

Cómo Diseñar un Experimento para Generar Conocimiento

Graciano Calva-Calva* y Josefina Pérez Vargas**

Resumen

La hipótesis elemental del método científico para la generación de conocimiento dice: "...hay cosas reales, cuyos caracteres son absolutamente independientes de nuestras opiniones...". El proceso que permite la prueba de esa hipótesis, es el diseño del experimento, desarrollo que comienza en el momento de la concepción de la idea de estudio, sea un fenómeno, un problema a resolver o el mejoramiento de un proceso productivo.

En este ensayo se analiza y discute cómo generar conocimiento válido con base en el diseño de experimentos.

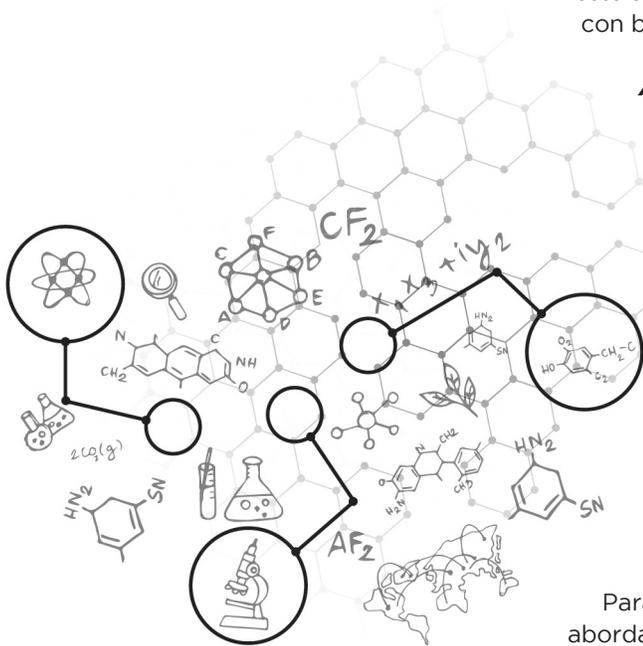
Abstract

The basic hypothesis of the scientific method for the generation of knowledge state "...there are real things, whose characters are entirely independent of our opinions...". The process that allows the test of this hypothesis, is the design of experiments, process that begins at the moment of the conception of the idea of study, been a phenomenon, a problem to be solved or to improve a production process.

In this essay will analyze and discusses how to generate valid knowledge on the basis of the design of experiments.

Introducción

Para generar conocimiento se debe entender, y saber, cómo abordar los fenómenos o problemas de estudio desde un punto de vista científico, diferente del sentido común, en el cual el criterio para juzgar es que las nuevas ideas han de semejarse a las antiguas. En la ciencia, el conocimiento se construye sistemáticamente, con base en estructuras teóricas, verificando su coherencia externa y sometiendo a prueba cada uno de los conceptos, aseveraciones e hipótesis, eliminando la selectividad característica del sentido común. La ciencia no sólo hace exploraciones teóricas y subjetivas, sino que hace pruebas sistemáticas, controladas en el laboratorio o campo experimental: hace investigación. Esto le permite descartar explicaciones metafísicas, es decir, proposiciones indemostrables. La ciencia estudia las cosas que pueden ser observadas y sometidas a prueba públicamente. Si las proposiciones o preguntas no ofrecen esa posibilidad, no son cuestión científica. El proceso que permite la generación científica de conocimiento es



Acerca de los autores...

* Biotecnología y Bioingeniería, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN.

** Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

el diseño de experimentos. Este proceso comienza en el momento mismo de la concepción de la idea de estudio, sea un fenómeno, un problema a resolver o el mejoramiento de un proceso productivo.

Con base en lo anterior, cabe preguntarse ¿cuál de los siguientes métodos indicados por Charles Sanders Peirce en 1877 (descritas en Kerlinger F. N., 1995) se debe usar para generar conocimiento?

1.- Método de la tenacidad. En él los hombres se aferran a la verdad, una verdad que saben cierta porque la creen firmemente, porque siempre la han tenido por cierta. La frecuente repetición de semejantes verdades parece confirmar su validez. Los datos psicológicos recientes han demostrado que los hombres se adhieren a sus creencias frente a hechos que claramente las contradicen. Y además se deducirán “nuevos” conocimientos y proposiciones que acaso sean falsas.

2.- Método de autoridad. Se basa en una creencia establecida. Si la Biblia lo dice, así debe ser; si un afamado físico lo dice, así debe ser. Si está publicado en una revista o libro científico, así debe ser. Si una idea está respaldada por el peso de la tradición y la sanción pública, será cierta.

3.- Método a priori o de intuición. Se basa en el supuesto de que las proposiciones aceptadas por el “apriorista” son evidentes por sí mismas. Éstas concuerdan con la razón y no necesariamente con la experiencia. Se piensa que los hombres, por libre comunicación e intercambio, pueden alcanzar la verdad, porque sus inclinaciones naturales tienden hacia ella. La dificultad de esta posición racionalista reside en la expresión “con cuerda con la razón”. ¿La razón de quién? Si algo es evidente para varias personas, ¿significa que así ocurre realmente? Según el método a priori, eso sucede y “es lógico”.

4.- Método de la ciencia. Se basa en la experimentación, la cual es una prueba para mostrar la verdad, examinar una hipótesis o descubrir lo desconocido. Este método es una forma de acercamiento entre la naturaleza y la ciencia. Es el método en el cual se deben fundar nuestras creencias, no en cosas humanas, sino en cierta permanencia externa, algo ajeno a los efectos de nuestro pensamiento. El método final debe ser tal, que la conclusión final de todos los hombres sea la misma. La hipótesis fundamental de este método es: hay cosas reales cuyos caracteres son absolutamente independientes de nuestras opiniones.

El método de la ciencia, a diferencia de los otros tres, se corrige a sí mismo. En todo el camino del conocimiento científico hay comprobaciones internas, que han sido concebidas y utilizadas para controlar y verificar las actividades y conclusiones del científico en su búsqueda de un conocimiento fidedigno y externo a él. El científico no acepta la veracidad de una aseveración, aunque los datos al inicio le parezcan prometedores. Insiste en someterla a prueba y en que cualquier procedimiento de verificación debe quedar abierto a la inspección pública. Dice Pierce que las comprobaciones empleadas en la investigación científica están ancladas lo más posible en la realidad externa al científico y a sus opiniones, percepciones, juicios, valores, actitudes y emociones personales: la objetividad.



Conceptos Básicos en el Diseño de Experimentos

En la generación de conocimiento, la investigación científica involucra la acumulación de información, formulación de hipótesis y su verificación mediante experimentos científicos dirigidos a la verificación de ciertas teorías acerca de fenómenos naturales para mostrar la verdad, examinar una hipótesis o descubrir lo desconocido. Esto requiere de una colección de **observaciones**. Frecuentemente es imposible obtener las observaciones de todos los elementos **(N)** de una **población** por ser esta muy grande o infinita. En su lugar se toma sólo un pequeño grupo de elementos **(n)**: una **muestra**. A partir de las observaciones encontradas en la muestra se obtienen los **estadísticos muestrales (X, S, S², etcétera)** con base en los cuales se pueden hacer deducciones de los **parámetros poblacionales (μ , σ , σ^2 , etcétera)** que indican los fenómenos y/o hechos que suceden en la población, proceso llamado **inferencia estadística**. La confiabilidad de esas deducciones depende de la forma en que se tomó la muestra.

El muestreo aleatorio, donde cada elemento de la población tiene la misma oportunidad de ser escogido, es el mejor método para asegurar una muestra homogénea y objetiva de la población. Para lograr una muestra verdaderamente aleatoria a partir de poblaciones pequeñas, se pueden tomar cada vez lotes o utilizar tablas de números aleatorios, el directorio telefónico, tablas de lotería, etcétera. De todas formas, las inferencias obtenidas a partir de las muestras tienen cierta probabilidad, nivel de significancia α , de no ser verdaderas para la población. El **diseño de experimentos** es básicamente la planeación para ese muestreo y colección de datos, de tal forma que con esa muestra



pueda obtenerse la información deseada de la población con la precisión suficiente a fin de que pueda probarse una hipótesis. El muestreo puede ser por reemplazamiento o sin reemplazamiento. En el primero, cada elemento muestreado se reincorpora a la población, de tal suerte que pueda ser seleccionado nuevamente al siguiente muestreo. Con este sistema una población finita se hace automáticamente infinita. Así, la estadística ayuda a la selección, construcción del diseño y al subsiguiente análisis de los datos observados. Este análisis debe incluir una descripción resumida de los datos, estimación o propiedades del fenómeno que se investiga y la prueba de la hipótesis.



Guía para Diseñar un Experimento

En una situación experimental, el científico debe usar sus conocimientos para definir claramente, los siguientes rubros:

- Tipo de estudio:
 - **Exploración de fenómenos naturales**
 - **Verificación de teorías**
 - **Establecimiento de procesos**
 - **Mejoramiento de procesos**

- Objetivo del experimento:
 - **Verificación de teorías acerca de fenómenos naturales**
 - **Exploración de fenómenos naturales**
 - **Mejoramiento de procesos**

- Variables:
 - **Dependientes o de respuesta a medir**
 - **Independientes a incluir en el experimento**
 - **Cómo se manejarán las variables independientes**

- Estrategia experimental:
 - **Modelo o diseño experimental**

Los tres primeros bloques de decisiones ayudan a definir precisamente al experimento. Después de haberlo definido, se usa la estadística para la construcción de una estrategia experimental eficiente. El éxito del experimento depende de la habilidad del investigador y de la eficiencia del modelo o diseño experimental.



Errores en el Diseño de Experimentos

Exactitud: Ninguna medición está libre de error absoluto, es decir, la diferencia entre el valor obtenido y el valor verdadero. Para determinar la exactitud de un instrumento, se usan técnicas de calibración.

Precisión: Independientemente del error absoluto, toda medición está sujeta a cierta **incertidumbre**, que se puede deducir del número de cifras significativas del dato. El número de **cifras significativas** refleja la bondad del método de medición y de los instrumentos para dar lecturas repetidas de la misma cantidad.

Errores sistemáticos o determinados: Son aquellos de los cuales se puede localizar o definir la fuente. Se pueden clasificar en:

Instrumentales.- Incertidumbre en la escala de lectura de los instrumentos o equipos, falla en las balanzas, mala calibración del material de vidrio o equipo, pureza de los reactivos, mala selección del material y equipo, etcétera {para leer un valor sobre una escala, el valor de incertidumbre “ \pm ” se asigna como el 20% de la división más pequeña de la escala. Por ejemplo, en una bureta con la división más pequeña igual a 0.1 ml, el volumen se estima como el valor leído \pm 0.02 ml.}.

Metódicos.- Solubilidad, reacciones incompletas, precipitación simultánea, cooprecipitación, efectos postprecipitación, descomposición o precipitación durante el calentamiento o mezclado, reacciones laterales o auxiliares, etcétera.

Operativos.- Manipulación por parte del analista, falta de experiencia en el laboratorio, introducción de materiales extraños a recipientes o materiales descubiertos, proyecciones de materiales o arrastre durante procesos de evaporación y/o calentamiento, pérdida de

sólidos o precipitados durante los procesos de filtración, mala selección de condiciones experimentales (temperaturas de ignición, secado, reacción, pH, etcétera), pesado de contenedores y materiales calientes, mal mantenimiento de materiales de desecación, etcétera.

Personales.- Pobre percepción de los colores, daltonismo, prejuicio (por ejemplo, tendencia a ajustar los valores o resultados a una situación preconcebida).

Los errores sistemáticos o determinados en relación con el resultado final, pueden llevar a cualquiera de estas dos situaciones: **de error constante o de error proporcional**. Una situación de error constante es, por ejemplo en un análisis volumétrico, el uso de un volumen constante de un reactivo con impurezas que pueden interferir en el análisis. Con respecto al resultado final, el efecto de este error variará de acuerdo a la cantidad de compuesto en la muestra a ser analizada. Por ejemplo, si en la reacción anterior para valorar Cl^- se utiliza ácido nítrico contaminado con Cl^- (digamos 1 mg de Cl^- por cada 10 ml de ácido), y se usa un volumen constante de ácido (digamos 10 ml), entonces se produce una situación de error constante, sin embargo, el **error relativo** es proporcional a la cantidad del analito a analizar:



Si la muestra bajo análisis contiene 0.1000 g de Cl^- , el *error relativo* sería:

$$0.001 \text{ g} / 0.1000 \text{ g} \text{ ó } + 10 \text{ ppt}$$

En el caso de que la muestra contenga 0.7000g de Cl^- , el *error relativo* sería:

$$0.001 \text{ g} / 0.7000 \text{ g} \text{ ó } + 1.4 \text{ ppt}$$

Nótese que esta es una situación de error constante (0.001 g), independientemente del tamaño de la muestra o la cantidad del analito bajo investigación, pero la magnitud del error relativo es proporcional a la cantidad del analito a ser determinada.

Una situación de error constante se produce también por la incertidumbre en la lectura los instrumentos o sistemas de medición. Esto es, el error en la lectura es constante independientemente del valor leído (por ejemplo, en material volumétrico graduado y equipo con dial de lectura), sin embargo, el error relativo es proporcional a la magnitud de la lectura.

La **situación de error proporcional** (no constante) se presenta en casos donde por ejemplo, se le asigna un valor erróneo a un estándar. Es decir, si a una solución estándar se le asigna un valor de 0.0050 g/ml cuando su valor real es de 0.0046 g/ml, entonces la magnitud del error introducido será proporcional a la cantidad del analito analizado. Así, en un análisis donde se gastan 10 ml de



la solución estándar, el error sería:

+ 0.004 g de analito error relativo: 0.004 g/0.046 g ó +87 ppt

Si el volumen gastado fuera de 20 ml, entonces el error sería:

+0.008 g de analito error relativo: 0.008 g/0.092 g ó +87 ppt

Nótese que en este caso de error proporcional, el error relativo permanece constante.

Errores indeterminados, aleatorios o accidentales: Son atribuidos a causas desconocidas, que no pueden ser predichas (como una magnitud o dirección) a partir de una sola medición de una serie o de un sólo dato obtenido de una observación única. Una vez incorporado al sistema de análisis o experimento, puede ser que no haya posibilidad de ser atribuido a alguna fuente de variación. El incidente es único, aleatorio y accidental.

Aparentemente la posibilidad de los errores aleatorios se incrementa con el número de operaciones involucradas en la obtención de los datos o medidas. Entonces, una estrategia para reducir la magnitud de este error, es disminuir al máximo el número de manipulaciones durante la experimentación y el análisis.

Mientras los errores aleatorios no se pueden predecir con exactitud, su patrón de ocurrencia puede analizarse por técnicas estadísticas para conocer su magnitud, frecuencia de ocurrencia y efecto sobre los resultados finales.

Bibliografía

Casp-Vanalocha, A., y Abril-Requena, J. Kerlinger, F.N., (1975). Investigación del comportamiento. Técnicas y metodología. Nueva Editorial Interamericana, pp 1-10. México.

Spiegel, M. R., (1975). Probabilidad y estadística. Teoría y problemas resueltos, pp. 76-79; 155-162. Mc. Graw Hill, México.

Mendenhall, W., (1979). Introduction to probability and statistics. 5th Ed. Duxbury Press, Massachusetts, USA., pp. 401-465.

Virgil, L.A., and R.A. Mc Lean, (1974). Design of experiments. A realistic Approach. pp. 1-40. Marcel Dekker, Inc., New York, USA.

Peng, K.C., (1967). The design and analysis of scientific experiments. An introduction with some emphasis on computation. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts, USA. pp. 1-21.

TABLA 1. ALGUNOS MODELOS EXPERIMENTALES

MODELO	APLICACIONES	ESTRUCTURA	INFORMACIÓN DESEADA
Completamente Aleatorio	Investigación de un solo factor en muestras homogéneas y bajo condiciones de variación controladas.	Las unidades experimentales se asignan aleatoriamente a cada tratamiento. Bloqueo: ninguno	Estimar el efecto por los tratamientos. Estimar precisión.
Factorial	Investigación del efecto de dos o más factores con posible interacción entre ellos.	Se corren todas las combinaciones entre los niveles de cada factor. Bloqueo: ninguno	Efecto de cada factor y su interacción con los otros factores. Estimar la precisión.
Factorial en Bloques	Cuando el número de corridas bajo condiciones uniformes en un factorial completo es muy grande.	El conjunto completo de tratamientos se divide en subconjuntos, de tal manera que algunas de las interacciones de mayor orden quedan en bloques. Bloqueo: usualmente en unidades de tiempo o espacio. La estimación de ciertas interacciones se sacrifica por el bloqueo.	La misma que para los factoriales, pero algunas de las interacciones de mayor orden no se pueden estimar debido al bloqueo.
Factoriales Fraccionales	Cuando hay muchos factores y se hace impráctico correr todas las combinaciones o tratamientos.	Se investiga el efecto de varios factores, pero sólo se corre un subconjunto de tratamientos. Bloqueo: algunas veces es posible pero no necesario.	Efecto de varios factores y algunas de sus interacciones. No se puede estimar la precisión de los diseños factoriales fraccionales pequeños.
Bloques Aleatorios	Cuando se investiga un factor y el material experimental o variables del medio ambiente pueden dividirse en bloques o grupos homogéneos.	Cada nivel de un factor está presente en cada bloque o grupo. Bloqueo: con respecto a otra variable experimental.	Estima los efectos de un factor, independientemente de los efectos de la variable bloqueada. Estima los efectos de la variable bloqueada. Estima la precisión.
Bloques Balanceados e Incompletos	Cuando hay un factor principal pero no se pueden acomodar todos los tratamientos en un bloque.	Se seleccionan y asignan ciertos tratamientos a cada bloque. Cada tratamiento debe aparecer al menos una vez en cada bloque con cada uno de los otros tratamientos. Bloqueo: una variable con respecto a cada una de las otras variables.	La misma que en bloques aleatorios. Todos los efectos principales son estimados con igual precisión.
Bloques Parcialmente Balanceados e Incompletos	Cuando se requiere uno de bloques balanceados e incompletos, pero es un número tan grande de bloques que lo hace impráctico.	Para un factor principal. Para cada bloque se establecen asignaciones selectas de tratamientos. Bloqueo: una variable con respecto a cada una de las otras.	La misma que en bloques aleatorios, pero no todos los efectos de los tratamientos pueden ser estimados con igual precisión.
Cuadrados Latinos	Para un factor principal donde los resultados pueden verse afectados por otras dos variables o fuentes de variación. Se asume que no hay interacción.	Se hacen dos agrupaciones cruzadas, correspondientes a los renglones y columnas de un cuadrado, entre las unidades experimentales. Cada tratamiento ocurre una vez en cada renglón y cada columna. El número de tratamientos es igual al número de columnas y de renglones. Bloqueo: el factor con respecto a las otras dos variables.	Estimar los efectos de un factor libre de los efectos de las dos variables o fuentes de variación bloqueadas.
Cuadrado de Youden	Las mismas que cuadrados latinos, pero el número de tratamientos, renglones y columnas no necesita ser igual.	Cada tratamiento ocurre una vez en cada renglón. El número de tratamientos tiene que ser el mismo que el número de columnas. Bloqueo: el factor con respecto a las otras dos variables.	Lo mismo que en cuadrados latinos.
Anidado	Cuando se estudia una variable relativa en vez del efecto de fuentes de variación (por ejemplo, la variabilidad en pruebas de la misma muestra y la variabilidad de diferentes muestras).	Los factores son estratos o niveles en una estructura jerárquica. Las unidades experimentales se prueban para cada nivel o estrato.	Variación relativa en los estratos o niveles.