



Diseño experimental y métodos de decisión multicriterio para optimizar la composición del helado mantecado

Experimental design and multicriteria decision making methods for the optimization of ice cream composition

Cristian Rojas^{1,*}, Piercosimo Tripaldi², Andrés Pérez² y Pablo Quinteros²

¹ Facultad de Ciencias de la Administración, Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación. Universidad del Azuay. Av. 24 de Mayo 7-77 y Hernán Malo. Apartado postal 01.01.981. Cuenca-Ecuador.

² Laboratorio de Análisis Ambientales. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del Azuay.

Recibido 17 febrero 2012; aceptado 29 marzo 2012

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue optimizar las características sensoriales y tecnológicas del helado tipo mantecado. El trabajo comprendió dos etapas: 1) optimización de la hidrólisis enzimática de la lactosa y 2) optimización del proceso y producto. Para la primera etapa se utilizó un diseño factorial completo, el cual fue optimizado utilizando el método de superficie de respuesta y el método de máxima pendiente. En la segunda etapa se utilizó un diseño de mezclas combinado con variables de proceso para establecer el producto que presente la mejor aceptación sensorial, mayor rendimiento y menor costo. La evaluación de la aceptabilidad del producto fue desarrollada por un panel de catadores no entrenados. Como principal resultado se mejoraron las características sensoriales y tecnológicas del producto terminado, estableciendo las condiciones óptimas de su elaboración.

Palabras clave: Diseño factorial, diseño de mezclas, función utilidad, superficie de respuesta.

Abstract

The aim of the present work was to optimize the sensorial and technological features of ice cream. The experimental work was performed in two stages: 1) optimization of lactose enzymatic hydrolysis, and 2) optimization of the process and product. For the first stage a complete factorial design was developed, optimized using both response surface and the steepest ascent method. In the second stage a mixture design was performed, combining the process variables. The product with the best sensorial acceptance, high yield and low cost was selected. The acceptance of the product was developed by an untrained taster's panel. As a main result the sensorial and technological features of the final product were improved, establishing the optimum parameters for its elaboration.

Keywords: Factorial design, mixture design, utility function, response surface.

1. Introducción

Según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 706:2005 (INEN, 2005), el helado "es un producto alimenticio, higienizado, edulcorado, obtenido a partir de una emulsión de grasas y proteínas, con adición de otros ingredientes y aditivos permitidos en los códigos normativos vigentes, o sin ellos, o bien a partir de una mezcla de agua, azúcares y otros ingredientes y aditivos permitidos en los

códigos normativos vigentes, sometidos a congelamiento con batido o sin él, en condiciones tales que garanticen la conservación del producto en estado congelado o parcialmente congelado durante su almacenamiento y transporte". Este trabajo se justifica en cuanto, en la producción del helado mantecado se utiliza leche entera, que genera problemas de intolerancia a la lactosa a las personas sensibles, por lo tanto para evitar este

* Autor para correspondencia

Email: crojasvilla@uazuay.edu.ec (C. Rojas)

problema se estudió la posibilidad de producir helado mantecado con leche deslactosada enzimáticamente.

Las técnicas experimentales son estrategias que permiten tener una planificación de los experimentos a realizar. El diseño factorial completo a dos niveles (Lundstedt *et al.*, 1998) es una metodología de exploración que permite determinar la influencia sobre el resultado de las variables experimentales y sus interacciones. La optimización de la respuesta se puede realizar con superficie de respuesta (Lewis *et al.*, 1999) mediante una función polinomial de segundo orden, o por medio de la máxima pendiente (Carlson, 1992) que es una optimización de forma iterativa; es decir, busca mejorar la respuesta con cada nuevo experimento realizado. El diseño experimental de mezclas (Cornell, 1990) permite aplicar el criterio que la suma de las proporciones de los componentes es el 100% y que por supuesto la modificación de un porcentaje afecta los otros. También se puede combinar el diseño de mezclas con un diseño factorial (Cornell, 1990), permitiendo estudiar simultáneamente mezclas y variables abiertas o de proceso.

La valoración sensorial ha demostrado ser un instrumento de gran eficacia para el control de calidad y aceptabilidad de un alimento. La evaluación sensorial se ha definido como una disciplina científica usada para evocar, medir, analizar e interpretar las reacciones percibidas por los sentidos de las personas hacia ciertas características intrínsecas de un alimento como son su sabor, olor, color y textura (Stone y Sidel, 2004), que son los indicadores de aceptación o rechazo de un producto, por lo que el resultado de este complejo de sensaciones captadas e interpretadas son usadas para medir la calidad de los mismos. La valoración sensorial es útil además para el control del proceso, tanto como adaptación del alimento a su perfil final, como para realizar modificaciones o correcciones; permitiendo obtener condiciones para conseguir datos que posteriormente serán

tratados estadísticamente (Sancho *et al.*, 2002).

Es muy común que en el área de los alimentos se tenga que optimizar una respuesta global que dependerá de diversas respuestas parciales. Las funciones de decisión multicriterio ‘Multicriteria Decision Making’ (Pavan y Todeschini, 2008) son una disciplina que se ocupa de las decisiones relativas a la elección de la mejor alternativa a partir de varios posibles criterios. Son un instrumento matemático que permite tener una estrategia para tomar decisiones a partir de una gran variedad de fuentes, ya que no requiere ninguna restricción fuerte en las estructuras de preferencia.

En la industria alimentaria, han venido aplicándose con éxito metodologías experimentales para evaluar de manera consistente y económica la influencia de los factores y/o componentes de la mezcla en el producto final, varios autores presentan investigaciones con diversas metodologías experimentales en el estudio y optimización de productos alimenticios (Álvarez y Salamanca, 2007; Zhou *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2007; Moreira *et al.*, 2007; Quintero-Gil y Rueda-Quijano, 2008; Rojas *et al.*, 2010a; Rojas *et al.*, 2010b; Flores *et al.*, 2010; Saltos y Bayas, 2010; Tinoco *et al.*, 2011; Ketelaere *et al.*, 2011).

De esta forma, el objetivo planteado en el presente estudio fue de optimizar las dos etapas de producción de este tipo de helado; es decir, encontrar las condiciones óptimas para el proceso de hidrólisis de la lactosa y posteriormente determinar las condiciones óptimas de mezcla y proceso que generen la mayor aceptación sensorial del helado.

2. Material y métodos

El trabajo realizado se dividió en dos etapas: (a) Hidrólisis enzimática de la lactosa, y (b) optimización del proceso y producto.

2.1. Hidrólisis enzimática de la lactosa

La hidrólisis enzimática de la lactosa se llevó a cabo en el Laboratorio de Química de la Universidad del Azuay. Para este proceso se utilizó leche pasteurizada de producción local y la enzima HA-LACTASA 5200. Para pesar la leche se utilizó una balanza digital MICRA Basic RK 10, mientras que para el enzima se empleó una balanza analítica OHAUS modelo Adventurer Pro AV114C. La incubación se llevó a cabo en una incubadora Memmert tipo INB400, con temperatura regulable de hasta 473 K. El control del tiempo de hidrólisis se realizó utilizando un cronómetro Invicta Ultimate Quartz. Para medir la hidrólisis se utilizó un crioscopio Funke Gerber tipo CryoStar I; las mediciones se realizaron por sextuplicado antes y después de la hidrólisis, para poder obtener un valor promedio representativo. El valor medio del punto crioscópico de cada experimento permitió calcular el porcentaje de hidrólisis, aplicando la siguiente fórmula (Lazo y Verdugo, 2011):

$$H\% = \frac{Y-537}{2.74}$$

En donde Y es igual a los Grados Horvet multiplicados por mil. La base hidrolizada se almacenó dentro del cuarto frío de los laboratorios de Tecnología de Alimentos de construcción local (MAFRICO, Cuenca) a temperatura de 277 K. Las variables que se consideraron influyentes en el proceso de hidrólisis enzimática fueron tres: Cantidad de enzima (HA-LACTASA 5200), tiempo de acción del enzima y temperatura de acción del enzima (Tabla 1).

Tabla 1

Variables y condiciones experimentales del proceso de hidrólisis enzimática de la lactosa.

ID	Mínimo (-1)	Centro (0)	Máximo (+1)
X ₁	0.2	0.3	0.4
X ₂	7200	14400	21600
X ₃	307	310	313

X₁: Cantidad de Enzima (mL/L)

X₂: Tiempo de acción del enzima (s)

X₃: Temperatura de acción del enzima (K)

Se aplicó un diseño factorial completo a 2 niveles para 3 variables (Lundstedt *et al.*, 1998), generando ocho experimentos. Además se desarrollaron 6 réplicas las que se utilizaron para calcular el error total (Lewis *et al.*, 1999). La significatividad del modelo de regresión de hidrólisis se comprobó utilizando el análisis de la varianza (ANOVA). Mientras que la significatividad de los coeficientes se comprobó utilizando la técnica de la incertidumbre expandida según Lewis *et al.* (1999). El porcentaje de hidrólisis representó la respuesta experimental, la cual por medio de regresión de mínimos cuadrados ordinarios multivariante (Draper y Smith, 1981), permitió obtener el modelo de screening. La optimización del proceso de hidrólisis de la lactosa, se obtuvo mediante la técnica de la superficie de respuesta (Massart *et al.*, 1997) y la máxima pendiente (Carlson, 1992).

2.2. Optimización del proceso y producto

El desarrollo del helado se llevó a cabo en los Laboratorios de Tecnología de Alimentos, pertenecientes a la Universidad del Azuay. Los componentes básicos de la mezcla fueron: base hidrolizada, crema de leche y azúcar. Los aditivos esencia de vainilla, leche en polvo y Base 50 se adquirieron en la casa comercial Alitecno S. A. y en Supermercados la Favorita S. A.; ubicados en la ciudad de Quito y Cuenca, respectivamente. El batido, maduración y mantecado se desarrollaron utilizando un Mantecador Vertical Frigomat Machine per Gelato G20 de fabricación Italiana. El helado se congeló utilizando un congelador ECASA, glacial 166. En ésta etapa se aplicó un diseño mixto (Cornell, 1990): uno de mezclas para estudiar los componentes y un diseño factorial para estudiar las variables de proceso. Los tres componentes fueron premezclados, obteniendo los pseudocomponentes con los que se trabajó el diseño. La tabla 2 muestra estas condiciones.

Tabla 2

Pre-mezclas a partir de los componentes puros para la optimización del proceso y producto.

Componente	A	B	C
Base hidrolizada	60%	20%	20%
Materia grasa	20%	60%	20%
Azúcar	20%	20%	60%

Se consideraron dos variables de proceso: tiempo de maduración y tiempo de batido de la mezcla. Otros componentes fueron constantes: 8% de leche en polvo, 1% de vainilla y 1% de Base 50. En la tabla 3 se presentan las condiciones de la planificación experimental para las variables de proceso.

Tabla 3

Variables de proceso para el diseño de mezclas para la optimización del proceso y producto.

ID	Mínimo (-1)	Máximo (+1)
X ₁	14400	172800
X ₂	600	900

X₁: Tiempo maduración de la mezcla (s).

X₂: Tiempo batido de la mezcla (s).

Con estas variables se aplicó un diseño factorial a dos niveles, 2²; mientras que para las variables de mezcla se ajustó a un modelo cuadrático, que arrojó como resultado siete experimentos. Además se realizó una réplica para cada nivel con los valores centrales. El número de experimentos desarrollados fueron 32.

Como respuesta experimental se tomó los resultados de la evaluación sensorial; ésta se realizó utilizando escalas de intervalos para evaluar las diversas características sensoriales del helado.

El panel estuvo conformado por catadores no-entrenados conformado por 30 personas, hombres y mujeres entre 20 y 35 años, alumnos y personal de laboratorio de Ingeniería en Alimentos de la Universidad del Azuay. La evaluación se realizó

mediante una ficha de catación, que contemplaba los aspectos más relevantes e influyentes en la estructura del helado, como son textura, aroma, sabor, homogeneidad. A estas personas se les explicó el formato de la ficha y la forma en la se iba a llevar a cabo la catación con diferentes experimentos realizados al azar de la matriz de la tabla 14, se evaluaron 2 muestras por día.

Las respuestas sensoriales fueron procesadas mediante funciones de utilidad (Pavan y Todeschini, 2008), con la finalidad de obtener un solo puntaje que represente la mayor aceptación holística del producto; es decir, con todos los caracteres simultáneamente; también se consideraron las respuestas costos de producción y rendimiento. La selección de las funciones de utilidad para cada atributo respuesta se las escogió de manera lógica a las características que debe presentar el helado. La función lineal se utilizó para aquellas respuestas que se deseaba obtener la puntuación máxima. La función normal para atributos que deben presentarse en una cantidad intermedia. La función inversamente logarítmica para caracteres que se buscaba sean los más bajos en el producto.

Los cálculos para determinar las funciones de utilidad se desarrollaron con la ayuda del Software DART 2.2 (Talet, 2007); mientras que los cálculos y gráficos de superficie de respuesta ternario de mezclas se desarrollaron en el programa Minitab.

3. Resultados y discusión

Hidrólisis enzimática de la lactosa

En la Tabla 4 se presentan los resultados del porcentaje de hidrólisis (%H) para cada experimento realizado. Se obtuvo el modelo de regresión de la ecuación 1, mientras que en la Tabla 5 se presenta el resumen del Análisis de la Varianza sobre el modelo total.

$$H\% = 68.839 + 17.453X_1 + 13.928X_2 - 0.779X_3 - 10.956X_1X_2 + 5.904X_1X_3 + 1.919X_2X_3 - 5.740X_1X_2X_3 \quad (\text{Ec. 1})$$

Tabla 4

Matriz del modelo experimental para la hidrólisis enzimática de la lactosa.

Experimento	I	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	H%
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	40.84
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	74.37
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	75.29
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	87.96
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	12.16
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	92.27
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	77.25
8	1	1	1	1	1	1	1	1	90.57
R1	1	0	0	0	0	0	0	0	85.40
R2	1	0	0	0	0	0	0	0	81.96
R3	1	0	0	0	0	0	0	0	95.27
R4	1	0	0	0	0	0	0	0	78.11
R5	1	0	0	0	0	0	0	0	68.62
R6	1	0	0	0	0	0	0	0	70.31

X₁ = Cantidad de enzima; X₂ = Tiempo de acción del enzima; X₃ = Temperatura de acción del enzima
R: 1..6. Repeticiones.

Tabla 5

Análisis de varianza del modelo de regresión del proceso de hidrólisis enzimática de la lactosa.

H%	DF	SS	MS	F	p
Total	14	82276.8	5876.9		
Constante	1	75834.5	75834.5		
Total Corregido	13	6442.3	495.6		
Regresión	6	5262.56	877.1	5.204	0.024
Residuos	7	1179.73	168.5		

El análisis de la varianza muestra como el modelo al 95% de probabilidad es significativo. El coeficiente de determinación R² calculado considerando también las réplicas al punto central es de 0.817.

Por otro lado el cálculo del Lack-of-Fit utilizando todos los datos experimentales indica que el modelo lineal es significativo al 89% de probabilidad (Tabla 6).

Tabla 6

Análisis Lack-of-Fit del modelo de regresión para el proceso de hidrólisis enzimática de la lactosa.

H%	DF	SS	MS	F	p
Lack of Fit (error del modelo)	2	686.6	343.3	3.48	0.113
Error puro	5	493.1	98.6		

El Lack-of-Fit no explicado hace prever que una superficie de respuesta cuadrática podría aproximar mejor las respuestas y por lo tanto permitir el cálculo de un valor óptimo.

Tabla 7

Parámetros para el cálculo del error expandido.

Std = 9.931	alfa = 0.025
gl = 13.00	t _{student} = 2.5326
U _{expand} = 8.892	

Mediante comparación de los coeficientes de regresión con el valor del error total (error experimental y error de planificación) que se presenta en la Tabla 7, se estableció el polinomio que permite modelar el proceso de hidrólisis enzimática de la lactosa. El polinomio muestra únicamente las variables y sus interacciones que tienen una influencia significativa sobre la hidrólisis. Se observa que los coeficientes de las variables X₁ y X₂ (ecuación 1) son significativas. Queda establecido el modelo de screening para el proceso de hidrólisis como sigue:

$$H\% = 68.839 + 17.453X_1 + 13.928X_2 - 10.956X_1X_2 \quad (\text{Ec. 2})$$

La optimización de la hidrólisis de la lactosa, se realizó considerando las dos variables antes mencionadas y se mantuvo la temperatura como un valor constante igual a 310 K. Se utilizó un diseño central compuesto (Box *et al.*, 1978) para obtener una superficie de respuesta polinomial. Las tablas 8 y 9 muestran las condiciones experimentales y la matriz del modelo experimental, respectivamente.

Tabla 8

Variables y condiciones experimentales para la optimización de la hidrólisis enzimática de la lactosa.

ID	Axial Inf.	Mínimo	Centro	Máximo	Axial Sup.
	-1.414	-1	0	+1	+1.414
X ₁	0.1586	0.2	0.3	0.4	0.441
X ₂	4219.2	7200	14400	21600	24580.8

X₁: Cantidad de Enzima (mL/L).

X₂: Tiempo de acción del Enzima (s).

Tabla 9

Matriz del modelo experimental para optimizar la hidrólisis enzimática de la lactosa.

Exp.	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	H%
1	-1	-1	1	1	1	40.84
2	1	-1	-1	1	1	74.37
3	-1	1	-1	1	1	75.29
4	1	1	1	1	1	87.96
5	-1.414	0	0	1.999	0	62.91
6	1.414	0	0	1.999	0	80.89
7	0	-1.414	0	0	1.999	69.73
8	0	1.414	0	0	1.999	88.36
9	0	0	0	0	0	72.02

De la matriz de superficie de respuesta se obtuvieron tanto el polinomio (Ec. 3) y la gráfica de superficie de respuesta (Figura 1). Éste modelo presenta un coeficiente de determinación R²=0.892. Del análisis de la varianza del modelo polinomial presentado en la Tabla 10, se puede notar que son significativos al 90% solo los efectos

principales, lo que indica que la superficie de respuesta es un plano.

Tabla 10

Análisis de la varianza del modelo de superficie de respuesta del proceso de hidrólisis enzimática.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	p
Regresión	5	1493.2	1493.2	298.6	4.94	.109
Lineal	2	1332.9	1332.9	666.5	11.03	.041
Cuadrado	2	51.4	51.4	25.7	0.43	.688
Interacción	1	108.8	108.8	108.8	1.80	.272
Error residual	3	181.2	181.2	60.4		
Total	8	1674.4				

$$H\% = 72.026 + 8.954X_1 + 9.300X_2 - 5.215X_1X_2 - 1.529X_1^2 + 2.046X_2^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

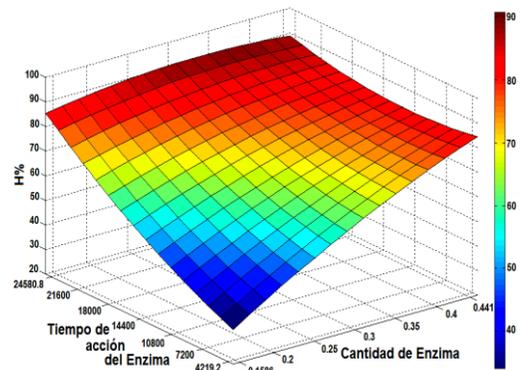


Figura 1. Superficie de respuesta: Proceso de hidrólisis enzimática de la lactosa.

El plano no presenta máximos matemáticos, por lo tanto se ha optado utilizar como algoritmo de optimización el método de máxima pendiente, partiendo de la cota donde el tiempo de acción del enzima es el máximo y la cantidad de enzima medio. La Tabla 11 muestra los resultados de la optimización por el método de máxima pendiente.

Tabla 11

Cálculo de las condiciones experimentales para la optimización de la hidrólisis enzimática de la lactosa por el método de la máxima pendiente.

Id	Escalado	Coefficiente	K	Id nuevo	Escalado	Real	H%
X ₁	0	8.9543	0.01	X ₁ '	0.090	0.309	103
X ₂	1.414	9.2993		X ₂ '	1.507	25250	

Los resultados de la optimización por el método de máxima pendiente se visualizan en la tabla 12. Se obtuvo una hidrólisis del 100% de la lactosa, en cuanto este valor esta dentro del intervalo de confianza al 95%. Por lo tanto estas condiciones son óptimas para el proceso de hidrólisis, y corresponden a: 0.31 mL/L de enzima, 25250 s de tiempo de acción de la enzima y a una temperatura de acción de la enzima constante de 310 K.

Tabla 12

Porcentaje de hidrólisis por el método de la máxima pendiente y límites de confianza calculados a partir de error expandido.

Réplicas	H%	97.0	106.2	102.4	91.4	93.5	
Prom.	Desv. Est.	GL	p	t student	Error exp.	L.I.	L.S.
98.1	6.13	4	0.03	3.49	9.57	88.53	107.68

Optimización del proceso y producto

En la fórmula se consideraron tres componentes: base hidrolizada, materia grasa y azúcar, de los cuales se realizaron mezclas iniciales denominadas “pre-mezclas” (Tabla 2). Las cantidades de pre-mezcla A, pre-mezcla B y pre-mezcla C, se colocaron de acuerdo a los requerimientos

de cada experimento. Valores de componentes como: leche en polvo, vainilla y base 50, se mantuvieron constantes.

Cada muestra tenía 18 variables respuesta de tipo sensorial a ser evaluadas (homogeneidad, color, textura, aroma, sabor, dulzor, fusión, evaluación global), además los costos y el rendimiento de producción. Los resultados fueron obtenidos a partir de un panel no entrenado conformado por 30 personas, entre hombres y mujeres comprendidas entre edades de 20 a 35 años. Se trabajó con la mediana de las puntuaciones de cada atributo. A partir de las medianas calculadas se moduló con diversas funciones de utilidad, para finalmente determinar la función de utilidad global mediante el programa DART, según se observa en la Tabla 13. Una vez obtenidas las funciones de utilidad para cada experimento, se determinó el experimento que tuvo el valor más alto de función de utilidad, que correspondía al experimento que mejor se ajusta al modelo propuesto. En la Tabla 14 se presentan las condiciones del diseño de mezclas y la función utilidad (respuesta).

Tabla 13

Transformadas de las diferentes respuestas mediante funciones de utilidad para optimizar el proceso de elaboración del helado mantecado.

ID	Variables	Transformación	Optimalidad	Peso	Límite Inferior	Límite Superior
1	Homogeneidad	Lineal	Alto	0.050	2.000	3.000
2	C. blanco	Normal	0.500	0.050	0.000	1.000
3	C. crema	Normal	1.500	0.050	0.000	3.000
4	C. amarillo	Normal	1.000	0.050	0.000	2.000
5	Textura	Inv. Logarítmica	Bajo	0.050	1.000	2.000
6	A. leche	Lineal	Alto	0.050	2.000	3.000
7	A. grasa	Normal	1.500	0.050	1.000	2.000
8	A. vainilla	Lineal	Alto	0.050	2.000	3.000
9	A. ácido	***	***	***	***	***
10	A. rancio	***	***	***	***	***
11	S. grasa	Inv. Logarítmica	Bajo	0.050	1.000	2.000
12	S. leche	Normal	2.500	0.050	2.000	3.000
13	S. vainilla	Lineal	Alto	0.050	3.000	3.500
14	S. metal	***	***	***	***	***
15	S. rancio	***	***	***	***	***
16	Dulzor	Normal	4.000	0.050	3.000	5.000
17	Fusión	Normal	1.500	0.050	1.000	2.000
19	E. global	Lineal	Alto	0.050	2.000	4.000
19	Costos	Inv. Logarítmica	Bajo	0.050	7.060	15.250
20	Rend. (% Vol)	Lineal	Alto	0.050	0.000	18.420

Tabla 14

Diseño factorial combinado con el diseño de mezclas.

Var. Proceso		Var. Mezcla			F.U.
X ₁	X ₂	A	B	C	
-1	-1	1.00	0.00	0.00	0.351
		0.00	1.00	0.00	0.254
		0.00	0.00	1.00	0.324
		0.50	0.50	0.00	0.435
		0.00	0.50	0.50	0.36
		0.50	0.00	0.50	0.404
		0.33	0.33	0.33	0.515
1	-1	0.33	0.33	0.33	0.452
		1.00	0.00	0.00	0.322
		0.00	1.00	0.00	0.238
		0.00	0.00	1.00	0.139
		0.50	0.50	0.00	0.342
		0.00	0.50	0.50	0.36
		0.50	0.00	0.50	0.315
-1	1	0.33	0.33	0.33	0.395
		0.33	0.33	0.33	0.421
		1.00	0.00	0.00	0.38
		0.00	1.00	0.00	0.35
		0.00	0.00	1.00	0.371
		0.50	0.50	0.00	0.391
		0.00	0.50	0.50	0.267
1	1	0.50	0.00	0.50	0.248
		0.33	0.33	0.33	0.376
		0.33	0.33	0.33	0.408
		1.00	0.00	0.00	0.473
		0.00	1.00	0.00	0.321
		0.00	0.00	1.00	0.358
		0.50	0.50	0.00	0.454
1	1	0.00	0.50	0.50	0.329
		0.50	0.00	0.50	0.315
		0.33	0.33	0.33	0.475
		0.33	0.33	0.33	0.475

La Tabla 15 resume los resultados del cálculo de los coeficientes estimados de regresión para la función de utilidad, a partir del cual se obtienen las figuras 2 y 3.

Tabla 15

Regresión para el diseño factorial y diseño de mezclas.

Término	Coef. SE	Coef.	T	P	VIF
A	0.3767	0.04516	**	**	1.599
B	0.3069	0.04516	**	**	1.599
C	0.2932	0.04516	**	**	1.599
A*B	0.1888	0.20757	0.91	0.414	1.599
A*C	0.0193	0.20757	0.09	0.930	1.599
B*C	0.1928	0.20757	0.93	0.405	1.599
A*X ₁	0.0159	0.04516	0.35	0.743	1.599
B*X ₁	0.0096	0.04516	0.21	0.842	1.599
C*X ₁	-0.0496	0.04516	-1.10	0.033	1.599
A*B*X ₁	0.0640	0.20757	0.31	0.773	1.599
A*C*X ₁	0.0475	0.20757	0.23	0.830	1.599
B*C*X ₁	0.1440	0.20757	0.69	0.526	1.599
A*X ₂	0.0394	0.04516	0.87	0.432	1.599
B*X ₂	0.0181	0.04516	0.40	0.709	1.599
C*X ₂	0.0609	0.04516	1.35	0.249	1.599
A*B*X ₂	-0.1000	0.20757	-0.48	0.655	1.599
A*C*X ₂	-0.2665	0.20757	-1.28	0.268	1.599
B*C*X ₂	-0.1920	0.20757	-0.93	0.407	1.599
A*X ₁ *X ₂	0.0332	0.04516	0.74	0.503	1.599
B*X ₁ *X ₂	-0.0215	0.04516	-0.48	0.658	1.599
C*X ₁ *X ₂	0.0457	0.04516	1.01	0.369	1.599
A*B*X ₁ *X ₂	0.2320	0.20757	1.12	0.326	1.599
A*C*X ₁ *X ₂	-0.0455	0.20757	-0.22	0.837	1.599
B*C*X ₁ *X ₂	-0.0300	0.20757	-0.14	0.892	1.599

S=0.0906548; PRESS=13.8849; R²=77.56%; R²ajust=0.00%; R²predicho=0.00%.

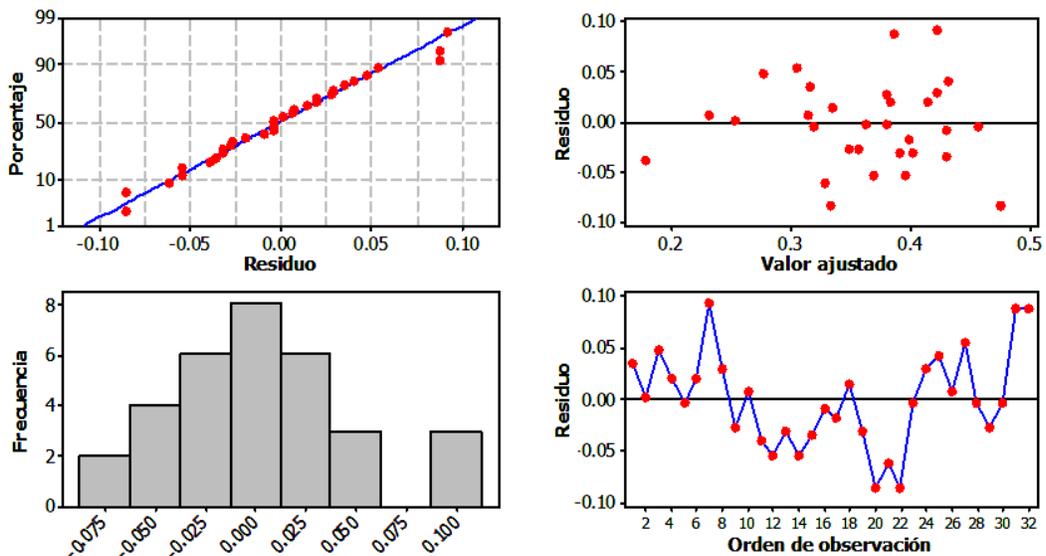


Figura 2. Diagnóstico del modelo de diseño de mezclas combinado con las variables de proceso.

La Figura 2 muestra el comportamiento de los residuos del modelo. Se observa que los residuos se distribuyen casualmente y no existen patrones de comportamiento o autocorrelación entre los mismos. La Figura 3 muestra la superficie de respuesta en la que se puede identificar la función de utilidad más alta. Esta figura se logra cuando de trabajada a los valores más altos para las dos variables de proceso, además muestra que la mezcla de componentes A y B (alto contenido de base hidrolizada y materia grasa) son relevantes en el estudio, mientras que el componente C (alto contenido de azúcar), no presenta mayor significancia.

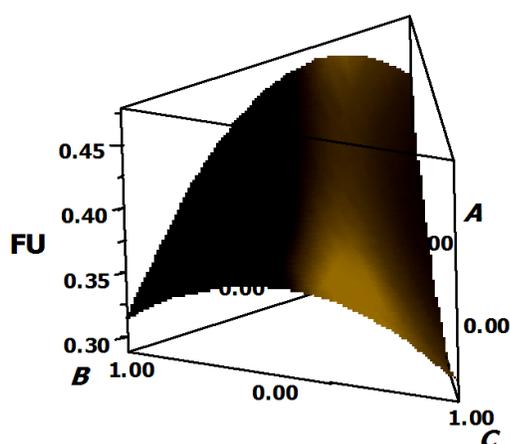


Figura 3. Diagrama ternario diseño de mezclas combinado con variables de proceso. Valores fijos: $X_1=X_2=1$.

La función de utilidad más alta corresponde 0.449. Este resultado brinda la mayor aceptación sensorial del helado y rendimiento de producción, también el menor costo de elaboración. Las condiciones óptimas son: 70% de la pre-mezcla A, 20% de pre-mezcla B y 10% de pre-mezcla C; mientras que las variables de proceso tiempo de maduración y tiempo de batido, se las debe fijar en las condiciones más altas presentadas en la tabla 3. La formulación final del helado tipo mantecado son: 38% de base hidrolizada, 30% de materia grasa, 22% de Azúcar, 8% de leche en polvo y 1% de Vainilla y Base 50, tiempo de maduración

de la mezcla de 172800 s y tiempo de batido de la mezcla de 900 s.

El balance de la formulación final del helado cumple con los parámetros perceptibles al gusto del consumidor como son: poder anticongelante, extracto seco, dulzor y materia grasa. El helado elaborado tiene como componentes mayoritarios leche (base hidrolizada) y materia grasa (crema de leche), estos componentes brindan al producto las características propias de helado tipo mantecado.

4. Conclusiones

Mediante la aplicación de diseño experimental factorial y diseño de mezclas combinado con variables de proceso, se pudo optimizar las características sensoriales y tecnológicas del helado tipo mantecado. En la hidrólisis enzimática de la lactosa, se obtuvo una hidrólisis del 100%, al trabajar con 0.31 mL/L de enzima, 25250 s de tiempo de acción de la enzima y a temperatura de acción de la enzima de 310 K. Las proporciones de los componentes que mezclados permiten obtener el mejor helado son: 38% de base hidrolizada, 30% de materia grasa, 22% de azúcar y 10% de otros componentes (leche en polvo, vainilla y base 50). La mezcla debe ser batida por 900 s y sometida a una maduración de 172800 s. Las funciones de utilidad fueron una herramienta potente para procesar las 21 variables respuestas, permitiendo obtener polinomios que permitieron estudiar simultáneamente todas estas variables respuesta. Finalmente, se obtuvo un helado mantecado con los mejores parámetros perceptibles para el gusto del panel utilizado (homogeneidad, color, textura, aroma, sabor, dulzor, fusión, evaluación global), con un alto rendimiento y bajo costos de producción.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, H.; Salamanca, G. 2007. Valoración metodológica para el estudio de mezclas ternarias en sistemas alimentarios. *Alimentos Ciencia e Ingeniería* 16 (1): 92-96.

- Box, G.; Hunter, W.; Hunter S. 1978. Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building. Editorial John Wiley & Sons. USA.
- Carlson, R. 1992. Design and optimization in organic synthesis. Elsevier Science Publishers B.V. Netherlands.
- Cornell, J. 1990. Experiments with mixtures. Second edition. Editorial John Wiley and Sons, Inc. USA.
- Draper, NR.; Smith, H. 1981. Applied regression analysis. John Wiley & Sons, In. USA.
- Flores, S.K.; Costa, D.; Yamashita, F.; Gerschenson, L.N. and Grossmann, M.V. 2010. Mixture design for evaluation of potassium sorbate and xanthan gum effect on properties of tapioca starch films obtained by extrusión. Materials Science and Engineering 30: 196-202.
- INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2005. Helados. Requisitos. NTE INEN 706:2005. INEN, Ecuador.
- Ketelaere, B.; Goos, P. and Brijs, K. 2011. Prespecified factor level combinations in the optimal design of mixture-process variable experiments. Food Quality and Preference 22: 661-670.
- Lazo, J.; Verdugo, P. 2011. Estudio para optimizar la calidad tecnológica y sensorial del helado tipo mantecado con hidrólisis enzimática mediante diseño experimental. Tesis de graduación previo a la obtención de título de Ingeniero en Alimentos. Universidad del Azuay. Ecuador.
- Lewis, GA.; Mathieu, D.; Phan-Tan-Luu, R. 1999. Pharmaceutical experimental design. Marcel Dekker Inc. USA.
- Lundstedt, T.; Seifert, E.; Abramo, L.; Thelin, B.; Nyström, Å.; Pettersen, J.; Bergman, R. 1998. Experimental design and optimization. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 42: 3-40.
- Massart, DL.; Vandeginste, BGM.; Buydens, LMC. 1997. Handbook of chemometrics and qualimetrics: Part A. Elsevier Science B.V. Netherlands.
- Moreira, G.A.; Micheloud, G.A.; Beccaria, A.J. and Goicoechea, H.C. 2007. Optimization of the *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* HD-1 δ -endotoxins production by using experimental mixture design and artificial neural networks. Biochemical Engineering Journal 35: 48-55.
- Pavan, M.; Todeschini, R. 2008. Total-Order Ranking Methods. In: Scientific Data Ranking Methods: Theory and Applications. Edited by Pavan, M.; Todeschini, R. Elsevier. The Netherlands.
- Quintero - Gil, C.M.; Rueda - Quijano, H. 2008. Optimización de las condiciones de proceso para la elaboración de la esponja líquida de pan de molde a través de un diseño factorial de experimentos. Revista Publicaciones e Investigación 2(1):43-50.
- Rojas, C.; Aguilar, L.; Tripaldi, P. 2010a. Desarrollo y optimización de un producto untable a base de soya. Revista Tecnológica ESPOL 23(2): 33-40.
- Rojas, C.; Tripaldi, P.; Dután, H. 2010b. Desarrollo y optimización de una infusión aromática tipo tisana aplicando diseño de Plackett-Burman y optimización de máxima pendiente. Revista de Ciencias 14: 103-115.
- Salto, H.; Bayas, A. 2010. Aplicación de un diseño experimental de mezclas en el desarrollo de una "Barra Energética" con base en el salvado de Palmito de Pejibaye (*Bactris gasipaes* H.B.K). Revista Tecnológica ESPOL 23(2):1-7.
- Sánchez, C.; Urgilés, G.; Verdugo, P.; Lazo, J.; Rojas, C. 2007. Estudio tecnológico de variables de proceso mediante diseño experimental y función de dominancia para evaluar la calidad sensorial del manjar de leche con hidrólisis enzimática. Alimentos Ciencia e Ingeniería 16(3): 318-320.
- Sancho, J.; Bota, E.; De Castro, J.J. 2002. Introducción al análisis sensorial de los alimentos. Alfaomega grupo editor, S.A. de C.V.
- Stone, H.; Sidel, J.L. 2004. Sensory evaluation practices. 3rd Edition. San Diego, CA, USA: Elsevier Academic Press.
- Taleta SRL. 2007. DART-Decision Análisis by Ranking Techniques (Version 2.0).
- Tinoco, M.; Rojas, C.; Tripaldi, P.; Criollo, M.; Huayasaca, L. 2011. Aplicación de funciones de decisión multicriterio y diseño Plackett-Burman para el estudio de la calidad sensorial de mortadelas. Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos 2(1): 142-157.
- Zhou, J.; Liu, X.; Huang, K.; Dong, M.; Jiang H. 2007. Application of the mixture design to design the formulation of pure cultures in Tibetan kefir. Agricultural Sciences in China 6 (11): 1383-1389.