



## Aplicación del modelo de Peleg para estudiar el efecto de la temperatura y dureza del agua durante la rehidratación de frijol caballero (*Phaseolus vulgaris*).

Application Peleg's model for study the effect of temperature and water hardness during the rehydration of caballero bean (*Phaseolus vulgaris*).

Edgar Paredes<sup>a\*</sup>, Melany Quiroz<sup>a\*</sup>, Katherine Quispe<sup>a\*</sup>, Belissa Reyes<sup>a\*</sup>, Lía Velásquez<sup>a\*</sup>, Nancy Zavaleta<sup>a\*</sup>, Jesús A. Sánchez-González<sup>a</sup>

*a. Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Trujillo) Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo Perú*

### RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la aplicación del modelo de Peleg para estudiar el efecto de la temperatura y dureza del agua durante la rehidratación de frijol caballero (*Phaseolus vulgaris*), utilizando un diseño compuesto central rotacional (DCCR) obteniendo como resultados que la temperatura y la dureza del agua tienen un efecto positivo en la ganancia de peso durante la rehidratación de Frijoles. Además determinamos las constantes de Peleg  $K_1$  (s.kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>m.s</sub>) y  $K_2$  (kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>m.s</sub>).

**Palabras clave:** Frijol caballero, rehidratación, modelo de Peleg

### ABSTRACT

In the present research Peleg model application was evaluated for study the effect of temperature and water hardness during the rehydration of caballero bean (*Phaseolus vulgaris*), using a center-rotational composed design, obtaining as result that temperature and water hardness have a positive effect during rehydration of beans. Peleg constants were also determinated  $K_1$ (s.kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>m.s</sub>) y  $K_2$ (kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>m.s</sub>).

**Keywords:** Caballero bean, rehydration, Peleg model.

## 1. Introducción

Hoy en día se observa una gran variedad de productos novedosos, de diferente origen y proceso y muchas veces confundimos el atractivo de un alimento con su poder nutritivo, de aquí la emergencia de obtener productos de calidad desde los diferentes estándares establecidos y es aquí que se tiene la responsabilidad grande de procesarlos de tal manera que convenga al consumidor de todas las formas posibles. El Perú es un productor de alimentos de alto potencial nutritivo como tubérculos y leguminosas, por ello, el frijol, al contener altos porcentajes de nutrientes esenciales es recomendable su consumo, sin embargo este no se impulsa por diferentes motivos entre los que está el

empleo de tiempos prolongados en su cocción (Mora, 1982), así como energía derivada de este por lo que se recurre al remojo anticipado.

La mayoría de los productos deshidratados deben ser reconstituidos antes de su consumo, lo que hace necesario determinar las condiciones óptimas para la realización de dicho proceso; en consecuencia, es importante obtener productos rehidratados de textura aceptable en el menor tiempo posible. Diversos investigadores han reconocido que el grado de rehidratación es dependiente de la composición original del producto, condiciones del proceso y preparación, así como de la extensión del desorden químico y estructural provocado por el secado

(Okos *et al.*, 1992; Abu Ghannam y Mc Kenna, 1997a; Lewicki, 1998).

La rehidratación es un proceso complejo dirigido a restaurar las propiedades estructurales originales del material fresco (previo al secado o deshidratado) poniendo en contacto el producto seco con agua. No obstante se ha demostrado que la habilidad de rehidratación presenta una histéresis debido a la disrupción estructural y celular que tiene lugar durante el proceso de deshidratación (Krokida y Philipopoulos 2005).

Algunos alimentos, particularmente los frijoles y los chícharos, cuando son cocidos con agua dura se endurecen. Los iones de calcio alteran algunas moléculas dentro de los frijoles, por lo que la estructura que se forma no deja pasar el agua y el frijol permanece duro. Una manera simple para contrarrestar este efecto es la adición de bicarbonato de sodio al agua donde se van a cocer los frijoles (Wright y Krieger, 1977).

El ión calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) forma sales desde moderadamente solubles a muy insolubles. Precipita fácilmente como carbonato de calcio. Es el principal componente de la dureza del agua y causante de incrustaciones. Las aguas dulces suelen contener de 10 ppm a 250 ppm, pudiendo llegar hasta 600 ppm (Linsely *et al.*, 1992)

En cuanto al análisis matemático del modelo de Peleg además de su simplicidad y fácil manejo, ha sido validado en el modelado de fenómenos de absorción de humedad para una gran cantidad de materiales tales como garbanzos, lentejas, frijoles blancos, avellana y hojas, motivo por el cual este modelo fue escogido para evaluar la absorción de agua del frijol Caballero (*Phaseolus vulgaris*).

Esta investigación se realizó con el fin de conocer:

Cómo influye la temperatura (5°C a 40 °C) y la dureza (87.9 ppm a 600 ppm)

del agua de remojo (inmersión) para el frijol caballero (*Phaseolus vulgaris*).

Teniendo como objetivo general: Determinar la influencia de la temperatura (5°C a 40°C) y la dureza (87.9 ppm a 600 ppm) del agua de remojo en la ganancia de humedad de frejol caballero (*Phaseolus vulgaris*), así como modelar el proceso de rehidratación mediante el modelo de Peleg (Ecuación 1), lo cual implica determinar sus respectivas constantes  $K_1(\text{s.kg H}_2\text{O/kg m.s})$  y  $K_2(\text{kgH}_2\text{O/kg m.s})$

## 2. Materiales y Método

Como materiales de estudio se utilizaron: Fríjol caballero (*Phaseolus Vulgaris L.*) procedente de la zona oriental del Departamento de La Libertad- Perú, aunque su mayor producción se encuentra en los departamentos de Arequipa y Lima,

Agua destilada, libre de iones.

Carbonato de calcio, agente que otorgo dureza al agua.

### Metodología

Se seleccionó el frijol con la finalidad de homogenizar las muestras teniendo en lo siguiente: Color, textura, tamaño.

Se pesaron los 15 gramos aproximados de los granos seleccionados para cada tratamiento. Se prepararon soluciones con  $\text{CaCO}_3$  para dar diferentes medidas de dureza en agua, estas concentraciones se obtuvieron de los rangos establecidos mediante el DCCR y de manera análoga para la temperatura. Se crearon medios de temperatura en los agitadores eléctricos (para temperatura de 34,9 °C y 40 °C), así como lo de 20 °C, 5°C y 10 °C con la ayuda de hielo mezclado con sal para retardar el proceso de calentamiento de los medios, así mismo se controló estas temperaturas con termómetro cada cierto tiempo prudencial a fin que se mantenga constante. Se colocaron los granos en los vasos con las soluciones establecidas, con su respectivo medio de temperatura.

Se tomó datos de peso de los frijoles retenidos en la malla en cada tratamiento cada media hora, intentando retornar todas las muestras es un tiempo uniforme y corto. Se pesaron las muestras ya hidratadas una vez alcanzada la humedad de equilibrio.

Este se realizó para determinar el contenido de materia seca. Con los datos obtenidos de masas y humedades, se procedió a determinar datos resultantes de la aplicación del modelo de Peleg. Mediante el método estadístico y matemático se llegó a resultados que se interpretan en los resultados mostrados más adelante.

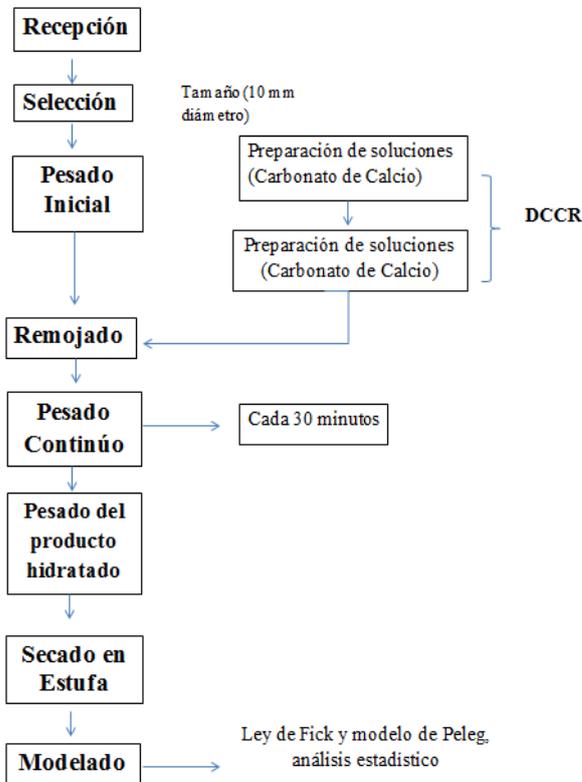


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de hidratación de frijol Caballero.

**Diseño Estadístico**

El diseño estadístico utilizado es el Diseño Compuesto Central Rotacional (DCCR) de segundo orden con resultados en Superficie de Respuesta. Se realizó un planeamiento factorial completo  $2^k$ , incluido 2.k puntos axiales y cuatro puntos centrales (en este caso  $k=2$  por ser dos variables

independientes) totalizando 11 tratamientos.

**3. Resultados y Discusión.**

En la tabla 1 se muestran los resultados respecto a ganancia de peso al cabo de 11 h, con estos datos y más el dato referencial de humedad inicial en la muestra original, se procedió al análisis estadístico y cálculo de la difusividad y las constantes  $K_1$  y  $K_2$  como resultados de la aplicación del modelo de Peleg. Como se puede observar en la tabla 1, el tratamiento 8 es el que proporcione mayor cantidad de peso equivalente a agua obtenida seguido del tratamiento 2, los cuales sugieren que hay una relación complementaria pero no sinérgica entre la temperatura y la dureza del agua.

La ganancia de peso para los 11 tratamientos se muestra en la figura 2 y figura3.

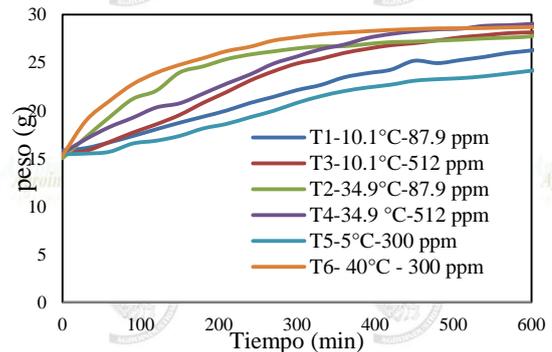


Figura 2. Pesos obtenidos durante la rehidratación de frijol caballero en tratamientos de T<sub>1</sub> a T<sub>6</sub>.

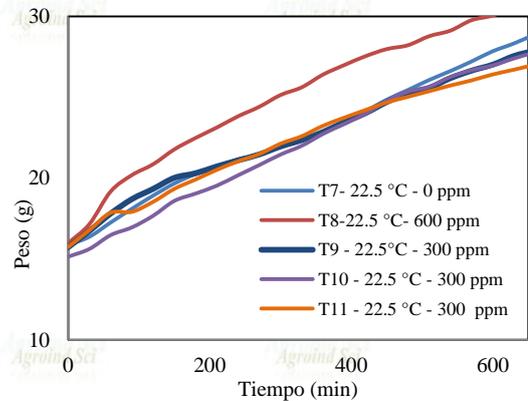


Figura 3. Pesos obtenidos durante la rehidratación de frijol caballero en tratamientos del T<sub>7</sub> a T<sub>11</sub>.

Tabla 1. Resultados obtenidos del Modelo DCCR.

Temperatura °C	Dureza (ppm)	Y <sub>1</sub> Ganancia de Peso (g)	Y <sub>2</sub> Difusividad (m/s <sup>2</sup> )x10 <sup>-10</sup>	R <sup>2</sup> Modelo Fick	Y <sub>3</sub> K <sub>1</sub> (s.kg H <sub>2</sub> O/kg m.s)	Y <sub>4</sub> K <sub>2</sub> (kg H <sub>2</sub> O/kg m.s)	R <sup>2</sup> Modelo Peleg
10.1	87.9	11.12	2.2820	0.9174	0.3695	0.2813	0.9899
34.9	87.9	13.65	2.0284	0.8889	0.1562	0.28	0.9994
10.1	512.1	12.83	2.5356	0.9508	0.3333	0.2599	0.9949
34.9	512.1	13.63	2.5356	0.9443	0.2932	0.2544	0.9949
5	300	9.26	2.2820	0.9342	0.371	0.3091	0.9919
40	300	13.58	2.5356	0.9925	0.1308	0.2715	0.9997
22.5	0	13.03	1.7749	0.8533	0.4008	0.2672	0.9762
22.5	600	14.93	2.0264	0.8838	0.3177	0.2465	0.9894
22.5	300	12.16	1.774	0.8433	0.1957	0.2832	0.9434
22.5	300	12.63	2.0264	0.8699	0.4362	0.27	0.9897
22.5	300	11.27	2.0284	0.9053	0.3432	0.2843	0.9894

Las muestras exhibieron comportamiento un comportamiento típico con un incremento exponencial de su peso, debido al aumento del contenido de agua contra el tiempo de hidratación en todas las temperaturas, mientras el proceso continuaba, la tasa de absorción decrecía continuamente debido al llenado con agua de los espacios libres capilares y los espacios intermicelares.

A medida que el llenado del agua decrecía, por la diferencia de concentración entre el medio de hidratación y los granos, la extracción de los sólidos solubles en la dirección reversa al movimiento del agua ofrece resistencia adicional a la transferencia del agua, la absorción frenó cuando los granos alcanzaron el punto de equilibrio.

Aplicación de la ley de Fick para el cálculo de la difusividad

Los resultados de la difusividad (tabla 1) para cada uno de los tratamientos con un R<sup>2</sup> mayor que 0.85 lo que indica un buen ajuste del modelo, pero al realizar los análisis estadísticas nos indica que tanto la temperatura como dureza de agua no tienen influencia en la difusividad por lo que se creyó conveniente no realizar un análisis más a fondo.

Aplicación del modelo de Peleg

Peleg (1988) propuso una ecuación (Ec. 1) para predecir la absorción de agua durante el remojo de cereales que se ha utilizado igualmente para describir los cambios de humedad durante procesos de hidratación y secado.

El modelo de Peleg (1988) ha sido utilizado para estudiar el proceso de absorción de agua en vegetales y materiales con almidón y semillas (Abu-Ghannam y McKenna, 1997b; Hung y Trehwella, 1993) La ecuación de Peleg viene dada por la siguiente expresión:

$$M_t = M_o + \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (\text{Ec.1})$$

Dónde:

M<sub>t</sub>= Masa en el tiempo (g)

M<sub>o</sub>= Masa inicial (g)

t= tiempo de rehidratación (min)

K<sub>1</sub>= Constante de ratio de Peleg (s. kg m.s/ kg H<sub>2</sub>O)

K<sub>2</sub>= Constante de capacidad de Peleg (kg H<sub>2</sub>O/kg m.s)

La linealización de la ecuación de Peleg (Ec.1) fue aplicada para cada uno de los tratamientos de los cuales obtuvimos una ecuación y constantes K<sub>1</sub> y K<sub>2</sub> para cada tratamientos obteniéndose valores de correlación mayores (R<sup>2</sup> mayor que

0.9) tal y como se mostró en la tabla 1 y en la figura 4 cuyo resultado gráfico de la aplicación de la ecuación linealizada de Peleg se muestra a continuación.

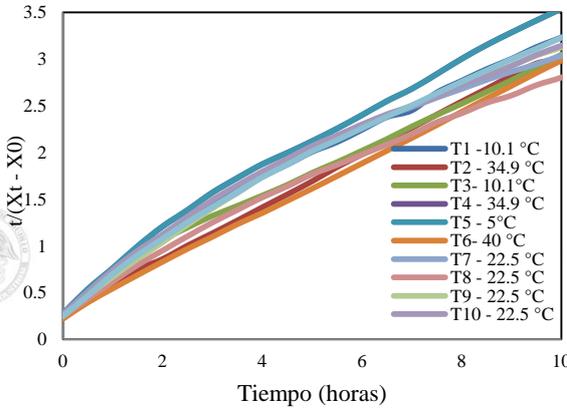


Figura 4. Aplicación del modelo linealizado de Peleg para la hidratación de Frijol Caballero a 5, 10.1, 22.5, 35.9 y 40 °C y dureza de agua de 0-600 ppm.

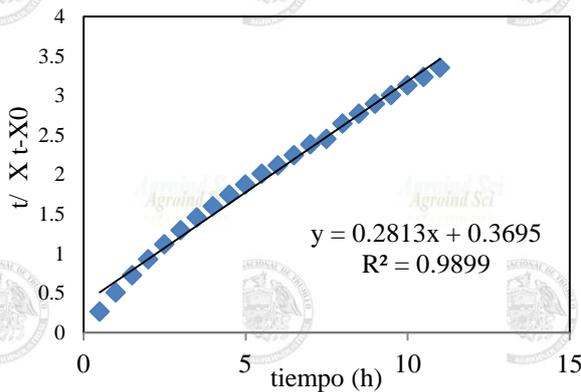


Figura 5. Linealización del modelo de Peleg para cada tratamiento.

Este procedimiento fue realizado para cada uno de los tratamientos, en la figura 5 se muestra las gráficas linealizadas del modelo de Peleg.  $K_1$  es una constante que se relaciona con la velocidad de transferencia de masa, por lo tanto a menor valor de  $K_1$  mayor velocidad inicial de absorción de agua. El decrecimiento de  $K_1$  con el incremento de la temperatura sugiere un correspondiente incremento en la velocidad inicial de absorción de agua cuanto mayor sea la temperatura (Turhan *et al.*, 2002).

$$\frac{t}{M - M_0} = K_1 + K_2 t$$

$$Y = 0.3695 + 0.2813 X$$

Ec. 1. Despeje de las constantes  $K_1$  y  $K_2$ .

A continuación se resumen los parámetros establecidos mediante el análisis de los resultados obtenidos:

Tabla 2. Valores de regresión para las diversas temperaturas.

T °C	$K_1$ (s.kg m.s/kg H <sub>2</sub> O)
Promedios	
5	0.371
10.1	0.3514
22.5	0.33872
34.9	0.2247
40	0.1308

Se debe determinar el efecto de la temperatura sobre la constante  $K_1$ , para poder construir un modelo generalizado a las distintas temperaturas mediante valores medios, para dicho fin se utilizan los valores determinados para la constante  $K_1$  a las temperaturas de 5°C, 10.1°C, 22.5°C, 34.9°C y 40°C.

En este caso se asumió el promedio de  $K_1$  de acuerdo a cada temperatura, normalmente esto no se realiza debido a que las concentraciones en las soluciones fueron iguales para todos los tratamientos, lo cual podría crear un alto margen de error. Pero en nuestro caso fue conveniente para poder graficar y obtener una ecuación lineal que se muestra en la figura 6.

De la ecuación lineal mostrada en la gráfica 6. Se puede obtener el valor de  $K_1$  para nuestra ecuación general.

El valor de  $K_2$  se obtiene del promedio de todos los  $K_2$  obtenidos para los 11 tratamientos.

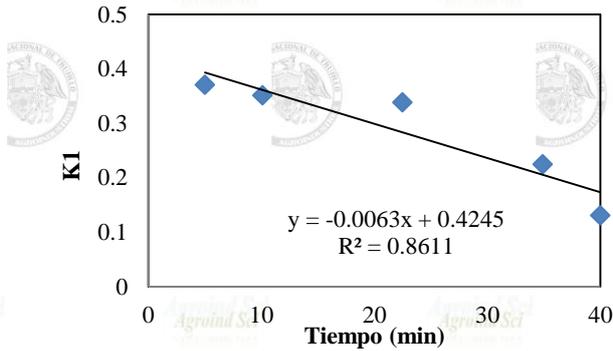


Figura 6. Efecto de la temperatura sobre  $K_1$  del modelo de Peleg para la rehidratación del frijol caballero.

$K_1$  es una constante que se relaciona con la tasa de transferencia de masa, por lo tanto a menor valor de  $K_1$  mayor tasa inicial de absorción de agua, y la disminución de  $K_1$  con el incremento de la temperatura sugiere un correspondiente incremento en la tasa inicial de absorción de agua.

$K_2$  es una constante relacionada con la máxima capacidad de absorción de agua, entre más bajo  $K_2$  más alta la capacidad de absorción de agua.

Sopade y Obekpa (1990) observaron que  $K_2$  suele ser independiente de la temperatura del agua de remojo, representando una característica de sorción de cada producto. Conociendo el valor de  $K_2$ , se puede calcular la humedad de equilibrio ( $M_e$ ). La constante  $K_1$  es un parámetro cinético, cuya inversa es equivalente a un parámetro difusivo de los modelos basados en la ley de Fick

El análisis estadístico realizado nos permite sustentar la validez del modelo en cuestión, además el comportamiento de los  $K_1$  posibilita generalizar ecuaciones basadas en el modelo de Peleg. Por tanto utilizando la media de  $K_2$  y las ecuaciones lineales que relacionan  $K_1$  con las diferentes temperaturas experimentales es posible generar las siguientes expresiones generales:

$$M_t = M_o + \frac{t}{0.4238 - 0.0063T + 0.2734t}$$

Dónde:

$M_o$ : Masa inicial ( $\text{g H}_2\text{O/g ms}$ ).

$T$ : Temperatura de hidratación ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$t$ : Tiempo de hidratación (h).

$M_t$ : Masa después del tiempo  $t$  ( $\text{g H}_2\text{O/g ms}$ ).

La ganancia de agua representa el agua absorbida por el almidón y otros carbohidratos capaces de retener agua en el tejido pero controlado por la expansión de las paredes celulares (Beleia *et al.*, 2004).

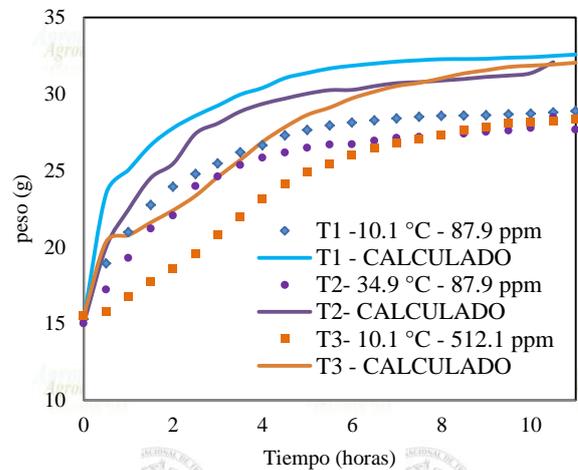


Figura 7. Peso experimental y calculado en el tiempo para tratamientos  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$

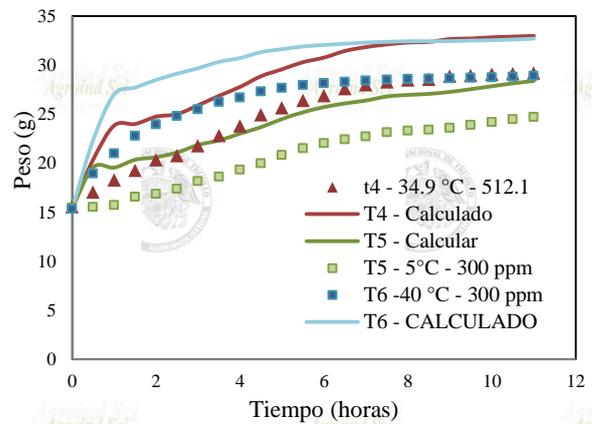


Figura 8. Peso experimental y calculado en el tiempo para tratamientos  $T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ .

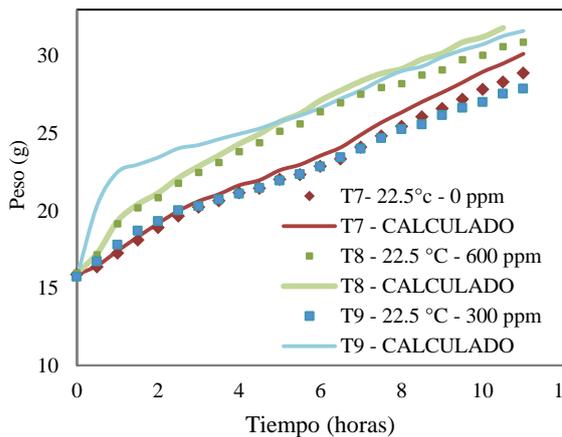


Figura 9. Peso experimental y calculado en el tiempo para tratamientos T<sub>7</sub>, T<sub>8</sub>, T<sub>9</sub>.

A continuación se procede a validar el modelo generalizado de Peleg, mediante la comparación gráfica de los datos experimentales contra los calculados con las ecuaciones establecidas, para cada material analizado a las diversas temperaturas (Figura 7,8 ,9 y 10).

De acuerdo a las figuras 7, 8, 9 y 10 la ecuación generalizada de Peleg para el fenómeno de hidratación, a las diversas temperaturas, del fríjol caballero presenta un comportamiento ajustado para los 11 tratamientos experimentales por lo tanto el modelo tiene un buen grado de confiabilidad.

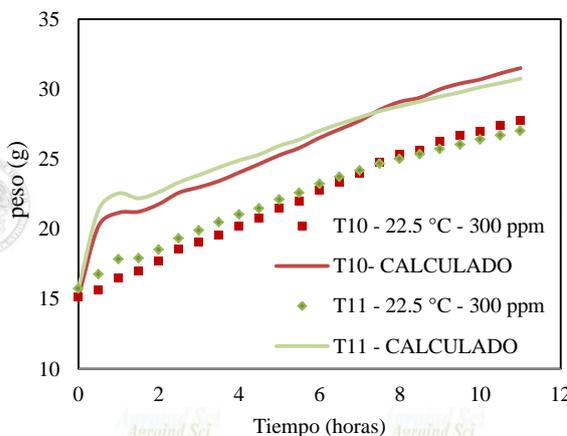


Figura 10. Peso experimental y calculado en el tiempo para tratamientos T<sub>10</sub> y T<sub>11</sub>.

Tabla 3. Coeficientes de regresión para los modelos de ambas variables dependientes

Factor	Ganancia de peso (g)		Difusividad (m <sup>2</sup> /s)	
	C regresion	P	C Regresion	P
Intercepto	12.023	0,000	1.9420	0.0129
Temperatura (L)	1.182	0,000	0.3890	0.2719
Temperatura (°C) (C)	-0,272	0,360	0.4706	0.2659
Dureza (ppm) (L)	0,5481	0,060	0.5146	0.163
Dureza (ppm)(C)	100,5	0,020	0.2135	0.5933
1L por 2L	-0,432	0,240	0.8129	0.1274

El modelo para la ganancia de peso sería:

$$GP=12.02326-1.18207(T)-0.27215(T^2)-0.54813(D)+1.00510(D^2)-0.43237(T)(D).$$

Donde: GP es la ganancia de peso en (g), T es la temperatura en (°C), D es dureza en (ppm).

El cual cuenta con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> igual 0.91383, el cual nos indica que las variables temperatura y dureza, explican en un 91,383 % la ganancia de peso de los frijoles. Esto nos dice, que el modelo puede ser aplicado para investigaciones futuras.

Tabla 4. Análisis de varianza para el modelo de la variable dependiente Ganancia de peso y Difusividad.

F.V.	SS	Gl	CM	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>
<b>Ganancia de peso (g)</b>					
MODELO	20.4	3	4.09	5.614	5.05
Residuos	3.64	5	0.73		
Total	24.0	7			
<b>Difusividad (m<sup>2</sup>/s)</b>					
Modelo	7.47	5	1.49	1.98	5.05
Residuos	3.74	5	0.75		
Total	11.2	10			

El análisis estadístico dio resultados más objetivos acerca de la influencia de la temperatura y dureza de agua en la ganancia de peso

Según la Tabla 4 como  $F_{tab} > F_{cal}$  entonces la temperatura y Dureza del agua para evaluar la difusividad aplicando el modelo de Fick, no se ajusta para modelar la hidratación de los frijoles.

En cuanto a la ganancia de peso la figura 9 muestra las superficies de respuesta y contorno.

La figura 9 muestra que a mayor temperatura o a mayor dureza existe una mayor ganancia de peso durante la rehidratación, esto puede darse considerando a las variables por separado pero en caso de estar juntas, como ya se había indicado, se obtiene también un rendimiento mayor con bajas temperaturas y alta dureza, mientras que en el caso inverso esto no se da, mientras que para el parámetro  $1/K_1$  esta ganancia de peso se da solo a temperaturas altas, por otro lado, para  $1/K_2$ , se requiere ambas variables en combinación para obtener un mayor resultado.

#### 4. Conclusiones

Existe una influencia significativa de la temperatura y la dureza en la ganancia de peso de los frijoles durante su rehidratación.

El modelo de Peleg específico para cada temperatura y dureza analizado, demostró una buena correlación tanto para temperatura como para dureza de agua en la ganancia de peso.

En este estudio se observó que a medida que aumentaba la temperatura del agua de remojo la velocidad de transferencia de agua ( $K_1$ ) disminuía. Lo mismo sucedió con la capacidad de saturación de absorción de agua ( $k_2$ ).  $K_1$

y  $K_2$  tuvo un comportamiento variable para las diferentes durezas del agua.

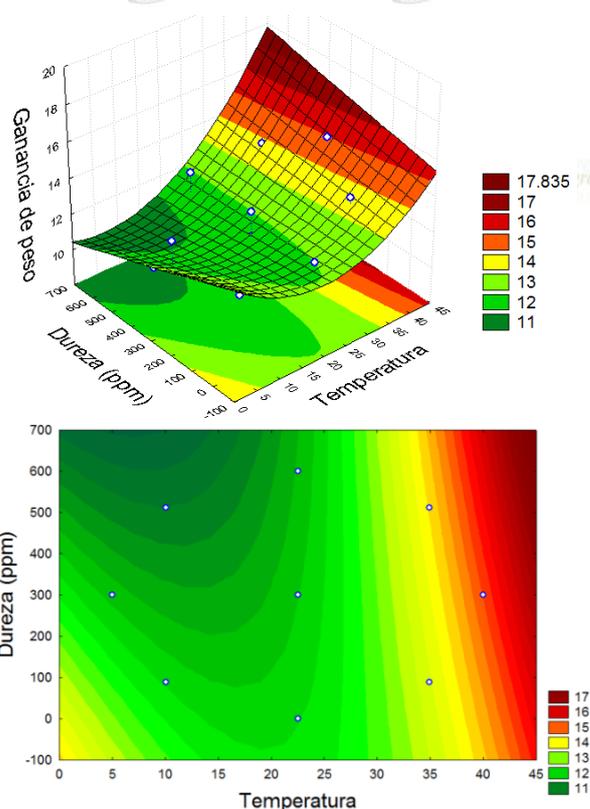


Figura 9. Superficie de respuesta y contornos para la ganancia.

#### 5. Referencias Bibliográficas

- Abu-Ghannam, Nissreen; McKenna, Brian. 1997a. Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *en* : journal of food science. vol. 62, n°. 3. p. 520-523
- Abu-Ghannam, Nissreen; McKenna, Brian. 1997b. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *en* : journal of food engineering. N°. 32. p. 391-401
- Beleia, A., Prudencio-Ferreira, S., Yamashita, F., Sakamoto, T.; Ito, L. 2004. La textura sensorial e instrumental de análisis de las raíces de yuca. *Revista de Estudios de la textura*, 5(35), 542
- Krokida, M., Philippopoulos, C. 2005. La rehidratación de alimentos deshidratados. *Tecnología de secado* 23: 799-830.

Linsely, R., Franzini, J., Freyberg, D., Thobonolous, G. 1992. Recursos hídricos de la ingeniería. 4<sup>a</sup> edición. McGraw-Hill International Editions

Mora, M. 1982. Variables relacionadas con la determinación del tiempo de cocción de frijol (*Phaseolus vulgaris*), p. 91-94

Okos, M., Narsimhan, G., Singh, R.P., Weitnauer, A. 1992. Deshidratación de alimentos. Manual de Ingeniería de Alimentos, eds. Nueva York, p.437-562.

Sopade, P. A.; Obekpa, J.A. 1990. Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using peleg's equation. *en* : journal of food science. vol. 55, n°. 4. p. 1084-1087.

Turhan, Mahir; Sayar, Sedat; Gunasekaran, Sundaram. 2002. application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *en* : journal of food engineering. no. 53. p. 153-159.

Wright, F.; Krieger, R. 1977. Abastecimiento de agua rural y saneamiento. 3<sup>a</sup> edición.