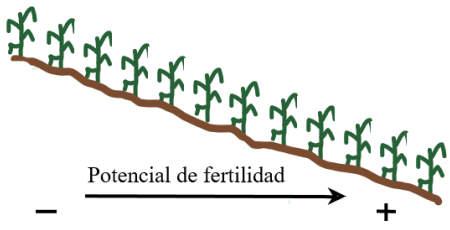


Figura 1.1. Pendiente de terreno y su cambio de fertilidad.

Aunque es más común su uso en agronomía, el bloqueo puede utilizarse en experimentos de otras áreas en donde los bloques pueden ser personas, fechas, zonas, horarios, corrales, etc. Un ejemplo al respecto puede ser un experimento en donde se valore una cualidad sensorial de varias muestras (formulaciones) de algún producto. Si el grupo de catadores no tiene ninguna formación sobre pruebas de evaluación sensorial, podría haber un efecto debido a la subjetividad de cada persona que estará implícita en la evaluación que realicen. En este caso, una alternativa para mejorar la precisión del ensayo y controlar el efecto perturbador de la subjetividad es la consideración de una fuente de bloqueo constituida por el grupo de personas que valoren cada muestra de alimento.

Adicionalmente a estos tres principios fundamentales de los experimentos, otros aspectos también de relativa importancia que permitirán evitar algún tipo de sesgo son el tipo de variable dependiente y su forma de medición. En este sentido, hay dos tipos de variables de respuesta: las variables cuantitativas y las variables cualitativas. Asimismo, hay dos formas de medir estas variables; una de ellas es mediante el uso de algún equipo, lo cual generalmente se realiza con las variables cuantitativas, mientras que la otra forma de medición está relacionada a las variables cualitativas y se llevan a cabo mediante el sentido humano (ojos, nariz, boca, tacto y oídos). Las variables cuantitativas no dependen del criterio del investigador sino del propio objeto con que se las evalúa, de allí que la medición de estas variables se respalda en técnicas objetivas. La medición de variables cualitativas por lo general no depende del objeto sino exclusivamente del sujeto quien las mide, es decir existe una predisposición al sesgo dada la subjetividad bajo la cual se realiza esta medición. En este sentido y en la posibilidad de las circunstancias, será siempre recomendable que mientras las evaluaciones de las variables dependientes en un ensayo menos dependan del criterio subjetivo, mayor será la confianza y la validez científica del experimento.

CARACTERÍSTICAS DE UN ADECUADO EXPERIMENTO

Un experimento debidamente planificado no conlleva mayor complejidad si se lo establece con un criterio práctico, simple y a la vez analítico. Considerando parcialmente lo que manifiestan Little e Hills (1965), las características que debe tener un experimento son las siguientes:

Simplicidad: tanto el diseño experimental como los tratamientos de estudio deben ser lo más simples posibles, pero en concordancia con los objetivos del experimento.

Precisión: el experimento deberá poseer un alto grado de precisión, de tal manera que sea capaz de detectar diferencias reales entre los tratamientos evaluados. Esto implica que el diseño experimental sea el más idóneo en cuanto a la separación de las fuentes de variación secundarias identificadas, además de tener un número suficiente de repeticiones. Estos requerimientos permitirán tener un adecuado control del error experimental.

Homogeneidad: las unidades experimentales (material experimental sobre el cual se ha aplicado un sólo tratamiento) deben tener las mismas condiciones al momento de realizar la experiencia. Estas condiciones diferirán con el área de estudio. Así, por ejemplo, si se trata de experimentos con plantas, las parcelas necesariamente deben tener las mismas dimensiones; si el estudio es con animales, éstos deben tener el mismo peso (al menos tratar de que esto sea así) y estado fisiológico. También la homogeneidad deberá cuidarse al momento de la medición de los efectos. Si, por ejemplo, la variable de medición es el peso, lo recomendable será utilizar una misma balanza (en la medida de lo posible), lo que evitará diferencias o errores sistemáticos en los resultados si se utilizan varios equipos y alguno de ellos tenga algún defecto. Con todo esto, los tratamientos evaluados no tendrán "pretexto" para presentar variaciones inexistentes.

Validez contundente: las conclusiones que se extraigan de un experimento deben proceder de resultados con el mínimo riesgo de estar equivocadas. Para esto es muy necesario cuidar el cumplimiento de los tres principios de los experimentos: aleatorización, independencia y bloqueo. Además, para poder ampliar el rango de validez de las conclusiones es preciso que un experimento sea replicado en el espacio y en el tiempo.

Grado de incertidumbre: en cualquier experimento siempre existe algún grado de incertidumbre en cuanto a la validez de las conclusiones. En este contexto, un experimento deberá ser concebido de modo que resulte posible establecer la probabilidad que tienen los resultados de responder únicamente al azar. La magnitud de estos grados de incertidumbre, como es lógico, va a depender de lo que esté involucrado en la investigación. Por ejemplo, si el experimento valora medicamentos para personas hipertensas, en términos ideales y por obvias razones, no debería existir lugar para la incertidumbre; de allí que las pruebas estadísticas que se utilicen presenten relativamente una mayor estrictez. Asimismo, este grado de incertidumbre puede disminuir hasta desaparecer por completo si unos resultados experimentales son replicados a través de varias investigaciones que los corroboran.

CLASIFICACIÓN DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

La selección de los diseños experimentales que se utilizan en el área agrícola se realiza de acuerdo al ambiente particular dentro del cual se desarrollará la experiencia, siendo uno de los factores de mayor incidencia en este ambiente (quizá el único) y que deberá ser controlado por el investigador, aquel que está directamente relacionado con la heterogeneidad del suelo. Cada uno de estos diseños tienen sus características específicas que los hacen idóneos para una situación dada, de allí que en la clasificación de ellos sea importante considerar bajo qué ambiente se desarrollará el experimento. Si el ambiente es totalmente homogéneo o controlado, la mejor alternativa que pudiera considerar el investigador es aquella que utiliza el diseño completamente al azar (identificado por sus siglas como DCA) debido a un aspecto que está relacionado a un término utilizado en los modelos de análisis de varianza que se tratarán más adelante y que se conocen como grados de libertad del error experimental. Si el ambiente no es controlado, como el caso de los experimentos que se realizan a nivel de campo, entonces habrá que considerar la presencia de potenciales fuentes de variabilidad secundaria que podrían afectar a la precisión de un ensayo, seleccionando en forma correspondiente aquellos diseños experimentales que controlen mediante bloques estas fuentes de variación. Es importante tener en cuenta que un diseño experimental dado no es mejor que otro, como se ha mencionado, cada uno de ellos tiene diferentes virtudes que los hacen aplicables para ciertas condiciones específicas.

Si bien los aspectos de importancia de cada uno de los diseños indicados en la tabla 1.1 se describirán en los capítulos correspondientes, es imperativo hacer algunas distinciones sobre los diseños experimentales básicos que se utilizan en la práctica. El DCA es el diseño que genera la mayor cantidad de grados de libertad en el error experimental entre las demás alternativas de diseño para un mismo número de tratamientos y repeticiones, de allí que mientras más grande sea este término (valor) mayor precisión se logrará al valorar estadísticamente una información experimental dada. Sin embargo, la desventaja mayoritaria del DCA es la restricción de su uso en medios no controlados, debido a que no bloquea ninguna fuente de variación secundaria (tabla 1.1), y por tanto, no aísla ningún efecto que esté presente en el material experimental y que al final van a engrosar el mencionado error experimental, haciendo que el ensayo pierda precisión.

Para el caso de los experimentos que se desarrollan en ambientes no controlados, como aquellos ensayos que se realizan a campo abierto y con la influencia latente de la heterogeneidad del suelo, se recurre a diseños experimentales que tienen la particularidad de poder controlar fuentes de variación secundarias a través de la formación de bloques. Si bien las fuentes secundarias de bloqueo le restan grados de libertad al error experimental de un modelo de análisis de varianza determinado, el hecho de separar la variabilidad ajena al efecto de los tratamientos que es posible

con estos diseños, constituye la ventaja más importante que debe considerarse al momento de seleccionar uno de ellos. Los diseños experimentales que permiten controlar una, dos y hasta tres fuentes con requerimientos de bloqueo, son los que se detallan en la tabla 1.1; identificados como diseño de bloques completos al azar (DBCA), diseño en cuadrado latino (DCL) y diseño en cuadrado grecolatino (DCGL), respectivamente.

Tabla 1.1. Diseños experimentales básicos.

Ambiente controlado		**Ambiente no controlado**	
Diseño completamente al azar (DCA)	Sin bloqueo de fuentes secundarias	Diseño de bloques completos al azar (DBCA)	Un solo bloqueo (Controla una sola fuente de variación secundaria)
		Diseño en cuadrado latino (DCL)	Doble bloqueo (Controla dos fuentes de variación secundaria)
		Diseño en cuadrado grecolatino (DCGL)	Triple opción de bloqueo (Controla tres fuentes de variación secundaria)

Las fuentes de variación secundarias que se hacen mención en esta parte del texto, son los factores plenamente identificados en el área experimental y que se estima tendrán un efecto sobre las variables de respuesta. Estas fuentes pueden ser la pendiente de un terreno, una marcada diferencia de textura y/o fertilidad del suelo, cercanías de canales o fuentes de agua superficiales, entre otras, que se incluyen en la instauración de los diseños experimentales en el campo y en los modelos de análisis de varianza correspondientes. Son fuentes que tienen un interés secundario para el investigador, pero que son consideradas con el propósito de lograr eficacia en la comparación de los efectos de los tratamientos de un experimento. En este sentido, es el investigador o su asesor estadístico quien debe identificar esas posibles fuentes de variabilidad secundarias, de tal manera que el diseño seleccionado permita separar el efecto de estas fuentes de lo que es pertinente al error experimental.

Asimismo, es importante resaltar el hecho de que la gran mayoría de investigaciones experimentales utilizan el diseño de bloques completos al azar para desarrollar los distintos experimentos. No obstante, el investigador debe saber que sólo en los casos en donde la fuente de variabilidad secundaria esté realmente presente en el área experimental, se justifica el uso del DBCA. En la práctica de los ensayos, los lotes de terreno tienen superficies relativamente reducidas que no van más allá de unos 1000 m^2 y que son necesarios para desarrollar comúnmente un experimento con cultivos de ciclo corto; por lo tanto, tienen una insignificante heterogeneidad que hacen que sea indiferente seleccionar un diseño con una fuente de bloqueo como el DBCA. Más bien en estos casos, el uso de un DBCA causa una disminución de la precisión del ensayo, ya que la fuente de bloqueo le resta grados de libertad a la fuente del error experimental. Sin embargo, si la fuente de bloqueo en el análisis resulta con efecto no significativo, es posible cambiar el modelo de análisis de varianza considerando como si el diseño experimental utilizado hubiese sido un DCA y no un DBCA.

Por otro lado, existe cierta confusión respecto de los diseños experimentales en los cuales se evalúan varios factores al mismo tiempo, llamándolos diseños factoriales; en tal sentido, es necesario distinguir a los tratamientos de lo que es el diseño. Un experimento puede constar del estudio de un solo factor a diferentes niveles como, por ejemplo, una evaluación de potasio en banano. En este caso el factor de estudio es el potasio y de este nutriente pueden valorarse varias dosis que vienen a constituir los niveles experimentales o tratamientos. Por otro lado, si en un

experimento se ha previsto la evaluación de varios factores al mismo tiempo con diferentes niveles, el resultado es un arreglo con tratamientos establecidos por combinaciones factoriales. Como ejemplo de un ensayo factorial puede ser la valoración de los efectos del fósforo y del potasio (combinados) también en banano, en forma simultánea. Estos dos casos de experimento requieren de un diseño, el cual adecuadamente seleccionado y acorde a las circunstancias que rodean al ensayo, permitirá separar las fuentes de variación adicionales que podrían tergiversar el efecto real de los factores en estudio. Es decir, una cosa es la definición de los tratamientos, que pueden ser unifactoriales o multifactoriales (comúnmente llamado factorial) y otra cosa es el diseño experimental. No existe el diseño factorial como concepto análogo al diseño experimental.

Las combinaciones factoriales son las que han originado ciertas modificaciones y/o combinaciones de los diseños experimentales mencionados en la tabla 1.1. Así se tiene, por ejemplo, de acuerdo a la importancia del factor y a la superficie que requieren dichos factores, los experimentos con arreglos en parcelas divididas (2 factores) o también los que se llevan a cabo bajo un arreglo en parcelas subdivididas (3 factores). Estos experimentos siguen siendo factoriales, con cierta desventaja en la aleatorización que los hacen menos eficaces que los factoriales totalmente cruzados. Su definición es sólo cuestión del arreglo de los tratamientos dentro de las unidades experimentales, ya que el diseño experimental subyacente es cualquiera de los cuatro diseños básicos mencionados en la tabla 1.1.

Para el caso de experimentos factoriales con más de dos factores de estudio puede recurrirse a la consideración de los factoriales fraccionados o con efectos confundidos, los cuales usan bloques incompletos. Así se tiene el caso del diseño en *látice simple* o el diseño en *látice múltiple*, muy utilizados en genética vegetal y con un número elevado de tratamientos que, con el propósito de controlar la heterogeneidad del suelo, se distribuyen de forma incompleta dentro de los bloques. Así también existen los arreglos experimentales que, a pesar de ser factoriales, no valoran todas las combinaciones posibles sino sólo una parte y que también pueden utilizar de base cualquiera de los diseños experimentales indicados en la tabla 1.1. Entre estos últimos se tienen a los arreglos *Plakett – Burman, Box – Behnken, Central compuesto,* entre otros; los cuales son muy utilizados a nivel industrial para optimización de procesos.

DEFINICIONES DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN EXPERIMENTO

Tal como ya se ha mencionado, muchos de los métodos estadísticos del diseño experimental fueron ideados por Sir Ronald Fisher a principios del siglo XX, desarrollando investigaciones en la estación Experimental Agrícola de Rothamsted en Inglaterra. En función de esto es que el vocabulario utilizado en esta disciplina se derivó de la biología y la agricultura; por ello, dado la aplicación de la estadística en estas áreas, influyó para que se la denominara también como *Biometría*.

Palabras como tratamiento, nivel, bloque y parcela se derivaron de los estudios experimentales en agronomía; los cuales, actualmente se han generalizado al aplicarse en la práctica científica de otros campos del saber. La descripción de estos y demás términos que se utilizan en el diseño de experimentos se indican en los párrafos siguientes.

Variables

Las variables constituyen uno de los elementos que definen un tipo de diseño experimental determinado. Básicamente éstas pueden agruparse en dos bandos: las que son independientes, las cuales constituyen las causas; y las que son dependientes, que vendrían a constituir los efectos, conocidas también como variables de respuesta. Las variables independientes a su vez pueden dividirse en variables de estudio, controladas y no controladas; a estas últimas también se las conoce como variables de ruido.

Variable independiente de estudio: la variable independiente de estudio es el factor de interés principal que se evalúa en un experimento a través de dos o más niveles de dicho factor. Por ejemplo, si se va a evaluar la influencia del nitrógeno en un cultivo, la variable de estudio o factor es este elemento químico, el cual se lo puede valorar a través de dos o más dosis que vienen a constituir los niveles de dicha variable. Si en un experimento únicamente se evalúa un sólo factor, el experimento será unifactorial (llamado también univariado); mientras que si se evalúan varios factores al mismo tiempo, el experimento será factorial o multifactorial. Es necesario indicar que, para que una investigación esté definida como experimental, su(s) variable(s) de estudio debe al menos valorarse en dos niveles.

Variable independiente controlada: la variable independiente controlada en un experimento es un factor de menor interés que la variable independiente de estudio, pero que puede afectar a la variable dependiente de respuesta que se obtenga de dicho experimento. Seleccionando adecuadamente el diseño experimental y cuidando la homogeneidad en cada actividad que se realice en el experimento, se logra controlar variables independientes plenamente identificadas. Por ejemplo, si en el suelo existe alguna variabilidad diferenciada (como fertilidad) y que puede afectar a los resultados de un experimento de agronomía, ésta puede controlarse mediante el bloqueo de dicha fuente de variación utilizando para ello un DBCA.

Variables independientes no controladas o variables de ruido: son las variables que durante el desarrollo del experimento pueden estar presentes, que pueden por tanto influir en un resultado o enmascararlo y que son muy difíciles de controlar. Generalmente son variables que afectan a todas las unidades experimentales (siempre que todo el ensayo se realice en un mismo sitio) por igual y antes que precisión, le restan exactitud[3]; es decir, no dejan que los tratamientos expresen todo su efecto potencial. En este caso, los resultados estarán por debajo de la respuesta verdadera de los tratamientos. Estas variables están referidas fundamentalmente a la parte del ambiente, tales como cambios bruscos de temperatura, de la humedad relativa, de horas de luz, de lluvia, etc. Como ejemplo, se puede mencionar un experimento en donde se estudie un bioestimulante de la productividad de un cultivo; y si en el tiempo en que se realiza la experiencia los días son sombríos, los resultados que se obtengan del mismo estarán enmascarados por la influencia de la falta de brillo solar.

[3] Dos términos que podrían confundirse como sinónimos en los experimentos son: precisión y exactitud. El primero está relacionado al manejo de un experimento y hace mención a qué tan cercanos están los datos que provienen de un mismo tratamiento, mientras que el segundo está referido a la selección de los tratamientos y qué tan cerca están éstos del punto experimental en donde se obtendría la máxima respuesta de un fenómeno. De allí que, una vez iniciado un experimento, lo único que está bajo el dominio del investigador es lograr precisión con un adecuado manejo experimental; porque si los tratamientos inicialmente fueron mal seleccionados, no hay ninguna acción que puedan dar exactitud a los resultados. Sólo la precisión está relacionada al error experimental.

Variable dependiente: la variable dependiente, llamada también como variable de respuesta, es el efecto o característica que mide el investigador, y que a la vez, es la indicadora del cambio que produce la variable independiente de estudio. En un experimento generalmente se tendrán algunas variables dependientes, las cuales debidamente seleccionadas, deben explicar completamente la acción del factor (o factores) de estudio. Las variables dependientes no solo están en función de la acción que realiza la variable independiente de estudio, sino también pueden ser afectadas por las variables no controladas. Ejemplos de algunas variables dependientes del área agrícola son el rendimiento, la altura de planta, el diámetro de frutos, el peso de 100 semillas, entre otras. Si la variable de respuesta es cuantitativa, el análisis estadístico de ella es individual o también llamado análisis univariado. Por el contrario, si la variable es cualitativa, dado que existe un criterio cargado de subjetividad en su valoración, es recomendable unir todas las variables de esta característica y proceder a un análisis en conjunto debido a la presencia de cierto grado de correlación que podría existir entre ellas y que terminaría confundiendo un efecto. En este último caso podría realizarse un análisis de varianza multivariado.

Clasificación de las variables por la forma de medición

En función del instrumento de medida, todas las variables de un experimento, incluyendo las independientes, se clasifican en variables cuantitativas y variables cualitativas. Las variables cuantitativas se expresan mediante números, generalmente se miden mediante el uso de instrumentos y sólo dependen del propio objeto en el cual se realiza la medición. Estas variables se dividen en variables cuantitativas continuas y en variables cuantitativas discretas. En la figura 1.2 se presenta un esquema de esta clasificación.

- **Variables cuantitativas continuas:** son todas aquellas variables que admiten todos los valores de un rango, o en forma práctica, son todas aquellas que pueden expresarse con números decimales. Ejemplos son la altura de una planta (96.5 cm), el rendimiento de un cultivo (4.5 t/ha), etc.

- **Variables cuantitativas discretas:** son aquellas variables que no admiten valores intermedios, es decir, valores que no se escribirán con decimales y por lo cual también se las conoce como variables de conteo. Ejemplos son los frutos de una planta, el número de aspersores de un módulo de riego, etc.

Las variables cualitativas comúnmente no se miden con números, sino mediante cualidades o categorías del objeto. Esto hace que el instrumento de medida sean los sentidos humanos, y por tanto, dependen del sujeto quien las mide. Las variables cualitativas también se dividen entre variables cualitativas nominales y variables cualitativas ordinales.

- **Variables cualitativas nominales:** son todas aquellas variables que se miden a través de una cualidad, por lo tanto, no se miden con números; además no se rigen a ningún orden. Ejemplos son los métodos de siembra (al voleo, chorro continuo y por trasplante) (variable independiente), el estado civil de un agricultor (soltero, casado, viudo, divorciado y en unión libre), los tipos de créditos agrícolas (público y privado), etc.

- **Variables cualitativas ordinales:** son las variables que tampoco utilizan números para medirse sino cualidades jerarquizadas, es decir, obedecen a un orden determinado. Ejemplos son el nivel de daño de un insecto (mínimo, medio y severo), el control de

malezas (control mínimo, medio y total), la severidad del daño de una enfermedad (Escalas de estado), etc.

La gran mayoría de variables que se miden en el ámbito de la experimentación agrícola son cuantitativas, gran parte de ellas son continuas y la otra parte son de tipo discretas o de conteo. No obstante, en muchos casos, especialmente en aquellos experimentos que están relacionados a las plagas (en las cuales también se incluyen las malezas), se hace uso de variables cualitativas de característica ordinal. Aquí es importante que una variable tenga característica cuantitativa para que pueda ser analizada por las herramientas de la estadística paramétrica, lo que demanda que aquellas variables cualitativas ordinales utilicen escalas ampliadas y no relativamente cerradas a dos o tres valores, de tal forma que sean susceptibles de someterse, por ejemplo, a un análisis de varianza para detectar diferencias significativas entre tratamientos. Uno de estos ejemplos es el uso de la tradicional escala de ALAM (Asociación Latinoamericana de Malezas), que traduce a valores porcentuales los diversos niveles de control de un herbicida, que en la práctica son valorados visualmente. En el caso de las variables cualitativas nominales, éstas generalmente no son utilizadas en estudios experimentales y su uso más común se da en los estudios descriptivos.



Figura 1.2. Clasificación de las variables.

En un experimento siempre será mejor si la medición de variables se realiza con objetividad, especialmente cuando esta medición se realiza mediante el uso de instrumentos que no tenga dependencia en el criterio subjetivo del investigador. Por ello, es recomendable que mientras se puedan utilizar alternativas que sean menos dependientes del subjetivismo humano en la medición de variables, de tal forma que se pueda evitar cualquier sesgo, la inferencia estadística permitirá tener resultados más eficaces y representativos a la vez.

Factor

Tal como ya se ha mencionado y bajo las definiciones del diseño experimental, el término factor hace referencia a la variable independiente que se evalúa en una investigación. Dependiendo del tipo de investigación, los factores de estudio pueden ser experimentales u observacionales, los cuales se diferencian de otras variables independientes que no son de interés primordial en el estudio, pero que pueden afectar a la variable de respuesta.

Niveles de los factores

Un nivel es un atributo o proporción en que se descompone un factor de estudio en un experimento. Estos niveles pueden ser cuantitativos o cualitativos. Ejemplos de niveles cuantitativos de un factor son las varias dosis de un fertilizante que se pueden aplicar (80 kg/ha, 100 kg/ha y 120 kg/ha). Por otro lado, ejemplos de niveles cualitativos de un factor son los métodos de preparación de suelos. En el caso de los niveles cuantitativos, el análisis estadístico que se aplica a los datos permite la obtención de modelos de regresión, los que a su vez pueden utilizarse para establecer los efectos máximos a los que puede llegar algún nivel de un factor evaluado. Ésta última es una técnica que se circunscribe a la metodología de superficie de respuesta en los experimentos para optimización.

Tratamiento

Es un nivel de un factor sometido a estudio o a ensayo de comparación, si el experimento es unifactorial o univariado. En estudios factoriales o multifactoriales, un tratamiento es una combinación de niveles tomando uno de cada factor. Por ejemplo, en una investigación sobre la influencia del nitrógeno en un cultivo, un tratamiento es una dosis del mismo, tal como 100 kg/ha.

Si el nitrógeno se aplica en tres dosis o niveles diferentes, junto con dos dosis de potasio, entonces se tendrán las combinaciones que se indican en la tabla 1.2. En esta tabla puede observarse que cada tratamiento está compuesto por la combinación de un nivel de cada factor de estudio. Así, por ejemplo, el tratamiento 1 estará formado por la dosis 1 de nitrógeno más la dosis 1 de potasio. Para este caso, tendremos 6 tratamientos. Nótese el uso de la notación común, representando con letras mayúsculas a los factores y minúsculas los correspondientes niveles. Es indiferente la asignación de letras a los factores y no debe entenderse como que existiera una mayor importancia para aquel factor que se asigna con la letra A; salvo en los casos de experimentos que utilizan el arreglo factorial de *parcelas divididas* o en *parcelas subdivididas* que se detallan en el capítulo IX, en los cuales los factores son valorados con distintos grados de precisión.

Tabla 1.2. Combinaciones (tratamientos) entre dos factores.

Factores		Nitrógeno (Factor A)		
		a_1	a_2	a_3
Potasio (Factor B)	b_1	a_1b_1 (Tratamiento 1)	a_2b_1 (Tratamiento 3)	a_3b_1 (Tratamiento 5)
	b_2	a_1b_2 (Tratamiento 2)	a_2b_2 (Tratamiento 4)	a_3b_2 (Tratamiento 6)

Unidad experimental

Una unidad experimental es la parte más pequeña del material experimental a la que se le aplica un sólo tratamiento. Es, por lo tanto, el objeto sobre el que se obtiene un dato. Este dato puede ser un promedio de varias mediciones dentro de una misma unidad experimental o directamente ser el valor medido cuando, por ejemplo, la unidad experimental es una sola planta. En agronomía, una unidad experimental puede ser una maceta, una parcela, una finca o una región geográfica. En medicina, puede ser una persona, un consultorio, un hospital, etc. Una unidad experimental también puede ser un sitio escogido de un río, un bosque, una rama, una hoja, una flor de un árbol,

etc. En el diseño de un experimento va definido el tamaño, la forma, el reconocimiento, la ubicación y la diferenciación de las unidades experimentales.

Para el caso de los experimentos agronómicos, especialmente para los que utilizan cultivos de distancias de siembra pequeñas (cultivos de ciclo corto), la unidad experimental puede ser una parcela. Sin embargo, por el requerimiento de control sobre la heterogeneidad del suelo, las parcelas deben ir contiguas lo que podría causar la existencia de algún efecto de traslape parcial de los tratamientos aplicados. Por consiguiente, debe considerarse la afectación de borde (llamado *efecto de borde*); dejando una o dos hileras de plantas de los costados de la parcela, así como dos o tres plantas de los extremos (cabeceras) sin evaluarse. La única zona o parte de la parcela que se utiliza para la evaluación se ubica en el centro de ésta y es lo que se conoce como *parcela útil*. Este último término puede prestarse para una mala interpretación, dado que toda una parcela experimental es útil, incluyendo las plantas que comprenden el efecto de borde. Para este autor, un término más adecuado podría ser la definición de *área de muestreo* de la parcela.

Repetición

Una repetición significa que un mismo tratamiento se lo efectúa dos o más veces dentro del experimento. Su función es suministrar una mejor estimación del error experimental y brindar una medición más precisa de los efectos de los tratamientos, y al mismo tiempo, aumentar el alcance de las inferencias. El número de repeticiones que se requerirán en un experimento particular depende de la magnitud de las diferencias que deseamos detectar y de la variabilidad de los datos con los que estemos trabajando; sin embargo, en los experimentos que se realizan con plantas en agronomía, aparte de estas dos características fundamentales, existen otras situaciones que son también restrictivas del número de repeticiones que tendrá la investigación. En este contexto es importante considerar que los experimentos que se realizan en campo, bajo la acción de la heterogeneidad del suelo, están expuestos a múltiples factores que pueden influir en las variables de respuesta. Entre los elementos que imponen el número de repeticiones que debe tener un experimento agrícola están:

a) **La clase de cultivo**: no es lo mismo un cultivo que está sembrado a distancias cortas como el maíz, en donde las parcelas o unidades experimentales son pequeñas, lo que hará que el experimento requiera de un área también pequeña; que un cultivo sembrado a distancias amplias, como por ejemplo la palma africana, que requerirá un área mayor de experimentación.

b) **La heterogeneidad del suelo**: la fuente de variación que representa el suelo en experimentos que se realizan en el campo, podrían aumentar al menos en forma directa conforme las repeticiones ocupen más área. Esto creará una restricción al momento de aumentar el número de repeticiones, ya que se complicaría el manejo homogéneo que requiere todo experimento.

c) **Materiales disponibles:** esta situación puede presentarse en experimentos como los relacionados al mejoramiento de plantas, en donde la propagación debe realizarse con escasas cantidades de semillas que no permitirán tener las suficientes repeticiones.

d) **Los medios económicos:** es el componente que no solo restringe el número de repeticiones que en algunos experimentos se desearía tener, sino la realización misma de

cualquier tipo de investigación debido a los altos costos que involucran llevar a cabo un experimento. Es la condicionante no técnica más decisoria de las investigaciones.

e) Los métodos de distribución o diseño experimental: el tipo de diseño experimental que se use también tiene algunas restricciones respecto del número de repeticiones, las cuales básicamente tienen que ver con la eficacia del diseño para detectar efectos significativos entre los tratamientos. La eficacia de los diseños experimentales contrapone dos situaciones que están relacionadas con las repeticiones. Por un lado, está el criterio estadístico de minimizar el error estándar de la media de los tratamientos a través de la relación entre la desviación típica S y la raíz cuadrada del número de repeticiones R, $\left(s/\sqrt{R}\right)$, con lo cual es deducible que el error experimental disminuye mientras aumentan las repeticiones; y por otro lado, el incremento de la heterogeneidad del suelo con el aumento de repeticiones que restarían precisión a un experimento.

Bajo el argumento de lo indicado en el párrafo anterior, existe un criterio práctico de que un experimento genere entre 12 a 20 grados de libertad en la fuente de error experimental de los modelos de análisis de varianza, de allí que mientras un diseño dado controle fuentes de variación secundarias (bloqueo), como los indicados en la tabla 1.1, el investigador tendrá que considerar el número suficiente de repeticiones para que su experimento tenga la sensibilidad adecuada que le permita determinar efectos de significancia entre tratamientos.

f) El grado de diferenciación que existen entre los tratamientos de estudio: cuando el efecto de los tratamientos de un experimento no es relativamente evidente, entonces será necesario aumentar el número de repeticiones con el propósito de incrementar la sensibilidad del experimento. Esta situación puede ocurrir generalmente cuando los niveles de los tratamientos son categóricos, es decir, son métodos o técnicas definidas mediante un nombre cuyos efectos no presentan diferencias sustancialmente marcadas. Para el caso de los tratamientos de característica cuantitativa, como los relacionados a los fertilizantes, la falta de sensibilidad del experimento para detectar diferencias significativas entre ellos podría deberse a la mala selección de los tratamientos al inicio de la experiencia. Sin embargo, existen tratamientos cuantitativos cuyos niveles no pueden ser sustancialmente distintos, de allí que requieran un número adecuado de repeticiones. Como ejemplo de esta última situación, están los experimentos que se realizan con los micronutrientes que requieren las plantas; dado el requerimiento esencial de tan solo unos pocos miligramos, los niveles (dosis) que se evalúen de los mismos serán ínfimamente diferentes, ante lo cual podría ser difícil lograr diferencias claramente observables.

Para evitar la mala selección de tratamientos, debido a la escasa diferenciación entre ellos, es importante la fundamentación tanto teórica como práctica al momento de decidir cuáles serán los niveles de prueba de un ensayo. Esta insignificante variabilidad que pudieran revelar los tratamientos es cuantificada mediante el coeficiente de determinación (r^2) de un modelo dado de análisis de varianza. Si este coeficiente es menor a 0.6, en alguna medida es un indicativo de que los tratamientos del ensayo fueron mal seleccionados.

g) El número de tratamientos en estudio: el número de tratamientos tiene cierta relación inversa con el número de repeticiones (véase la tabla 1.2); es decir, si los tratamientos son unos pocos se requerirá un mayor número de repeticiones, con el propósito de tener

suficientes grados de libertad[4] en el error experimental que permita que el análisis estadístico sea más efectivo. Por otro lado, si el número de tratamientos es alto, las repeticiones pueden reducirse.

h) El criterio estadístico de los grados de libertad del error experimental: realmente este criterio es aplicable a los experimentos de cualquier área de investigación. Se fundamenta en el número de grados de libertad del error experimental que tendrá el ensayo, el cual es cuantificado en el modelo de análisis de varianza respectivo. En forma general, en cualquier experimento se logra mayor sensibilidad mientras más grados de libertad tenga el error experimental. En este sentido, es recomendable tener en cuenta lo indicado antes, referente a que el modelo de análisis de varianza cuente con un mínimo de 12 grados de libertad en el error experimental para que el experimento posea una suficiente sensibilidad.

En contraposición, el incremento sustancial de los grados de libertad del error experimental, lo cual se logra aumentando el número de repeticiones (tamaño muestral), no asegura una mayor precisión práctica en el experimento, más bien lo encarecerá. Este contexto se explica en el esquema de la figura 1.3, el cual se ha realizado considerando varios ensayos con iguales tratamientos pero con distintas repeticiones; en donde el error experimental (cuadrado medio del error experimental o varianza intra-grupos) no disminuye linealmente al aumentar el número de repeticiones, más bien se observa que existe una inflexión en la curva a partir de la cual el aumento de tamaño muestral no contribuye de manera trascendental (o éste es nulo) a una mayor precisión (menor varianza). El extremo de tener un elevado número de repeticiones hará que aumente, de manera inverosímil, la probabilidad de seleccionar un tratamiento de forma equivocada creyendo que tiene un efecto de importancia, pero que en términos prácticos no lo es (Error tipo I, el cual se explica más adelante).

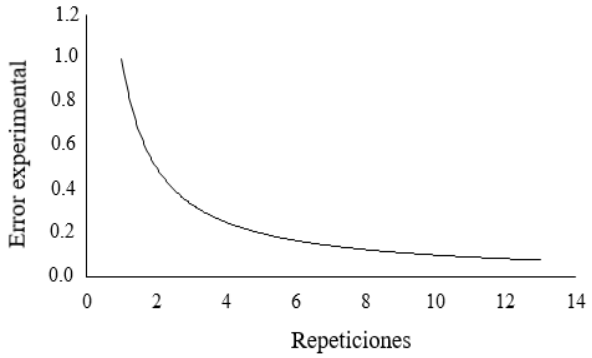


Figura 1.3. Esquema de la relación entre el número de repeticiones y el error experimental.

[4] Los grados de libertad son los datos, parámetros o valores estadísticos que tienen libre albedrío para variar. Por ejemplo, si obtenemos un promedio a partir de cinco datos y nos resulta el valor de 8, y si cuatro datos de los cinco son: 10, 7, 6 y 5, es ineludible que el quinto dato sea 12. Es decir, sólo $n - 1$ de los datos pueden tomar cualquier valor. Asimismo, tal como se verá en los análisis de varianza más adelante, los grados de libertad del error experimental representan a la libertad de variación que tiene esta fuente que une a todo lo que hace variar a los datos y que no se conoce; por ello es deducido por diferencia desde la variación total de los datos.

Seleccionar el número de repeticiones que requiere un experimento, tal como se ha tratado de indicar, involucra todo un proceso de análisis en los que debe primar el criterio objetivo; sin embargo, dada la limitación de recursos económicos para llevar a cabo cualquier investigación, se termina estableciendo una cantidad mínima de repeticiones, a tal punto de insuficiente que podrían establecer resultados equivocados como el de negar una diferencia real entre los tratamientos en estudio. Lo último, en la estadística se conoce como error tipo II, que significa aceptar una hipótesis nula falsa. Como recomendación, para experimentos que tienen un mínimo de 5 tratamientos, deberían tener como mínimo 4 repeticiones por cada uno de ellos. En todo caso, en la tabla 1.2, en forma orientativa, se indica el número de repeticiones requeridas de acuerdo al número de tratamientos en estudio.

El diseño experimental que más comúnmente se utiliza en los experimentos agrícolas, utilizados en el campo (medio no controlado), es el diseño de bloques completos al azar; en el cual cada repetición representa a un bloque siempre que el experimento sea balanceado (cada tratamiento se repite igual cantidad de veces).

Tabla 1.2. Número de repeticiones de acuerdo a los tratamientos en estudio.

Tratamientos	Repeticiones mínimas
2	12
3	6
4	5
Más de 4	4

Para determinar el número de repeticiones de una forma netamente estadística es necesario el conocimiento previo de la varianza que tenga un suelo dado debido a su heterogeneidad. En este contexto, la alternativa que podría ofrecer mayor precisión para esta determinación es el uso de los *experimentos de uniformidad*, también llamados *experimentos en blanco*. Estos experimentos deben realizarse para cada campo de prueba y consiste en sembrar una misma especie indicadora, la cual se cultivará de forma homogénea dentro del campo en donde se implantará posteriormente el experimento definitivo. Una vez lista la cosecha, ésta se recoge de acuerdo a diferentes tamaños de parcela a partir de las cuales se obtiene la variabilidad del campo, pudiendo ésta ser representada por el coeficiente de variación. Con la información de tamaños de parcela y de la variabilidad, es posible aplicar metodologías como la de Hatheway (De La Loma, 1966), que relaciona estas características y es considerada como una de las mejores alternativas para este propósito hasta en los actuales momentos.

Dato

Es el resultado de las observaciones o mediciones hechas en cada unidad experimental, y un conjunto de ellos, pertenecientes a una misma variable dependiente, conforman la base para hacer los cálculos estadísticos. Este dato puede ser el promedio de varias mediciones realizadas dentro de una misma unidad experimental cuando esta última es una parcela que contiene varias plantas, lo cual es común en los experimentos con cultivos de ciclo corto como arroz o maíz, por ejemplo.

Población

Es un conjunto formado por todos los elementos o unidades experimentales, constituidas por personas, animales, plantas o cosas, que poseen una o más características en común factibles de ser medidas. Estadísticamente, es el conjunto de mediciones de una variable, tomadas sobre todos los individuos que constituyen una población. En consideración de lo último, hay una diferencia respecto de lo que es el *universo*; éste también involucra a todas las personas, animales, plantas o cosas, pero no hace referencia a alguna característica en común. Por ejemplo, podemos llamar universo a todos los ecuatorianos, pero de éstos sólo vamos a considerar a las personas que pertenezcan a la etnia indígena; es decir, esta parte del universo es la población de estudio, cuya característica en común es la etnia.

Una población puede ser relativamente pequeña como, por ejemplo, la edad del grupo de estudiantes de la asignatura de Diseño Experimental; o tan grande como todos los tiburones que habitan los océanos. En el primer caso estamos ante una *población finita*, es decir, aquella que es fácil de contabilizar; en el segundo caso estamos ante una *población infinita*, en donde sus individuos son difíciles de contabilizar.

Cuando se realizan experimentos y debido a que se trabajan con pequeñas cantidades de unidades experimentales, además de que cada grupo de observación se caracteriza por tener un mismo tratamiento de aplicación, la concepción del conjunto de dichas unidades experimentales se encuadra dentro de lo que es una población finita.

Muestra

Aunque una definición más amplia se describirá más adelante sobre este término, es necesario indicarlo aquí dado que también es mencionado dentro del diseño de experimentos. Una muestra, dentro del concepto estadístico, es un subconjunto de la población que contiene información sobre ella. Es decir, es un conjunto de mediciones que constituyen parte de una población. A partir de la muestra obtenemos información que nos permite sacar inferencias acerca de la población. Por esta razón es importante que la muestra sea representativa de la población, para lo cual tenemos que usar las técnicas aleatorias de muestreo. Una muestra aleatoria es aquella en que cualquier medición individual tiene tantas probabilidades de ser incluida como cualquier otra.

Para evitar algún tipo de sesgo en los experimentos agrícolas que utilizan cultivos de ciclo corto, generalmente se recurre al uso de muestras, seleccionándolas en forma aleatoria o sistemática. Asimismo, debido a que en un experimento se trata de cuidar que tanto el ambiente en donde se desarrollará éste, así como las labores que se realicen dentro del mismo sean homogéneas, el tamaño de las muestras que se utiliza es relativamente reducido y que en el contexto experimental se definen como repeticiones.

El testigo

Dentro de un experimento, el testigo es considerado como un tratamiento más y es el referente para la comparación de los efectos del resto de tratamientos. Estos testigos pueden ser de dos tipos, uno convencional o de uso común y el otro conocido como testigo absoluto. El testigo convencional, también llamado testigo relativo, representa a la actividad, labor o método que comúnmente se realiza. El testigo absoluto, está representado por la unidad experimental en donde no se aplica ningún tratamiento.

Existen muchos experimentos que requieren de testigos convencionales. Por ejemplo, si el experimento trata sobre cuatro dosis de potasio en banano, será necesario un tratamiento testigo que deberá ser el convencional; es decir, la dosis que comúnmente aplica el agricultor. En este ejemplo, conociendo que el banano es un cultivo que requiere cantidades relativamente altas de potasio, por la notoria diferencia que se obtendría, no será necesario utilizar un testigo absoluto.

Igual que en el caso anterior, en una gran variedad de experimentos, el uso de testigos absolutos dentro de los mismos puede ser determinante al momento de adoptar un cambio, un nuevo método, un nuevo producto; que aparentemente logren incrementar el rendimiento de los cultivos. En la concepción del negocio de cualquier proceso productivo, el método experimental será el que permita conocer que tratamiento resultó con los mejores efectos; sin embargo, quién en la práctica establecerá qué tratamiento es el que se debe adoptar o aplicar en la gran mayoría de experimentos es el análisis económico de rentabilidad que se realice respecto de los tratamientos evaluados. Bajo este criterio, llevar un testigo absoluto en un experimento permitirá hacer la comparación respectiva, y a partir de esto, tomar la decisión más acertada. Por ejemplo, suponga que usted es el profesional a cargo de una hacienda que abarca una extensión de 200 ha de banano y le ofrecen un bioestimulante que supuestamente mejorará los rendimientos; si en la demostración experimental no existe un testigo absoluto, jamás podrá saber si la aplicación de tal producto es rentablemente mucho mejor que no aplicarlo. Si no existiera el efecto significativo de tal producto, sólo imagine la inversión que se tendrá que realizar en aquel supuesto bioestimulante y no tener un rendimiento de mayor importancia. En esta situación, deberá ir pensando en conseguir un nuevo empleo. En este punto cabe hacer referencia a aquella frase policiaca: “el testigo es clave”.

En algunas investigaciones, el testigo absoluto, además de permitir cuantificar la eficacia del resto de tratamientos, permite verificar el espectro de acción de tales tratamientos. Un ejemplo de esta situación es el uso de herbicidas pre-emergentes, en donde sólo el testigo absoluto es el que permitirá conocer cuáles han sido las malezas que controlaron las diferentes dosis y/o diferentes ingredientes activos evaluados en el ensayo.

Así como hay experimentos que sólo requieren, ya sea un testigo convencional o un testigo absoluto, también hay experimentos que requieren de los dos testigos juntos en la misma investigación. Un ejemplo de estudio en donde se requieran los dos testigos puede ser un experimento que trate sobre el control de insectos en un cultivo, a base de productos orgánicos. Como cualquier agrónomo intuirá, son escasos los productos netamente orgánicos que pueden realizar un control efectivo de las plagas. Por ello, aparte de que el experimento tenga los tratamientos de insecticidas orgánicos, en este caso si será viable utilizar un testigo convencional (plaguicida químico) y un testigo absoluto. En esta situación, el testigo absoluto permitirá una visión de la importancia de la plaga como para decidir su control; mientras que el testigo convencional será el referente del efecto de la alternativa orgánica para valorar su eficacia, de tal manera que se pueda establecer la conveniencia de sustituir el plaguicida químico.

Error experimental

En un ensayo bien cuidado, el error experimental (también llamado residuo, resto no explicado o medida del azar) es la varianza o variación no explicada del mismo, que es ajena al efecto de los tratamientos. Es decir, si de la variación total que expresen los datos de un experimento le quitamos la variación que corresponde al de los tratamientos, la variación desconocida restante se conoce como error experimental. El error experimental es la medida de la variación que

expresan dos o más unidades experimentales a las cuales se les ha aplicado un mismo tratamiento. Su existencia y tamaño se debe fundamentalmente a dos causas independientes, las cuales son:

1. **Ambiente en donde se realiza el experimento:** dependiendo del lugar en donde se lleve a cabo el ensayo, la influencia del ambiente que lo rodea puede ser fundamental. Un estudio realizado en un laboratorio va a tener menos influencia del ambiente que uno que se realice a campo abierto. Por ejemplo, en los experimentos que se realizan con cultivos en las condiciones de campo, el suelo puede ser un causante de una variación no explicada.

2. **Manejo del experimento:** la magnitud del error experimental también depende mucho de la responsabilidad, honestidad, intuición, inteligencia y suspicacia del investigador. Un investigador debe tener sumo cuidado respecto del trato uniforme que debe dar a cada unidad experimental, debe evitar en lo posible criterios subjetivos preferenciales, deducir y sospechar de cualquier fuente de variación extraña que pudieran afectar a las respuestas extraídas de su experimento. Un manejo negligente de las labores experimentales arrojará por la borda toda la investigación realizada debido a que el experimento será insensible, no detectará ningún efecto, inducirá a cometer el error tipo II y a convertir al ensayo en una pérdida de tiempo y dinero.

La magnitud del error experimental puede ser determinada, ya sea por una de estas causas, o por las dos causas al mismo tiempo cuando existe un mal manejo del ensayo. La verificación matemática sobre la influencia del ambiente en donde se realiza el experimento se obtiene a través del coeficiente de determinación (r^2), que ofrece una idea de la magnitud de la variación explicada por los tratamientos aplicados. Mientras que el manejo del experimento, relativamente puede ser verificado a través del coeficiente de variación (CV) que presenta una variable de respuesta medida en dicho experimento.

Es importante considerar que aun en los experimentos que se realizan en condiciones controladas siempre existirá esa variabilidad que no se puede explicar entre las unidades experimentales que reciben un mismo tratamiento (variación dentro de los grupos) y que al inicio de este tema fue definido como error experimental. Debe entenderse que esta variación, por ser casual, es conocida como error aleatorio y se supone que es invariable en cada unidad experimental; estadísticamente definido bajo distribución normal, con media cero y varianza constante $N(0, \sigma^2)$. Sin embargo, cuando un ensayo no ha sido bien diseñado o no ha sido bien manejado, o las dos cosas al mismo tiempo, el investigador adiciona fuentes de variación secundarias que causan otro tipo de error que ya no obedece a un comportamiento aleatorio. En este sentido, todo experimento contiene un error experimental que puede estar integrado de la suma del error aleatorio y el no aleatorio (ocasionado por el propio investigador, conocido también como error de manejo o sistemático). Esto es:

$$\text{Error experimental} = \text{error aleatorio} + \text{error no aleatorio}$$

El investigador debe estar consciente que el éxito de un experimento es que el error no aleatorio sea cero y que el error experimental corresponda únicamente a la casualidad, lo cual se logra con rigor científico, aplicando un extremo cuidado en el diseño y en el desarrollo del ensayo; lo que consecuentemente al final, conferirá la debida precisión en la determinación de los efectos entre tratamientos.

Por lo que ya se ha manifestado sobre el error experimental, cuando éste es exclusivo del error aleatorio, no debe interpretarse como lo que sugiere su denominación, es decir como un error propiamente dicho (aunque el error humano si es posible, parcialmente), sino como lo que ya se ha indicado, hace referencia a toda variación externa al experimento que no es explicada por los tratamientos. Es preciso también indicar que en cualquier experimento que se realice será imposible eliminar totalmente el error experimental, lo máximo que podemos hacer es reducir su efecto de manera que el resultado y diferencia de los tratamientos evaluados sean establecidos más claramente. Al respecto de esto último y considerando lo que expresa Reyes (1984), se puede reducir el error experimental tomando las siguientes medidas:

a) Manejo de las unidades experimentales lo más homogéneamente posible (mismo tamaño, misma condición física, uniforme aplicación de fitosanitarios, etc.)
b) El uso de la parcela útil, que evite el traslape parcial de los tratamientos.
c) El uso de un diseño experimental que separe las potenciales fuentes de variación secundarias que podrían afectar al experimento.
d) Utilizar un adecuado e igual número de repeticiones para cada tratamiento.
e) Manejo uniforme del experimento, previendo las potenciales fuentes de variación adicional.
f) Sortear los tratamientos.
g) Aplicación de las pruebas estadísticas que puedan separar las potenciales causas de variación identificadas.

La magnitud del error experimental, en forma holística, nos permite la visión sobre el éxito de un experimento; el cual, como se habrá deducido de los párrafos que anteceden, tiene una dependencia mayoritaria en el investigador más que en el propio experimento *per se*. Este éxito también involucra la eficacia que debe lograrse en un experimento cuando se controlan los errores tipo I y II de la estadística, de los cuales se dará una explicación detallada más adelante. Sin embargo, no necesariamente un experimento exitoso quiere decir que sea eficiente.

En forma general, lo que debe tener siempre presente todo investigador es que cuanto menor sea el error experimental más certeros serán los resultados y más fácil será determinar diferencias reales entre los tratamientos que se evalúen, especialmente si dicha diferencia es pequeña.

La varianza que representa el error experimental de un diseño, puede permitirnos tener una idea de la eficiencia relativa que tendrá éste respecto de otro diseño que se utilice para analizar un mismo experimento. Si un primer diseño reporta exactamente la mitad de la varianza del error experimental de un segundo, entonces el primero será dos veces más eficiente que el segundo; siempre que los dos diseños tengan los mismos grados de libertad en el error experimental. Para dos diseños con distintos grados de libertad en el error experimental, haciendo el ajuste recomendado por Fisher, la eficiencia relativa (E_R) se determina por la siguiente expresión:

$$E_R = \frac{(S_1^2 - S_2^2)}{S_2^2} \cdot \frac{(GL_1 + 1)(GL_2 + 3)}{(GL_2 + 1)(GL_1 + 3)} \qquad (1.1)$$

En la expresión 1.1, E_R es la eficiencia relativa del diseño con la varianza del error 2 (S_2^2), respecto del diseño con la varianza 1 (S_1^2). GL_1 y GL_2 son los grados de libertad del error experimental de los diseños 1 y 2, respectivamente. Adicionalmente, un elemento importante que no debe dejarse de lado es el costo de un diseño, ya que diseños más eficientes demandarán una mayor inversión.

2

MUESTRA ESTADÍSTICA

Introducción

Uno de los elementos o componentes fundamentales en el éxito de los resultados de toda investigación es el tipo y tamaño de la muestra, a partir de la cual el investigador hace su inferencia. Estas muestras, como se explicará en el presente capítulo, dependen de varios factores que van desde el mismo comportamiento de la variable hasta la experticia del propio investigador; cuya importancia entre uno u otro depende de los costos de la medición de las unidades de muestreo. Todo esto es lo que se pretende explicar en este capítulo, abarcando temas como muestra estadística, tipos de muestra, el papel de los descriptores estadísticos de tendencia central y de dispersión, el tamaño de la muestra dependiendo del tipo de población, los factores que influencian en el tamaño muestral y el tamaño de muestra para los experimentos.

CONSIDERACIONES DE LA MUESTRA ESTADÍSTICA

Antes de entrar a detallar paso a paso el diseño de experimentos, objetivo principal de este texto, es prioritario que se identifique el tipo de muestra y la magnitud de su tamaño que permita una aserción verdadera respecto de la población a la cual representa, a sabiendas que ésta es una parte con que se describe a una población.

En este punto hay que hacer la diferencia correspondiente entre los ámbitos de aplicación del muestreo. No es lo mismo lo que se pueda obtener de una muestra proveniente de una población en donde no se tiene idea de la variabilidad de la información que se busca; o de una muestra en donde se conoce que la variabilidad de la información será muy reducida y estima aproximadamente lo que se obtendrá. En el primer caso, estaremos tratando con tipos de **investigaciones netamente descriptivas u observacionales**, donde el efecto que se busca no ha sido manipulado arbitrariamente y el medio que rodea a la población en estudio no lo controla, ya sea parcial o totalmente, el investigador. En el segundo caso estamos tratando con **investigaciones básicamente experimentales**, en donde la variabilidad del efecto que valoramos se supone será menos disperso, ya que el medio en donde la población se desarrolla está controlado por el investigador. Es decir, en investigaciones de tipo descriptivas necesitaremos un tamaño de muestra relativamente importante, que permita obtener conclusiones confiables acerca de una población; mientras que en las investigaciones de carácter experimental, el tamaño de muestra será reducido, y que ya en su contexto, se conocen como repeticiones.

La efectividad y magnitud de una muestra básicamente está subordinada a la representatividad de la misma, a la variabilidad dentro de la población y a los márgenes de error con que la muestra representa a la población de origen. La representatividad de una muestra permitirá, en forma

aproximada, que las características de la población no sean obviadas; es decir, lo que estadísticamente pueda concluirse con la muestra, sea factible de extrapolación a la población estudiada. Asimismo, si hay razones que indiquen la existencia de mucha variabilidad entre la información en una población, es lógico que la magnitud de la muestra vaya en aumento de acuerdo a dicha variabilidad. Esto último, también es igual para el margen de error de una muestra, ya que mientras más variabilidad presenten los datos más grandes deberán ser las muestras para estimar, por ejemplo, una media.

TIPOS DE MUESTRA

La representatividad de una muestra no es más que la consideración del azar al momento de la medición (recolección) de una variable (característica). Esto permite tener dos tipos generales de muestras:

1. Muestras probabilísticas o aleatorias
2. Muestras no probabilísticas o escogidas

Muestras probabilísticas o aleatorias

Una muestra probabilística o aleatoria es aquella en la que todos los sujetos o unidades de medición de una población tienen la misma probabilidad de ser seleccionados. Son los tipos de muestras que tienen el mayor grado de certeza, y por lo tanto, permiten realizar inferencias respecto de una población con una mayor credibilidad. Es el único tipo de muestra que relativamente tiene las características de la población de origen; así por ejemplo, si una población tiene un 30% de una característica determinada (color, edad, educación, altura, etc.), existe gran posibilidad de que esta misma proporción de dicha característica esté presente en la muestra o al menos tenga un valor muy cercano a éste. Entre los tipos de muestreo probabilístico más utilizados están:

- ✓ **Muestreo aleatorio simple:** es un tipo de muestreo recomendado para poblaciones pequeñas o finitas. Consiste en identificar a cada una de las unidades de medida (numéricamente, mediante letras o cualquier otro símbolo) de la población, de tal manera que puedan someterse a una selección aleatoria mediante algún tipo de sorteo (tómbolas, tablas de números aleatorios, etc.).

- ✓ **Muestreo sistemático:** este tipo de muestreo también está indicado para poblaciones pequeñas y consiste en la selección de una unidad de medida mediante el uso de intervalos. Para realizar este tipo de muestreo primero se parte seleccionando, al azar, una primera unidad de medida; luego a partir de ésta, el resto se seleccionan con un intervalo fijo. Por ejemplo, si asumimos un intervalo de 5, cada quinta unidad será seleccionada. Debe considerarse cierta precaución respecto de las unidades de medida seleccionadas de esta forma, ya que sólo la primera de éstas es seleccionada al azar, teniendo el resto una probabilidad relativa. Tiene cierta deficiencia respecto del muestreo aleatorio simple; ya que, si el intervalo escogido coincide con alguna alteración de la población, esto se reflejará en la muestra y, en consecuencia, la información que se extraiga no será representativa de la población de origen.

- ✓ **Muestreo estratificado:** es el tipo de muestreo más idóneo para poblaciones grandes o infinitas que poseen ciertas características heterogéneas, las cuales sugieren que dicha

población se divida en estratos o subpoblaciones de mayor homogeneidad, de tal forma que la muestra constituida considere estas características y sea representativa de la población en estudio al momento de medir la variable. En forma concreta, lo que se pretende con este tipo de muestreo es asegurar de que todos los estratos de importancia de una población estarán representados adecuadamente en la muestra.

Dentro de cada estrato, los cuales obedecen a características que según el estudio se las considera de importancia, (tales como edad, sexo, tiempo, etc.); las unidades de medida se las selecciona aleatoriamente.

- ✓ **Muestreo aleatorio por conglomerados:** en este tipo de muestreo, la unidad de medida constituye un grupo de elementos de la población que forman una unidad muestral y a la cual se la conoce como conglomerado. Se utiliza, generalmente cuando la población es infinita y muy heterogénea, de tal manera que no se puede estratificar la información. Para la toma de la muestra, la población se divide en conglomerados o subpoblaciones, dentro de las cuales se realiza un muestreo aleatorio simple. Ejemplos de conglomerados pueden ser las universidades de un país, los hospitales, productos empacados, una urna de votación, etc.

Muestras no probabilísticas

Muchas veces en un estudio descriptivo o exploratorio, el muestreo probabilístico como tal resulta excesivamente costoso, en otros casos, sencillamente sólo interesa una característica particular de la población; adicionalmente, un tamaño muestral determinado puede restringir la medición de una variable para un gran grupo de unidades de medición por lo caro que resulta. Para evitar estas limitaciones se acude a muestreos no probabilísticos que desafortunadamente tienen la desventaja de que no sirven para realizar generalizaciones (inferencia poblacional); ya que es muy difícil de que la muestra extraída sea representativa, debido a que no todos los sujetos de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidos. Consecuentemente, debido a esta particularidad en este tipo de muestreo, el tamaño de la muestra generalmente es establecido por el criterio subjetivo del investigador y las conclusiones que se extraigan sólo se circunscriben a las unidades de muestreo con determinadas características. Entre los tipos de muestreo no probabilístico se tienen:

- ✓ **Muestreo intencional o de conveniencia:** es un tipo de muestreo que selecciona a las unidades de medida de acuerdo a su disponibilidad o por la representatividad de un grupo de individuos dentro de la población. Como ejemplos se pueden mencionar la determinación de niveles de mercurio en peces, pero de un peso determinado; o encuestas a personas que se tienen fácil acceso. La extrapolación a la población es específica para la condición estudiada y debe ser especificada.

- ✓ **Muestreo por cuotas:** viene a constituir una analogía al muestreo estratificado, pero se diferencia de éste por el hecho de que la selección de los datos no se hace en forma aleatoria. Es un tipo de muestra predeterminado, donde se establecen grupos con ciertas características de interés para el investigador. Es un tipo de muestreo que se utiliza mucho en encuestas de opinión.

- ✓ **Muestreo bola de nieve:** este tipo de muestreo ocurre cuando se utilizan unos pocos sujetos (unidades de medida), los cuales a su vez, brindan información sobre otros sujetos,

hasta constituir una muestra relativamente adecuada. Es aplicable cuando la información no es tan común o es de difícil acceso; ejemplos pueden ser el estudio de ciertos enfermos, de ciertos grupos delincuenciales, entre otros.

Antes de entrar a detallar la forma de establecer el tamaño de una muestra probabilística se hace necesario explicar sobre algunos estadígrafos descriptores importantes y relacionados al tamaño de las muestras estadísticas; los mismos que de aquí en adelante se los mencionará, unos más continuamente que otros.

DESCRIPTORES ESTADÍSTICOS DE TENDENCIA CENTRAL Y DE DISPERSIÓN

Los descriptores estadísticos son todos aquellos estadígrafos que nos ofrecen una visión del conjunto de datos en cuanto al centro y a la dispersión o variabilidad de ellos; unos más precisos que otros, dependiendo de la distribución y/o dispersión que presenten. Estos descriptores nos acercan una imagen de los rasgos de los datos, ya sea gráficamente (como un histograma) o numéricamente. En lo que corresponde a los descriptores numéricos, estos se dividen en descriptores de tendencia central y en descriptores de dispersión o variabilidad.

Descriptores de tendencia central

Los descriptores de tendencia central son aquellos valores estadísticos que tratan de describir el centro de un conjunto de datos, que generalmente conforman una muestra. El término de tratar de describir se ha mencionado por el hecho de que, casi siempre se trabajan con muestras, por lo tanto, dichos valores estadísticos son estimadores de sus correspondientes parámetros estadísticos, que son las medidas de posición central de una población. Los tres valores estadísticos más importantes, que ubican el centro de una muestra son la media $(\bar{Y})$, la mediana (M_d) y la moda (M_o).

La media

La media, o también llamada media aritmética, es el promedio o cociente obtenido entre la suma de un conjunto de números y el número total de ellos. Esta medida central es la de mayor uso en la estadística y fuera de ella. Según la definición dada, su expresión es:

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \cdots + Y_n}{n} = \frac{\sum Y}{n} \qquad (2.1)$$

Donde $\bar{Y}$ es la media; $\sum Y$ representa a la suma de todos los valores de la muestra, teniendo $\sum$ (Sigma del alfabeto griego) el significado de sumatoria; y n es el número total de datos de la muestra.

Hay que indicar que todas las expresiones que se verán en el texto hacen referencia a datos muestrales únicamente, ya que existe una diferencia respecto de los símbolos que se utilizan cuando se trata del conjunto de datos de una población. Por ejemplo, la media muestral que se ha descrito tiene el símbolo dado de $\bar{Y}$, mientras que la media de una población se indica por el símbolo μ (Mi del alfabeto griego); asimismo, la varianza y la desviación estándar que más adelante se indicarán tienen sus formas diferentes de simbolizarse.

Cuando queremos que nuestra media muestral sea representativa de una población que está compuesta de subpoblaciones con ciertas características que son necesarias de considerar, de las cuales se han obtenido también submedias muestrales, se puede recurrir al uso de una *media ponderada* $(\bar{\bar{Y}}_P)$. Esta media ponderada se define como:

$$\bar{\bar{Y}}_P = \frac{\sum(\bar{Y}_U \cdot P)}{\sum P} = \frac{\bar{Y}_{U1} \cdot P_1 + \bar{Y}_{U2} \cdot P_2 + \cdots + \bar{Y}_{Un} \cdot P_n}{P_1 + P_2 + \cdots + P_n} \tag{2.2}$$

Donde P representa el "peso" o tamaño de la submuestra y $\bar{Y}_U$ es la media submuestral.

Ejemplo de aplicación 2.1

Los contenidos de potasio en $meq/100g$ de suelo en 5 lotes distintos son: 0.16, 0.19, 0.25, 0.21 y 0.14; obtenidos en superficies respectivas de 1.8 ha, 2.9 ha, 8.6 ha, 4.1 ha y 2.5 ha. Calcular la media aritmética y la media ponderada.
La media aritmética será:

$$\bar{Y} = \frac{0.16 + 0.19 + 0.25 + 0.21 + 0.14}{5} = 0.19\ meq/100\ g$$

La media ponderada será:

$$\bar{\bar{Y}}_P = \frac{(0.16 \times 1.8) + (0.19 \times 2.9) + (0.25 \times 8.6) + (0.21 \times 4.1) + (0.14 \times 2.5)}{1.8 + 2.9 + 8.6 + 4.1 + 2.5}$$

$$\bar{\bar{Y}}_P = 0.21\ meq/100\ g$$

La media ponderada ha realizado una consideración de las superficies (pesos), respectivamente, de los resultados de contenido de potasio; reportando una diferencia de 0.02 meq/100 g respecto de la media aritmética. Tal vez una diferencia insignificante para unas pocas hectáreas $(16\ kg\ K/ha)$[5].

La mediana

La mediana (M_d) es otra medida del centro de una muestra. Se define como el valor central de un conjunto de datos (o muestra), ordenados en algún orden de magnitud (generalmente en orden creciente); dividiendo a la muestra en dos partes iguales, con la mitad de los valores debajo de ésta y la otra mitad por encima de ella. Cuando el conjunto de datos es impar, la mediana es el valor central; si es par, la mediana es el promedio entre los dos valores centrales. Una de sus mayores ventajas respecto de la media, es que no se deja influenciar por valores extremos.

No existe una fórmula que permita determinar la mediana, pero es posible ubicar su posición, una vez que los datos han sido ordenados. La expresión que permite ubicar la posición de la mediana es:

$$Pos.M_d = \frac{n+1}{2}$$

[5] Debido a que $1\ meq\ K/100\ g = 390\ ppm$, la diferencia es: $(0.21 - 0.19) \times 390 \times 2 = 16\ kg\ K/ha$.

La media no es representativa de un conjunto de datos, cuando éstos tienen cierta dispersión. Por ejemplo, en el caso de la lluvia, al ser una variable que generalmente presenta una fuerte dispersión, la media estará cargando un error relativo a los valores más bajos. En esta situación, mayor representatividad tendrá la mediana. Veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo de aplicación 2.2

Se ha medido el peso (g) de 7 frutos de mango, obteniéndose los valores: 456, 503, 475, 417, 523, 432 y 489. Consideremos que se confundió el valor de 417 por 174. La media aritmética con los datos correctos será:

$$\bar{Y} = \frac{456 + 503 + 475 + 417 + 523 + 432 + 489}{7} = 470.7 \approx 471\ g$$

La media aritmética con el dato errado será:

$$\bar{Y} = \frac{456 + 503 + 475 + 174 + 523 + 432 + 489}{7} = 436.0\ g$$

La mediana de este conjunto de datos, junto con el valor errado, será:

174 432 456 **475** 489 503 523

$$M_d = 475\ g$$

Si se obtiene la diferencia entre la media con los datos correctos y la del dato errado, el error será: $471 - 436 = 35$. Si hacemos lo mismo, pero con la mediana, se tendrá: $471 - 475 = -4$. Esto quiere decir, que con la mediana se tiene un error de 4 unidades; mientras que con la media, el error es de 35 unidades. Es de esta forma como los valores extremos afectan a la media, haciendo a la mediana mucho más precisa.

Una opción para el ejemplo de aplicación 2.2 es el uso de la *media recortada*, es decir, el promedio aritmético excluyendo los valores cuya dispersión es mucho mayor a la mostrada por el resto de los datos. Para el ejemplo, la media con exclusión de 174, es 480; valor este que es más representativo.

Cuando se tienen datos con una dispersión moderada, la mediana es generalmente menos confiable que la media; ya que su nivel de error es mayor que el de la media. Su aplicación está más difundida cuando se utilizan variables discretas o cualitativas, y por lo tanto, su uso más común es en las pruebas no paramétricas. Una de las propiedades comunes, tanto para la media como la mediana, es que siempre existen en un conjunto de datos y son únicas.

La moda

La moda (M_o) es otro estadígrafo que a veces se utiliza para describir el centro de los datos, y al igual que la mediana, no tiene una expresión para calcularla. Se define como el dato que se repite con mayor frecuencia en una muestra. A lo contrario de la media y la mediana, una muestra puede no tener moda (no tener dos o más valores iguales); y si la tiene, puede no ser única. De lo último se deduce que, dependiendo las modas que tenga una muestra, ésta puede ser unimodal, bimodal, trimodal, etc.

En una distribución normal ideal, la media, la mediana y la moda coinciden en el centro de los datos. Asimismo, existe una relación empírica entre estos tres estadígrafos, siempre que la muestra sea unimodal y con cierto sesgo (o asimetría), que es la siguiente:

$$\bar{Y} - M_o = 3(\bar{Y} - M_d)$$

Descriptores de dispersión

Los descriptores de dispersión son todos aquellos estadígrafos que nos permiten tener la magnitud del espacio que hay entre el centro y los extremos de un conjunto de datos. En otras palabras, estos descriptores constituyen las medidas de variación de una muestra. Entre los más importantes, debido a su uso en la inferencia estadística, están la varianza (S^2), la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV).

La varianza

Es un estadígrafo que describe la variabilidad de una muestra y junto con la desviación estándar, son los de mayor uso en las pruebas de inferencia estadística.

La deducción de la varianza parte de otro descriptor estadístico de la dispersión conocida como la *Desviación media* (DM), que es el promedio aritmético de todas las desviaciones de los datos respecto a la media, en valores absolutos; esto es:

$$DM = \frac{\sum|Y - \bar{Y}|}{n} \qquad (2.3)$$

La expresión 2.3 está basada en un criterio radical y subjetivo, que puede hacer cometer errores importantes si dicha desviación se utilizara para inferencia estadística. Para evitar este criterio y además de no utilizar valores absolutos que eliminan dispersiones más pequeñas, sino más bien los cuadrados de las desviaciones, se tiene lo siguiente:

$$S^2 = \frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{n - 1} \qquad (2.4)$$

La expresión 2.4 en su concepción es la *desviación cuadrática media* de una muestra, pero comúnmente se la conoce como la *varianza*. Dado que estamos considerando una muestra, S^2 es la varianza de la muestra; para la población, el símbolo cambia a σ^2; además de que $n - 1$ cambia a N que es el tamaño de la población.

Es preciso hacer la indicación del uso de $n - 1$ en el denominador de la expresión 2.4 en vez de n. Utilizar el valor de $n - 1$ como denominador, permite tener una varianza muestral mucho más cercana a la varianza poblacional en muestras pequeñas, es decir cuando $n < 30$. Sin embargo, en muestras de más de 30 datos es prácticamente indiferente utilizar n o $n - 1$ en el denominador de la mencionada expresión. El valor de $n - 1$ es el que se considera en este texto y tal como se lo indicará más adelante, se conoce como grados de libertad.

La forma más común de la varianza se obtiene resolviendo la suma de cuadrados del numerador de la expresión 2.4:

$$S^2 = \frac{\sum(Y^2 - 2Y\bar{Y} + \bar{Y}^2)}{n - 1} = \frac{\sum Y^2 - 2\bar{Y}\sum Y + \sum \bar{Y}^2}{n - 1} \qquad (2.5)$$

Por deducción se conoce que:

$$\sum Y = n \cdot \bar{Y} = \frac{n \cdot \sum Y}{n} \qquad (2.6) \qquad \sum \bar{Y}^2 = \bar{Y}^2 \sum 1 = \left(\frac{\sum Y}{n}\right)^2 \cdot n \qquad (2.7)$$

Reemplazando 2.6 y 2.7 en la expresión 2.5, se tiene:

$$S^2 = \frac{\sum Y^2 - 2\frac{\sum Y}{n} \cdot \frac{n \cdot \sum Y}{n} + n \cdot \left(\frac{\sum Y}{n}\right)^2}{n-1}$$

$$S^2 = \frac{\sum Y^2 - 2n\left(\frac{\sum Y}{n}\right)^2 + n\left(\frac{\sum Y}{n}\right)^2}{n-1}$$

$$S^2 = \frac{\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}}{n-1} \qquad (2.8)$$

La expresión 2.8 es la forma común de la varianza, a la cual también se le conoce como la forma abreviada de la varianza.

La desviación estándar

La desviación estándar, o también llamada desviación típica, sencillamente es la raíz cuadrada positiva de la varianza y se simboliza mediante la letra S. En el caso de la población, el símbolo de la desviación estándar es σ (Sigma minúscula del alfabeto griego). Obteniendo la raíz cuadrada positiva de 2.8, la desviación estándar es:

$$S = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}}{n-1}} \qquad (2.9)$$

El coeficiente de variación

El coeficiente de variación es otro descriptor estadístico que se utiliza como medida de dispersión de un conjunto de datos. Se define como la variación relativa de los datos, respecto de la media, ya que relaciona la desviación estándar con ésta en forma porcentual. Matemáticamente se expresa como:

$$CV = \frac{100 \cdot S}{\bar{Y}} \qquad (2.10)$$

Como podrá observarse, el CV no depende de las unidades de medida de la variable; esto le da una ventaja respecto de la desviación estándar, cuya magnitud de la dispersión está en función de la unidad de medida. Esto quiere decir que, si se quiere comparar la dispersión de dos variables medidas en una misma unidad, el mejor indicador de la variación en ese caso es el coeficiente de variación. Más adelante se hará una explicación más detallada de este descriptor en referencia a su utilidad en los diseños experimentales.