

Optimización multirespuesta de la concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión sobre humedad final y ganancia de sólidos del espárrago verde deshidratado osmóticamente.

Multirespond optimization of the concentration of osmotic solution, temperature and time of immersion on final humidity and solid gain of green sparrago dehydrated osmotically.

Luis Alberto Rubio Jácobo ^{1,*}

¹ Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Av, Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria. Trujillo. Perú.

* Autor correspondiente: lrubioja@hotmail.com (L. Rubio)

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue establecer las condiciones óptimas de concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión que simultáneamente optimizan la humedad final y ganancia de sólidos del espárrago verde (*Asparragus officinalis*) deshidratado osmóticamente. Se utilizó el diseño compuesto central rotatable (DCCR) haciendo un total de 18 corridas experimentales considerándose como unidad experimental al espárrago verde. Se utilizó la metodología de superficie multirespuesta y dentro de ésta, la función de deseabilidad como estrategia de optimización y se utilizó el Software DESING EXPERT ver 7.0. Se concluye que al utilizar el diseño de superficie de respuesta central compuesto rotatable (DCCR), las condiciones óptimas de operación son una concentración de solución osmótica de 20% de NaCl; una temperatura de 36,10°C y un tiempo de inmersión de 300 mm.; el modelo de regresión cuadrático describe adecuadamente la relación funcional de concentración, temperatura y tiempo de inmersión con la humedad final y ganancia de sólidos, obteniendo un R² alto (98,87% y 98,37%) y un PRESS bajo (51,29 y 49,11); el punto de optimización multirespuesta que maximiza la función de deseabilidad global (0,942) es cuando se tiene una humedad de 69,698% y una ganancia de sólidos de 22,46%,

Palabras clave: Diseño de superficie multirespuesta; Función de deseabilidad; Deshidratación osmótica.

ABSTRACT

The objective of this research was to establish the optimum conditions of osmotic solution concentration, temperature and immersion time that simultaneously optimize the final moisture and gain of the asparagus dehydrated green asparagus (*Asparragus officinalis*) solids. The central composite rotatable design (DCCR) was used, making a total of 18 experimental runs considering the green asparagus as the experimental unit. The multiresistance surface methodology was used and within it, especially the desirability function as an optimization strategy and the DESING EXPERT ver 7,0 software was used. It is concluded that using the rotatable composite central response surface design (DCCR), the optimum operating conditions are an osmotic solution concentration of 20% of NaCl; a temperature of 36,10 °C and a immersion time of 300 mm. The quadratic regression model adequately describes the functional relationship of concentration, temperature and immersion time with final moisture and solids gain, obtaining a high R² (98,87% and 98,37%) and a low PRESS (51,29 and 49,11). The multiresponse optimization point that maximizes the global desirability function (0,942) is when we have a humidity of 69,698% and a solids gain of 22,46%.

Keywords: Multiresponse surface design; Function of desirability; Osmotic dehydration

1. INTRODUCCIÓN

En la práctica industrial son muchos los métodos utilizados para el diseño y control de procesos industriales con el objetivo de establecer parámetros o condiciones de operación que proporcionen las características de calidad deseadas. La calidad global de los productos en la industria manufacturera, está representada por muchas características de interés y éstas a la vez, están en función de un conjunto de factores de control. Para obtener el valor de respuesta de esas características se requiere utilizar una herramienta poderosa, como es los

diseños experimentales que constituyen la estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de corridas experimentales.

El tipo de diseño que se utilice involucra los factores de interés con el fin de encontrar la combinación que corresponda de la mejor manera a todas las características. A este proceso se le conoce como un diseño de optimización multirespuesta en la que las características de interés se definen como respuesta múltiple. (Ayala, J.; Pardo, R. 1995:39; Figueroa, G. 2003:17; Varela, J.; Fermín, J.; Albornoz, Y. 2000: 810). En algunos casos el problema de optimización multirespuesta puede no tener una solución completamente acorde con la realidad desde el punto de vista individual ya que cada variable respuesta individual no coincide con el óptimo global. Lo que sí se puede señalar es la región de operación del proceso en el que todas las variables cumplen con el requerimiento de la mejor manera posible. Así pues, típicamente se encuentra una solución de compromiso, que busca balancear de manera adecuada la importancia relativa de las respuestas. (Dominguez, J. 2006:145; Nuñez, M. 2002:83).

Dentro de la metodología de optimización multirespuesta, tenemos muchos enfoques que han sido propuestos por diferentes investigadores. Derringer, G.; Suich, R. (1980) transforman cada función de respuesta en una función de deseabilidad y luego maximizan la media geométrica de las funciones de deseabilidad individuales para obtener una solución de compromiso. Lind *et al.* (1960); Floros, J.; Chinnan, M. (1988) Fermin, W.; Corzo, O. (2005), superponen gráficas de contornos para resolver problemas que involucran optimización de multirespuesta. Este método, aunque simple y directo, tiene sus limitaciones en grandes sistemas que involucren diversas variables independientes y un gran número de variables de respuesta. Khuri, A.; Colon, M. (1981), presentaron un procedimiento basado en una función distancia que calcula la cercanía global, donde las funciones de respuesta logran sus respectivos óptimos en el mismo conjunto de condiciones y posteriormente se encuentra una solución comprometida minimizando esta función distancia sobre la región experimental. Pignatiello (1993); Ames, A. *et al.* (1997) y Vining, G. (1998) propusieron minimizar una medida basada en una función de pérdida multivariante que evalúa la pérdida cuando las respuestas se desvían de sus "targets". Chi-Bin, C. (2004) usa un sistema neuro-difuso denominado sistema de inferencia neuro-difuso múltiple adaptable (SNDAM) a fin de modelar un sistema que tenga respuestas múltiples y luego usa un algoritmo genético para optimizar este sistema de respuesta.

Todos estos métodos utilizan una aproximación para resolver los problemas de optimización multirespuesta, la cual consiste en obtener una función objetivo unificada, es decir, las variables respuestas individuales son matemáticamente combinadas para generar una función simple. En un inicio, las variables de respuesta individuales son modeladas para crear una superficie de respuesta de un diseño experimental. Luego a cada variable de respuesta se le aplica una transformación de tal manera que todas las respuestas se puedan combinar en una sola función de interés. Posteriormente se hacen variar los niveles de los factores, tal que se puedan cumplir de la mejor manera los óptimos individuales hasta alcanzar un óptimo global (Ángel, 2004; Domínguez, 2004; Nuñez, 2002).

Por otro lado, en la actualidad existen una amplia tendencia mundial hacia la investigación y desarrollo de técnicas de conservación de alimentos que permiten obtener productos de elevada calidad nutricional que sean muy similares en color, aroma y sabor a los alimentos frescos. La utilización del proceso de deshidratación osmótica como pre tratamiento al proceso de secado, puede ofrecer productos de calidad con humedad intermedia con buena estabilidad a temperatura ambiente y también ha sido sugerida por algunos investigadores como una forma de disminuir el tiempo de permanencia del producto en el secado, colaborando así con la reducción del uso de energía en el proceso y el valor nutricional (Lenart, 1993).

La Deshidratación Osmótica es una técnica de remoción de agua que consiste en sumergir frutas u hortalizas, trozadas o enteras en una solución hipertónica compuesta por solutos capaces de generar una presión osmótica alta, lo cual permite aumentar la vida útil y mejorar las características sensoriales del producto. Este proceso también es interesante debido a su potencial aplicación en la industria de los alimentos, por lo que la deshidratación osmótica debe ser utilizada como pre tratamiento en procesos que efectivamente reduzcan la actividad del agua (secado con aire caliente, vacío, congelación, pasteurización) pues mejora considerablemente la calidad del producto (Parjoko, *et al.*, 1996).

La presente investigación tiene una relevancia social porque es conveniente para el desarrollo regional en el sentido que se propone conocer las condiciones óptimas de operación durante el proceso de deshidratación osmótica dando lugar a un valor agregado al espárrago verde (*Asparagus officinalis*), contribuyendo así a una mayor aceptación del producto en el mercado nacional e internacional. También tiene una relevancia empresarial ya que no solamente se determinará las condiciones óptimas de trabajo, sino que se logrará disminuir los costos de producción y comercialización. Por lo tanto, los resultados obtenidos benefician a la sociedad industrial de nuestro país y a los consumidores que obtendrán un producto de mejor calidad. De la misma forma se tendrá una relevancia práctico-institucional ya que los resultados de la investigación permitirán sustentar el uso de las técnicas de superficie multirespuesta en procesos de optimización las cuales van a tener que ser aplicadas estratégicamente en las diferentes organizaciones industriales de nuestro medio con el objetivo claro de

optimizar sus procesos productivos. Todo esto implicará una relevancia académica, debido a la necesidad de contar con afirmaciones teóricas complementarias, sólidas y comprobadas respecto al tema de investigación se considera necesario estructurar un cuerpo de conocimiento conexo; por lo que, con las conclusiones obtenidas en esta investigación se pueda generalizar los resultados a principios más amplios de actuación e investigación. Se estableció como objetivo general determinar las condiciones óptimas de concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión que simultáneamente optimizan la humedad final y ganancia de sólidos del espárrago verde (*Asparragus officinalis*).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño experimental utilizado es el Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR) de tres factores con tres niveles cada factor, una parte axial y aumentado en cuatro puntos centrales, que permitió evaluar el efecto de los factores F₁: Concentración de solución osmótica, F₂: Temperatura y F₃: Tiempo de inmersión sobre Y₁: Humedad final y Y₂: Ganancia de sólido. Se establecieron 18 corridas experimentales, determinado por la estructura de este diseño de superficie de respuesta, las cuales fueron realizadas de manera aleatoria para garantizar la validez estadística de los resultados.

La población estuvo constituido por la producción de espárrago verde (*Asparragus officinalis*) que proviene en su estado fresco desde los campos de cultivo del distrito de Paján. La unidad experimental estuvo constituida por el espárrago verde, que fue seleccionada de 18 fajos de espárragos seleccionados aleatoriamente, Luego fueron evaluados y estudiados en el Laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Trujillo. Los factores con sus niveles y las variables respuesta con su respectiva función objetivo e importancia considerada en esta investigación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Factores y Variables Respuesta consideradas en la investigación

Factores	Unidad	Niveles	
F ₁ : Concentración de la solución osmótica	%	Bajo (4%); Medio (12%); Alto (20%)	
F ₂ : Temperatura	°C	Bajo (20°C); Medio (35°C); Alto (50°C)	
F ₃ : Tiempo de inmersión	Min	Bajo (10m); Medio (155m); Alto (300m)	
Variable Respuesta	Unidad	Función, Objetivo	Importancia
Y ₁ : Humedad final	%	Minimizar	3
Y ₂ : Ganancia de sólidos	%	Maximizar	1

Fuente: Diseñado por el investigador

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS VARIABLES EN ESTUDIO

Tabla 2: Medidas estadísticas descriptivas de los factores y las variables respuestas

Factor	Nombre	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	D.E.	C.V.%
F ₁	CONCENTRACION	%	4 (-1)	20 (+1)	12	6,96	58,06
F ₂	TEMPERATURA	°C	20 (-1)	50 (+1)	35	13,06	37,33
F ₃	TIEMPO	Min	10 (-1)	300 (+1)	155	126,30	81,48
Respuesta	Nombre	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	D.E.	C.V.%
Y ₁	HUMEDAD	%	69,69	88,24	79,08	5,53	7,00
Y ₂	GANANCIA	%	6,55	26,70	16,07	4,74	29,54

Nota: D.E. : Desviación Estándar; C.V.: Coeficiente de variación

Fuente: Salidas del Software Desing Expert

3.2. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTAS:

Tabla 3: Modelo Polinomial sugerido para las variables respuestas Y₁: Humedad final y Y₂: Ganancia de sólidos, en función de los factores F₁: Concentración de solución osmótica, F₂: Temperatura y F₃: Tiempo de inmersión,

Modelo sugerido	E.E.	Coef. Det. R ²	R ² ajustado	PRESS
Para Y1: Humedad final				
Lineal	1,6964	0,9270	0,9114	67,9313
Cuadrático *	0,8947	0,9884	0,9754	51,2900
Cúbico	0,6759	0,9967	0,9859	365,7146
Para Y2: Ganancia de sólidos				
Lineal	1,5657	0,9155	0,8973	61,7075
Cuadrático *	0,9097	0,9837	0,9653	49,1152
Cúbico	0,9568	0,9910	0,9617	759,1475

Nota: *: Modelo sugerido. PRESS: Suma de cuadrados de error residual previsto. E.E.: Error de Estimación

Fuente: Salidas del Software Desing Expert

3.3. ANALISIS DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL MODELO CUADRATICO:

Tabla 4: Análisis de varianza para evaluar la significación de los términos del modelo cuadrático de la variable respuesta humedad final en función de concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión

Fuente de Variación	SC	GL	CM	Valor F	Valor p
Modelo	545,8041	9	60,6449	75,7609	< 0,0001
F ₁ : CONCENTRACION	430,5028	1	430,5028	537,8072	< 0,0001
F ₂ : TEMPERATURA	27,7794	1	27,7794	34,7035	0,0004
F ₃ : TIEMPO	53,6378	1	53,6378	67,0072	< 0,0001
F ₁ F ₂	0,0196	1	0,0196	0,0244	0,8796 ns
F ₁ F ₃	18,9217	1	18,9217	23,6380	0,0013
F ₂ F ₃	0,0590	1	0,0590	0,0737	0,7928 ns
F ₁ ²	6,1736	1	6,1736	7,7124	0,0240
F ₂ ²	6,0057	1	6,0057	7,5027	0,0255
F ₃ ²	8,8058	1	8,8058	11,0007	0,0106
Residual	6,4038	8	0,8005		
• Falta de ajuste	6,2325	5	1,2465	21,8235	0,145 ns
• Error Puro	0,1714	3	0,0571		
Total	552,2079	17			

Nota: ns: no significativo

Fuente: Salidas del Software Desing Expert

En base a estos resultados se obtuvo el siguiente modelo de regresión cuadrático para la variable Y₁: Ganancia de sólidos en función a los términos significativos (p<0,05)

$$\text{Humedad Final (Y}_1\text{)} = 95,079 - 0,758F_1 - 0,309F_2 - 0,01F_3 - 0,001F_1F_3 + 0,01F_1^2 + 0,003F_2^2 + 0,0003F_3^2 \quad (1)$$

Tabla 5: Análisis de varianza para evaluar la significación de los términos del modelo cuadrático de la variable respuesta ganancia de sólidos en función de concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión,

Fuente de variación	SC	GL	CM	Valor F	Valor p
Modelo	399,31925	9	44,3688	53,6158	< 0,0001
F ₁ : CONCENTRACION	337,61189	1	337,6119	407,9744	< 0,0001
F ₂ : TEMPERATURA	10,65342	1	10,6534	12,8737	0,0071
F ₃ : TIEMPO	23,35250	1	23,3525	28,2194	0,0007
F ₁ F ₂	4,69558	1	4,6956	5,6742	0,0444
F ₁ F ₃	0,81320	1	0,8132	0,9827	0,3506 ns
F ₂ F ₃	9,67956	1	9,6796	11,6969	0,0091
F ₁ ²	0,06821	1	0,0682	0,0824	0,7813 ns
F ₂ ²	3,41831	1	3,4183	4,1307	0,0366

Fuente de variación	SC	GL	CM	Valor F	Valor p
F ₃ ²	9,66084	1	9,6608	11,6743	0,0091
Residual	6,62026	8	0,8275		
• Falta de ajuste	6,39735	5	1,2795	17,2194	0,203ns
• Error Puro	0,22291	3	0,0743		
Total	405,93951	17			

Nota: ns: no significativo,

Fuente: Salidas del Software Desing Expert

En base a los resultados del análisis de varianza se obtuvo el modelo de regresión cuadrático para la variable Y₂: Ganancia de sólidos en función a los términos significativos:

$$\text{Ganancia Sólidos (Y}_2\text{)} = -3,117 + 0,234F_1 - 0,383F_2 + 0,039F_3 - 0,006F_1F_2 - 0,0005F_2F_3 - 0,002F_2^2 - 0,0004F_3^2 \quad (2)$$

3.4. SUPERFICIES DE RESPUESTA Y GRAFICOS DE CONTORNOS

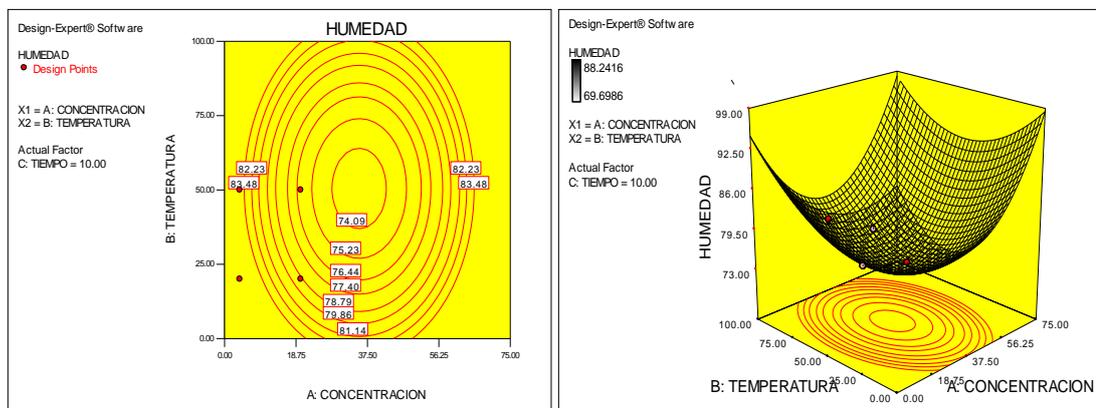


Figura 1. Contornos y superficie de respuesta de la Y₁: Humedad del espárrago verde, en función de la F₁: Concentración de solución osmótica y F₂: Temperatura, considerando un F₃: Tiempo de inmersión constante de 10 mm,

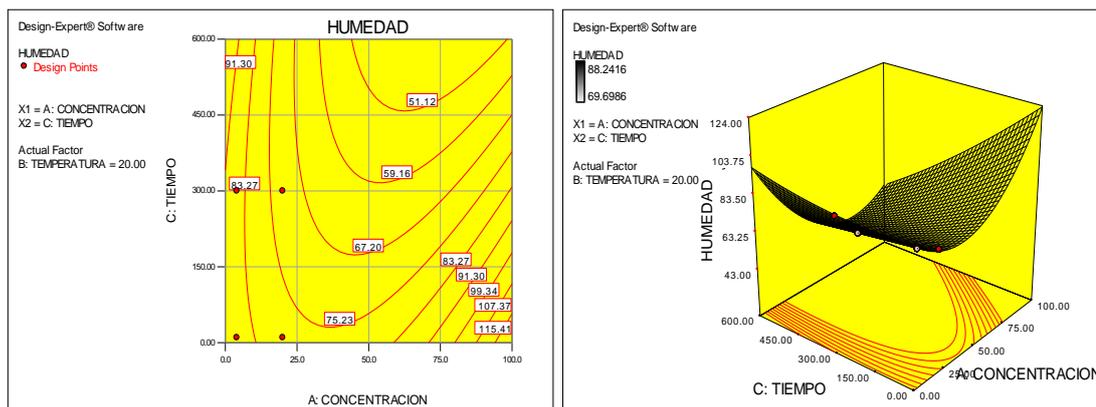


Figura 2. Contornos y superficie de respuesta de la Y₁: Humedad del espárrago verde, en función de la F₁: Concentración de solución osmótica y F₃: Tiempo de inmersión, considerando una F₂: Temperatura constante de 20°C.

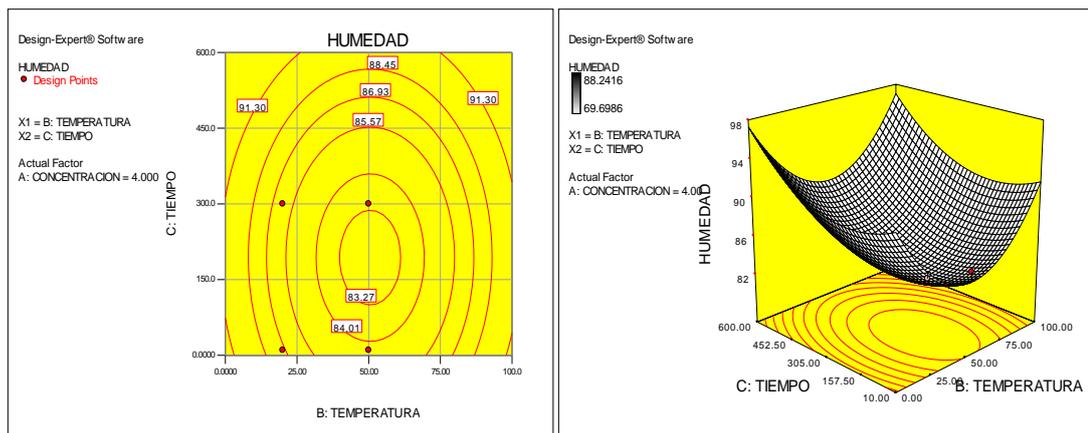


Figura 3. Contornos y superficie de respuesta de la Y_1 : Humedad del espárrago verde, en función de la F_2 : Temperatura y F_3 : Tiempo de inmersión, considerando una F_1 : Concentración constante de 4% de NaCl.

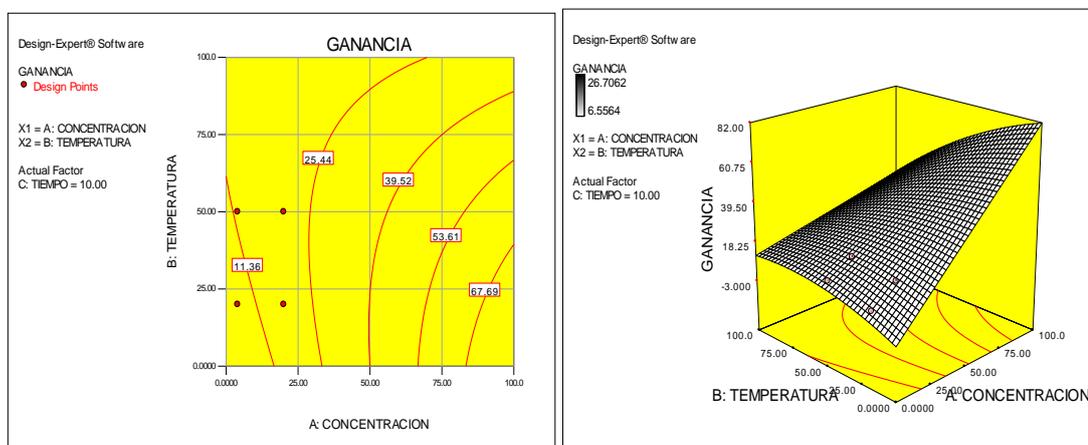


Figura 4. Contorno y de superficies de respuesta de la Y_2 : Ganancia de sólidos del espárrago verde, en función de la F_1 : Concentración de solución osmótica y F_2 : Temperatura, considerando un F_3 : Tiempo de inmersión de 10 mm.

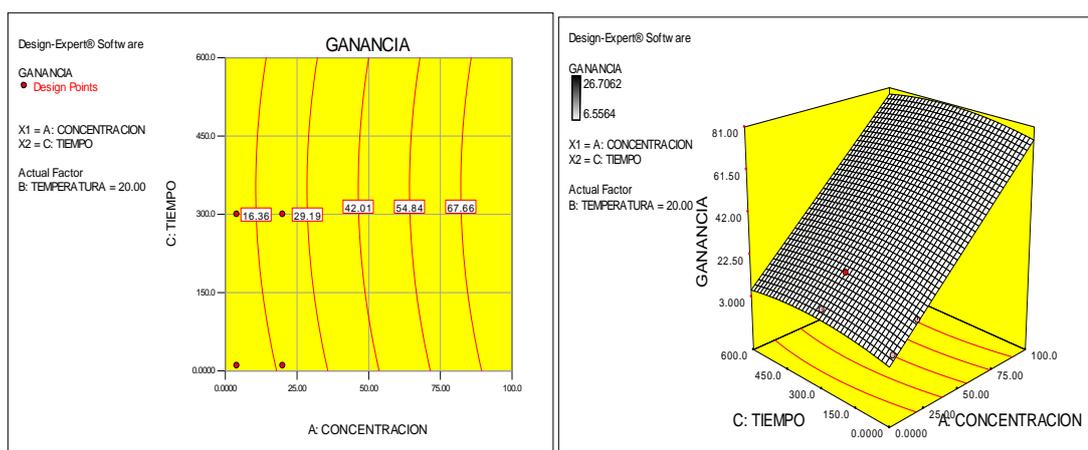


Figura 5. Contorno y superficie de respuesta de la Y_2 : Ganancia de sólidos del espárrago verde, en función de la F_1 : Concentración de solución osmótica y F_3 : Tiempo de inmersión, considerando una F_2 : Temperatura constante de 20°C.

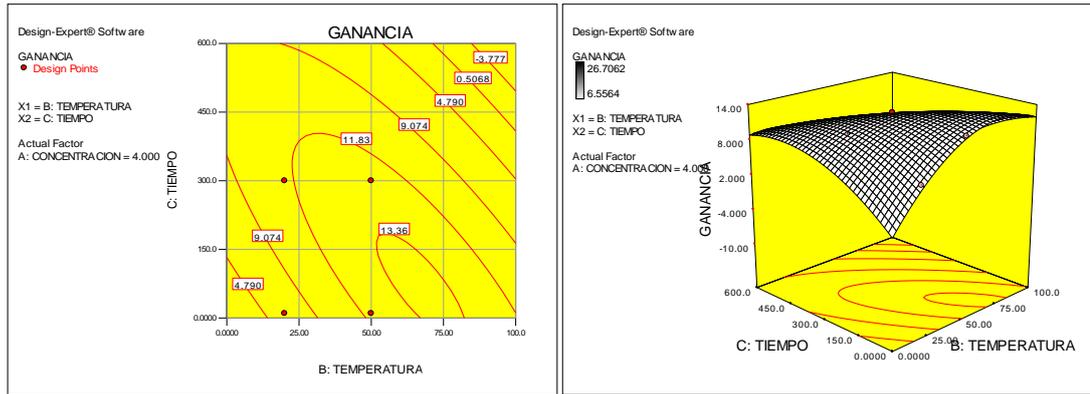


Figura 6. Contorno y superficie de respuesta de la Y_2 : Ganancia de sólidos del espárrago verde, en función a la F_2 : Temperatura y F_3 : Tiempo de inmersión, considerando una F_1 : Concentración constante de 4% de NaCl.

3.5. RESULTADOS DE LAS DESEABILIDADES

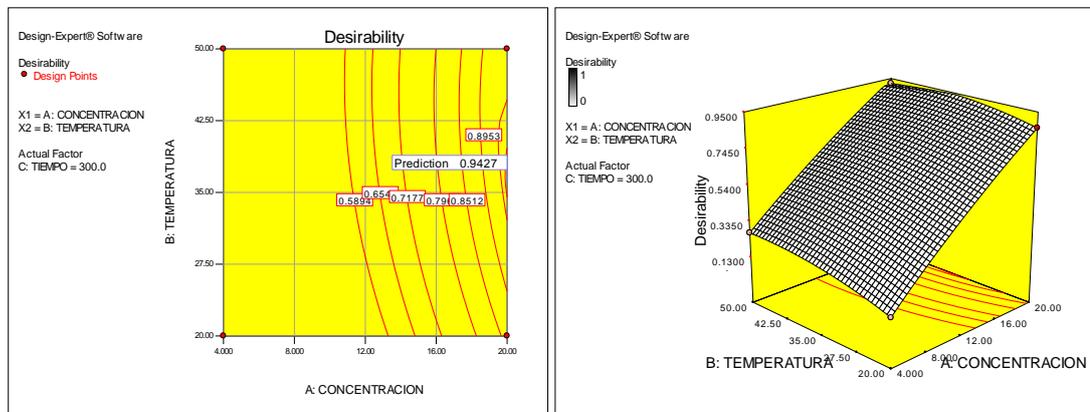


Figura 7. Gráfico de contornos y superficie de respuesta de la deseabilidad global en función de la concentración de solución osmótica y temperatura, considerando un tiempo de inmersión de 300 mm.

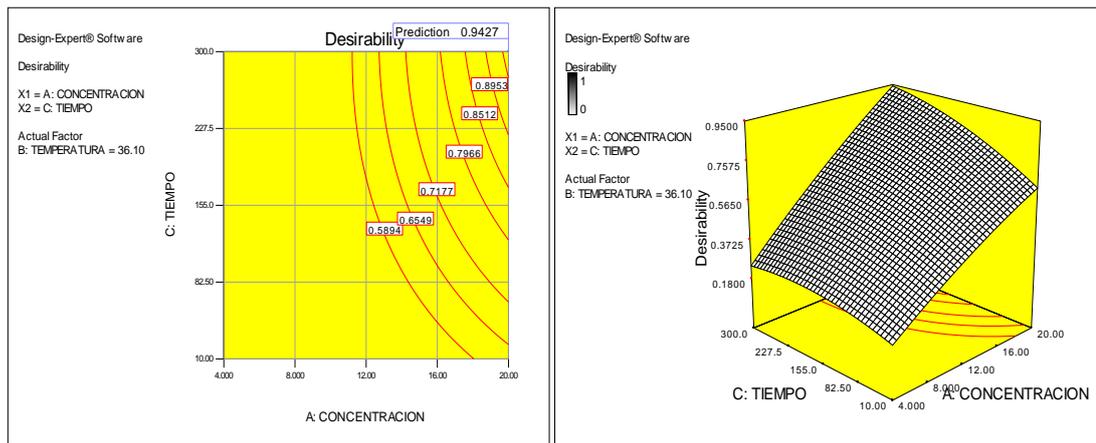


Figura 8. Gráfico de contornos y superficie de respuesta de la deseabilidad global en función de la concentración de solución osmótica y tiempo de inmersión, considerando una temperatura de 36°C.

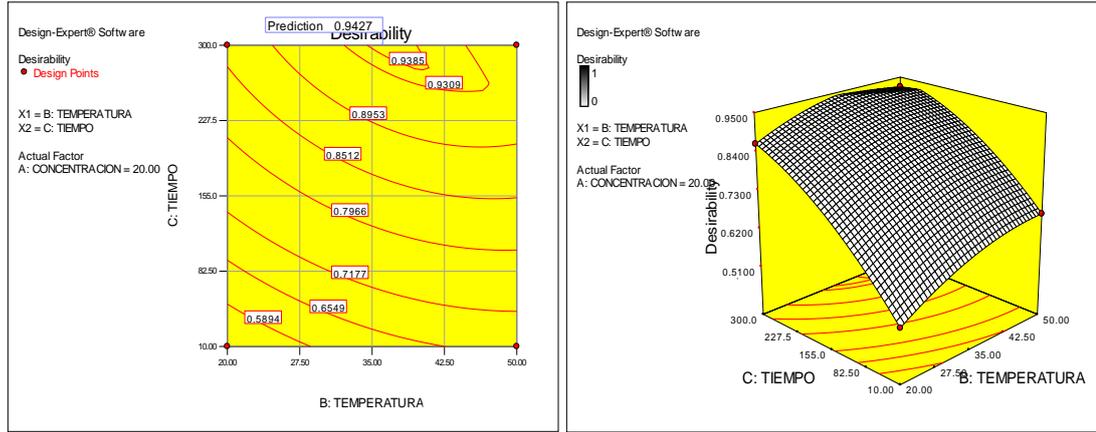


Figura 9. Gráfico de contornos y superficie de respuesta de la deseabilidad global en función de la temperatura y tiempo de inmersión, considerando una concentración de 20% de NaCl.

3.6. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACION CON LA FUNCION DE DESEABILIDAD

Tabla 6: Niveles óptimos de concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión, para minimizar la humedad final y maximizar la ganancia de sólidos del espárrago verde, obtenidos mediante la función de conveniencia

Nº	F1: CONCENTRACION	F2: TEMPERATURA	F3: TIEMPO	Y1: HUMEDAD	Y2: GANANCIA	Deseabilidad
1	20	36,1	300	69,698	22,4698	0,942
2	20	49,01	256,5	69,698	21,529	0,928
3	20	42,88	213,8	70,634	22,189	0,902
4	20	21,86	300	71,577	22,995	0,877
5	18,17	34,69	300	71,178	21,427	0,870
6	20	50	168,4	71,429	21,720	0,865

Fuente: Salidas del Software Desing Expert

Tabla 7: Prognósticos de la humedad final y ganancia de sólidos en función de la concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión, obtenidos mediante la función de conveniencia

Variable Respuesta	EP (Estimación puntual)	EEE (Error Estándar de estimación)	Límites de confianza (95%)	
			Inferior	Superior
Y1: HUMEDAD	69,69	0,4906	68,60	70,79
Y2: GANANCIA	22,46	0,4298	21,51	23,42

Fuente: Salidas del Software Desing Expert

alcanzado un promedio de 16,07% de ganancia que es un porcentaje también aceptable ya que esta se encuentra en relación directa con la pérdida de agua.

Posteriormente, se realizó un ajuste de modelos polinómicos a los datos experimentales obtenidos de la humedad final y ganancia de sólidos. A cada uno de las variables respuesta se ajustaron modelos polinomiales empezando por el lineal, luego el interactivo y el cuadrático, en tanto que el cúbico no pudieron ajustarse debido a que la matriz de datos del DCCR proporciona pocos puntos de diseño para determinar el término cúbico. La jerarquía modelada permite observar en la Tabla 3, que el modelo cuadrático es el modelo que mejor se ajusta a la humedad final y a la ganancia de sólidos respectivamente ($p < 0,01$). Para la construcción del modelo solamente se consideraron aquellos términos que tienen un efecto significativo ($p < 0,01$), cuyos resultados se presentan en las Tablas 4 y 5, respectivamente. Las pruebas de falta de ajuste para la variable humedad final y para la variable ganancia de sólidos, revelan que no existe falta de ajuste altamente significativa ($p > 0,01$). Por lo tanto, el modelo cuadrático identificado antes como el modelo probable podemos concluir es un buen modelo (1) y (2). De misma forma al evaluar las estadísticas de resumen de los modelos ajustados que se presentan en las Tablas 4 se confirma que el modelo cuadrático es el mejor tanto para la humedad final y ganancia de sólidos del espárrago verde deshidratado osmóticamente por presentar errores de estimación bajos, un R^2 alto y un PRESS bajo en comparación con los otros modelos ajustados.

Luego de haber identificado y estimado el modelo polinomial que mejor se ajuste a los datos, el cual es el modelo cuadrático se construyeron los gráficos de superficie de respuesta y gráficos de contornos para las variables humedad y ganancia de sólidos en función de los factores concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión. La gráfica de superficie ofrece una vista tridimensional que permite visualizar como la variable Y_1 : Humedad final (Figuras 1, 2 y 3) y Y_2 : Ganancia de sólidos (Figuras 4, 5 y 6) varían en función de dos de los factores elegidos en cada uno de las figuras, manteniendo constante el otro factor. Mientras que el gráfico de contornos proporcionan una vista en dos dimensiones del gráfico de superficie visto desde arriba. En la Figura 1, se aprecia el gráfico de contornos para la humedad considerando los factores A: Concentración y B: Temperatura, manteniendo constante el factor C: Tiempo=10 mm., en la que podemos apreciar que a menores valores de humedad se obtienen a mayores niveles de concentración y mayores niveles de temperatura, manteniendo constante el tiempo de 10 mm. En la Figura 7, se presentan los contornos y las superficies de respuesta de la deseabilidad global para la humedad final y ganancia de sólidos en forma conjunta, en función de la concentración y temperatura, manteniendo constante un tiempo de 300 mm., apreciamos que se obtiene una deseabilidad de 0,9427 cuando estamos en un nivel de concentración de 20% de NaCl y a una temperatura de 35°C. En lo que respecta a la evaluación de la concentración y tiempo de inmersión, manteniendo constante una temperatura de 36°C, a un 20% de concentración de NaCl y a 300 mm como tiempo de inmersión se logra una deseabilidad de 0,9427. Hasta aquí ya podemos ir concluyendo que ha niveles altos de la concentración se van obtienen una alta deseabilidad.

Finalmente, en la Figura 9 se evalúa la temperatura con el tiempo de inmersión considerando una concentración de 20% de NaCl. Aquí apreciamos una deseabilidad de 0,9427 cuando se obtiene una temperatura de 35°C y cuando se tiene los niveles altos de tiempo de inmersión en este caso 300 mm. Aquí ya podemos obtener otra conclusión que a valores altos de tiempos de inmersión se obtiene una mayor deseabilidad y a valores intermedios de temperatura (35°C) también se logra obtener un valor alto de deseabilidad.

Una vez establecidos los criterios tanto para los factores como para las variables respuestas, es decir, minimizar la humedad final y maximizar la ganancia de sólidos, se determinó la deseabilidad global de estas variables respuestas. Como parte de la optimización gráfica se obtuvo la región de operatividad donde se cumplen simultáneamente las propiedades críticas en función a los factores concentración (%), temperatura (°C) y tiempo de inmersión (mm). Al realizar la optimización numérica en la Tabla 6, se presenta los niveles convenientes de las F_1 : Concentraciones de solución osmótica, F_2 : Temperatura y F_3 : Tiempo de inmersión para minimizar la Y_1 : Humedad final y maximizar la Y_2 : Ganancia de sólidos del espárrago verde deshidratado osmóticamente, Aquí apreciamos que cuando la concentración toma un valor de 20% de NaCl, la temperatura toma un valor de 36,1°C y el tiempo de inmersión un valor de 300 minutos la deseabilidad global toma su máximo valor (0,942) originando una humedad de 69,698% y una ganancia de sólidos de 22,46%. Por lo tanto, podemos concluir que los niveles antes mencionados son las condiciones óptimas para cumplir con los parámetros de calidad del espárrago verde ya que estos valores se encuentran dentro del rango permitido tanto para la humedad como para la ganancia de sólidos. Debemos señalar también que para la determinación de estos niveles la experiencia

del investigador es muy importante en esta toma de decisiones ya que dar los respectivos pesos e importancia depende mucho de esta experiencia y conocimiento. La importancia considerada en esta investigación para la humedad y ganancia de sólidos están en razón 3 a 1. En la figura 10, se presenta las rampas de la optimización numérica donde se aprecia en una forma contundente el comportamiento de las variables respuestas como son humedad y ganancia y las respectivas condiciones óptimas que debemos trabajar en la deshidratación osmótica del espárrago verde.

4. CONCLUSIONES

Al utilizar el diseño de superficie de respuesta central compuesto rotable, las condiciones óptimas de operación son una concentración de solución osmótica de 20% de NaCl; una temperatura de 36,10°C y un tiempo de inmersión de 300 mm, los cuales generan una humedad final de 69,698% y una ganancia de sólidos de 22,46%. El modelo de regresión cuadrático describe adecuadamente la relación funcional de concentración, temperatura y tiempo de inmersión con la humedad final y ganancia de sólidos, obteniendo un R^2 alto (98,87% y 98,37%) y un PRESS bajo (51,29 y 49,11) en comparación con los otros modelos ajustados. El punto de optimización multirespuesta que maximiza la función de deseabilidad global (0,942) es cuando se tiene una humedad de 69,698% y una ganancia de sólidos de 22,46%. La optimización gráfica conjuntamente con la optimización numérica proporcionan resultados muy interesantes para la determinación de la región de optimización y el punto de optimización en el proceso de optimización multirespuesta y en especial en procesos de optimización agroindustriales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ames, A.; Mattucci, M.; Stephen, M.; Szony, G.; Hawkins, D. 1997. "Quality loss functions for optimization across multiple response surfaces". *Journal of Quality Technology* 29: 339–346
- Ángel, G. 2004. Optimización de múltiples respuestas por el método de la función de conveniencia. *Ecos de Economía*, 19(2), 147-159.
- Ayala, J.; Pardo, R. 1995. Optimización por Diseños Experimentales, Lima, S.A. Universidad Agraria La Molina.
- Chi-Bin, C. 2004. Process optimization by soft computing and its application to a wire bonding problem. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2(10), 59-71.
- Derringer, G.; Suich, R. 1980. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. New York: John Wiley & Sons.
- Dominguez, J. 2004. Teoría Difusa una Alternativa en la Optimización para la Mejora Continua. México: Editorial Centro de Investigación en Matemáticas.
- Dominguez, J. 2006. Optimización simultánea para la mejora continua y reducción de costos en procesos. *Ingeniería y Ciencia*, 2(4). 145-162.
- Fermín, W.; Corzo, O. 2005. Optimization of vacuum pulse osmotic dehydration of cantaloupe using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*. 29(1). 20-32.
- Figueroa, G. 2003. Utilización de una superficie de Respuesta utilizando JMP IN. *Mosaicos Matemáticos*. 5(11). 17-23.
- Floros, J.; Chinnan, M. 1988. Seven factor response surface optimization of a double-stage lye (NaOH) peeling process of pimiento peppers. *J. Food Sci*, 53:631-638.
- Gutierrez, H. 2004. Análisis y diseño de experimentos. Segunda edición. Editorial Mc Graw Hill. Mexico.
- Khuri, A.; Colon, M. 1981. Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions. *Technometrics*. 23(2). 363-375.
- Lenart, A. 1993. Mass transfer during rehydration of dewatered apple, pumpkin and carrot. *Polish Journal of Food Nutrition and Science*. 2/43 (4). 69
- Lind, E, Goldin, J.; Hickman, J. 1960. Fitting yield and cost response surface. *chem. eng. prog.* 56: 62-68
- Montgomery, D. 2005. Diseño y Análisis de Experimentos. Segunda Edición. México: Limusa – Wiley.
- Myers, R.; Montgomery, D.; Cocinero, A. 2009. Metodología de Superficie de Respuesta. Nueva York: John Wiley e Hijos.

- Núñez, M. 2002. Optimización de múltiples respuestas por el Método de la Función de Conveniencia para un Diseño de Mezclas. *Investigación Operacional*. 23(2). 83-96.
- Parjoko, K.; Rahman, M.; Buckle, K.; Perera, C. 1996. Osmotic Dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* **29**, 452-459.
- Pérez, Z. 2003. Aplicación de la deshidratación osmótica para la obtención de rodajas de naranja con procesamiento mínimo. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de alimentos.
- Pignatiello, J. 1993. Strategies for Robust multiresponse. *Quality Engineering*. HE. Transactions. 25(3). 5-15.
- Torres, A. 2009. Optimización de esparrago verde deshidratado osmóticamente utilizando como variables independientes el agente deshidratante (NaCl), temperatura, tiempo de inmersión, velocidad de agitación y relación solución producto. Tesis Universidad Nacional de Trujillo. Perú
- Várela, J.; Fermín, J.; Albornoz, Y. 2008. Comparación de Técnicas de Optimización de Multirresposta en la Industria de los alimentos basado en la sensibilidad de selección de los parámetros. *Interciencia*. 33(11). 810-816.
- Vinning, G. 1998. A compromise approach to multiresponse optimization, *J, Qual, Techno*, 30(1), 309-313,