

## INFORME IN EXTENSO DE ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN CON/CON 2016

### A. DATOS GENERALES DEL ESTUDIO

1. Título del estudio. Optimización de procesos de alimentos con cadenas de Markov, estadística bayesiana y soft computing vs. Métodos tradicionales.
2. Código del estudio. 161701081
3. Facultad. Ingeniería Industrial
4. Programa y Línea de investigación. Producción y operaciones.
5. Instituto, Centro o Unidad de Investigación. Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Industrial.
6. Miembros del equipo de investigación.

Responsable: Dr. Juan Manuel Cevallos Ampuero.

Miembros: Mg. Feliciano Muñoz Osiris. Obtención y análisis de información.

Colaboradores Estudiantes: Castro Lozano Christian Gabriel y Araujo Azañero Luis Daniel. Apoyo en análisis de información.

7. Firma del Responsable del estudio.

Dr. Ing. Juan Manuel Cevallos Ampuero

### B. CONTENIDO DEL INFORME IN EXTENSO:

#### ARTÍCULO CIENTÍFICO-ACADÉMICO REDACTADO

1. Resumen

El presente trabajo ha desarrollado una metodología de cálculos de optimización para un proceso de secado de alimentos distinta a los métodos tradicionales. La idea fundamental radica en ver a los procesos no sólo con input y output sino que además actúan como una cadena de Markov; donde a través del tiempo se presentan procesos estocásticos que deben ser tomados en cuenta. Por otro lado frente a la tradicional estadística frecuentista se plantea el uso de la estadística bayesiana y frente a la idealización determinista de los datos se plantea el uso de datos difusos e inciertos. De tal manera que tendremos un diseño experimental muy distinto a lo tradicional. Finalmente para el análisis y optimización de los procesos se plantea el uso de las técnicas de softcomputing y estadística bayesiana. Se seleccionó trabajar con procesos de alimentos debido a que en dichos procesos el tiempo influye en el resultado y se van produciendo diversos cambios durante dichos procesos. Se seleccionó el de proceso de secado. Se desarrolló el método y luego se aplicó a datos de una investigación previa sobre secado de alimentos. Los resultados de la simulación se compararon con los reales y allí se pudo demostrar las ventajas del método obtenido.

2. Palabras Claves.

### 3. Introducción

Hay diversos trabajos sobre procesos y optimización en los últimos años. Así tenemos que Alavarez, Lizarbe y Viles (2009), aplican metodología de superficie de respuesta para mejorar los procesos y algoritmos genéticos para optimizarlos. Castañeda, Garmendia y Santos (2008), Aplican algoritmos genéticos y lógica difusa para optimizar. Por otro lado, Del Castillo (2012), desarrolla una metodología de optimización robusta con la función de deseabilidad. Con los alimentos tenemos los trabajos de Mudahar, Toledo, Floros y Jen (1989) que aplican diseño de experimentos y la metodología de superficie de respuesta para optimizar el secado de zanahoria; de Cronin (1998) que desarrolla una metodología para simular el secado de alimentos en túnel de aire caliente con zanahoria; de Vargas (1996) que desarrolla una metodología para simular el secado de alimentos en túnel de aire caliente con cebollas.

De la revisión de la información sobre secado de los alimentos se obtuvo información de las diversas teorías sobre secado en bandejas con túnel de aire caliente de Toledo (2007) en su texto "Fundamentals of food process engineering" que presenta las diversas teorías de secado más aceptadas y asimismo el texto de Varzakas y Tzia (2015) cuyo título es "Food Engineering Handbook". De la revisión respectiva se infiere que los conocimientos sobre secado de alimentos requieren del uso de técnicas más modernas que las tradicionales para poder predecir su comportamiento debido a que la mayoría de técnicas suponen un comportamiento lineal y ello no ocurre en los alimentos debido a su estructura compleja.

De la revisión de diversas literaturas que buscan mayores desarrollos para predecir el comportamiento de los procesos se pudo revisar a el texto de Albert (2009) que nos presenta la simulación bayesiana con el método MCMC sobre cadenas de Markov y Monte Carlo; Casella y Robert sobre Métodos Monte Carlo; Deb (2013) sobre el uso de algoritmos evolutivos para optimizar; Alvarez, Lizarbe, Viles y Tanco (2009) sobre el uso de algoritmos genéticos para optimizar; Render, Stair y Hanna (2012) sobre métodos cuantitativos, en especial el uso de Cadenas de Markov; y Singh (2010) sobre el uso de Soft Computing para optimizar; es decir, el uso de las diversas combinaciones de redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos.

Toledo (2007) sostiene que los alimentos deshidratados son preservados porque la actividad de agua hasta un nivel donde la actividad microbiológica no puede ocurrir y donde las tasas de deterioro químico y bioquímico se reducen al mínimo. Para contenido de humedad altos la actividad de agua es igual a la fracción molar de agua  $x_w$ . Como el peso molecular del agua es 18; la fracción de peso del agua  $x'_w$  y fracción de agua disuelta  $x'_s$  y peso molecular de agua disuelta  $M_s$  se tiene la siguiente ecuación para la actividad de agua:

$$a_w = x_w = \frac{\frac{x'_w}{18}}{\frac{x'_w}{18} + \frac{x'_s}{M_s}}$$

Asimismo, Toledo (2007) recomienda para un amplio rango de contenido de humedad la ecuación de GAB Guggenheim- Anderson- de Boer; donde  $X$  es el contenido de humedad en base de sólidos secos y  $X_m$  el contenido de humedad en base seca, equivalente a una capa mono molecular de agua. Luego tenemos la ecuación:

$$X = \frac{X_m C k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)}$$

Esta ecuación tiene 3 parámetros con  $k$ ,  $C$  y  $X_m$  como constantes.  $C$  es una constante a temperatura constante y está relacionada con el calor de adsorción de agua sobre las partículas.  $X_m$  es la fracción de masa de agua en el material equivalente para una capa uni molecular de agua que cubre la superficie de cada partícula.  $k$  es un parámetro que corrige la diferencia en propiedades relativas de agua de adsorción con el agua líquida y que permite que la ecuación GAB cumplirse sobre un amplio rango de contenido de agua.

Barbosa, Ma y Barletta (1997) sostiene que en el proceso de secado de alimentos se presentan dos procesos o periodos. El primero se tiende a eliminar la mayor parte del agua libre de un sistema alimenticio para disminuir su deterioro. El segundo elimina principalmente parte de resto de agua del alimento. El primer periodo es de velocidad constante de secado. Para secado en bandejas con túnel de aire caliente, para un cubo de lado  $L$  se tiene la siguiente ecuación de velocidad de secado  $R_c$ :

$$R_c = \frac{h(T_a - T_s)}{h_{fg} L \rho_s}$$

Donde,  $h$  es el coeficiente de transmisión de calor ( $W/(m^2K)$ );  $T_a$  es la temperatura del aire (K);  $T_s$  es la temperatura de la superficie del sólido (K);  $h_{fg}$  es el calor latente de vaporización a la temperatura de la superficie del material ( $J/(kg H_2O)$ );  $\rho_s$  es la densidad de materia seca del material ( $kg$  de masas seca/  $m^3$  de material).

Asimismo, Barbosa, Ma y Barletta (1997), para el segundo periodo es de velocidad decreciente de secado; para secado en bandejas con túnel de aire caliente, proponen para la velocidad de secado:

$$R_c = -\frac{dw}{dt}$$

Asimismo, el tiempo total  $t_c$  para la etapa de velocidad constante es:

$$t_c = \frac{w_0 - w_c}{R_c}$$

donde  $w_0$  es la humedad inicial y  $w_c$  es la humedad crítica; y el  $t$  en la segunda etapa de velocidad decreciente es igual a:

$$t - t_c = \frac{w_c}{R_c} \ln\left(\frac{w_c}{w}\right)$$

Varzakas y Tzia (2015) sobre los mecanismos de secado sostiene que son tres: difusión superficial o difusión líquida sobre la superficie porosa; difusión líquida o de vapor debido a las diferentes concentraciones de humedad; y acción capilar en alimentos granulares o porosos debido a fuerzas superficiales.

Alvarez y Legues (1986) desarrollaron el siguiente modelo matemático para las curvas de secado:

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \exp\left[-\frac{\lambda_n^2}{(1+b)}\left(\left(1 + \frac{D_0 t}{a^2}\right)^{(1+b)} - 1\right)\right]$$

Donde, para una esfera:  $v=3$ ;  $\lambda_n = n\pi$ ; y  $a$ = radio

Vargas (1996), para la estimación de la difusividad efectiva, teniendo en cuenta los trabajos de Legues, y la segunda Ley de Fick, propone:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{ef} \frac{\partial M}{\partial r}\right)$$

Vargas (1996) plantea que la simulación del proceso de secado es una manera de representar matemáticamente, mediante modelos, lo que ocurre en la realidad con el producto a través del tiempo, dentro del secador.

Singh et al (1984) señalan que para el desarrollo de una simulación computacional se requiere de la incorporación de modelos matemáticos que describan la cinética de los diversos cambios que se están evaluando.

Alvarez y Legues (1986) proponen para la difusividad efectiva la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2v}{\lambda_n^2} \exp \left[ -\lambda_n^2 \frac{D_0}{a^2} \int_0^t f(t) dt \right]$$

Vargas(1996) propone la metodología de Alvarez y Legues modificada para la estimación de la difusividad efectiva durante el secado:

1)Tomar como referencia el modelo de Alvarez y Legues para cuerpos geométricos con forma de plancha infinita:

$$\frac{\bar{M} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 n^2} \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2 n^2}{4a^2} \int_{t=0}^{t=t_i} D_{ef} dt \right]$$

2)A partir de los datos experimentales de humedad en base seca (M) versus tiempo se calculan los valores de humedad adimensional para cada tiempo (E(ti)):

$$E(t_i) = \frac{\bar{M} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}}$$

3)Mediante un proceso iterativo (método numérico de Newton o de la tangente) se calculan los valores de  $\int_{t=0}^{t=t_i} D_{ef} dt$  para los diferentes ti. La serie infinita se trunca en al quinto término para todos los casos.

4)Utilizando una regresión de tipo potencial se relaciona la función  $\int_{t=0}^{t=t_i} D_{ef} dt$  versus tiempo, encontrándose los parámetros p y q de la ecuación que gobierna dicho comportamiento, obteniéndose:

$$\int_{t=0}^{t=t_i} D_{ef} dt = p \cdot (t_i)^q$$

5)Conocida la relación  $\int_{t=0}^{t=t_i} D_{ef} dt$  versus tiempo, se deriva y se obtiene la función que relaciona la difusividad efectiva como una función del tiempo de secado, obteniéndose:

$$D_{ef} = p \cdot q \cdot t^{q-1}$$

Asimismo, para simular el secado Vargas(1996) propone trabajar con el mismo método que se usa para estimar la difusividad efectiva. Se simula y se obtienen los valores de humedad predecidos en base seca para todo el tiempo de secado. El modelo final utilizado es:

$$\frac{\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \sum_1^5 \frac{8}{(2n-1)^2 n^2} \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2 n^2}{4a^2} p t^q \right]$$

Vargas (1996) para validar los resultados utiliza las ecuaciones recomendadas por Favetto y Chirife (1984):

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|M_{exp} - M_{pred}|}{\bar{M}_{exp}}; \text{ y}$$

$$RMS = 100 \sqrt{\sum \frac{\left| \frac{M_{exp} - M_{pred}}{\bar{M}_0 - M_{exp}} \right|}{n}}$$

Donde n es el número de pares de datos (experimentales y predecidos).

Al respecto, Mesiami-Asi, et al (2009) utilizan el estadístico RMSE, similar al RMS.

Toledo (2007) para predecir la tasa de secado  $R_c$ , en la etapa de tasa constante, propone la ecuación:

$$-\frac{dX}{dt} = R_c$$

El tiempo total  $t_c$  para la tasa constante es:

$$t_c = \frac{X_0 - X_c}{R_c}$$

Donde  $X_0$  es el contenido de humedad inicial y  $X_c$  es el contenido de humedad crítica.

Asimismo, Toledo (2007) para la etapa de secado de tasa decreciente propone la ecuación:

$$-\frac{dX}{dt} = \frac{R_c}{X_c}(X)$$

Integrando y operando se obtiene el valor del tiempo:  $t - t_c = \frac{X_c}{R_c} \ln \frac{X_c}{X}$

Finalmente se obtiene se puede obtener la ecuación del tiempo total:

$$t = \frac{X_0 - X_c}{R_c} + \frac{X_c}{R_c} \ln \frac{X_c}{X}$$

Vargas (1996) los mejores valores de simulación de proceso de secado de cebolla en túnel de aire caliente fueron obtenidos con base al método de Alvarez y Legues modificado e que obtuvo fueron de  $P= 11.26$  y  $RMS=8.22$ ; para el tratamiento de  $70^\circ\text{C}$  para el aire caliente y una velocidad de  $2 \text{ m/s}$ .

Cronin (1998) desarrolla una metodología, considerando el modelado con el uso de cadenas de Markov para simular el secado de zanahorias en túnel de aire caliente. El resultado del modelo es validado con resultados de secado experimental, para probar su exactitud. Además el resultado del enfoque de Markov es comparado con aquel equivalente obtenido del modelo de simulación de Montecarlo. La mejor programación simulada es de  $80^\circ\text{C}$ ,  $20\% \text{ HR}$  y  $3 \text{ m/s}$ ; la distribución final experimental es de  $9.3\%$  mientras que la del modelo de Monte Carlo es de  $9.9\%$  y la de Cadenas de Markov es de  $10.1\%$ .

La propuesta de Cronin (1998) de modelado de secado aplicando de cadenas de Markov se basa en la conversión de la variable tiempo continua en discreta. Para ello el número de intervalos se determina empíricamente. Se usan dos matrices de transición; una para cada etapa del proceso de secado. La primera con cambios mayores y la segunda con cambios más refinados. Asimismo, se requiere la determinación de un vector de probabilidad inicial y trabaja con una distribución normal.

La formulación de la matriz de transición es conseguida por Cronin (1998) usando la salida del modelo de secado determinista en conjunción con el conocimiento estadístico de las variaciones aleatorias en la tasa de secado. El modelo de secado calcula la tasa de secado promedio de las bandejas desde el contenido de humedad inicial  $m_i$  descendiendo hasta el contenido de humedad objetivo final  $m_f$ .

Asimismo, Cronin (1998) propone un modelado de secado mediante simulación de Montecarlo; para ello considera el contenido de humedad inicial y las tasas de secado en los periodos 1 y 2 a ser gobernados por variables aleatorias mediante distribución de probabilidad.

El método de solución involucra extraer variables aleatorias de las 3 distribuciones de probabilidad cuyos parámetros han sido estimados del análisis experimental. En particular en cada tiempo el modelo es ejecutado, un valor es muestreado de distribución de contenido de

humedad inicial para obtener el nivel de humedad inicial. Cada prueba del modelo Monte Carlo produce un valor para el contenido de humedad final de una bandeja única para un tiempo de secado dado.

Del Castillo (2012) desarrolla un método de optimización con el uso de regresión multivariante bayesiana, y asimismo, desarrolla una metodología de optimización aplicando el método de Newton y la aproximación estocástica.

Albert (2009) desarrolla en lenguaje R una metodología para aplicar estadística bayesiana en la simulación MCMC cadenas de Markov y simulación Monte Carlo; para tal efecto utiliza los paquetes LearnBayes y CODA.

Singh (2010) plantea que un importante uso de las redes neuronales es en la aproximación de funciones, para tal efecto, entre otras, propone el uso de las redes neuronales que usan el enfoque backpropagation. Utiliza redes tanto e una capa como de varias capas. Al respecto propone un conjunto de redes para diferentes usos.

Deb (1013) propone el uso de los algoritmos genéticos para la optimización multiobjetivos. Al respecto hace un repaso de los diversos métodos clásicos. Asimismo, para el caso de la optimización multiobjetivo obtiene diversas soluciones que se presentan en el frente Pareto.

Singh y Pandey (2011) aplican redes neuronales para predecir la cinética de secado durante el secado de camotes; asimismo, Nazghelichi , Kianmehr y Aghbashio (2011) aplican redes neuronales para predecir la cinética de secado de cubos de zanahoria durante el secado en bandejas.

Luego de esta revisión de información se redefinieron los Objetivos; siendo el objetivo general desarrollar una metodología para predecir y optimizar el secado de alimentos. Para ello se contemplaron los siguientes objetivos específicos; aplicación de las cadena de markov, estadística bayesiana al estudio de los procesos de alimentos; optimización de los procesos con el uso de redes neuronales y algoritmos genéticos; y comparación la metodología propuesta con la tradicional.

#### 4. Metodología y técnicas de investigación utilizadas.

Es una investigación aplicada; de tipo cuasi experimental. Se trabajará con datos experimentales de una investigación sobre secado de los alimentos; y con dicha información se aplicará la metodología propuesta obteniéndose resultados que luego se compararán con los resultados experimentales y se obtendrán conclusiones sobre la pertinencia de lo propuesto. Los datos a utilizar son los de secado de zanahorias realizado por Vargas (1996). En un inicio se revisó la información existente relacionada con el tema. Luego de ello en una primera etapa se aplicó cadenas de Markov y estadística bayesiana para analizar el comportamiento del fenómeno de secado; luego se aplicaron redes neuronales y algoritmos genéticos para predecir y optimizar y finalmente los resultados se compararon con los resultados experimentales y tradicionales. Para el trabajo se utilizaron los software Minitab y Matlab.

#### 5. Aplicación de cadenas de Markov y estadística bayesiana para analizar el comportamiento del fenómeno de secado.

Con base a lo propuesto por Cronin(1998) y los datos de secado de zanahoria de Vargas (1996) se determinó de manera análoga el vector de probabilidades de estados de humedad inicial, que llamaremos  $a_0$  (las probabilidades de  $a_0$  se obtuvieron con base al total de bandejas y la

humedad promedio de cada bandeja. Tener presente que las zanahorias cosechadas no tienen la misma humedad).

Para la primera etapa de secado constante, en el rango 1350-360 de humedad en base seca; en 8 estados; por tanto el rango corresponde a:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_0 &= (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4, \mathbf{a}_5, \mathbf{a}_6, \mathbf{a}_7, \mathbf{a}_8) \\
 & \quad 1350 \quad 1180 \quad 1020 \quad 880 \quad 730 \quad 590 \quad 470 \quad 360 \\
 & = (0.90, \quad 0.05, \quad 0.02, \quad 0.01, \quad 0.01, \quad 0.005, \quad 0.003, \quad 0.001) \quad \Sigma=1
 \end{aligned}$$

Seguidamente se procedió a elaborar la matriz de transición; que es una matriz cuadrada; que será 8x8 para poder multiplicarse por el vector inicial. Se desarrolló una matriz de transición para cada etapa de secado (velocidad de secado constante y de secado decreciente). La primera etapa se estableció entre 1350 y 370 de base húmeda y la segunda entre 370 y 8 de base húmeda.

Para cada  $p_{ij}$  se aplicó la ecuación de la distribución normal recomendada por Cronin (1998):

$$f(\Delta m) = \frac{1.0027}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp - \left[ \frac{(\Delta m - \overline{\Delta m})^2}{2\sigma_m^2} \right]$$

La matriz de transición (probabilidades) obtenida es 8x8 (se trabajó con la desviación estándar propuesta por Cronin (1998) para zanahorias: 3.53):

Tabla 1. Matriz de transición para la etapa 1.

i\j	1350	1180	1020	880	730	590	470	360
1350	0	0.8	0.2	0	0	0	0	0
1180	0	0	0.8	0.2	0	0	0	0
1020	0	0	0	0.7	0.2	0.1	0	0
880	0	0	0	0	0.7	0.2	0.1	0
730	0	0	0	0	0	0.7	0.2	0.1
590	0	0	0	0	0	0	0.8	0.2
470	0	0	0	0	0	0	0.1	0.9
360	0	0	0	0	0	0	0	0

En todos los casos en que la probabilidad es menor a 0.0001 se ha considerado 0.

Para la segunda etapa de secado decreciente, en el rango 370-8 de humedad en base seca; en 8 estados; por tanto el rango corresponde a:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_0 &= (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4, \mathbf{a}_5, \mathbf{a}_6, \mathbf{a}_7, \mathbf{a}_8) \\
 & \quad 360 \quad 250 \quad 150 \quad 80 \quad 40 \quad 35 \quad 15 \quad 8 \\
 & = (0.90, \quad 0.05, \quad 0.02, \quad 0.01, \quad 0.01, \quad 0.005, \quad 0.003, \quad 0.001) \quad \Sigma=1
 \end{aligned}$$

Tabla 2. Matriz de transición para la etapa 2.

i\j	360	250	150	80	40	35	15	8
360	0	0.9	0.1	0	0	0	0	0
250	0	0	0.9	0.1	0	0	0	0
150	0	0	0	0.85	0.15	0	0	0
80	0	0	0	0	0.85	0.15	0	0
40	0	0	0	0	0	0.95	0.05	0
35	0	0	0	0	0	0	0.97	0.03
15	0	0	0	0	0	0	0.01	0.99
8	0	0	0	0	0	0	0	0

En todos los casos en que la probabilidad es menor a 0.0001 se ha considerado 0.

Teniendo el vector inicial y la matriz de transición se procedió a calcular los vectores resultantes del producto. Considerando los diversos estados. Se obtuvo (trabajando con Matlab):

Para la primera etapa de tasa de secado constante:

```
A=[0.90,0.05, 0.02, 0.01, 0.01, 0.005, 0.003, 0.001];
>> B=[0 .8 .2 0 0 0 0 0;0 0 .8 .2 0 0 0 0;0 0 0 .7 .2 .1 0 0;0 0 0 0 .7 .2 .1 0;0 0 0 0 0 .7 .2 .1;0 0 0 0 0 0 .8 .2;0 0 0 0 0 0 0 .1 .9;0 0 0 0 0 0 0 0 0];
>> A*B
    0 0.7200 0.2200 0.0240 0.0110 0.0110 0.0073 0.0047
>> A*B^2
    0 0 0.5760 0.2980 0.0608 0.0345 0.0141 0.0099
>> A*B^3
    0 0 0 0.4032 0.3238 0.1598 0.0710 0.0257
>> A*B^4
    0 0 0 0 0.2822 0.3073 0.2400 0.1282
>> A*B^5
    0 0 0 0 0 0.1976 0.3263 0.3057
>> A*B^6
    0 0 0 0 0 0 0.1907 0.3332
>> A*B^7
    0 0 0 0 0 0 0.0191 0.1716
```

Esto significa que en el estado 8 las probabilidades de llegar a menos de 360% de humedad en base húmeda en la zanahoria, con las condiciones el trabajo de Vargas (1996) son superiores al 83%. Sólo 17% de estar en 360%

Para la segunda etapa de tasa de secado decreciente:

```
>> A=[0.90, 0.05, 0.02, 0.01, 0.01, 0.005, 0.003, 0.001];
>> B=[0 .9 .1 0 0 0 0 0;0 0 .9 .1 0 0 0 0;0 0 0 .85 .15 0 0 0;0 0 0 0 .85 .15 0 0;0 0 0 0 0 .95 .05 0;0 0 0 0 0 .97 .03;0 0 0 0 0 0 0 .01 .99;0 0 0 0 0 0 0 0 0];
>> A*B
    0 0.8100 0.1350 0.0220 0.0115 0.0110 0.0054 0.0031
>> A*B^2
    0 0 0.7290 0.1958 0.0389 0.0142 0.0113 0.0057
>> A*B^3
    0 0 0 0.6197 0.2757 0.0664 0.0159 0.0116
>> A*B^4
    0 0 0 0 0.5267 0.3549 0.0783 0.0177
>> A*B^5
    0 0 0 0 0 0.5004 0.3714 0.0882
>> A*B^6
    0 0 0 0 0 0 0.4891 0.3827
```

```
>> A*B^7
```

```
0 0 0 0 0 0 0.0049 0.4842
```

Esto significa que en el estado 8 las probabilidades de llegar a menos de 8% de humedad en base húmeda en la zanahoria, con las condiciones el trabajo de Vargas (1996) son superiores al 99%. Sólo 48% de estar en 8%. Asimismo, con los resultados se puede apreciar en los diversos estados como variará la humedad y que valores tendrá.

6. Aplicación de redes neuronales para predecir y optimizar el proceso de secado de alimentos.

Con base a lo propuesto por Singh y Pandey (2011) y los datos de secado de zanahoria de Vargas (1996) se determinó de manera análoga la red neuronal que permita predecir los valores del proceso de secado. Se utilizó el algoritmo backpropagation y el software Matlab – tool nueral networks.

Se creó la red neuronal con los siguientes comandos: nnstart; fitting tool; network y se siguieron indicaciones para introducir los datos, entrenar la red y calcular la eficiencia de la red. El script de la red es:

```
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
% Script generated by Neural Fitting app
% Created Thu Mar 23 00:17:28 COT 2017
% This script assumes these variables are defined:
% p - input data.
% t - target data.
x = p;
t = t;
% Choose a Training Function
% For a list of all training functions type: help nntain
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. NFOOTL falls back to this in low memory
situations.
trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt
% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 10;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);
% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);
% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)
% View the Network
view(net)
% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotfit(net,x,t)
%figure, plotregression(t,y)
%figure, ploterrhist(e)
```

Luego se simula la red con los valores del tiempo a efectos de obtener los nuevos valores que da la red neuronal obtenida (comandos sim(net, p1). Así se obtienen los siguientes valores, que se presentan.

Tabla 3. Predicción con redes neuronales

Tiempo(min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Humedad %	1349	1274	1165	1051	947	872	783	713	639	574	515
Tiempo	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
Humedad	455	401	346	306	267	227	192	172	152	133	113
Tiempo	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320
Humedad	96	83	68	53	43	33	23	18	18	13	13
Tiempo	330	340	350	360							
Humedad	13	13	13	8							

7. Interpretación de datos. Comparación de los resultados obtenidos con resultados experimentales y tradicionales.

Así se puede preparar la siguiente tabla de valores obtenidos con las cadenas de Markov, redes neuronales, simulación tradicional y compararlos con los valores experimentales de Vargas(1996):

Tabla 4. Comparación de resultados

Tiempo	Valor experimental	Valor con simulación tradicional	Valor con cadena de Markov	Valor con redes neuronales
0	1349	1295	1350	1350
15	1219	1205	1180	1219
30	1051	1084	1020	1051
45	909	967	880	909
60	783	854	730	784
75	676	743	690	676
90	574	636	470	574
105	485	534	410	485
120	401	439	360	401
150	267	280	250	267
180	172	138	150	172
210	113	93	80	113
240	68	50	40	69
270	33	27	35	33
300	18	16	15	18
330	13	11	12	13
360	8	9	8	8

Calculando los valores de p y rms para comparar se obtuvo los valores de la tabla siguiente.

Tabla 5. Parámetros p y rms para comparar propuestas.

	Simulación tradicional	Cadenas de Markov	Redes neuronales
Valores de p	11.25	5.63	0.04
Valores de RMS	8,22	18.18	1.4

## 8. Conclusiones

- 1) Se ha desarrollado una metodología para predecir las variaciones de la curva de secado mediante el uso de cadenas de Markov.
- 2) Se ha desarrollado una metodología para predecir las variaciones de la curva de secado mediante el uso de redes neuronales.
- 3) Se compararon los resultados de las dos nuevas metodologías con los resultados de simulación tradicionales, encontrándose que los resultados son similares; con la ventaja que con el uso de software la velocidad de cálculo con redes neuronales es mayor. Asimismo, teniendo en cuenta que los procesos de secado pueden tener mayores complejidades que lo trabajado en este trabajo, el uso de redes neuronales y cadenas de Markov ofrece una nueva alternativa a tener en cuenta.

## 9. Recomendaciones

Continuar investigaciones sobre simulación de procesos de alimentos con el uso de las técnicas probadas y otras metaheurísticas, lo cual puede significar un aporte importante en el análisis de los procesos de alimentos.

## 10. Referencias bibliográficas

- ALBERT, J. 2009. Bayesian Computation with R. Segunda Edición. Editorial Springer. Estados Unidos.
- ALVAREZ, P y LEGUES, P. 1986. Deshidratación de agroproductos: Desarrollo de un modelo matemático para la interpretación de las curvas experimentales de secado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile. Chile.
- ALVAREZ, M; LIZARBE, L , VILES, E Y TANCO, M. 2009. The use of Genetic Algorithms in Response Surface Methodology. Quality Technology and Quantitative Management. Vol. 6 – 3 (2009) 295-307.
- BARBOSA, G.; MA, L. y BARLETTA, B. 1997. Manual de laboratorio de ingeniería de alimentos. Editorial Acribia. España.
- CASELLA, G y ROBERT, C. 2010. Introducing Monte Carlo Methods with R. Editorial Springer. Estados Unidos.
- CASTAÑEDA, E; GARMENDIA, L Y SANTOS, M. 2008. Algoritmos Genéticos Difusos: Una Aproximación Práctica para la Creatividad Computacional. Segundo Congreso Internacional de Matemáticas en la Ingeniería y la Arquitectura. España. (2008) 279-290. DEL CASTILLO, D.
- CRONIN, K. 1998. Probabilistic simulation of batch tray drying using Markoc chains and the Monte Carlo technique. Journal of Food Process Engineering. Vol. 21. 459-483.
- DEB, K. 2013. Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Ed. Wiley. Cuarta Edición. India.
- DEL CASTILLO, E. 2010. Process Optimization. Segunda Edición. Editorial Springer. Estados Unidos.
- MEISAMI-ASI, E, et al. 2009. Methemathical modeling of moisture content of Apple (Var. Golab) slices during drying. Pakistan Journal of Nutrition Vol. 8(6) 804-809.
- MUDAHAR,G; TOLEDO, R; FLOROS, J. y JEN, J. 1989. Optimization of Carrot Dehydration Process Response Surface Methodology. Journal of Food Science. Vol. 54. N°3.
- RENDER,B; STAIR, R y HANNA, M. 2012. Métodos Cuantitativos para los Negocios. Undécima edición. Editorial Pearson. México.
- SINGH, I. 2010. Soft Computing. Editorial Khanna Book Publishing. Edición 1. India.
- SINGH,N y PANDEY,R. 2011. Neural network approaches for prediction of drying kinetics during drying of sweet potato. CIGR Journal. Vol. 13. No.1. 2011. India.

NAZGHELICHI, T; KIANMEHR,M. y AGHBASHIO,M .2011. Prediction of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying by artificial neural network. Journal of Food Science Technology. Vol. 48(5) 542-550.

TOLEDO, T. 2007. Fundamentals of food process engineering. Tercera Edición. Editorial Springer.

VARGAS, L. 1996. Simulación de secado de cebolla blanca (*Allium cepa*) por flujo de aire caliente y evaluación de la pérdida de su pungencia. Tesis. UNALM.

VARZAKAS, T y TZIA, C. 2015. Food Engineering Handbook. Primera Edición. Editorial CRC Press. Estados Unidos.

## 11. Anexos

Datos de proceso de secado de cebolla, obtenidos de Vargas (1996):

Variación de la humedad en función al tiempo durante el secado de cebolla blanca a 70°C y 2 m/s. HR=10%; Humedad inicial = 93.1 % bh, 13.49% bs; Humedad final= 8.21 % bh, 0.00 bs.; Tiempo de secado= 6 h.

Tiempo min	Resistencia Ohms	Peso g	Humedad % bh	Humedad dec bs	Humedad adimensional
0	8.4600	145.0000	93.1000	13.4928	1.0000
10	8.4450	137.5500	92.7263	12.7481	0.9445
20	8.4230	126.6233	92.0986	11.6560	0.8631
30	8.4000	115.2000	91.3151	10.5142	0.7779
40	8.3790	104.7700	90.4505	9.4718	0.7002
50	8.3640	97.3200	89.7195	8.7271	0.6447
60	8.3460	88.3800	88.6796	7.8336	0.5781
70	8.3320	81.4267	87.7129	7.1386	0.5263
80	8.3170	73.9767	86.4755	6.3940	0.4707
90	8.3040	67.5200	85.1822	5.7488	0.4226
100	8.2920	61.5600	83.7476	5.1529	0.3762
110	8.2800	55.6000	82.0054	4.5572	0.3338
120	8.2690	50.1387	80.0445	4.0112	0.2931
130	8.2580	44.8733	77.8641	3.4651	0.2524
140	8.2500	40.7000	75.4177	3.0680	0.2228
150	8.2420	36.7267	72.7582	2.6708	0.1932
160	8.2340	32.7533	69.4535	2.2737	0.1836
170	8.2270	29.2767	65.8260	1.9262	0.1376
180	8.2230	27.2900	63.3382	1.7276	0.1228
190	8.2190	25.3033	60.4598	1.5291	0.1080
200	8.2150	23.3167	57.0908	1.3305	0.0932
210	8.2110	21.3300	53.0942	1.1319	0.0784
220	8.2080	19.8400	49.5716	0.9630	0.0673
230	8.2050	18.3500	45.4766	0.8341	0.0562
240	8.2020	16.8600	40.8584	0.6852	0.0451
250	8.1990	15.3700	34.9057	0.5362	0.0340
260	8.1970	14.3767	30.4081	0.4369	0.0266
270	8.1950	13.3833	25.2428	0.3377	0.0192
280	8.1930	12.3900	19.2494	0.2384	0.0118
290	8.1920	11.8933	15.8772	0.1887	0.0081
300	8.1920	11.8933	15.8772	0.1887	0.0081
310	8.1910	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
320	8.1910	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
330	8.1910	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
340	8.1910	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
350	8.1910	11.3967	12.2112	0.1391	0.0044
360	8.1900	10.9000	8.2110	0.0895	0.0007

SIMULACIÓN DEL SECADO DE CEBOLLA BLANCA A 70°C Y 2 m/s – METODO DE ALVAREZ  
LEGUES MODIFICADO, OBTENIDO DE VARGAS (1996)

DATOS:

Espesor de la plancha (m) : .007; Incremento de tiempo (s): 600  
 Humedad inicial (dec, bs) : 13.4928; Humedad equilibrio (dec, bs) :.08  
 Temperatura del bulbo seco (°C) : 70; Humedad relativa del aire (%) :10

Tiempo de secado (min)	Difusividad Efectiva (m <sup>2</sup> /s)	Humedad Experimental (g agua /gms)	Humedad Predecida (g agua/g ms)
0	0	13.4928	12.951
10	1.545776 E-10	12.7481	12.4688
20	2.706972 E-10	11.6560	11.65878
30	3.756877 E-10	10.5142	10.84846
40	4.740465 E-10	9.4718	10.0629
50	5.677512 E-10	8.7271	9.296128
60	6.579064 E-10	7.8336	8.544064
70	7.45213 E-10	7.1386	7.804444
80	8.30153 E-10	6.3940	7.077425
90	9.130766 E-10	5.7488	6.366306
100	9.942491 E-10	5.1529	5.677267
110	1.073878 E-09	4.5572	5.017948
120	1.152129 E-09	4.0112	4.395854
130	1.229139 E-09	3.4651	3.817233
140	1.305021 E-09	3.0680	3.286532
150	1.37987 E-09	2.6708	2.806279
160	1.453769 E-09	2.2737	2.377223
170	1.526786 E-09	1.9262	1.998587
180	1.598985 E-09	1.7276	1.668361
190	1.670418 E-09	1.5291	1.383611
200	1.741135 E-09	1.3305	1.140758
210	1.811176 E-09	1.1319	0.935837
220	1.880581 E-09	0.9630	0.7647097
230	1.949384 E-09	0.8341	0.6232443
240	2.017616 E-09	0.6852	0.5074524
250	2.085304 E-09	0.5362	0.4135905
260	2.152476 E-09	0.4369	0.3382262
270	2.219154 E-09	0.3377	0.2782781
280	2.285361 E-09	0.2384	0.2310296
290	2.351116 E-09	0.1887	0.1941264
300	2.416437 E-09	0.1887	0.16556
310	2.481342 E-09	0.1391	0.1436411
320	2.545848 E-09	0.1391	0.1269687
330	2.609968 E-09	0.1391	0.1143957
340	2.673717 E-09	0.1391	0.1049945
350	2.737107 E-09	0.1391	9.802397 E-02
360	2.800151 E-09	0.0895	9.289833 E-02

Parámetro F: 11.2578; Parámetro RMS: 8.221662; Modelo difusivo: dif.ef. = 8.77874 E-13 x  
 Tiempo = .8083485