



Estimación de la eficiencia productiva en la extracción de aceite esencial a partir de la cáscara de la naranja mediante redes neuronales

Estimation of production efficiency in the extraction of essential oil from orange peel using neural networks

Sandra Elvira Fajardo Muñoz¹; Anthony Josue Freire Castro²; Michael Isaac Mejía Garzón³

Recibido: 28 / 07 / 2023 – Recibido en forma revisada: 12 / 09 / 2023 -- Aceptado: 06 / 11 / 2023 – Publicado: 19/03/2024

*Autor para la correspondencia

Resumen

En este trabajo, se utilizó una Red Neuronal Artificial (RNA) feedforward con 9 capas ocultas y algoritmos de entrenamiento backpropagation (BP) y de ajuste de pesos Levenberg- Marquardt (LM) para la predicción del rendimiento de extracción de aceite a partir de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), para el entrenamiento y validación, se emplearon los datos en cantidad de carga en gramos como variable de entrada y el rendimiento de aceite en porcentaje como variable de salida, los cuales se obtuvieron en la técnica de destilación por arrastre de vapor usando la trampa Clevenger. Se estudiaron distintas arquitecturas variando el número de neuronas en la capa oculta, encontrando que la RNA con 9 neuronas brindaba el mejor ajuste de los datos experimentales, lo que indica mayor eficacia y exactitud frente a las otras arquitecturas analizadas. Con respecto a los datos experimentales, se evaluó el error cuadrado medio porcentual (ECM%) y el coeficiente de determinación R^2 , encontrándose para la RNA valores de ECM%=0.0040 y $R^2=0.9929$, comprobando que la hipótesis de investigación es verdadera. Estos resultados muestran la eficacia y potencialidad del uso de las redes neuronales para el modelado y predicción del rendimiento de extracción de aceite de naranja dentro del dominio de los datos de entrenamiento.

Palabras Claves: Redes neuronales artificiales, algoritmo backpropagation, convergencia, topología, extracción, aceite esencial

Abstract

In this work, a feedforward Artificial Neural Network (ANN) with 9 hidden layers and backpropagation (BP) training algorithms and Levenberg-Marquardt (LM) weight adjustment algorithms were used for the prediction of oil extraction yield from the orange peel (*Citrus sinensis*). For training and validation, data were used in the amount of load in grams as an input variable and the oil yield in percentage as an output variable, which were obtained in the distillation technique by steam entrainment using the Clevenger trap. Different architectures were studied by varying the number of neurons in the hidden layer, finding that the ANN with 9 neurons provided the best fit of the experimental data, which indicates greater efficiency and accuracy compared to the other architectures analyzed. Regarding the experimental data, the percentage mean square error (MSE%) and the determination coefficient R^2 , were evaluated, finding for the ANN values of MSE%=0.0040 and $R^2=0.9929$, proving that the hypothesis research is true. These results show the efficacy and potential of using neural networks for modeling and prediction of orange oil extraction performance within the domain of training data.

Keywords: Artificial neural networks, backpropagation algorithm, convergence, topology, extraction, essential oil.

1. Introducción

La industria de los aceites esenciales ha experimentado un gran crecimiento gracias a los avances tecnológicos y las revoluciones industriales. El mercado de los jugos y néctares genera una gran cantidad de desechos provenientes de la pulpa de frutas, lo cual representa una carga para el medio ambiente. En el cantón Las Naves, provincia de Bolívar, la producción de naranjas es significativa, y los residuos generados pueden ser utilizados para obtener productos con valor agregado, como esencias, perfumes, champús, jabones, entre otros, a partir de los aceites esenciales presentes en la cáscara.

En la Ingeniería Química, es importante desarrollar modelos matemáticos para predecir la eficiencia de los procesos de separación físico o químico. En este sentido, las redes neuronales artificiales (RNAs) están ganando popularidad como herramientas de modelado debido a su

alta capacidad. Los investigadores están explorando cómo aplicar las RNAs para desarrollar nuevos controladores PID, inspirados en el funcionamiento de las neuronas biológicas en términos de aprendizaje y memoria. Las RNAs pueden aprender de ejemplos y generalizarse para resolver diversos problemas, incluso con datos incompletos o erróneos.

En este trabajo de investigación, se propone realizar un experimento a escala de laboratorio para obtener aceites esenciales de la cáscara de naranja, específicamente de la especie *Citrus Sinensis* L. Además, se utilizará la herramienta de programación y cálculo matemático Matlab para desarrollar un modelo de RNA que permita predecir de manera más precisa la eficacia del proceso.

En los últimos años, el crecimiento de la actividad tecnológica ha sido alarmante, ya que los seres humanos

¹ Universidad de Guayaquil; sandra.fajardom@ug.edu.ec ; Guayaquil; Ecuador.

² Universidad de Guayaquil; anthony.freirec@ug.edu.ec ; Guayaquil; Ecuador.

³ Universidad de Guayaquil; michael.mejia@ug.edu.ec ; Guayaquil; Ecuador.

necesitan recursos para satisfacer sus necesidades y deseos. La tecnología se refiere al conjunto de conocimientos técnicos y científicos que permiten la creación y diseño de objetos y servicios para satisfacer las necesidades humanas. En este contexto, surge el concepto de red, que se refiere a un conjunto de entidades interconectadas que permiten el flujo de elementos materiales y no materiales entre sus puntos de conexión [1].

En busca de mejoras, los humanos han mostrado interés en comprender las funciones del cerebro y han desarrollado herramientas tecnológicas para emular sus funciones. El cerebro es un procesador de información con características complejas y especiales. Su función principal es procesar grandes cantidades de información sensorial de manera inmediata, combinarla y compararla con la información almacenada, y responder adecuadamente ante nuevas situaciones [2].

En este estudio se desarrolla un modelo de red neuronal artificial para imitar las capacidades de procesamiento de información del cerebro. Las computadoras convencionales son limitadas en su capacidad para interactuar con datos complejos y entornos variables, lo que hace que las redes neuronales sean útiles para resolver problemas donde los algoritmos tradicionales no son efectivos. Estos modelos pueden aplicarse a operaciones unitarias de Ingeniería Química, como la extracción de aceites esenciales a partir de residuos de naranja [3].

En Ecuador, se generan grandes cantidades de residuos, incluyendo residuos orgánicos, y la cáscara de naranja representa una fuente potencial de productos de valor agregado, como los aceites esenciales. Estos aceites tienen aplicaciones en diversas industrias, como la farmacéutica, alimentaria y cosmética. La extracción de aceites esenciales se realiza mediante métodos como la destilación por arrastre de vapor con la trampa Clevenger [4].

En la industria alimentaria, se valora cada vez más el uso de aditivos naturales en lugar de aditivos sintéticos debido a preocupaciones por la salud. Los aromas naturales son especialmente apreciados, ya que pueden mejorar la experiencia sensorial de los alimentos. Los métodos de extracción de aceites esenciales permiten obtener fragancias naturales que pueden ser utilizadas como aditivos aromáticos [5].

En resumen, este estudio se centra en el desarrollo de un modelo de red neuronal artificial para predecir la efectividad de la extracción de aceites esenciales de la cáscara de naranja. Se destaca el potencial de los residuos de naranja como fuente de valor agregado y la importancia de los aditivos naturales en la industria alimentaria.

Además, se mencionan los métodos de extracción utilizados, como la destilación por arrastre de vapor.

El naranjo (*Citrus sinensis*) es un árbol frutal perteneciente a la familia Rutáceas. Su fruto es la naranja dulce, de forma globosa u ovalada con un diámetro de 6-9 cm. Tiene una corteza poco rugosa de color naranja y una pulpa sin vesículas oleosas, y sus semillas son blancas. El árbol alcanza una altura de tres a cinco metros, con copa redondeada y ramas regulares. Posee un solo tronco derecho y cilíndrico que cambia de color de verde a gris. Las hojas son perennes, de tamaño mediano y alargadas, con base redondeada y terminadas en punta. Las flores aparecen solitarias o en racimos en las axilas de las hojas [6].

El naranjo es originario de zonas tropicales y subtropicales de Asia y se ha extendido a través del norte de África, el sudeste de Europa y América debido a su introducción por los europeos en el siglo XVI. Las flores del naranjo son utilizadas para obtener aceites esenciales que se emplean en perfumería y también tienen aplicaciones medicinales.

En resumen, el naranjo es un árbol frutal con características específicas, cuyo fruto es la naranja dulce. Su distribución geográfica se ha expandido gracias a la intervención humana, y las flores de este árbol tienen usos importantes en la industria de la perfumería y la medicina [7].



Fig. 1. Naranjas (*Citrus sinensis*) en el cantón Las Naves provincia de Bolívar
Fuente: [8]

El nivel de carbohidratos en los residuos de la cáscara de naranja es del 80.8%. Según los carbohidratos identificados son pectinas del 30-50%, azúcares (sacarosa, fructosa, glucosa), hemicelulosa, del 10-20% y celulosa del 20-40% [9].

Tabla 1. Composición Físicoquímica de la cáscara de naranja

Componentes Principales	(%)
Materia Seca	90,00



Proteína	6,00
Carbohidratos	62,70
Grasas	3,40
Fibra	13,00
Cenizas	6,90
Minerales	(%)
Calcio	2,00
Magnesio	0,16
Fosforo	0,10
Vitaminas	(mg/Kg)
Niacina	22,00
Riboflavina	22,20
Aminoácidos	(%)
Arginina	0,28
Lisina	0,20
Triptófano	0,06

Fuente: [10]

En la tabla 1, se observa la composición fisicoquímica de la cascara de naranja, en el cual se analiza que los componentes principales, como la materia seca, proteína, carbohidratos, fibra y cenizas que se encuentran en mayor proporción y aquellos denominados trazas, como ciertos minerales, vitaminas y aminoácidos en menor proporción. Estos datos experimentales nos ayudaran a saber el rendimiento al momento de extraer el aceite esencial.

1.1. Usos y aplicaciones industriales

La naranja tiene varios usos industriales debido a sus propiedades beneficiosas. Reduce el colesterol de baja intensidad y posee bioflavonoides con propiedades anticancerígenas que ayudan a prevenir el cáncer de mama y colon. La cáscara de naranja contiene vesículas con aceites esenciales que proporcionan aromas característicos y actúan como defensa contra plagas [11].

1.2. Aceites esenciales

El aceite esencial de naranja se utiliza ampliamente en la fabricación de productos para consumo humano. Sus características fungicidas lo hacen útil en la fabricación de repelentes de insectos y plaguicidas. También se utiliza en la elaboración de bebidas no alcohólicas, jarabes, complejos vitamínicos, perfumes, aguas de colonia, jabones y otros productos [12].

Los aceites esenciales son compuestos orgánicos volátiles obtenidos de plantas, bacterias u hongos. Son utilizados en la industria cosmética, alimentaria, farmacéutica y otros procesos industriales que requieren aromas y esencias.

Tienen diversas propiedades biológicas, como antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos, anticancerígenos e hipolipemiantes. Se pueden extraer mediante métodos como la destilación, prensado en frío, hidro-difusión, líquidos supercríticos y radiación de microondas [13].

Los aceites esenciales son mezclas complejas de más de 100 componentes diferentes, que incluyen compuestos alifáticos, fenilpropanos, monoterpenos y sesquiterpenos.

En resumen, la naranja tiene usos industriales debido a sus propiedades beneficiosas, especialmente en la producción de aceites esenciales. Estos aceites se utilizan en diversos sectores industriales y tienen propiedades biológicas importantes [14].

1.3. Métodos de Extracción de Aceites Esenciales

Según Fennema [15], es importante definir el método de extracción ya que esto influirá directamente sobre la calidad y cantidad del aceite esencial obtenido.

Kirk Donald y Othmer, mencionados por Guevara [16], manifiestan que existen una gran cantidad de técnicas donde se logra la extracción de las esencias de las materias primas que los contienen. Su elección va a depender de característica como:

- Características de la materia prima.
- Volatilidad de la esencia.
- El porcentaje de esencia en la planta.
- Las características de pureza y calidad que se desea obtener.

1.4. Neuronas Artificiales

La neurona artificial fue diseñada para "emular" las características del funcionamiento básico de la neurona biológica. En esencia, se aplica un conjunto de entradas a la neurona, cada una de las cuales representa una salida de otra neurona. Cada entrada se multiplica por su "peso" o ponderación correspondiente análoga al grado de conexión de la sinapsis. Todas las entradas ponderadas se suman y se determina el nivel de excitación o activación de la neurona [17]. Una representación vectorial del funcionamiento básico de una neurona artificial se indica según la siguiente ecuación

$$NET = X * W \quad (1)$$

Donde:

- NET = La Salida
- X = El vector de Entrada
- W = El vector de Salida

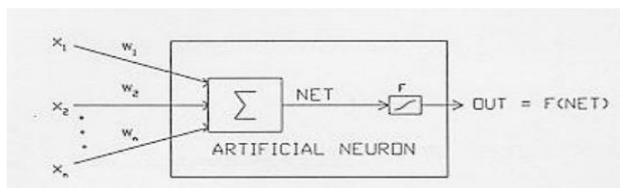


Fig. 2. Modelo de neurona artificial

Fuente: [18]

Las funciones de activación más utilizadas son la función Sigmoid y Tangente hiperbólica expresadas en la Tabla (3).

Tabla 2. Funciones de activación

Sigmoid	$OUT = 1/(1 + e^{-NET})$
Tangente Hiperbólica	$OUT = \tanh(NET)$

Fuente: Xabier Basogain Olabe, Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones, [19]

En la tabla 2, podemos observar las funciones F más utilizadas, son la función Sigmoid y Tangente hiperbólica ya que estas devuelven una salida que será generada por la neurona dada una entrada o conjunto de entradas, es decir cada una de las capas que conforman la red neuronal tienen una función de activación que permitirá reconstruir o predecir.

Este tipo de modelo de neurona artificial ignora muchas de las características de las neuronas biológicas. Entre ellas destaca la omisión de retardos y de sincronismo en la generación de la salida. No obstante, a pesar de estas limitaciones las redes construidas con este tipo de neurona artificial presentan cualidades y atributos con cierta similitud a la de los sistemas biológicos [20].

1.5. Estructura de las Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Los sistemas neuronales artificiales imitan la estructura del hardware del sistema nervioso. Cada neurona realiza una función matemática. Las neuronas se agrupan en capas, constituyendo una red neuronal. Una determinada red neuronal está confeccionada y entrenada para llevar a cabo una labor específica. Finalmente, una o varias redes, más las interfaces con el entorno, conforman el sistema global [21].

En las redes neuronales biológicas, las neuronas corresponden a los elementos de proceso. Las interconexiones se realizan por medio de las ramas de salida (axones) que producen un número variable de conexiones (sinapsis) con otras neuronas o con otras partes como músculos y glándulas. Las redes neuronales son sistemas de elementos simples de proceso muy interconectados.

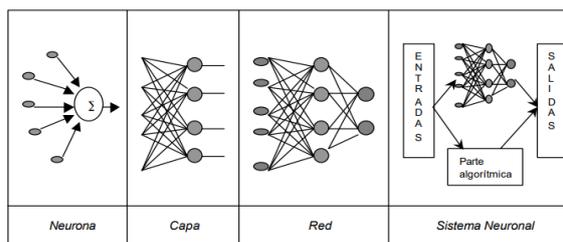


Fig. 3. Estructura jerárquica de un sistema basado en redes neuronales artificiales

Fuente: [22]

La figura 3 muestra la complejidad de un sistema neuronal, ya que la salida obtenida de la red es el resultado de abundantes lazos de realimentación junto con no linealidades de los elementos de proceso y cambios adaptativos de sus parámetros. [23].

Formalmente, un sistema neuronal o conexionista está compuesto de los siguientes elementos:

- Un conjunto de procesadores elementales o neuronas artificiales.
- Un patrón de conectividad o arquitectura.
- Una dinámica de activaciones.
- Una regla o dinámica de aprendizaje.
- El entorno donde opera.

2. Materiales y métodos

El naranjo Citrus Sinensis, se lo obtuvo en la provincia de Bolívar, cantón las Naves a 88 km del noroccidente de Guaranda. Esta región del país goza de un bosque tropical beneficioso para el desarrollo de esta especie. Se recolectó 3 sacos de este material cítrico, e inmediatamente se procedió al traslado a la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas para su reacondicionamiento y la posterior extracción del aceite esencial.



Fig. 4. Recepción de la materia prima.

2.1. Caracterización de la naranja especie *Citrus sinensis*.

1. **Grado de madurez:** Se evaluó el fruto pintón, determinándose el índice de madurez, que se expresa mediante la relación °Brix/Acidez valorable. Esto indica que mientras la razón °Brix/Acidez valorable aumente avanza directamente la maduración [24].

2. **Determinación biométrica:** Se tomaron al azar 10 naranjas medianas pintonas, y se procedió a calcular el porcentaje de cáscara y pulpa, se determinó pesando por separado la pulpa de la cáscara, y mediante las siguientes formulas, obtenemos el % cáscara y % pulpa.

$$\% \text{cáscara} = (W_c / W_t) * 100 \quad (2)$$

$$\% \text{pulpa} = \left(\frac{W_t - W_c}{W_t} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde: W_t : peso total del fruto
 W_c : peso de la cáscara

2.2. Extracción por destilación con arrastre de vapor mediante la trampa Clevenger

La cáscara una vez pesada con cargas de 200 g, 300 g, 350 g, 400 g y 500 g se alimentaron al equipo, colocando 1,250 litros de agua destilada en el recipiente. El vapor que se genera va arrastrando todos los componentes volátiles que posee la superficie de la cáscara, para luego con ayuda del refrigerante condensarse en una mezcla de agua y aceite esencial. El tiempo que se estableció fue de 30 minutos de destilación una vez que ha caído la primera gota de condensado.

2.3. Diseño Experimental

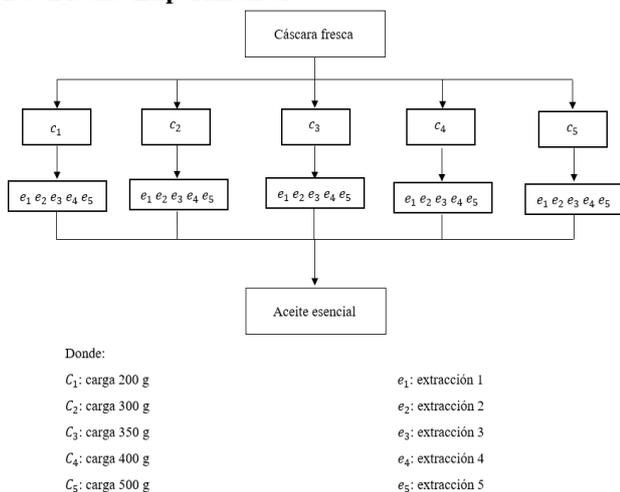


Fig. 5. Diseño experimental para la extracción de aceite esencial a partir de Cáscara de naranja por el método de destilación por arrastre de vapor con la trampa Clevenger

2.4. Prueba estadística

Como para cada carga inicial de cáscara se van a realizar un mínimo de 5 extracciones se considera un tamaño de

muestra pequeño ya que $n < 30$, por lo tanto, usaremos el estadístico t para construir los intervalos de confianza.

2.5. Construcción de los modelos matemáticos predictivos

Para modelar la relación entre la cantidad de carga inicial y el rendimiento del proceso de extracción de aceite esencial se procedió a realizar un diagrama de dispersión para analizar qué tipo de relación existe entre las 2 variables.

Con el programa de Matlab se procedió a revisar varias líneas de tendencia tales como: lineal, una polinómica de grado 2 y una logarítmica, donde posteriormente se evaluó su capacidad predictiva con la carga de verificación de 350 g.

2.6. Construcción de la red neuronal artificial (RNA)

Se implementó una red perceptrón multicapa para predecir el rendimiento del proceso de extracción de aceite esencial de la cáscara de naranja en función de la cantidad de carga inicial. Se consideraron dos factores importantes para asegurar el éxito del modelo neuronal: el número de capas ocultas y el número de neuronas por capa.

Se utilizó una capa oculta y una capa de salida en la red, con una función de activación sigmoideal para la capa oculta y una función lineal para la capa de salida. Se construyeron varias redes variando el número de neuronas en la capa oculta, entre 2 y 10, para encontrar la mejor arquitectura. Se empleó el algoritmo de backpropagation para el entrenamiento supervisado, debido a su rápido ajuste y fácil aplicación. El algoritmo de Levenberg-Marquardt se utilizó para ajustar los pesos de las conexiones entre las neuronas de cada capa.

El entrenamiento y la validación se realizaron utilizando diferentes cantidades de carga (200g, 300g, 400g y 500g) como variable de entrada, y los rendimientos promedios en porcentaje como variable de salida. El 70% de los datos se destinaron al entrenamiento, mientras que el 30% restante se utilizó para la validación. El entrenamiento continuó hasta que el error en los datos de validación alcanzó un valor mínimo. Para evaluar la capacidad predictiva de la red, se utilizó un punto medio dentro del rango de experimentación, en este caso, 350g.

La efectividad de la red neuronal se evaluó mediante dos indicadores: el error cuadrático medio porcentual (EMC%) y el coeficiente de determinación cuadrático (R^2). Estos indicadores se calcularon utilizando expresiones específicas y permiten medir la precisión de la red para estimar los valores de rendimiento del proceso en los datos de prueba.

En resumen, se utilizó una red neuronal para predecir el rendimiento del proceso de extracción de aceite esencial de

la cáscara de naranja. Se ajustaron los parámetros de la red y se utilizaron indicadores de precisión para evaluar su capacidad predictiva. Los resultados obtenidos permiten estimar con mayor precisión los rendimientos del proceso en función de la cantidad de carga inicial.

$$EMC\% = 100 * \left(\frac{\sum_{i=1}^N (m_i^{exp} - m_i^{pred})^2}{N} \right) \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (m_i^{exp} - m_i^{pred})^2}{\sum_{i=1}^N (m_i^{exp} - \bar{m}^{pred})^2} \quad (5)$$

Donde m_i^{exp} representa el valor experimental, m_i^{pred} representa el valor predicho por la red, \bar{m}^{pred} el valor de la respuesta promedio y N el número total de datos. A su vez estos dos parámetros son importantes para comprar el rendimiento de las diferentes arquitecturas de RNAs propuestas para estimar cual es la mejor.

3. Resultados

En la tabla 3, se muestra el indicador de madurez de la naranja que se seleccionó.

Tabla 3. Indicador del grado de madurez de la naranja especie Citrus sinensis

Color Fruta	pH	°Brix (%)	A.T(%)	I.M
Pintona (amarillenta)	4,84	1,9	0,81	2,35

A.T=Acidez Titulable
I.M= Índice de Madurez

A la relación entre los °Brix/Acidez titulable se le denomina índice de madurez, y para el desarrollo del presente trabajo, se utilizó la naranja pintona cuyo índice de madure fue de 2,35.

3.1. Análisis estadístico.

El comportamiento de los rendimientos de la extracción de aceite esencial (%), por la técnica de destilación por arrastre de vapor, con cantidades de carga (200, 300, 400, 500) gramos, se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Promedios del %rendimiento de aceite esencial en función de la carga (g)

Tamaño (cm ²)	Cantidades de carga (g)			
	200	300	400	500
1,5	0,0625	0,0971	0,1473	0,1674

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 6, para un tamaño establecido de cáscara a mayor cantidad de carga introducida al sistema, mayor será el rendimiento del proceso, siendo este un valor promedio de 0,1674% para una carga de 500 g.

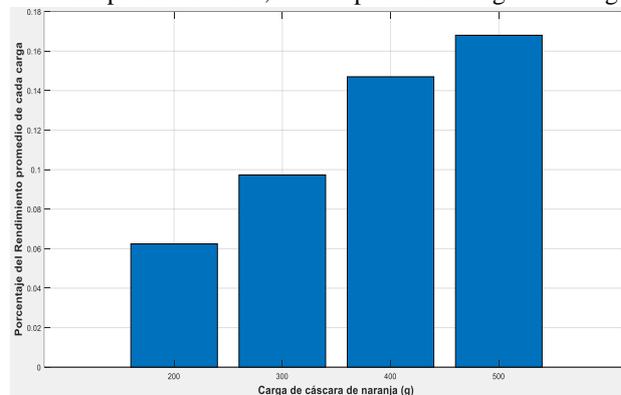


Fig. 6. Diagrama de barras de %Rendimiento Vs Cantidad de cáscara

3.2. Modelo matemático mediante la técnica de ajuste de curvas.

En la figura 7 se logra apreciar un diagrama de dispersión de los rendimientos obtenidos en la experimentación en función de la cantidad de cáscara (g) que se utilizó, esto nos ayudará para poder determinar qué tipo de relación existe entre estas dos variables. En la figura 9 se puede apreciar que se procedió a analizar los datos con 3 modelos matemáticos: lineal, polinómica de grado 2 y una logarítmica, junto con su coeficiente de determinación (R^2)

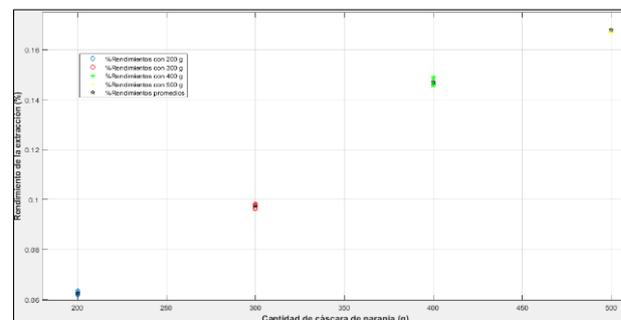


Fig. 7. Diagrama de dispersión del (%) Rendimiento vs Cantidad de cáscara (g)

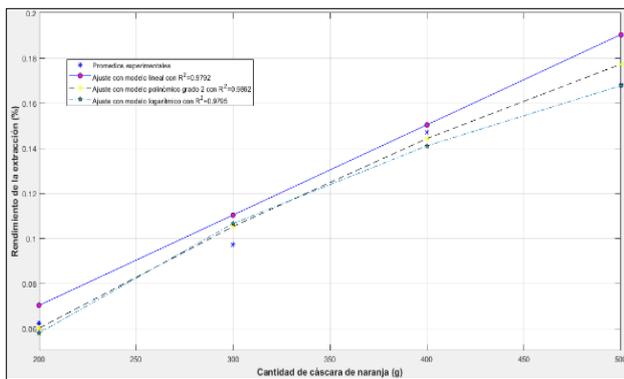


Fig. 8. Ajuste de los datos experimentales con diversos modelos matemáticos y la presentación de su R^2

En la tabla 5, se logra apreciar cada una de las ecuaciones de los 3 modelos matemáticos que se presentaron en la figura anterior con su respectivo R^2 , y logramos apreciar que el ajuste polinómico de grado 2 presenta el mayor coeficiente de determinación frente a los otros 2 ajustes realizados.

Tabla 5. Comparación predictiva del rendimiento de los diferentes ajustes realizados.

Ajuste	Ecuación	R^2	%Rendimiento predicho con una carga de 350 g
Lineal	$\%Rendimiento=0,0004*(carga (g))-0,0096$	0,979	0,1304
Logarítmica	$\%Rendimiento=0,1196*\ln(carga (g))-0,5755$	0,979	0,1251
Polinómico	$\%Rendimiento=-3 \times 10^{-7} * (carga (g))^2+0,0006*(carga (g))-0,0477$	0,986	0,1255

Sin embargo, la tabla 6 se logra apreciar el error que existe entre el valor experimental del rendimiento y el valor predicho por cada uno de los modelos matemáticos con la carga de 350 g. El valor experimental promedio del rendimiento para esta carga fue del 0,1158%, y podemos darnos cuenta de que el modelo logarítmico es el mejor ya que presenta un error menor, aunque su R^2 es el segundo mejor.

Tabla 6. Comparación entre los diferentes modelos mediante el cálculo del error con el valor experimental obtenido

Ajuste	R^2	%Rendimiento predicho con una carga de 350 g	Error (%)
Lineal	0,9792	0,1304	12,6079
Logarítmica	0,9795	0,1251	8,0310
Polinómica	0,9862	0,1255	8,3765

Ajuste	R^2	EMC (%)
Lineal	0,9792	12,6079
Logarítmica	0,9795	8,0310
Polinómica	0,9862	8,3765

3.3. Modelo de red neuronal artificial.

En la tabla 7, podemos observar la cantidad óptima de neuronas en la capa oculta que se determinó mediante un proceso de prueba y error, minimizando la diferencia entre los valores experimentales y los predichos por la red en el punto de verificación. También se logra apreciar los valores del ECM% y R^2 de cada una de las predicciones realizadas con distintos números de neuronas en la capa oculta.

Tabla 7. Capacidad predictiva de la eficiencia con diferentes números de neuronas en la capa oculta.

Número de neuronas en la capa oculta	Valor de rendimiento predicho	R^2	EMC (%)
2	0,0990	0,8522	0,0314
3	0,0941	0,5165	0,0503
4	0,1070	0,9452	0,0110
5	0,1634	0,7618	0,2295
6	0,0983	0,9528	0,0339
7	0,1170	0,9574	0,0034
8	0,1599	0,9806	0,1975
9	0,1187	0,9929	0,0040
10	0,1217	0,9984	0,0067

Se encontró que la RNA con una arquitectura de 9 neuronas en la capa oculta proporciona la mejor predicción.

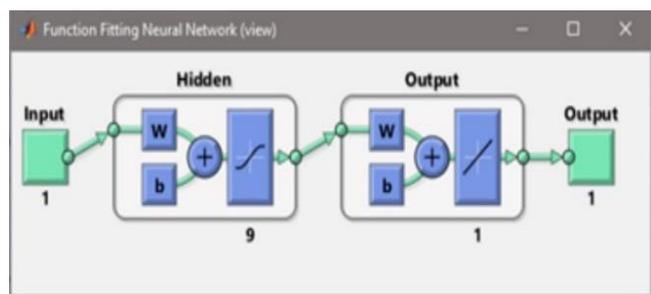


Fig. 9. Diagrama esquemático del modelo óptimo de RNA Fuente: Elaboración propia

3.4. Comparación de los valores predichos por el modelo matemático logarítmico, la RNA y experimentales.

La figura 10 muestra los datos de rendimientos de extracción de aceite esencial en función de la cantidad de cáscara de naranja, la curva de ajuste del modelo

matemático y los valores predichos por la RNA (red neuronal artificial).

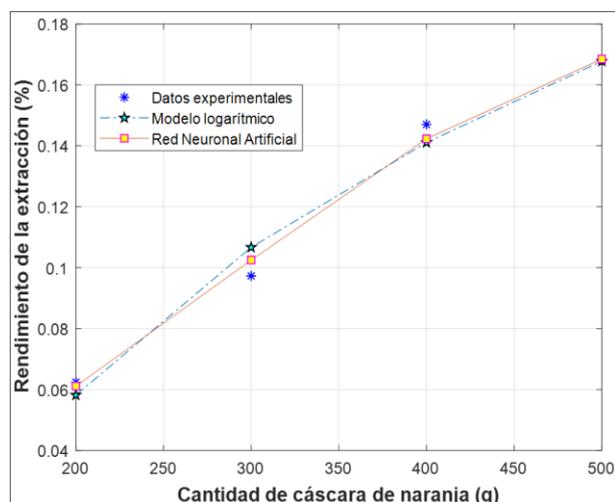


Fig. 10. Valores experimentales del Rendimiento (%), modelo logarítmico y la RNA

Además, se logra apreciar que los datos predichos por la red neuronal artificial presentan una elevada correspondencia con la curva de ajuste proporcionada por el modelo matemático, mostrando la capacidad de la red para captar interacciones lineales y no lineales asociado con el proceso de extracción.

Y como se muestra en la tabla 8, la red neuronal presenta una elevada capacidad predictiva en el punto de verificación frente a los demás modelos matemáticos.

Tabla 8. Demostración de la capacidad predictiva de la red neuronal frente a los demás modelos

Modelo	R ²	%Rendimiento predicho con una carga de 350 g	Error (%)
Lineal	0,9792	0,1304	12,6079
Logarítmica	0,9795	0,1251	8,0310
Polinómica	0,9862	0,1255	8,3765
Red Neuronal Artificial	0,9929	0,1187	2,4431

Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

Se logró la caracterización de la cáscara de naranja en el laboratorio acreditado por la ISO 17025 Analytical Laboratories en sus parámetros físicos-químicos más importante tales como grado de madurez, humedad, contenido de cenizas, azúcares reductores- Los resultados obtenidos fueron de suma importancia ya que el proceso de extracción se lo desarrolló con ese tipo de materia prima, y el modelo predictivo de RNA solo funcionará para

extracciones realizadas con este tipo de cáscara bajo las condiciones físico-químicas establecidas en este trabajo.

La técnica de destilación por arrastre de vapor usando la trampa Clevenger permitió obtener un rendimiento promedio de extracción del 0.1680% para los 500 g de carga inicial. Por lo tanto, está dentro del rango de 0.5-0.8% de rendimientos con este tipo de materia prima, usando este método de extracción ya que pueden oscilar dependiendo de la variedad, estado de madurez de la fruta y método usado de extracción. El modelo de RNA óptimo desarrollado con el software Matlab R2019a fue el que tuvo 9 neuronas en la capa oculta, tuvo como variable de entrada la cantidad de carga en gramos y como variable de salida el rendimiento en porcentaje; este modelo mostró mayor exactitud frente a las otras arquitecturas analizadas. Esto se puede demostrar con los valores de los parámetros del coeficiente de determinación, $R^2 = 0.9929$ y el error cuadrático medio porcentual, $EMC\% = 0.0040$, por lo tanto, se comprobó que la hipótesis de investigación es verdadera.

Se pudo observar la capacidad predictiva de la red para relacionar las variables, demostrando su potencialidad de inteligencia artificial para el modelado y la predicción de procesos físicos, como se pudo observar en la aplicación que se le dio en el presente trabajo, sus resultados fueron mejores y más cercanos a los experimentales frente a los ajustes matemáticos que comúnmente se suelen realizar en la carrera de Ingeniería Química para relacionar las distintas variables de proceso.

Referencias

- [M. Moreno, «Redes Neuronales Artificiales aplicadas al Análisis de 1 Datos,» *tesisenred.net*, pp. 17-31, 2002.]
- [E. A. Heredia, «NARANJA ESTUDIO AGROINDUSTRIAL DEL 2 ECUADOR,» 4 Julio 2008. [En línea]. Available:] <https://issuu.com/mipro/docs/naranja>.
- [A. Badui, «APLICACIÓN DEL LECHO POR FUENTE- 3 FLUIDIZADO “SPOUT-FLUID BED” CON SÓLIDOS INERTES] A LA MICROENCAPSULACIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE NARANJA,» *sappi.ipn.mx/*, pp. 1-45, 2008.
- [L. Balboa, «Obtención Experimental de aceite esencial y 4 subproducto a partir de la cáscara de naranja (Citrus Sinensis),»] *repositorio.umsa.bo*, pp. 1-10, 2019.
- [J. M. Huayta, «EFECTO HIPOLIPEMIANTE DEL ACEITE 5 ESENCIAL DE CÁSCARA DE NARANJA (Citrus sinensis) EN] RATTUS NORVEGICUS VARIEDAD WISTAR,» *repositorio.unsa.edu.pe*, pp. 1-25, 2017.
- [P. A. Reyes-Ortiz y Colaboradores, «1 PRODUCCIÓN DE 6 NARANJA (Citrus sinensis L. Osbeck) VARIEDAD VALENCIA] TARDÍA BAJO MANEJO ORGÁNICO EN SAN PABLO, PAPANTLA DE OLARTE; VERACRUZ.,» 13 Junio 2017. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320110143_PRODUCCI



- ON_DE_NARANJA_Citrus_sinensis_L_Osbeck_VARIEDAD_V
ALENCIA. 2
]
- [A. Contreras-Oliva y Colaboradores, «CALIDAD
7 FÍSICOQUÍMICA, SENSORIAL Y NUTRICIONAL DE
] NARANJAS CV. VALENCIA RECUBIERTAS CON
QUITOSANO.» 15 Agosto 2012. [En línea]. Available:
http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n5/v46n5a2.pdf. 2
]
- [Mejía y Freire, «La naranja está barata.» *El Diario Comercio*
8 *Ecuador*, vol. 1, n° 1, p. 1, 2021. 2
]
- [A. C. Trejo y A. C. Krauser, «Química de los carbohidratos.» 16
9 Enero 2013. [En línea]. Available:
] https://www.researchgate.net/publication/286640492_Quimica_de_los_Carbohidratos. 2
- [A. Germán, «Producción de enzimas pectinasas por actinomicetos
1 en cultivo sumergido utilizando pectina y cáscara de naranja.»
0 *sisbib.unmsm.edu.pe*, pp. 4-6, 2014. 4
]
- [A. E. Q. Valle, «UTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE CÁSCARA
1 DE NARANJA PARA LA PREPARACIÓN DE UN
1 DESENGRASANTE DOMÉSTICO E INDUSTRIAL.»
] *repositorio.uisek.edu.ec*, pp. 13-22, 2009. 2
- [A. Castañeda, «Actividad antimicrobiana del aceite de naranja
1 residual.» *Scielo*, pp. 1-6, 2018. 2
2
]
- [L. Mancilla, «Estudio del aceite esencial de la cáscara de la naranja
1 dulce (*Citrus sinensis*, variedad Valenciana) cultivada en Labateca
3 (Norte de Santander, Colombia).» *Redalyc.org*, pp. 4-7, 21 Febrero
3 2007. 4
]
- [D. Nuñez, «OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES A PARTIR
1 DE CORTEZA DE NARANJA "CITRUS SINENSIS" VARIEDAD
4 VALENCIANA.» *Researchgate.net*, pp. 6-13, Julio 2019. 6
]
- [O. Fennema, «Introducción a la Química de los Alimentos.»
1 *ceqa.files.wordpress.*, pp. 504-798, 2014. 5
5
]
- [O. Guevara, «Obtención de aceite esencial de citronela
1 (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala
6 piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la
] calidad del aceite.» *ria.utn.edu.ar*, pp. 62-82, Marzo 2014. 7
]
- [J. T. Barrera, «Redes Neuronales.» *cucei.udg.mx*, pp. 3-6, 2012.
1
7
]
- [J. Marshall, «Redes Neuronales.» *avellano.fis.usal.es*, pp. 1-3, 2013.
1
8
]
- [X. B. Olabe, «Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones.»
1 *ocw.ehu.es*, pp. 18-20, 2016. 9
9
]
- [E. C. A. Tepán, «Estudio de los Principales tipos de Redes
2 Neuronales y las Herramientas para su aplicación.»
0 *dspace.ups.edu.ec*, pp. 15-16, Febrero 2013. 2
]
- [H. G. Asensio, «Inteligencia artificial. Redes neuronales y
2 aplicaciones.» *it.uc3m.es*, pp. 2-6, 2011. 1
1
]
- [V. B. Pardo, «Machine Learning con TensorFlow.» *oa.upm.es*, pp.
2 1-16, 15 Enero 2017. 2