

**YINETH PIÑEROS CASTRO - EDUARDO RODRÍGUEZ SANDOVAL**  
EDITORES ACADÉMICOS

# **MANUAL DE PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

## **Propiedades, Operaciones y Bioprocesos**

### **AUTORES**

**Ricardo Contento  
Diana Fernanda Abril  
Edgar Mauricio Vargas  
Daniel A. Varela Muñoz  
Luz Marina Arango  
Blanca Liliana Useche  
Fredy Alexander Garzón  
Alexander Eslava S.  
Katherine Manjarrés  
Yineth Piñeros Castro  
Eduardo Rodríguez Sandoval**



**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ  
JORGE TADEO LOZANO**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS**







# MANUAL DE PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

PROPIEDADES, OPERACIONES  
Y BIOPROCESOS



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ  
**JORGE TADEO LOZANO**

---

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS



# MANUAL DE PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

## PROPIEDADES, OPERACIONES Y BIOPROCESOS

EDITORES ACADÉMICOS

Yineth Piñeros Castro  
Eduardo Rodríguez Sandoval

AUTORES

Ricardo Contento  
Diana Fernanda Abril  
Edgar Mauricio Vargas  
Daniel A. Varela Muñoz  
Luz Marina Arango  
Blanca Liliana Useche  
Fredy Alexander Garzón  
Alexander Eslava S.  
Eduardo Rodríguez Sandoval  
Yineth Piñeros Castro  
Katherine Manjarrés

Bogotá D.C. - Colombia  
2009

Manual de prácticas de ingeniería de alimentos : propiedades, operaciones y bioprocesos / editores académicos Yineth Piñeros Castro, Eduardo Rodríguez Sandoval / autores Ricardo Contento... [*et al.*] ; — Bogotá : Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2009. 112 p.; 20 cm.

ISBN 978-958-725-016-9

I. INGENIERÍA DE ALIMENTOS. 2. PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.  
I. Contento, Ricardo. II. Yineth, Piñeros Castro, comp. III. Rodríguez Sandoval, Eduardo, comp.

CDD664M319

Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano  
Carrera 4 No. 22-61 Bogotá D.C. - Colombia  
www.utadeo.edu.co

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

MANUAL DE PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
PROPIEDADES, OPERACIONES Y BIOPROCESOS

ISBN 978-958-725-016-9

EDITORES ACADÉMICOS  
Yineth Piñeros Castro  
Eduardo Rodríguez Sandoval

AUTORES  
Eduardo Rodríguez Sandoval  
Ricardo Contento  
Diana Fernanda Abril  
Edgar Mauricio Vargas  
Daniel A. Varela Muñoz  
Luz Marina Arango  
Blanca Liliana Useche  
Fredy Alexander Garzón  
Alexander Eslava S.  
Yineth Piñeros Castro  
Katherine Manjarrés

Rector: JOSÉ FERNANDO ISAZA DELGADO  
Vicerrector Académico: DIÓGENES CAMPOS ROMERO

DIÓGENES CAMPOS ROMERO, Decano de la Facultad de Ciencias Naturales  
GILMA JANETH LUNA CORTÉS, Decana del Programa de Ingeniería de Alimentos  
JAIME MELO CASTIBLANCO, Director de Publicaciones (E)

CORRECCIÓN DE TEXTOS: Taller de Edición - Luis Daniel Rocca Lynn  
DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN: Felipe Duque Rueda

Impresión - Cargraphics S.A.

Reservados todos los derechos  
2009© Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

IMPRESO Y HECHO EN COLOMBIA — PRINTED AND MADE IN COLOMBIA

---

# CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| PRÓLOGO.....  | 7   |
| APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN PRUEBAS DE LABORATORIO            |     |
| EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS.....   | 9   |
| MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA DE FLUIDOS ALIMENTICIOS              |     |
| TRASLÚCIDOS UTILIZANDO UN VISCOSÍMETRO DE CAÍDA DE BOLA .....           | 23  |
| EVALUACIÓN DE PARÁMETROS TEXTURALES DE FRUTAS.....                      | 30  |
| EVALUACIÓN SENSORIAL DE ALIMENTOS: PRUEBAS BÁSICAS.....                 | 41  |
| HUMEDAD DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO.....                                 | 53  |
| DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE SECADO DE ALIMENTOS .....                  | 66  |
| SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS .....                                     | 75  |
| DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR          |     |
| EN EL PROCESAMIENTO DE UN ALIMENTO FLUIDO EN UN TANQUE AGITADO .....    | 85  |
| CULTIVO DE HONGOS COMESTIBLES <i>PLEUROTUS OSTREATUS</i> SOBRE RESIDUOS |     |
| AGROINDUSTRIALES.....   | 93  |
| PRODUCCIÓN DE CELULASAS POR FERMENTACIÓN EN FASE LÍQUIDA .....          | 101 |



---

# PRÓLOGO

Este manual contiene varias prácticas de laboratorio que fueron realizadas en el Programa de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, UJTL. Los autores de cada capítulo se han propuesto presentar una práctica comprensible para los estudiantes de ingeniería, con objetivos pedagógicos claros y concretos y con experimentaciones fáciles de reproducir en cualquier laboratorio o planta piloto de una institución académica. No se trata pues, de un trabajo bibliográfico realizado únicamente sobre la base de buenas fuentes documentales. La elaboración de este trabajo ha ocupado, además, muchas horas de laboratorio para poner a punto las técnicas descritas, ensayando varias veces y ajustando protocolos, registrando los errores de las pruebas originales, informando posibles soluciones y recurriendo a pares evaluadores para contrastar lo escrito. El objetivo de este libro es ofrecer una guía básica para las prácticas en ingeniería de alimentos que permita desarrollar habilidades cuantitativas específicas, útiles en un gran número de entornos de procesamiento o manufactura de alimentos.

Es importante combinar prácticas de laboratorio —como las operaciones unitarias y bioprocesos—, con diseño de experimentos y el análisis de las propiedades de diferentes tipos de alimentos. El primer capítulo presenta información básica sobre diseño de experimentos y su aplicación, a un conjunto de datos obtenidos en una experimentación llevada a cabo en el laboratorio. Los siguientes cuatro capítulos cubren aspectos relacionados con algunas propiedades de los alimentos como humedad, textura, viscosidad y características sensoriales. Los últimos cinco tratan diferentes operaciones unitarias y bioprocesos, tales como el secado, la transferencia de calor en tanques agitados y la producción de hongos comestibles y celulasas por fermentación líquida. Todos los textos están organizados de tal forma que incluyen los conceptos más apropiados para abordar la temática, los objetivos pedagógicos y del ejercicio, materiales y métodos, resultados esperados y referencias.

YINETH PIÑEROS CASTRO

EDUARDO RODRÍGUEZ SANDOVAL

Docentes del Programa de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.



---

# APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN PRUEBAS DE LABORATORIO EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

EDUARDO RODRÍGUEZ SANDOVAL\*

RICARDO CONTENTO\*\*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el sector de alimentos, las personas encargadas de desarrollar productos, mejorar y controlar procesos deben realizar un diseño de experimentos adecuado. Los experimentos se realizan para conocer cómo una serie de variables afecta a otra; por ejemplo, se podría hacer un experimento para saber el efecto de un ingrediente o la temperatura en la textura de un producto (Sharma *et al.*, 2003). Los ensayos en materiales biológicos, como los alimentos, se pueden comparar si se tiene un diseño de experimentos adecuado que contemple la falta de uniformidad de las muestras y los diferentes factores que influyen en las pruebas como el medio ambiente y la humedad, entre otros. Evidencia de lo anterior se observa cuando se requiere comparar dos procesos de deshidratación de tomate empleando dos tipos de pretratamiento –escaldado y sin escaldar–, combinados con un secado por aire caliente a dos temperaturas (40 y 60°C). Una prueba que indicaría el efecto de estos procesos de deshidratación podría ser la determinación de licopeno en las muestras deshidratadas. El licopeno es un antioxidante benéfico para la salud y que está presente en el tomate fresco en una alta proporción. Sin embargo, para establecer qué proceso conserva mayor cantidad de licopeno, es necesario plantear un diseño de experimentos que contemple las variables del proceso, el número de repeticiones de los tratamientos y las variables que deberían permanecer constantes en el ensayo, entre otros.

Los experimentos pueden hacerse siguiendo el principio de “ensayo y error” o pueden planearse cuidadosamente. La mayoría de los buenos investigadores efectúan ambos tipos de estrategias de experimentación; los primeros para probar “corazonadas” y los segundos para adquirir información valiosa y confirmar ideas. Los principios estadísticos se utilizan en el diseño de experimentos con el fin de realizar experimentación que produzca la información correcta en el menor tiempo posible y al menor costo (Sharma *et al.*, 2003).

---

\* Ingeniero químico, doctor en Ingeniería, profesor titular del Programa de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

\*\* Estadístico, profesor del Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Al enfoque general para planear y llevar a cabo el experimento se le llama “estrategia de experimentación”. Para aplicar los principios estadísticos en el diseño y análisis de un experimento, es necesario tener una idea clara de qué es exactamente lo que se va a estudiar, cómo se coleccionarán los datos y, al menos, una comprensión cualitativa de la forma en la cual se analizarán dichos datos. El esquema general para abordar y diseñar un experimento se presenta en su orden así: identificación y descripción del problema; elección de los factores, niveles y rangos; selección de la variable de respuesta; elección del diseño experimental; realización del experimento; análisis estadístico de los datos y conclusiones y recomendaciones (Montgomery, 2006). Algunos ejemplos sobre la aplicación de diseño de experimentos en procesos con alimentos se muestran en la literatura (Madamba, 2002; Mbofung, *et al.*, 2002; Unlu y Faller, 2002; Lingyun *et al.*, 2007; Rodríguez-Sandoval *et al.*, 2008).

El análisis estadístico de los datos indica simplemente qué diferencias pueden interpretarse y cuáles no; no constituye una interpretación por sí solo. La interpretación describe cómo las variables experimentales afectan las variables de respuesta. Es aconsejable guiarse por los objetivos del experimento y por las pruebas estadísticas cuando se realice la interpretación. Además, es claro que la interpretación de los resultados será sólo tan buena como lo sean los conocimientos de los principios físicos y químicos del proceso que se realiza. La estadística no es un sustituto de la ciencia.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo de esta práctica es aplicar los conceptos de diseño de experimentos en la planeación y análisis de los resultados, mediante la realización de un experimento con una variable de respuesta.

El estudiante deberá estar en capacidad de comprender y aplicar los fundamentos de estadística y diseño de experimentos en un ensayo de laboratorio.

## **3. PRINCIPIOS BÁSICOS**

Un experimento puede definirse como una prueba, o serie de pruebas, en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida. El diseño estadístico de experimentos se refiere al proceso para planear el experimento, de tal forma que se obtengan datos adecuados que puedan analizarse con métodos estadísticos para obtener conclusiones válidas y objetivas. Cualquier problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos (Montgomery, 2006).

Los tres principios básicos del diseño experimental son la realización de réplicas, la aleatorización y la formación de bloques. Las réplicas son la repetición del experimento básico, no se deben confundir con mediciones repetidas. Por ejemplo, suponga que se conservó una manzana a 4°C durante dos meses y se hacen tres mediciones en diferentes instantes de una dimensión crítica de esta fruta. Estas mediciones

no son réplicas, son una forma de mediciones repetidas y, en este caso, la variabilidad observada en las tres mediciones repetidas es reflejo directo de la variabilidad inherente del sistema o instrumento de medición. La aleatorización quiere decir que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizarán las corridas o ensayos individuales del experimento se determinan al azar. La formación de bloques es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés (Montgomery, 2006).

Cualquier variable que no sea la experimental y tenga un efecto sobre la variable de respuesta es conocida como variable de interferencia –o perturbadora–. El error experimental es la variación de la variable de respuesta atribuible a las de interferencia y no a los tratamientos –no confundir con equivocaciones–. Muchas variables de interferencia potenciales pueden mantenerse constantes durante todo el experimento, teniendo el mismo efecto en cada tratamiento y sin afectar la comparación entre tratamientos (Sharma *et al.*, 2003). La unidad experimental es la unidad que se le asigna a un tratamiento, por ejemplo, un área de terreno, una unidad de tiempo, 10 kg de fruta, entre otros (Bravo de Guenni, 2001).

En el análisis se requiere representar los datos, ya sea en tablas o figuras, de modo tal que sea posible interpretarlos de manera clara. Así mismo, se debe probar si las diferencias observadas en estas representaciones son el resultado de los tratamientos o sólo el resultado de una variable de interferencia.

El análisis de varianza –ANOVA, según terminología en inglés– es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados. Sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos (Cochran y Cox, 1992).

El primer paso al diseñar un experimento es establecer los objetivos tan específicos como sean posibles. Por lo general las metas implican determinar el efecto de una o más variables sobre otras. En este capítulo se van a tratar los experimentos de una variable y factoriales de dos vías, que son los más utilizados en la ciencia y tecnología de alimentos. Si se quieren profundizar o conocer otros tipos de diseño de experimentos se recomienda consultar la literatura (Cochran y Cox, 1992; Montgomery, 2006).

### **3.1 Experimentos unifactoriales**

Los experimentos con un solo factor se realizan para averiguar cómo una variable experimental afecta una o más variables de respuesta. En este tipo de experimentos, los tratamientos son simplemente niveles seleccionados de la variable experimental. La variable experimental se puede definir con una característica que el experimentador puede manipular. El nivel es un valor específico, ya sea cualitativo o cuantitativo, de la variable experimental seleccionada para el ensayo. En este tipo de experimentos, cada tratamiento es un nivel de la variable experimental. La variable de respuesta se puede considerar como una variable que el experimentador mide después de llevar a cabo los tratamientos para observar el efecto de la variable experimental.

Si se calienta una solución de harina de yuca precocida a cinco temperaturas diferentes (variable experimental) y se mide su viscosidad aparente (variable de respuesta), se puede observar el efecto de la temperatura en las propiedades físicas del fluido. Las cinco temperaturas son los niveles de la variable experimental y, por ende, los tratamientos de este experimento. Si los resultados se parecen a los de la figura 1 se podría concluir que al aumentar la temperatura la viscosidad de la solución disminuye.

### 3.2 Experimentos factoriales de dos vías

En un experimento factorial de dos vías se eligen dos variables experimentales y se seleccionan dos o más niveles para cada una. Para cada combinación de niveles habrá un tratamiento. Aunque los experimentos factoriales comúnmente son más prolongados que los experimentos de una sola variable, por lo general producen mucha más información en el tiempo que toman.

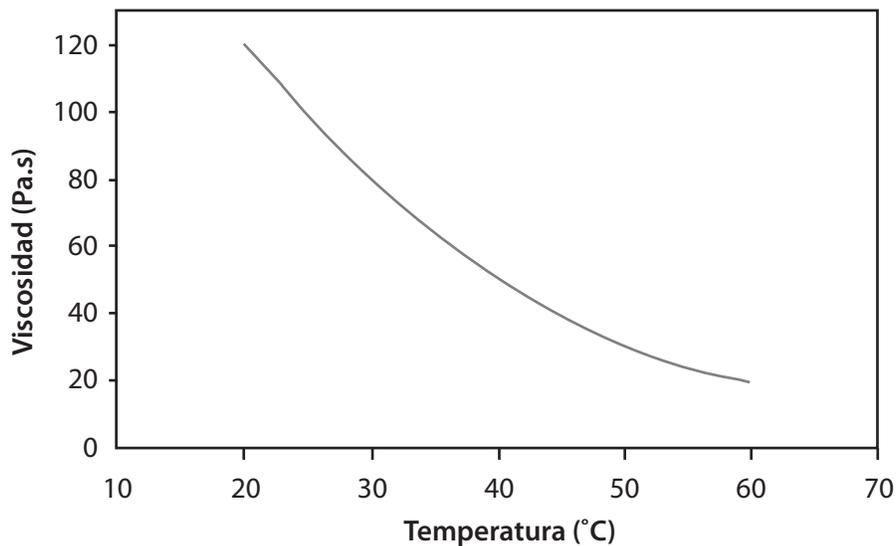


Figura 1. Resultados de un experimento de una sola variable experimental sobre una variable de respuesta.

Cuando se manejan en un solo experimento más de una variable experimental, éstas se conocen como factores experimentales. En un tratamiento factorial de dos vías, un tratamiento es una combinación de niveles de los dos factores. Si hay  $n_1$  niveles del factor 1 y  $n_2$  niveles del factor 2, entonces habrá  $n_1 * n_2$  tratamientos. Si el efecto de un factor en la variable de respuesta es diferente para distintos niveles del otro factor, se dice que los factores presentan una interacción.

Si se calienta una solución con dos concentraciones de harina de yuca precocida (factor 1) a cinco temperaturas diferentes (factor 2) y se mide su viscosidad aparente (variable de respuesta), se tendrá un total de diez tratamientos ( $2*5$ ), uno por cada tipo de combinación de concentración de harina y temperatura de medición. En la figura 2 se presentan los principales resultados de este experimento.

La viscosidad de la solución de concentración uno (C1) y la de concentración dos (C2) disminuye a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, en la figura 2A el efecto de la temperatura es el mismo para cada concentración (líneas paralelas), por lo que se puede afirmar que los factores actúan de forma independiente, no hay interacción, es decir, es posible discutir fácilmente el efecto de uno u otro factor sin tomar en cuenta al otro. En la figura 2B, aumentar la temperatura produce un mayor efecto en la solución C2 que en la C1, lo que indica que hay una interacción entre los dos factores. Carece de sentido discutir el efecto de la temperatura en esta situación sin especificar la concentración de la solución utilizada.

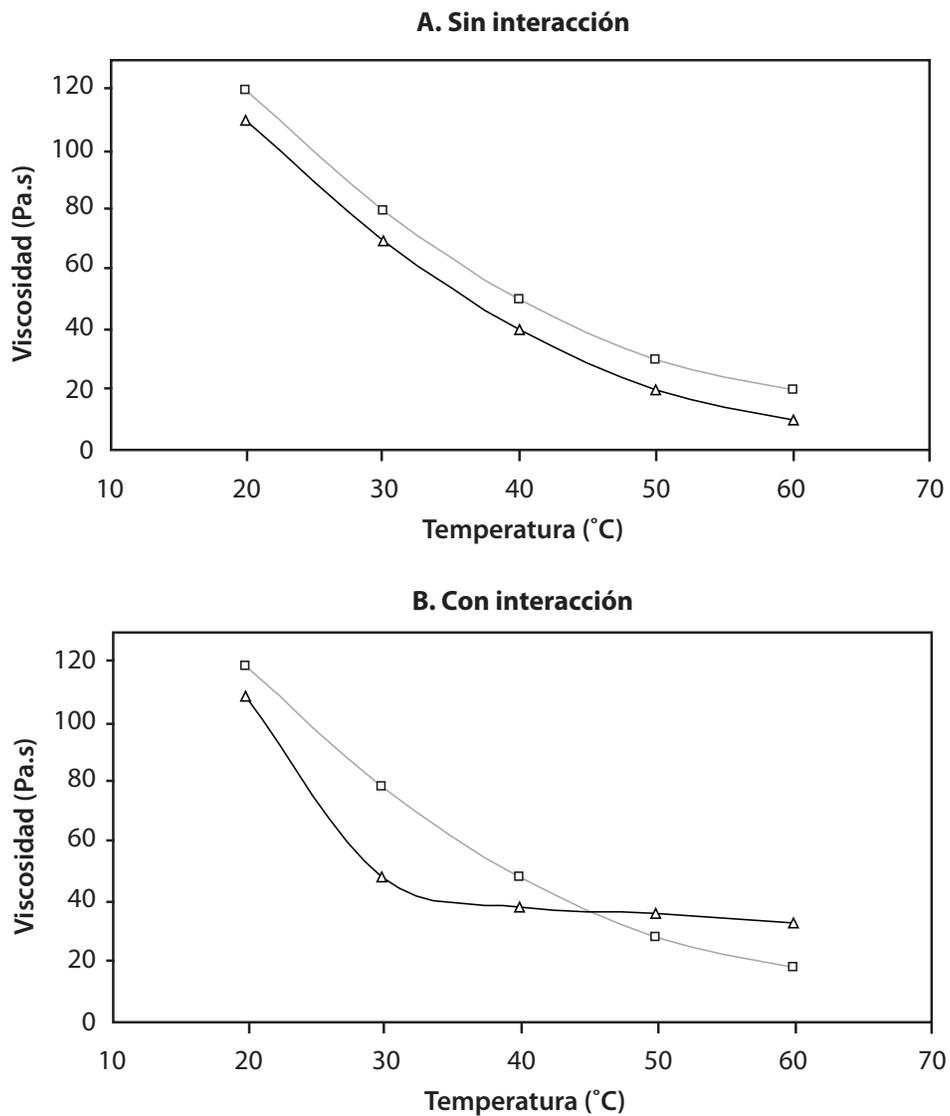


Figura 2. Resultados de un experimento con y sin interacción. Concentración 1 (□), Concentración 2 (Δ).

## 4. ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS

### 4.1 Ejemplo de experimento con un solo factor

Se realiza un experimento para estudiar si el procesamiento comercial de diversos alimentos modifica la concentración de elementos esenciales para el consumo humano. En un experimento se desean estudiar los valores de zinc en habichuelas tiernas, una leguminosa recomendada para el colesterol. Se divide un lote en cuatro grupos, éstos se asignan aleatoriamente para la medición de zinc como sigue: grupo 1, crudos; grupo 2, antes de su escaldado; grupo 3, después del escaldado y grupo 4, luego del paso final de su procesamiento. Se obtienen mediciones independientes de los cuatro grupos (tratamientos), de modo que se cuenta con las siguientes observaciones:

**TABLA 1. CONCENTRACIONES DE ZINC EN HABICHUELAS TIERNAS SEGÚN GRUPO EXPERIMENTAL.**

| Concentración de zinc |         |         |         |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Grupo 1               | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 |
| 2,23                  | 3,71    | 2,53    | 4,06    |
| 2,20                  | 3,67    | 2,87    | 5,09    |
| 2,44                  | 3,45    | 2,83    | 4,11    |
| 2,11                  | 2,73    | 2,33    | 4,82    |
| 2,30                  | 2,58    | 2,19    | 4,63    |
| 1,72                  | 1,85    | 1,80    | 3,39    |
| 1,78                  | 1,81    | 1,75    | 4,09    |
| 2,36                  | 2,32    | 1,83    | 3,27    |
| 2,91                  | 2,50    | 1,97    | 3,39    |

El investigador desea determinar si se presenta una diferencia significativa en la concentración promedio de zinc en los cuatro grupos, lo cual conduce a probar la hipótesis nula  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ , es decir, no hay diferencia en las concentraciones promedio de zinc en los grupos –contra la hipótesis alterna–, donde se prueba que la concentración promedio sea diferente para al menos un par de grupos, así:  $H_0: \mu_1 \neq \mu_3$ . El método estadístico para llevar a cabo esta comparación es el análisis de varianza, ANOVA, y requiere que los grupos tengan variabilidades<sup>1</sup> similares –supuesto de homocedasticidad–, el cual puede escribirse:  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2$  contra  $H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$ ; la transgresión de este supuesto conduce a invalidar los resultados del ANOVA. La prueba de Bartlett es una de las más usadas para examinar la homocedasticidad. El criterio más frecuentemente empleado para decidir sobre las hipótesis

<sup>1</sup> La variabilidad trata de determinar el grado en el que las observaciones se alejan del promedio y se obtiene generalmente mediante la varianza, que para cada uno de los grupos se calcula con:

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

es rechazar la hipótesis nula si el valor-P es menor que 0.05. El valor-P (*P-Value* en inglés) de las pruebas es logrado usando un programa estadístico apropiado.

El análisis de varianza está fundamentado en la partición de la variabilidad general de las observaciones en términos de: 1) Diferencias de la media de cada tratamiento y la media general y 2) Las diferencias que presentan las observaciones dentro de cada grupo.

$$SCT = SCTr + SCE$$

Donde:

SCT: suma de cuadrados total

SCTr: suma de cuadrados de tratamientos

SCE: suma de cuadrados del error

El cálculo de las sumas de cuadrados es:

$$SCT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2, \quad SCTr = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad \text{y} \quad SCE = SCT - SCTr.$$

Donde  $y_{ij}$  es la j-ésima observación del i-ésimo tratamiento,  $\bar{y}_{i.}$  es el promedio del i-ésimo grupo,  $\bar{y}_{..}$  el promedio general o global de todas las observaciones y  $n_i$  el número de observaciones en el i-ésimo tratamiento.

Es importante resaltar que la aditividad de la suma de cuadrados no sólo divide la variabilidad total de las observaciones, sino también el número total de grados de libertad, es decir:

$$gl(\text{total}) = gl(\text{tratamientos}) + gl(\text{error})$$

$$gl(\text{total}) = N - 1 \quad (N \text{ es el número total de observaciones})$$

$$gl(\text{tratamientos}) = k - 1$$

$$gl(\text{error}) = (N - 1) - (k - 1) = N - k$$

Un cuadrado medio es una suma de cuadrados dividida entre sus correspondientes grados de libertad.

$$CMTr = SCTr / (k - 1)$$

$$CME = SCE / [N - k]$$

El cuadrado medio del error es una estimación insesgada de la varianza común de los grupos ( $\sigma^2$ ). Cuando  $H_0$  es verdadera, la razón  $f_c = CMTr / CME$  es un valor de una variable aleatoria que tiene una distribución  $F[k-1; N-k]$ . El criterio establece que se debe rechazar  $H_0$  si  $f_c > f_{\alpha}[k-1; N-k]$ . Este criterio es equivalente a rechazar  $H_0$  si el valor-P  $< \alpha$ . Estos cálculos se presentan en la tabla de análisis

de varianza (tabla 2). Para los datos del ejercicio en cuestión, los cálculos para encontrar los promedios por grupo y general se presentan en la tabla 3.

**TABLA 2. DISPOSICIÓN DE LA TABLA ANOVA PARA EL EXPERIMENTO CON UN SOLO FACTOR.**

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado Medio        | f calculada (f) | Valor-P |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|---------|
| Tratamientos        | SCTr              | k-1                | $CMT_r = SCT_r / k-1$ | $CMT_r / CME$   |         |
| Error               | SCE               | N-k                | $CME = SCE / N-k$     |                 |         |
| Total               | SCT               | N-1                |                       |                 |         |

**TABLA 3. PROMEDIO POR GRUPO Y GENERAL PARA LAS CONCENTRACIONES DE ZINC EN HABICHUELAS TIERNAS.**

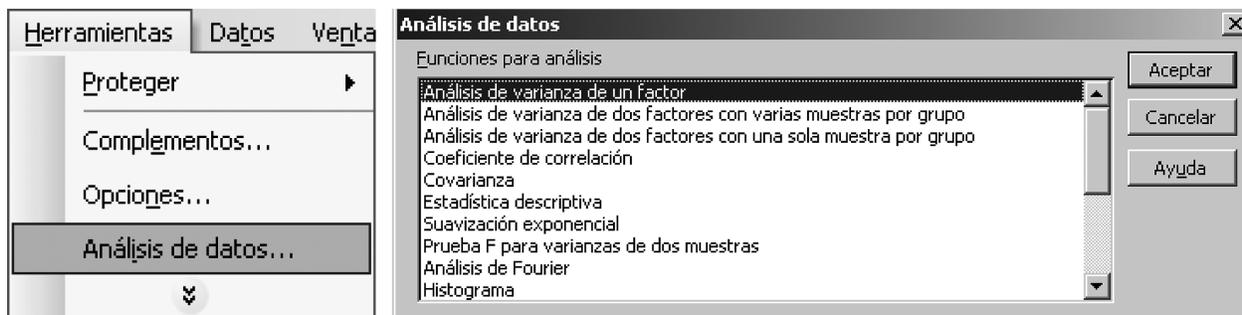
|                          | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Promedio Total |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
|                          | 2,23    | 3,71    | 2,53    | 4,06    |                |
|                          | 2,20    | 3,67    | 2,87    | 5,09    |                |
|                          | 2,44    | 3,45    | 2,83    | 4,11    |                |
|                          | 2,11    | 2,73    | 2,33    | 4,82    |                |
|                          | 2,30    | 2,58    | 2,19    | 4,63    |                |
|                          | 1,72    | 1,85    | 1,80    | 3,39    |                |
|                          | 1,78    | 1,81    | 1,75    | 4,09    |                |
|                          | 2,36    | 2,32    | 1,83    | 3,27    |                |
|                          | 2,91    | 2,50    | 1,97    | 3,39    |                |
| <b>Promedio de Grupo</b> | 2,2278  | 2,7356  | 2,2333  | 4,0944  | 2,8228         |

La suma de cuadrado total, SCT, se calcularía mediante:  $(2,23-2,8228)^2 + (2,20-2,8228)^2 + \dots + (3,39-2,8228)^2 = 31,1605$ . Por otra parte, la suma de cuadrados de tratamientos, SCTr, se obtendría de  $9*(2,2278-2,8228)^2 + \dots + 9*(4,0944-2,8228)^2 = 20,9359$  y  $SCE = 31,1605 - 20,9359 = 10,2246$ .

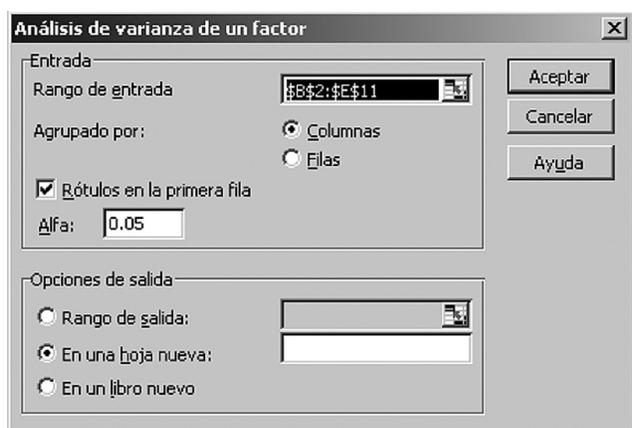
Para este diseño se tiene  $gl(\text{total}) = 35$  (el número total de observaciones es 36),  $gl(\text{tratamientos}) = 3$  y  $gl(\text{error}) = 35 - 3 = 32$ .

Los cuadrados medios del tratamiento y del error y el estadístico de prueba son:  $CMT_r = 20,9359/3 = 6,97864$ ,  $CME = 10,2246/32 = 0,319519$  y  $f_c = 6,97864/0,319519 = 21,84$ .

Los anteriores resultados son finalmente dispuestos en una tabla ANOVA según lo expuesto en la tabla 2. Los resultados anteriores pueden obtenerse mediante *Excel* de la siguiente forma:



Una vez se ha elegido la opción de “análisis de varianza” de un factor, aparece el siguiente cuadro de diálogo:



En este cuadro de diálogo se debe especificar el rango de entrada, es decir, las celdas en donde se encuentran los valores.

Una opción más técnica sería utilizar un paquete estadístico como *SAS*, *SPSS*, *Statgraphics*, entre otros, que permiten obtener los mismos resultados. En este caso, usando el software *Statgraphics* se encontró que en este diseño se cumple el supuesto de homocedasticidad, dado que el valor-P asociado es mayor a 0,05, por lo cual no se rechaza la hipótesis de similaridad de varianzas (Bartlett’s test: 1,17507, P-Value=0,178746). La comparación de los promedios de zinc en los grupos de la tabla 3 se lleva a cabo examinando los resultados del ANOVA (tabla 4).

**TABLA 4. RESULTADOS DEL ANOVA PARA LA CONCENTRACIÓN DE ZINC EN HABICHUELAS.**

| Source         | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|----------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Between groups | 20.9359        | 3  | 6.97864     | 21.84   | 0.0000  |
| Within groups  | 10.2246        | 32 | 0.319519    |         |         |
| Total (Corr.)  | 31.1605        | 35 |             |         |         |

En la última columna aparece el valor-P asociado a la hipótesis para comparar los promedios de los cuatro grupos y, puesto que es menor de 0.05, se rechaza la hipótesis nula, es decir hay evidencia que al menos algún par de grupos tiene diferencia. Esto conduce a preguntarse: ¿entre cuáles grupos se presenta la mencionada diferencia? Este interrogante plantea realizar un conjunto de pruebas estadísticas para establecer entre cuál(es) grupos se presentan diferencias, lo que se denominan comparaciones múltiples. Al aplicar este método se obtiene la tabla 5, en la que los grupos que no presentan diferencias tienen la X en la misma columna. De los resultados mostrados se deduce que entre los grupos 1, 2 y 3 no hay diferencia significativa, mientras que el grupo 4 presenta la mayor concentración de zinc comparativamente con los otros grupos.

**TABLA 5. COMPARACIONES MÚLTIPLES PARA LA CONCENTRACIÓN DE ZINC EN JUDÍAS SEGÚN GRUPO.**

Method: 95.0 percent Duncan

| Group | Count | Mean    | Homogeneous Groups |
|-------|-------|---------|--------------------|
| 1     | 9     | 2.22778 | X                  |
| 3     | 9     | 2.23333 | X                  |
| 2     | 9     | 2.73556 | X                  |
| 4     | 9     | 4.09444 | X                  |

#### 4.2 Ejemplo de experimento factorial de dos vías

El Departamento de Nutrición Humana y Alimentos realizó un estudio sobre la estabilidad de la vitamina C en el concentrado de jugo de naranja congelado y reconstituido, que se almacena en un refrigerador durante un período de hasta una semana. Se probaron tres tipos de concentrado de jugo de naranja congelado con tres períodos distintos, los cuales se refieren al número de días desde que se mezcló el jugo hasta que se probó. Se registraron los resultados, en mg de ácido ascórbico por litro (tabla 6). Los resultados de la tabla 7 muestran el ANOVA para este experimento, obtenido con *Statgraphics*®.

**TABLA 6. NIVEL DE ÁCIDO ASCÓRBICO/LITRO SEGÚN TIEMPO DE ALMACENAMIENTO Y MARCA.**

| Marca        | Tiempo (días) |      |      |      |      |      |
|--------------|---------------|------|------|------|------|------|
|              | 0             |      | 3    |      | 7    |      |
| Richfood     | 52,6          | 54,2 | 49,4 | 49,2 | 42,7 | 48,8 |
|              | 49,8          | 46,5 | 42,8 | 53,2 | 40,4 | 47,6 |
| Sealed-Sweet | 56,0          | 48,0 | 48,8 | 44,0 | 49,2 | 44,0 |
|              | 49,6          | 48,4 | 44,0 | 42,4 | 42,0 | 43,2 |
| Minute Maid  | 52,5          | 52,0 | 48,0 | 47,0 | 48,5 | 43,3 |
|              | 51,8          | 53,6 | 48,2 | 49,6 | 45,5 | 47,6 |

**TABLA 7. RESULTADOS DEL ANOVA PARA NIVEL DE ÁCIDO ASCÓRBICO/LITRO  
SEGÚN TIEMPO DE ALMACENAMIENTO Y MARCA.**

| Source              | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| <b>Main effects</b> |                |    |             |         |         |
| a: Marca            | 32.7517        | 2  | 16.3758     | 1.74    | 0.1953  |
| b: Tiempo           | 227.212        | 2  | 113.606     | 12.04   | 0.0002  |
| <b>Interactions</b> |                |    |             |         |         |
| ab                  | 17.3217        | 4  | 4.33042     | 0.46    | 0.7650  |
| Residual            | 254.703        | 27 | 9.43343     |         |         |
| Total (corrected)   | 531.988        | 35 |             |         |         |

La información estadística anterior (tabla 7) permite probar las siguientes hipótesis:

- $H_0$ : No hay diferencia en el contenido de ácido ascórbico entre las diferentes marcas de concentrado.
- $H_0$ : No existe diferencia en el contenido de ácido ascórbico para los diferentes períodos.
- $H_0$ : No se presenta interacción entre las marcas y los diferentes períodos.

Puesto que el valor-P (0,1953) para la primera de las hipótesis es mayor a 0,05, se concluye que no hay diferencia significativa en el contenido de ácido ascórbico entre las diferentes marcas de concentrado. La segunda hipótesis se rechaza (valor-P=0,0002), es decir, hay una diferencia importante en las concentraciones para los diferentes tiempos y, finalmente, no hay evidencia de interacción entre marca y tiempo (valor-P=0,7650). Del análisis anterior se puede concluir que el efecto de tiempo resulta ser el más importante sobre el contenido de ácido ascórbico en el concentrado de jugo.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Experimento con un solo factor

La achira (*Canna indica* o *Canna edulis*) es una planta de origen andino, que en Colombia se cultiva esencialmente para la extracción del almidón de sus rizomas, el cual a su vez es utilizado como materia prima para la fabricación de los bizcochos de achira (Rodríguez-Borray *et al.*, 2003). En este ensayo se emplearán diferentes marcas de bizcochos de achira comercial para evaluar su dureza. El penetrómetro mide la distancia o fuerza de penetración de un aditamento (cilíndrico, aguja, cono o bola) sobre una muestra durante un tiempo determinado (Bourne, 2002). En las pruebas para medir la dureza de las muestras se utilizará un penetrómetro (Chantillon DFM-100, Ametek Inc., Florida, USA) con soporte universal y con dos accesorios, cilíndrico y cono. Las muestras utilizadas en la medición deberán tener un peso similar. Cada prueba se realizará con mínimo quince muestras.

## 5.2 Experimento factorial de dos vías

El néctar de fruta se puede definir como un producto elaborado con jugo, pulpa o concentrado de frutas, adicionando agua, aditivos e ingredientes permitidos (Camacho, 2002). En la experimentación se empleará una fruta adquirida en el mercado local. El procedimiento que se llevará a cabo para la elaboración del néctar de fruta es el siguiente: Se realiza la limpieza y desinfección de la fruta en una solución de hipoclorito al 1% durante diez minutos, posteriormente se corta la fruta y se despulpa utilizando una despulpadora industrial con un tamiz adecuado. Después se pesa la pulpa obtenida y se mide su porcentaje de sólidos solubles mediante un refractómetro digital (PAL-3, Atago, España) para posteriormente realizar la formulación del producto. Se mide la cantidad final de sólidos solubles del néctar de fruta utilizando en el proceso diferentes concentraciones de azúcar y temperaturas (70 y 80°C) en la pasteurización durante cinco minutos.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Experimento con un solo factor

Los resultados obtenidos utilizando el penetrómetro se escriben en la tabla 8.

**TABLA 8. DATOS DE DUREZA DE BIZCOCHOS DE ACHIRA UTILIZANDO UN PENETRÓMETRO.**

| Marca | Dureza (N)* |
|-------|-------------|
|       |             |
|       |             |
|       |             |

\*Medida con accesorio cilíndrico y cónico.

### 6.2 Experimento factorial de dos vías

Los resultados obtenidos de sólidos solubles utilizando un refractómetro en la preparación de un néctar de fruta se pueden registrar en la tabla 9.

**TABLA 9. DATOS DE SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES DE UN NÉCTAR DE FRUTA UTILIZANDO DIFERENTES CONCENTRACIONES DE AZÚCAR Y TEMPERATURAS DE PASTEURIZACIÓN.**

| Concentración de azúcar (%) | Temperatura de pasteurización |      |
|-----------------------------|-------------------------------|------|
|                             | 70°C                          | 80°C |
| C1                          |                               |      |
| C2                          |                               |      |
| C3                          |                               |      |

### 6.3 Discusión de los resultados experimentales

- Realizar la ANOVA del experimento y comprobar las hipótesis respectivas.
- Definir las diferencias estadísticamente significativas mediante una prueba POSANOVA
  - Prueba de rango múltiple de Duncan, Prueba de Turkey, etcétera–.
- Analizar y discutir los resultados obtenidos con base en las pruebas estadísticas.

### REFERENCIAS

- BOURNE, M.C. (2002). *Food texture and viscosity: Concept and measurement* (pp. 148-150). San Diego, EE.UU.: Academic Press.
- BRAVO DE GUENNI, L. (2001). *Introducción al diseño de experimentos. Curso Métodos Estadísticos II*. Universidad Simón Bolívar. Departamento de Cómputo Científico y Estadística. Caracas, Venezuela. Recuperado de: [www.cesma.usb.ve/~lbravo/CO2124/transparencias/tran10co2124.pdf](http://www.cesma.usb.ve/~lbravo/CO2124/transparencias/tran10co2124.pdf)
- CAMACHO, G. (2002). *Procesamiento y conservación de frutas*. Bogotá: Programa Universidad Virtual. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 15 de febrero de 2008 de: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/teoria/obboca/p1.htm>
- COCHRAN, W. G., COX, G. M. (1992). *Experimental designs* (pp. 1-18). New York, EE.UU.: John Wiley.
- LINGYUN, W., WANG, J., XIAODONG, Z., DA, T., YALIN, Y., CHENGGANG, C., TIANHUA, F., FAN, Z. (2007). Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke tubers. *Journal of Food Engineering*, 79, 1087–1093.
- MADAMBA, P. S. (2002). The response surface methodology: An application to optimize dehydration operations of selected agricultural crops. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 35, 584–592
- MBOFUNG, C. M. F., NJINTANG, Y. N., WALDRON, K. W. (2002). Functional properties of cowpea–soy–dry red beans composite flour paste and sensorial characteristics of akara (deep fat fried food): effect of whipping conditions, pH, temperature and salt concentration. *Journal of Food Engineering*, 54, 207–214.

- MONTGOMERY, D. (2006). *Diseño y análisis de experimentos*, (2a Ed.) (pp. 1-20). México: Editorial Limusa-Wiley.
- RODRÍGUEZ-BORRAY, G. A., GARCÍA-BERNAL, H. R., CAMACHO-TAMAYO, J. H., ARIAS, F. L. (2003). El almidón de achira o sagú (*Canna edulis*, Ker). *Manual técnico para su elaboración* (pp.1-4). Tibaitatá, Cundinamarca, Colombia: Proyecto CORPOICA-PRONATTA.
- RODRÍGUEZ-SANDOVAL, E., FERNÁNDEZ-QUINTERO, A., SANDOVAL-ALDANA, A., QUICAZAN, M. C. (2008). Effect of cooking time and storage temperature on the textural properties of cassava dough. *Journal of Texture Studies*, 38, 68-82.
- SHARMA, S. K.; MULVANEY, S. J.; RIZVI, S. S. H. (2003). *Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio* (pp. 187-200). México: Editorial Limusa.
- UNLU, E., FALLER, J. F. (2002). RTD in twin-screw food extrusion. *Journal of Food Engineering*, 53, 115–131.

# MEDICIÓN DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA DE FLUIDOS ALIMENTICIOS TRASLÚCIDOS UTILIZANDO UN VISCOSÍMETRO DE CAÍDA DE BOLA

DIANA FERNANDA ABRIL\*

EDGAR MAURICIO VARGAS\*\*

## 1. INTRODUCCIÓN

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de materiales, ambos causados por la aplicación de un esfuerzo. Uno de los parámetros de la reología es la viscosidad, que desempeña un papel importante en los procesos tanto a nivel de laboratorio como a nivel industrial. La comprensión de la reología en el sector alimentos es fundamental en la investigación y desarrollo de nuevos productos, el diseño de equipos, el mejoramiento de procesos y el control de calidad de materias primas y productos terminados (Steffe, 1996).

Existen actualmente muchas maneras de calcular la viscosidad de los fluidos alimenticios, la ley de Stokes es una de ellas; ésta se basa en un análisis de las fuerzas de flotación y las fuerzas que intervienen en la caída libre de un objeto con dimensiones y valores de densidad conocidos; estos ensayos se realizan a través de un equipo llamado viscosímetro de caída de bola. Un esquema de éste se puede ver en la figura 1.

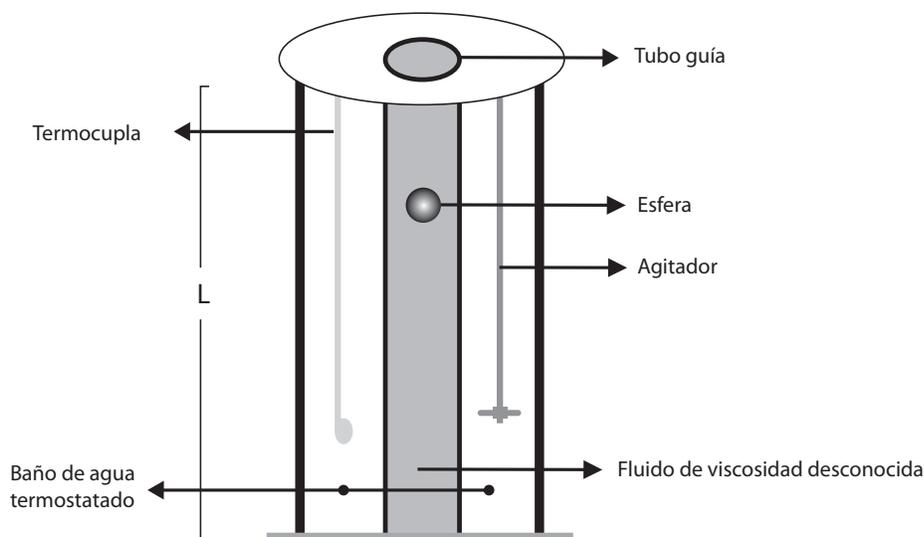


Figura 1: Esquema de un viscosímetro de bola

\* Ingeniera de alimentos, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

\*\* Ingeniero químico M.Sc. Profesor asociado del Programa de Ingeniería de Alimentos de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Cuando un fluido viscoso se mueve alrededor de un cuerpo con movimiento estacionario, o cuando éste se desplaza en el interior de un fluido viscoso en reposo, se ejerce sobre el cuerpo una fuerza resistente  $F_s$  debido a la viscosidad. Para analizar las fuerzas que actúan y facilitar el cálculo se adopta un cuerpo de forma esférica, sin embargo, se puede aplicar un cuerpo de cualquier forma. Stokes, en 1851 encontró que la fuerza resistente  $F_s$  se puede calcular utilizando la ecuación 1.

$$F_s = 6\rho \times m \times v \quad (1)$$

Donde  $m$  (kg) es la masa,  $v$  es la velocidad (m/s) y  $\rho$  es la densidad (kg/m<sup>3</sup>).

Si se introduce una esfera dentro del fluido y se deja caer partiendo del reposo, es decir, con velocidad inicial nula, al principio la resistencia debida a la fuerza de la viscosidad también es nula. Además, sobre la esfera de radio  $r$  actúan la fuerza del peso propio  $P$  hacia abajo y la fuerza de empuje  $E$ , que recibe la esfera hacia arriba, igual al peso del volumen desalojado. Si es  $\rho_e$  la densidad del material de la esfera y  $\rho_f$  la densidad del fluido, se tiene que:

$$\text{Peso de la esfera:} \quad P = m_e g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e g \quad (2)$$

$$\text{Y la fuerza de empuje:} \quad E = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_f g \quad (3)$$

La resultante de estas dos fuerzas opuestas es  $F_R$ , la que resulta de restar las ecuaciones (2) y (3):

$$F_R = P - E = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_e - \rho_f) \quad (4)$$

Del segundo principio de Newton se obtiene la aceleración  $a_e$  de la esfera:

$$F_R = m_e a_e \quad a_e = \frac{F_R}{m_e} \quad (5)$$

Como la masa de la esfera es:

$$m_e = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e \quad (6)$$

Dividiendo las ecuaciones (4) y (6) se obtiene, según la ecuación (5):

$$a_e = \left( \frac{\rho_e - \rho_f}{\rho_e} \right) g \quad (7)$$

Como resultado de esta aceleración, la esfera adquiere una velocidad  $v_e$  dirigida hacia abajo, existiendo una resistencia  $F_s$  del fluido sobre la esfera que se opone a su caída. A medida que aumenta la velocidad de la esfera, aumenta también la resistencia en proporción directa, por lo que se alcanzará al cabo de un tiempo una velocidad tal que la fuerza  $F_R$  dirigida hacia abajo, dada por la ecuación (4), y la resistencia  $F_s$ , dada por la ecuación (1), serán iguales, moviéndose la esfera a partir de ese instante con velocidad constante, llamada velocidad límite. Por lo tanto, se puede escribir:

$$F_R = F_s = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_e - \rho_f) = 6 \pi \mu r v_e \quad (8)$$

La ecuación (8) se cumple siempre y cuando la velocidad sea baja, sin régimen turbulento en el fluido. Si esto ocurre, la resistencia que opone el fluido es mucho mayor que la dada por la ley de Stokes.

De la ecuación (8) se obtiene:

$$\mu = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{v_e} (\rho_e - \rho_f) \quad (9)$$

La velocidad  $v_e$  de la esfera se puede obtener dividiendo el camino  $l$  recorrido por la esfera por el tiempo empleado en hacerlo, es decir:

$$v_e = \frac{l}{t} \quad (10)$$

Por lo tanto, reemplazando el valor de  $v_e$  dado por la ecuación (10) en la ecuación (9), se obtiene:

$$\mu = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{l/t} (\rho_e - \rho_f) \longrightarrow \mu = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{l} (\rho_e - \rho_f) t \quad (11)$$

En donde:  $\mu$  (Pa.s) es la viscosidad dinámica del fluido;  $r$  (m) es el radio de la esfera;  $g$  (m/s<sup>2</sup>) la aceleración de la gravedad;  $\rho_e$  (kg/m<sup>3</sup>) y  $\rho_f$  (kg/m<sup>3</sup>), son las densidades de la esfera y del líquido respectivamente;  $t$  (s) el tiempo de caída y  $l$  (m) la distancia recorrida por la esfera dentro del fluido en el tiempo  $t$ . No olvidar que las ecuaciones deben tener consistencia dimensional.

Las propiedades de las esferas utilizadas para realizar este tipo de práctica se pueden ver en la tabla 1; sin embargo estas determinaciones deben realizarse de acuerdo a los recursos existentes en el laboratorio.

TABLA 1. DIMENSIONES DE CADA ESFERA Y SU RELACIÓN CON EL DIÁMETRO DEL TUBO.

| Esfera | Material     | Relación tubo | Diámetro tubo (mm) | Diámetro esfera (mm) | Diámetro esfera (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|--------------|---------------|--------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1      | Vidrio       | 1,49          | 16,4               | 11,0                 | 2,493                                |
| 2      | Borosilicato | 1,18          |                    | 13,8                 | 2,334                                |
| 3      | Borosilicato | 1,13          |                    | 14,4                 | 2,233                                |
| 4      | Vidrio       | 1,60          |                    | 10,2                 | 2,537                                |

Para cada esfera existe una constante  $K$  propia, que se relaciona en la tabla 2 con sus respectivas desviaciones ( $S$ ), para realizar sus ensayos experimentales debe utilizar las reportadas en el viscosímetro de su laboratorio o calcularlas utilizando patrones de viscosidad conocida a determinada temperatura (usualmente a 20°C).

TABLA 2. CONSTANTES K DE ESFERAS CON SUS RESPECTIVAS DESVIACIONES ESTÁNDAR ( $S$ ).

|           | Esfera  |           |           |         |
|-----------|---------|-----------|-----------|---------|
|           | 1       | 2         | 3         | 4       |
| Constante | 0,04179 | 0,00320   | 0,00168   | 0,06233 |
| S         | 0,00430 | 6,702E-06 | 5,215E-05 | 0,00681 |

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos de la práctica

- Aplicar la ley de Stokes y el principio de flotación en la medición de la viscosidad utilizando un viscosímetro de caída de bola.
- Conocer los principios de funcionamiento del viscosímetro de caída de bola.
- Calcular viscosidades dinámicas de alimentos fluidos translúcidos utilizando un viscosímetro de caída de bola.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Materiales

El viscosímetro de caída de bola necesita de otros equipos e instrumentos para realizar las mediciones del tiempo de caída de las esferas a través de un fluido al que se le quiere conocer la viscosidad, los equipos e instrumentos son:

- Un viscosímetro de caída de bola.

- Esferas de diámetro, densidad y constante conocida.
- Un cronómetro que mida hasta décimas de segundo.
- Un baño termostataado con bomba de inmersión para la recirculación de fluido utilizado para el control de temperatura.
- Dos mangueras de media pulgada transparentes en neopreno –material resistente a la temperatura y flexible–.
- Dos buretas o pipetas.
- Dos termómetros de mercurio.
- Suficiente aceite vegetal o alimento líquido translúcido.
- Dos picnómetros.
- Una balanza analítica, con precisión 0,001 gramo.

### 3.2 Procedimiento

**3.2.1** Medir la densidad del fluido problema usando un picnómetro y una balanza analítica.

**3.2.2** Encender el baño termostataado y la bomba de recirculación y colocar a 20°C. Asegúrese que las mangueras que llevan el fluido de calentamiento estén colocadas en contracorriente en el viscosímetro –mejorar la transferencia de calor–.

**3.2.3** Dejar recirculando el fluido por quince minutos a 20°C para homogenizar la temperatura del viscosímetro.

**3.2.4** Llenar el tubo interno del viscosímetro con aceite vegetal o alimento líquido translúcido utilizando una pipeta o bureta; asegúrese que no hayan burbujas en su interior y que esté lleno hasta el borde.

**3.2.5** Repetir el numeral 3.2.3.

**3.2.6** Dejar caer una esfera, en caída libre asegurándose que no exista contacto con las paredes del tubo y tape la parte superior del tubo interno. Para asegurar el no contacto de la esfera con la pared interna del tubo, se debe nivelar perfectamente el sistema, utilizando la mirilla de nivel y los tornillos de graduación de nivel que poseen estos viscosímetros.

**3.2.7** Tomar el tiempo que la esfera tarda en ir de un extremo al otro y anótelo, realice cinco repeticiones para cada esfera. La medición debe hacerla siempre la misma persona.

**3.2.8** Repetir el numeral 3.2.6 con otra esfera.

**3.2.9** Realizar los cálculos pertinentes para encontrar un valor de viscosidad dinámica confiable.

### 3.3 Cálculos

La viscosidad dinámica de un fluido newtoniano expresada como Pa.s, medida en un viscosímetro de caída de bola se calcula según la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{l} (\rho_e - \rho_f) t (K) \quad (12)$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad dinámica (Pa.s)

$r$  = Radio de la esfera (m)

$g$  = Valor de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$l$  = La distancia recorrida por la esfera durante la medición (m)

$\rho_e$  = Densidad de la esfera (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_f$  = Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$t$  = Tiempo (s)

$K$  = Constante de la esfera (ver tabla 2 o manual de su viscosímetro).

*Nota:* Tenga en cuenta que la constante  $K$  es específica de cada esfera.

#### 4. RESULTADOS ESPERADOS

- Consigne los datos de tiempo (t) obtenidos en la experimentación en una tabla y calcule la viscosidad dinámica (Pa.s) para cada medición.

**TABLA 3. EJEMPLO DE PRESENTACIÓN.**

| Esfera # | Medición # | Tiempo (s) | Viscosidad ( $\mu$ ) | Desviación (s) |
|----------|------------|------------|----------------------|----------------|
| 1        | 1          |            |                      |                |
|          | 2          |            |                      |                |
|          | 3          |            |                      |                |
|          | 4          |            |                      |                |
|          | 5          |            |                      |                |
| 2        | 1          |            |                      |                |
|          | 2          |            |                      |                |
|          | 3          |            |                      |                |
|          | 4          |            |                      |                |
|          | 5          |            |                      |                |
| 3        | 1          |            |                      |                |
|          | 2          |            |                      |                |
|          | 3          |            |                      |                |
|          | 4          |            |                      |                |
|          | 5          |            |                      |                |

- Grafique los resultados obtenidos comparándolos con la viscosidad teórica de fluido problema y discuta los resultados.
- Calcule el promedio de las mediciones realizadas, sus desviaciones estándar y el coeficiente de variación.
- Analice los resultados obtenidos y explique las variaciones encontradas.
- Calcule la constante K para una esfera desconocida, utilizando los valores de viscosidad de sustancias conocidas y correlaciones lineales.

## REFERENCIAS

- BOURNE, M. C. (1982). *Food texture and viscosity*. New York, NY, EE.UU.: Academic Press.
- DIN, Norms. (1978). *For the viscosity and measurements*. Germany.
- DINSDALE, A., F. MOORE (1962). *Viscosity and its measurement*, Published on behalf of the Institute of Physics and the Physical Society by Chapman and Hall.
- MULLER, H. G. (1977). Caps. 4, 5, 6 y 7. *Introducción a la reología de alimentos*. España: Editorial Acribia.
- LEWIS, M. J. (1993). Capítulo 4, Viscosidad. *Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado* (pp. 120-122). España: Editorial Acribia.
- FOX, R. W. (1984). Capítulo 2. *Introducción a la mecánica de fluidos*. México: Editorial Interamericana.
- MOTT, Robert L. (1996). *Mecánica de fluidos, medición de la viscosidad* (pp. 33-34). México: Editorial Pearson.
- STEFFE, J. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. Michigan, EE. UU.: Freeman Press.
- STREETER, Víctor L. (1995). Capítulo 2. *Mecánica de fluidos*. México: Mc Graw-Hill.



---

# EVALUADORES

ADRIANA LOZANO M.Sc.  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

MARTHA QUICAZAN M.Sc.  
INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS (ICTA)  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ALEJANDRO FERNÁNDEZ. PhD  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE

LUIS EDUARDO CASTILLO M.Sc.  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

LILIANA BECERRA. Esp.  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO





ISBN 978-958-725-016-9



9 789587 250169

DISEÑO PORTADA: FELIPE DUQUE RIJEDA



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ  
JORGE TADEO LOZANO

[www.utadeo.edu.co](http://www.utadeo.edu.co)