

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y**  
**BIOTECNOLOGÍA**



**CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS**

---

**Tema:** Estimación de la humedad crítica para el secado de manzanas (*Pyrus malus*) utilizando redes neuronales artificiales.

---

Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención de título de Ingeniera en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología

**Autor:** Nataly Verónica Sánchez Barreno

**Tutor:** Mg., Julio Cesar Sosa Cárdenas

**Ambato – Ecuador**

**Septiembre - 2022**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

Ing. Mg., Julio Cesar Sosa Cárdenas

### **Certifica:**

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 13 de Junio de 2022

Ing. Mg., Julio Cesar Sosa Cárdenas

C.I. 1716615084-9

**TUTOR**

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Nataly Verónica Sánchez Barreno, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y personales a excepción de las citas bibliográficas.



Nataly Verónica Sánchez Barreno

C.I. 185048959-0

**AUTORA**

## **APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

**Presidente del Tribunal**

Dr. Esteban Mauricio Fuentes Pérez  
C.I. 1803321502

Dr. Santiago Casado Rojo  
C.I. 1759126954

Ambato, 05 de Agosto del 2022

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo de Titulación o parte de él, como documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a blue oval. The signature reads "Verónica S." followed by a stylized monogram.

Nataly Verónica Sánchez Barreno

C.I. 185048959-0

**AUTORA**

## DEDICATORIA

*El presente proyecto es dedicado a Dios y a mi hermano Paul por bendecirme todos los días con salud, inteligencia, fuerzas y sabiduría para poder culminar esta etapa de mi vida y aun regalarme una familia, la cual ha sido pilar fundamental para mi desarrollo personal y profesional.*

*Orgullosamente a mi Madre, Gladys quien me ha apoyado en todos mis días de mi vida, y me enseñó que para lograr algo hay que trabajar duro y no rendirse.*

*A mi hermana Nancy, que es mi ejemplo a seguir, ella me ha enseñado que todo con esfuerzo se logra además de siempre estar para mí y brindándome todo su apoyo.*

*A mi cuñado Hugo, que ha estado dándome ánimos en esta etapa de mi vida.*

*A LMAB quien estuvo en esta etapa y me ayudo a crecer como persona y siempre me apoyo.*

*A todos mis amigos personas que han sido mi mano derecha y nunca me han soltado.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a mi hermano Paul que desde el cielo me cuida y me guía en cada paso que doy, se que este logro es de él y para él.*

*Agradezco profundamente a mi madre y hermana que nunca me dejaron sola, dándome todo su apoyo, espero que se sientan orgullosas de mí.*

*A LMAB, que llego a mi vida y me acompaño en momentos que más lo necesite, por su apoyo y cariño.*

*A mis maestros por brindarme todo su conocimiento en especial al Ing. Julio Sosa por su guía y enseñanzas.*

## ÍNDICE CONTENIDOS

<b>APROBACION DEL TUTOR</b> .....	ii
<b>DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD</b> .....	.iii
<b>APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO</b> .....	IV
<b>DERECHOS DE AUTOR</b> .....	V
<b>DEDICATORIA</b> .....	VI
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	VII
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	X
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	XI
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b> .....	XII
<b>RESUMEN</b> .....	XIII
<b>ABSTRAC</b> .....	XIV
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO</b> .....	1
<b>1.1 Antecedentes investigativos</b> .....	1
<b>1.2 Redes Neuronales Artificiales</b> .....	4
<b>1.3 Arquitectura de las redes neuronales artificiales</b> .....	8
<b>1.4 Deshidratación y secado de alimentos</b> .....	12
<b>1.5 Mecanismo de deshidratación de alimentos</b> .....	15
<b>1.6 Deshidratación de manzana(<i>Pyrus Malus</i>)</b> .....	18
<b>1.7 Objetivos</b> .....	20
<b>1.8 Variables</b> .....	21
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA</b> .....	22
<b>2.1 Enfoque</b> .....	22
<b>2.2. Materiales</b> .....	22
<b>2.3 Métodos</b> .....	23
2.3.1 Modalidad de investigación .....	23
<b>2.4 Descripción de la zona de estudio</b> .....	23
<b>2.5. Población</b> .....	24
<b>2.6. Recolección de la información</b> .....	24



<b>2.7. Determinación de las variables de entrada y variable de salida.....</b>	<b>25</b>
<b>2.8. Diseño de la Red Neuronal Artificial RNA.....</b>	<b>26</b>
<b>2.9. Prueba de Tukey .....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Análisis y discusión de resultados.....</b>	<b>30</b>
3.1.1 Pronóstico de la red neuronal .....	33
3.1.2 Análisis estadístico .....	34
<b>CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Conclusiones .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Recomendaciones .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>44</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Matriz de ingreso a Matlab®</i> .....	24
<b>Tabla 2.</b> <i>Datos de programación de la red neuronal artificial</i> .....	27
<b>Tabla 3.</b> <i>Resultado de la estimación de la humedad crítica comparada con el valor real</i> .....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Sinapsis neuronal</i> .....	6
<b>Figura 2.</b> <i>Neuronas artificiales</i> .....	7
<b>Figura 3.</b> <i>Representación de una red neuronal artificial</i> .....	8
<b>Figura 4.</b> <i>Función de activación o transferencia</i> .....	9
<b>Figura 5.</b> <i>Unidad de procesamiento de neurona artificial genérica</i> .....	10
<b>Figura 6.</b> <i>Ejemplo red neuronal tipo monocapa recurrente</i> .....	10
<b>Figura 7.</b> <i>Ejemplo secadero continuo</i> .....	14
<b>Figura 8.</b> <i>Curva de humedad total YT</i> .....	16
<b>Figura 9.</b> <i>Ejemplo curva de secado</i> .....	18
<b>Figura 10.</b> <i>Manzano (pyrus malus)</i> .....	19
<b>Figura 11.</b> <i>Estufa binder</i> .....	20
<b>Figura 12.</b> <i>Red neuronal artificial diseñada</i> .....	26
<b>Figura 13.</b> <i>Red neuronal artificial diseñada</i> .....	28
<b>Figura 14.</b> <i>Programación de la red neuronal artificial en matlab®</i> .....	29
<b>Figura 15.</b> <i>Resultado entrenamiento de la red neuronal artificial</i> .....	30
<b>Figura 16.</b> <i>Resultado entrenamiento y ajuste de la red neuronal artificial con retro propagación</i> .....	31
<b>Figura 17.</b> <i>Resultado de la estimación del error con la red neuronal artificial con retro propagación</i> .....	32
<b>Figura 18.</b> <i>Resultado del análisis de varianza y prueba tukey</i> .....	35
<b>Figura 19.</b> <i>Resultado prueba tukey entre valores de humedad crítica de curvas de secado y las comparadas con la red neuronal</i> .....	36
<b>Figura 20.</b> <i>Prueba t para una media</i> .....	36

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1 y 2.</b> Balances de masas.....	13
<b>Ecuación 3.</b> Balance de materia para secadero continuo .....	14
<b>Ecuación 4.</b> Balance de energía para secadero continuo.....	14
<b>Ecuación 5 y 6.</b> Calores latentes .....	15
<b>Ecuación 7.</b> Contenido de humedad total.....	16
<b>Ecuación 8.</b> Humedad libre .....	17

## RESUMEN

El uso de redes neuronales artificiales como herramienta de predicción en la ciencia de los alimentos toma cada vez más importancia. Este estudio busca determinar el error de la predicción de la Humedad Crítica en el secado de manzana (*Pyrus malus*) utilizando redes neuronales.

En primer lugar, se desarrolló una matriz base conformada por 29 parámetros físicos experimentales y una variable de salida. Estas variables se seleccionaron mediante datos experimentales de curvas de secados para la manzana (*Pyrus malus*) de 30 trabajos similares ya desarrollados. A continuación, se utilizó el software MATLAB® con el diseño de la red neuronal artificial RNA utilizando el algoritmo de retro propagación RP conformada de cuatro capas, la primera capa de entrada tiene 15 neuronas receptoras estáticas, la segunda capa que es oculta dispone de 10 neuronas ocultas, la tercera capa es de suma y dispone una neurona dinámica, la capa final dispone de una neurona de salida estática. La RNA RP estimó la Humedad Crítica obteniendo el 90 por ciento de los resultados con errores de cálculo menos al 1 y el 10 por ciento con errores menos del 2,38 por ciento con un entrenamiento de la red que finalizó en 7 etapas.

Finalmente, los resultados demostraron que la humedad crítica se estimó numéricamente para el secado de manzana (*Pyrus malus*) a través de los modelos neuronales. Este tipo de modelo de neuronas representa. El análisis estadístico calculó una confiabilidad del 99,99% de las respuestas obtenidas de la red neuronal artificial y el valor real.

**Palabras Claves:** Redes Neuronales Artificiales, aplicaciones agroindustriales, deshidratación de alimentos, secado de alimentos, manzanas

## ABSTRAC

The use of artificial neural networks as a prediction tool in food science is becoming increasingly important. This study seeks to determine the error of the prediction of the Critical Humidity in the drying of apple (*Pyrus malus*) using neural networks.

First, a base matrix was developed consisting of 29 experimental physical parameters and one output variable. These variables were selected through experimental data of drying curves for apple (*Pyrus malus*) from 30 similar works already developed. Next, the MATLAB® software was used to design the artificial neural network RNA using the four-layer conformed RP back propagation algorithm, where in the first input layer it has 15 static receptor neurons, in the second layer that is hidden it has of 10 hidden neurons, the third layer is sum and has a dynamic neuron, the final layer has a static output neuron. The RNA RP estimated the Critical Humidity obtaining 90% of the results with calculation errors less than 1% and 10% with errors less than 2.38% with a network training that ended in 7 stages.

Finally, the results showed that the critical humidity was numerically estimated for apple (*Pyrus malus*) drying through neural models. This type of model of neurons represents. The statistical analysis calculated a reliability of 99.99% of the responses obtained from the artificial neural network and the real value.

**Keywords:** Artificial neural networks, agroindustrial applications, food dehydration, food drying, apples.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes investigativos

La tendencia mundial en consumo de alimentos es a consumir productos ecológicos y sobre todo saludables. Uno de los porcentajes más representativos es el del consumo de los alimentos deshidratados, principalmente en Estados Unidos y Europa. En Ecuador el consumo de productos secos y deshidratados se hace en mercados de consumo indirectos como en: a) elementos procesados para sopas, b) elementos deshidratados para fabricar salsas, c) productos deshidratados para preparar té e infusiones, d) platos preparados o congelados, e) especias deshidratadas, f) snacks para desayunos integrales, y g) snacks de frutos secos. La tendencia por los beneficios en la salud del uso de los alimentos deshidratados ha sido objeto de amplias investigaciones que se han desarrollado y avalado por universidades e institutos epidemiológicos de alto prestigio académico. Por otro lado **La Sociedad Española de Cardiología (2000)** menciona que: *“la ingesta de alimentos deshidratados es una medida fácil para prevenir enfermedades que son la mayor causa de morbilidad y mortalidad del mundo occidental”* (**Antonio Vega, Chacana, & Lemus, 2006**), por lo tanto los frutos secos con alto contenido de minerales, fibra, vitaminas, son alimentos de gran valor nutricional por su facilidad en aportar una extensa variedad de sustancias químicas beneficiosas para el organismo humano (**de la Sociedad Española et al., 2016**).

Ospina J, et al, 2007 dicen que: “*el crecimiento poblacional incide como factor determinante del aumento de la pobreza, hambre y deterioro de la salud*” (Abril, Martin, & Díaz, 2007); además a **Organización de la Naciones Unidas (2011)** señaló que: “ *el hambre y desnutrición había alcanzado los 1000 millones de personas en el mundo*”(Rosset & Ávila, 2008). Pero resulta contradictorio analizar que en los últimos 20 años, existen alimentos suficientes para alimentar a la población de todo el mundo, sin embargo estos no están llegando de una manera oportuna y adecuada siendo una de las principales causas la mala manipulación de los mismos por no contar con técnicas como la deshidratación (Bravo, 2009).

Este aumento de consumo a nivel mundial ha obligado a la ciencia a optimizar recursos y mejorar los procesos de ingeniería de alimentos en todo el mundo (Bisang & Campi, 2010). Debido al alto consumo de alimentos procesados, frutas especialmente, su producción se ve limitada a los métodos tradicionales de diseños de equipos. Para la manipulación industrial óptima y mejora de las condiciones: a) higiénicas, b) transporte y c) conservación la ingeniería de alimentos utiliza la deshidratación como herramienta fundamental y los secaderos como equipos donde el alimento quedará en las condiciones deseadas de proceso (Rodríguez Holguín & Duque Taborda, 2012). Pero considerar estas buenas prácticas de fabricación requiere de tiempos de experimentación muy largos y con cálculos tediosos y complejos. Uno de los parámetros importantes en el cálculo de la cinética de secado es la humedad crítica porque establece el cambio del comportamiento del alimento en función de una temperatura de proceso e instaurando la conducta crítica y post-crítica en ecuaciones que servirán para determinar los tiempos totales que regulan ese fenómeno en el diseño del secadero (A Vega, Andrés, & Fito, 2005).

Uno de los principales problemas de la pérdida de los alimentos en la cadena de producción industrial es el almacenamiento y los tiempos de vida de estos. Gran parte de estos no se deshidratan adecuadamente y principalmente las frutas, por lo que resulta en



pérdidas de hasta el 28% del producto en post-cosecha, encareciendo los costos de venta y afectando a la economía a escala global (**Anaya & Pechene, 2017**).

De los frutales de hoja caduca labrados en Ecuador, el manzano (*Pyrus malus*) ocupa un lugar significativo en consumo interno del país (**Pacbeco, 1981**). El manzano que pertenece a la familia Rosáceas que fue introducido en la época de la colonia y que su producción hasta la actualidad ha venido manteniéndose con las mismas técnicas tradicionales es una de las principales frutas de consumo en el centro del país. Aunque el Programa de Fruticultura del INIAP, en colaboración con la Cooperación Técnica Suiza (COTESU) han venido desde 1987 implementando técnicas y mejoras en sus granjas de producción experimental para lograr incrementar los ingresos del fruticultor y mejorar la calidad de la fruta (**Soria & León, 1992**). No han trabajado en su deshidratación por costos en la aplicación y desarrollo de la tecnología y sobre todo porque no existen alternativas a los cálculos que en su mayoría requieren de fases experimentales extensas y con consumo permanente de recursos de todo tipo (**Ferreira & Costa, 2009**).

Por otro lado, la deshidratación de la manzana (*Pyrus malus*) a escala industrial utiliza las propiedades del aire húmedo, los diagramas psicrométricos, la temperatura húmeda y la saturación adiabática del aire como fundamento para el cálculo del área y tiempo de secado. Pero los datos experimentales preliminares son siempre determinados a pequeña escala por los investigadores, tomando muestras del material y sometiendo al proceso de secado en condiciones controladas (**Castillo Martinez et al., 2015**). Estos resultados derivan en datos tabulados que siguen un proceso de cálculo para establecer el punto de quiebre en el secado a flujo constante. Determinando primero la humedad a la cual el proceso de secado se mantiene a velocidad de secado constante para luego empezar con un descenso gradual en función del tiempo. Luego se utiliza las ecuaciones que determinan estos dos escenarios: a) ante crítico y b) proscritico, para manejar el proceso de manera técnica y controlar los tiempos de exposición del fruto según nuestras necesidades (**Abad Paredes, 2015**). Todo este proceso requiere de mucho tiempo de

pre-investigación que determinan tiempos y gastos de recursos que no se pueden recuperar (**Martinez et al., 2014**).

La tecnología ha dado saltos gigantescos y la inteligencia artificial ha ayudado en muchas áreas de la ciencia a solucionar problemas que antes eran imposibles siquiera de poder pensar en resolver. Una de las aplicaciones de la inteligencia artificial utiliza redes neuronales artificiales para estimar cálculos que requieren a veces mucho tiempo o como en este caso requieren de una preparación experimental tediosa, agotadora y costosa (**Benítez, Escudero, Kanaan, & Rodó, 2014**).

En el trabajo realizado por **Gavilánez (2017)** dice que: “Las redes neuronales artificiales ayudan en la estimación de variables de salida con un margen de error bajo” (**Gavilánez Barrionuevo, 2021**). Pero estimaciones relacionadas con procesos de deshidratación de alimentos son muy escasas. Este trabajo ayuda a la determinación de la variable más importante en el proceso de deshidratación de la manzana (*Pyrus malus*) con la ayuda de una red formada por neuronas artificiales creadas en Matlab de datos experimentales reales.

## **1.2 Redes Neuronales Artificiales**

Una de las ramas más utilizadas y estudiadas dentro del contexto de la inteligencia artificial es el que corresponde a las Redes Neuronales Artificiales (**Larranaga, Inza, & Moujahid, 1997**). Siendo aquellas redes configuradas con la información de elementos procesadores de información de donde su interacción local depende de todo el conjunto formado en el sistema (**Olabe, 1998**).

Una de las principales características de estas redes neuronales artificiales es la de intentar replicar el comportamiento del cerebro en cuanto al aprendizaje en función de eventos sucedidos en el tiempo que alimentan la toma de decisiones futuras (**Matich, 2001**). Estos sistemas o RNA desarrollados mediante programación se establecen modelando a través de estructuras de procesamiento de cálculo emulado y con la configuración de una arquitectura de sistemas que imitan a la de la red de neuronas de origen biológico (**Bueno & Pons, 2007**).

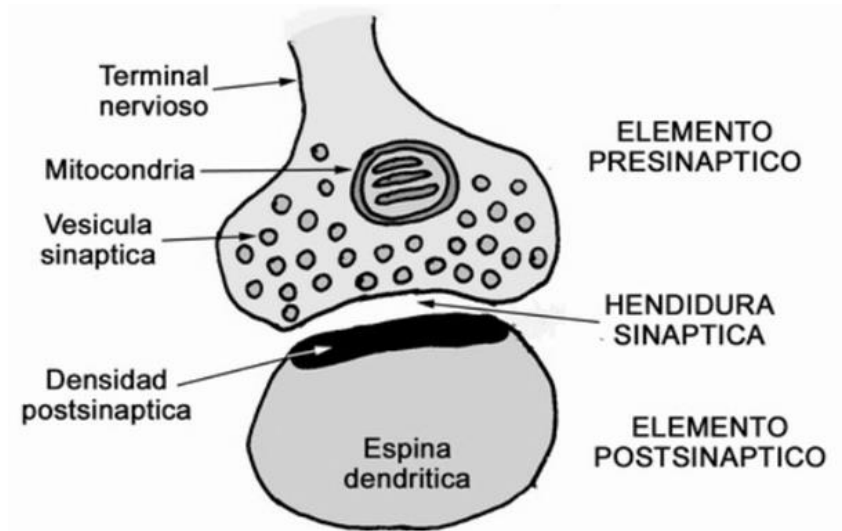
Así como el cerebro utiliza millones de neuronas para la toma de decisiones y procesamiento de la información el computador utiliza una arquitectura tipo Von Neumann con un microprocesador como parte principal (**del Brío & Cinca, 1995**). Aunque la similitud es muy significativa se debe mencionar que las neuronas no necesitan ser programadas, sino que su aprendizaje se basa en función a estímulos muy diferente al procesamiento en serio típico de los computadores tradicionales (**Goodin, 2013**).

Aunque las características y funcionamiento del cerebro y computador son parecidas se debe mencionar las principales diferencias: a) la velocidad de proceso de un computador supera en  $10^{-5}$  s, b) además el estilo de procesamiento del cerebro humano es paralelo y del computador es secuencial o en serie, c) las conexiones del cerebro son 10000 por procesador y del computador son pocas, d) la tolerancia a los fallos en el cerebro humano es amplia en cambio en el computador es casi nula, e) el tipo de control de procesos en el cerebro humano es democrático o auto-organizado en cambio en el computador es dictatorial o centralizado, f) el almacenamiento en el computador es en posiciones precisas en cambio en el cerebro humano es distribuido, y g) existente una diferencia superior de  $10^{-10}$  J en consumo de energía por parte de la computadora (**Rengifo Bedoya & Porras Galindo**).

El elemento principal de un sistema tipo neuronal biológico es una célula con todos sus elementos, cosa que se replica en la neurona artificial replicando el córtex cerebral con las capas coexistiendo en una organización vertical en forma de columnas. Así mismo replica los grupos neuronales ubicados en forma específica del cerebro, y los subgrupos incluyen varios millones de células neuronas (Larranaga et al., 1997).

Las neuronas biológicas constituyen procesadores de información entre sí y constan de: a) el canal de recepción para la información, b) el órgano de cómputo, c) el canal de salida, con estos elementos la neurona logra la conexión en la sinapsis como se muestra en la figura 1.

**Figura 1.** Sinapsis neuronal



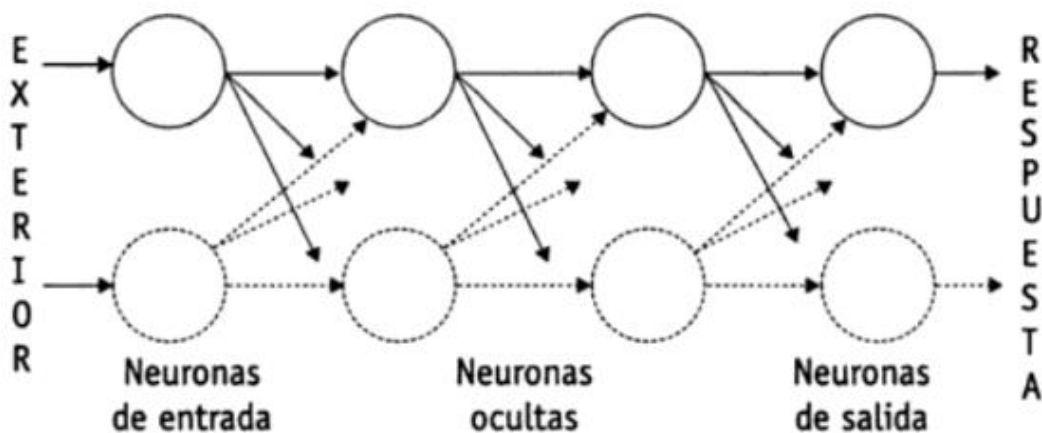
**Nota:** Frente a un estímulo la neurona transmite la información. La señal eléctrica permanece en el interior y la química en el exterior. En la figura se observa como puntos de color la interacción. **Fuente:** (Luján, 2004).

La sinapsis es un mecanismo complejo de intercambio neuroquímico y molecular antes y después que se dé la unión sináptica. De todo esta gama de sustancias presentan una importancia especial las proteínas sinápticas, los neurotransmisores y los receptores, dado que actúan sobre la función cerebral (**Hernández-Muela, Mulas, & Mattos, 2004**).

Las RNA son modelos de cálculo, que utilizan algoritmos eficientes y permiten el aprendizaje de patrones, clasificación y optimización. Las RNA se definen como grafos integrado por un conjunto de vértices con conexiones rígidas si se asignan sentido o no rígidas cuando las conexiones son bidireccionales (**Isasi Vinuela & Galván León, 2004**).

La unión de neuronas artificiales (NA) constituyen una RNA, existen algunos tipos de NA como se muestra en la Figura 2.

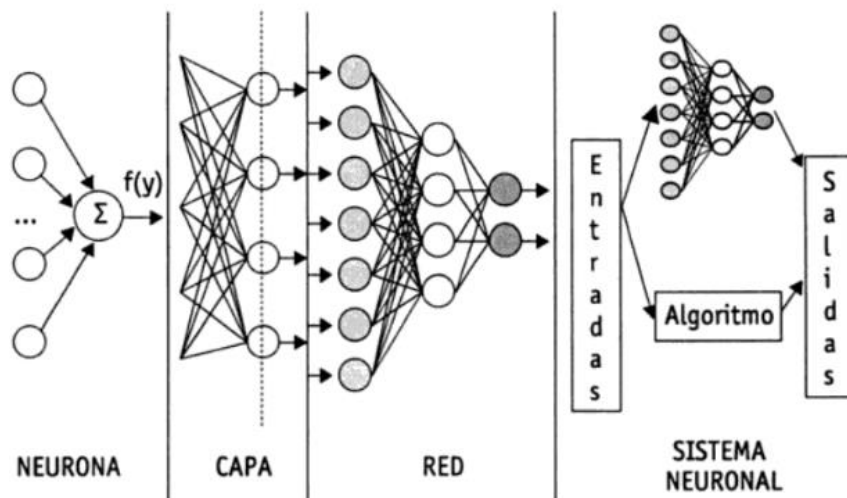
**Figura 2.** *Neuronas Artificiales*



**Nota:** Se observa una representación de una RNA donde los grafos o nodos se unen a las conexiones o líneas. Además, tres tipos de neuronas artificiales donde las Neuronas de

entrada reciben señales, las Neuronas ocultas transmiten señales fuera del sistema, las Neuronas de salida reciben estímulos y emiten salidas fuera del sistema. **Fuente:** (Acevedo, Serna, & Serna, 2017).

**Figura 3.** Representación de una Red Neuronal Artificial



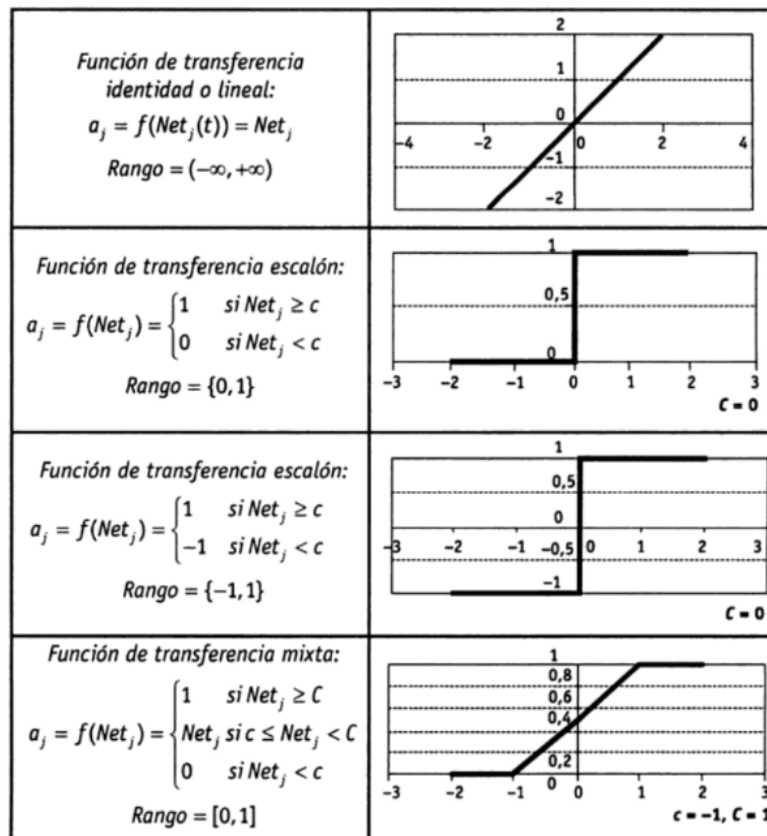
**Nota:** se observa los principales elementos de una red neuronal artificial. **Fuente:** (Aristizábal, 2006).

### 1.3 Arquitectura de las redes neuronales artificiales

Cuando se utiliza una Red Neuronal Artificial se tiene en cuenta tres etapas: la primera etapa involucra el diseño donde se elige el tipo de red neuronal (arquitectura), la cantidad de neuronas que generará, la función de activación definida para la función y el algoritmo de aprendizaje (Caicedo & López, 2017). La fase de entrenamiento presenta una serie de entradas y salidas a la red neuronal, de las cuales aprende mediante el uso del algoritmo de entrenamiento.

Comparando las redes neuronales biológicas con las artificiales se encuentran las siguientes similitudes: a) un valor de estado de activación ( $a_{t-1}$ ), b) unos estímulos o entradas de las neuronas ( $x_i$ ) con pesos asignados ( $w_{ij}$ ), c) una función de propagación ( $Net_j$ ), d) una función de transferencia, e) una función de salida ( $F$ ), f) una señal de salida que transmite a otras neuronas ( $y_j$ ), g) Una regla de aprendizaje que actualiza los pesos mientras se ejecuta como se muestra en la figura 4 y 5.

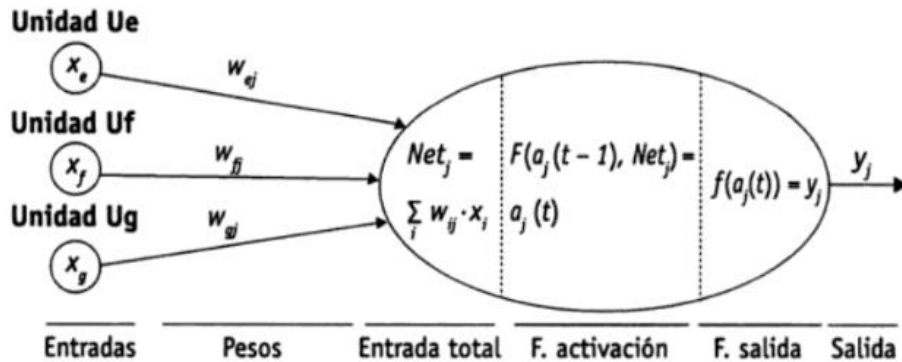
**Figura 4.** *Función de activación o transferencia*



**Nota:** gráficas de las principales funciones de activación o de transferencia. Las funciones más utilizadas son las de escalón. Fuente: (Llano, Hoyos, Arias, & Velásquez, 2007)

Si la función de activación de una RNA es lineal esta corresponde a una neurona lineal, de lo contrario se llaman no lineales. En los grafos más utilizados se representan a estas neuronas lineales con un cuadrado y las no lineales con un círculo.

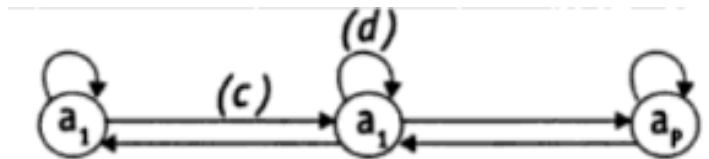
**Figura 5.** Unidad de procesamiento de neurona artificial genérica



**Nota:** se observa una estructura genérica de neurona artificial con sus funciones matemáticas incluidas. **Fuente:** (Salas, 2004),

La arquitectura de las redes neuronales se clasifica según: a) su estructura en capas: siendo mono-capa o multicapa, ver figura 6., b) según el flujo de datos en la red: pudiendo ser de propagación hacia adelante o hacia atrás, c) según el tipo de respuesta pudiendo ser: hetero asociativas y auto asociativas.

**Figura 6.** Ejemplo red neuronal tipo mono-capa recurrente



**Nota:** representación de una red monocapa recurrente. a = conexión hacia adelante, c=conexión hacia atrás. **Fuente:** (Carvajal Carlos, 2020).



El aprendizaje o entrenamiento es la clave de la efectividad de una red neuronal y esencialmente donde la sinapsis se adapta. En este proceso de RNA toda la información se guarda en el valor de cada peso sináptico (**Al-Omari & Bouza, 2014**). Este aprendizaje es de dos tipos: a) con profesor y b) sin profesor. El valor total del entrenamiento se denomina etapa. Esta capacidad, robustez de aprendizaje permiten predecir cómo será el comportamiento de la mayoría de sistemas dinámicos sin modelos explícitos (**Britos, 2005**).

Existen herramientas para desarrollar RNA: a) Weka, b) MATLAB® y c) NeuroSolutions, d) TradingSolutions, e) Noesis, f) Neuronal Stock, g) Trader 68, h) RapidMiner, y i) SSPS. De todas las mencionadas Matlab es la herramienta más completa pero requiere conocimientos de programación y pago de licencia para su uso, por otro lado Weka es de más fácil uso por su interfaz gráfica adaptable al usuario pero igual que NeuroSolutions requieren de pagos elevados en su licencia de uso (**Calixto Aldama, 2018**). Las demás opciones carecen de todas las opciones de aplicación y tienen limitaciones en su uso profesional.

La herramienta MATLAB® es muy utilizada para el desarrollo, configuración y ejecución de las RNA. Tiene muchas aplicaciones en la programación, pero los creadores han desarrollado Neural Network para su utilización en aplicaciones con RNA. En MATLAB® las RNA se pueden modificar: a) los valores preestablecidos de las funciones de activación, b) los pesos, c) la convolución, d) las secuencias, e) la agrupación, f) la normalización (**Moreno Rodríguez, 2009**).

Gracias a estos antecedentes este trabajo realizó una simulación de la humedad crítica a partir del modelo de Red Neuronal Artificial utilizando el algoritmo de Retro Propagación RNA RP; correspondiente al tipo de perceptrón multicapa de la red

neuronal artificial supervisada con el entrenamiento del algoritmo Levenberg-Marquardt.

#### **1.4 Deshidratación y secado de alimentos**

La importancia de modificar los alimentos para mejorar sus características nutricionales y además su manipulación es muy importante y utilizada a nivel mundial. En países latinoamericanos el consumo de productos deshidratados se hace de manera indirecta ya que su utilización se relaciona a tratar de evitar enfermedades coronarias y sobre todo la obesidad y sus problemas. Una de las alternativas para lograr la eliminación del agua y la conservación de los alimentos es la operación unitaria denominada secado **(BARBOSA-CANOVAS & Ibarz, 2005)**.

En la deshidratación el agua es eliminada del alimento al valor de humedad que se requiera para su utilización. Las experiencias de la manipulación de los alimentos en el campo militar han sido utilizadas en la industria general. Aunque se supone que secado y deshidratado son sinónimos la diferencia está en el contenido de agua final. Siendo que el contenido de agua en los procesos de secado puede tener más del 2,5% mientras que en los deshidratados no superan este valor **(Zuluaga, Cortés-Rodríguez, & Rodríguez-Sandoval, 2010)**.

Una de las mejores maneras de secar los alimentos es utilizando convección forzada con aire caliente. A diferencia de la liofilización, secado osmótico y secado al vacío con esta técnica se obtiene mejorar el rendimiento y tiempos de secado. Los equipos que se utilizan para secar alimentos se denominan secaderos y se diseñan conociendo la dinámica de la eliminación del agua del interior al exterior del alimento **(Ríos, 2011)**. En los secaderos por aire caliente el flujo de masa gaseosa que sale del equipo posee un contenido energético que se puede recircular parcialmente y que se mezcla con el flujo

de aire fresco (**García-Reverter, 1996**) que ingresa dando los balances de masa que se observa en la ecuación 1 y 2.

$$W_F * X_F + W_C * X_C = (W_F + W_C)X_M$$

$$W_F * \hat{H}_F + W_C * \hat{H}_C = (W_F + W_C)\hat{H}_M$$

**Ecuación 1 y 2.** Balances de masas

**Donde:**

W = flujo de aire.

X = humedad.

$\hat{H}$  = la entalpía por unidad de masa y los subíndices.

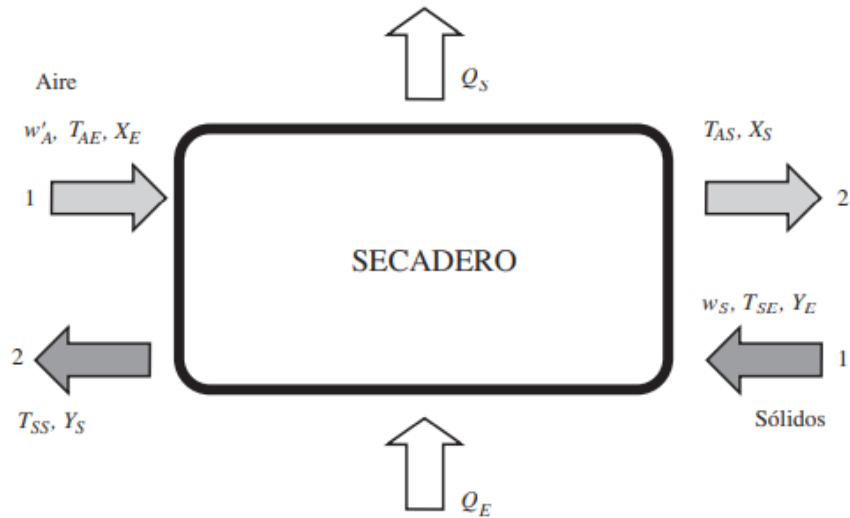
F = frío.

C = calor.

M = mezcla.

Para los secaderos continuos sin recirculación donde las corrientes a secar y de aire caliente fluyen en contracorriente como se muestra en la figura 7.

**Figura 7.** Ejemplo secadero continuo



**Nota:** representación de un secadero continuo. W = sólidos, Y = contenido de agua, T = temperatura, S = salida, E = entrada, A = aire. **Fuente:** (El Ouahabi El Ouahabi, 2018).

$$X_S * (Y_E + Y_S) = \dot{W}_A (X_S + X_E)$$

**Ecuación 3.** Balance de materia para secadero continuo

$$Q_E + W'_A * \hat{I}_E + W_S + \hat{h}_E = Q_S + W'_A * \hat{I}_S + W_S + \hat{h}_S$$

**Ecuación 4.** Balance de energía para secadero continuo

**Donde:**

Q = caudal.

$\hat{h}$  = entalpías de las sustancias sólidas.

$\hat{I}$  = entalpía del aire.

S = salida.

E = entrada respectivamente.

Además, se tiene la ecuación 5. Que considera los calores latentes. Así:

$$\hat{I} = \hat{s}(T - T') + \lambda_0 * X = (1 + 1,92X)(T - T') * \lambda_0 * X$$
$$\hat{h} = \hat{c}_p_s(T - T') + Y * \hat{c}_p_A(T - T')$$

### **Ecuación 5 y 6. Calores latentes**

**Donde:**

$\hat{c}_p_s$  = calor específico de los sólidos.

$\hat{c}_p_A$  = calor específico del agua.

$T'$  = temperatura de referencia (0° C).

### **1.5 Mecanismo de deshidratación de alimentos**

El proceso de secado consiste en la eliminación de agua de un alimento, la etapa principal durante el tiempo de secado es la transferencia de materia que se da en el interior. Estos mecanismos son: a) movimiento de agua bajo la tensión de fuerzas capilares, b) difusión del líquido por diferencia de concentración, c) la difusión ejercida por la superficie, d) difusión de vapor de agua en los poros que se inflan de aire, e) flujo de fluidos por diferencias de presión, f) flujo del fluido por vaporización y condensación del agua (**Padilla-Frías, Granados-Conde, Leon-Mendez, Pineda, & Torrenegra-Alarcon, 2020**).

El contenido de humedad total del producto se define como la razón entre la cantidad de agua que posee el alimento y la cantidad de sólidos secos (**BARBOSA-CANOVAS & Ibarz, 2005**).

$$Y_t = \frac{W_T + W_s}{W_s}$$

**Ecuación 7.** Contenido de humedad total

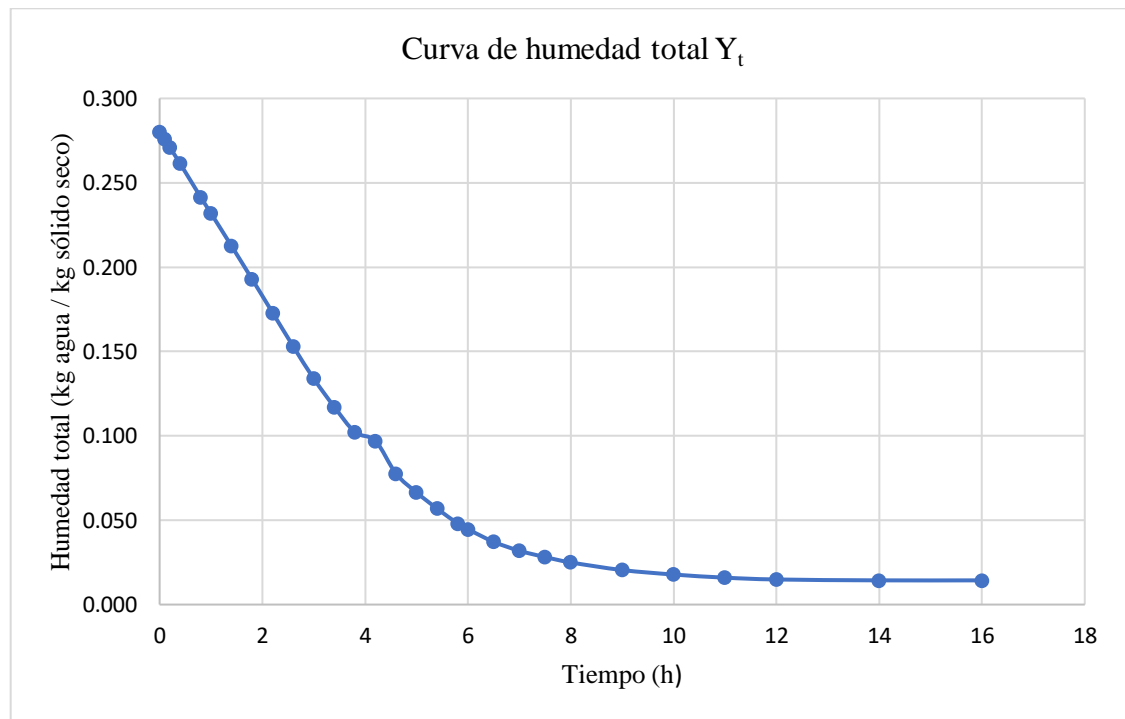
**Donde:**

$Y_t$  = humedad del producto o más conocida como humedad total.

$W_T$  = peso total de la materia en el tiempo.

$W_s$  = peso del sólido seco.

**Figura 8.** Curva de humedad total  $Y_t$



**Nota:** Curva de humedad total en función del tiempo para un alimento. **Fuente:** Elaboración propia.

Existe una humedad que se utiliza para entender la cinética de secado que se denomina humedad libre.

$$Y = Y_T - Y_{eq}$$

### **Ecuación 8.** Humedad Libre

**Donde:**

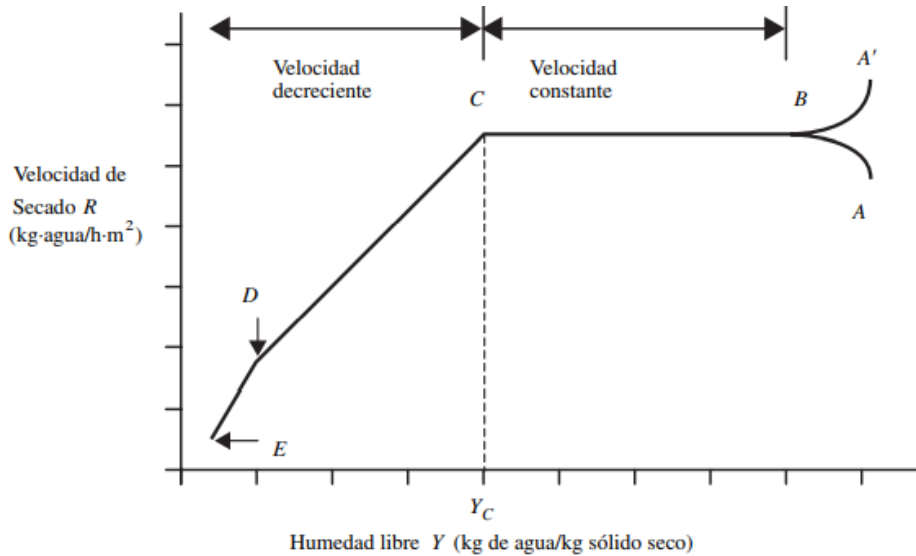
Y = humedad libre

$Y_T$  = humedad total

$Y_{eq}$  = humedad de equilibrio.

Para analizar las etapas los autores suelen utilizar la curva de velocidad de secado como se muestra en la figura 9, representando el inicio del proceso de secado antes de llegar al punto crítico donde la velocidad deja de ser constante y empieza el decrecimiento de la velocidad de secado del producto en función de la humedad libre (**Gava, 2009**). Es en el punto crítico donde se estima la *humedad crítica*, siendo este valor uno de los más importantes ya que es en este punto donde el producto empieza a ceder o absorber agua del ambiente para mantener una relación de equilibrio en las condiciones internas y externas del sistema.

**Figura 9.** Ejemplo curva de secado



**Nota:** Representación de una curva de secado. C = punto crítico, A = A' = inicio de proceso de secado, D = periodo decreciente, E = fin del periodo de secado,  $Y_C$  = humedad crítica. **Fuente:** (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996).

### 1.6 Deshidratación de manzana (*Pyrus malus*)

El manzano está formado por variedad, porta injerto o hasta un injerto intermedio. Existen variedades y clones del ancestro principal *Malus sieversii*, con contribución de *Malus orientalis*, *Malus sylvestris*, *Malus baccata*, *Malus mandshurica*, *Malus pumilia* y *Malus prunifolia* (Silva Gil, 2005). Linneo (1753) une bajo el género *Pyrus* al manzano en su obra titulada: "Species Plantarum" quedando su denominación *Pyrus malus* al manzano de cultivo común (Linnaeus, 1799).

El Manzano pertenece a la familia de las rosáceas, con la subfamilia Pomoideae, género *Malus*. Tiene un árbol caducifolio, con hojas que pueden ser de forma simple ovalada, con bordes aserrados, con haz verde oscuro glabro y envés de color verde pálido. El



fruto es de tipo pomo, con color rojo, amarillo o verde, posee 5 alveolos, con endocarpio cartilaginoso y con semillas en cada alveolo (Ayala Arias, Mejía Carranza, Martínez Estrada, Rubí Arriaga, & Vázquez García, 2017).

**Figura 10.** *Manzano (Pyrus malus)*



**Nota:** Representación del manzano *Pyrus malus*, en corte transversal. a) Flor, b) floración, c) semilla, d) pulpa. **Fuente:** (Aruani & Sánchez, 2002).

La manzana tiene una composición 85% de agua (Base Húmeda), 12% de carbohidratos, 0,3% de proteínas y micronutrientes (Casierra-Posada, Cortés, Ramírez, & Franco, 2003). El método de secado considerado en este trabajo son los realizados por secado con aire convectivo (SAC). Se consideraron las cinéticas de secado de las rodajas de manzana en una estufa WTB Binder, con corriente de aire a 50 °C de temperatura (Valencia, 2011). Se consideraron 14 pesos en intervalos de tiempo según autor para luego pasar a datos de curva de humedad total en función del tiempo para poder configurar la red neuronal.

**Figura 11.** *Estufa binder*



**Nota:** proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*), en corte por rodajas. **Fuente:** (Aruani & Sánchez, 2002).

## 1.7 Objetivos

### Objetivo General

Estimar el error de la humedad crítica para el secado de manzanas (*Pyrus malus*) utilizando redes neuronales artificiales.

### Objetivos Específicos

- Determinar las características cualitativas y cuantitativas para formar la red neuronal para estimar la humedad crítica para el secado de manzanas (*Pyrus malus*).

- Diseñar un modelo matemático basado en la Red Neuronal Artificial con retro programación que estime el valor de la humedad crítica para el secado de manzanas (*Pyrus malus*) empleando el software Matlab.
- Comparar los valores estimados de humedad crítica en el secado de manzanas (*Pyrus malus*) con la Red Neural y los valores reales de referencia aplicando pruebas estadísticas.

## **1.8 Variables**

**Variable dependiente:** La humedad crítica.

**Variables independientes:** Parámetros de secado de manzano (*Pyrus malus*).

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1 Enfoque

El presente proyecto de investigación utiliza un enfoque cualitativo y cuantitativo, con un diseño teórico-fundamentado; es decir, la predicción del comportamiento de la variable dependiente (el error de medición de la humedad crítica) entendiendo el comportamiento de las variables independientes referidas a los números de interacciones y observaciones que estima la red neuronal artificial. Por lo tanto, se establecerá una comparación entre los datos sin variar los resultados publicados y de esta manera se elaborará una revisión acerca del estado actual del arte con respecto a la estimación de error de la humedad crítica en el secado de manzanas (*Pyrus malus*) utilizando el modelo de RNA de Retro Propagación (RNARP), el mismo que visualiza un bajo porcentaje de error absoluto, en comparación al modelo de Red Neuronal General de Regresión (RNGR) con un valor de porcentaje de error absoluto de 6,7%.

### 2.2. Materiales

Para ejecutar la simulación de manera rápida y confiable en este trabajo de investigación se utilizó una computadora con procesador Ryzen 5 5600 h de 16 giga bites de ram. La selección de información se obtuvo de base de datos indexadas como: SCOPUS, ProQuest, CENGAGElearning, Ebook Central, Britannica ACADEMIC, Springer y del repositorio de trabajos de titulación de la base de datos virtual de la Universidad Técnica de Ambato. Para el diseño y ejecución de la simulación se utilizó la plataforma

MATLAB® con sus herramientas de visualización para el desarrollo, verificación y puesta en marcha de redes neuronales (**Codina, 2005**).

## **2.3 Métodos**

### **2.3.1 Modalidad de investigación**

Este trabajo utiliza un enfoque Cuantitativo ya que se verificó el error de la estimación de la humedad crítica a través de la aplicación de la red neuronal artificial con el algoritmo de retro propagación y la comparación con la respuesta real de base de datos actualizadas desde hace 5 años por medio de la plataforma de análisis MATLAB® (**Ortega, 2018**). El tipo de investigación es inductivo puesto que no genera nuevo conocimiento, más bien parte de teoría y normativas generales para aplicarlas a un caso en particular (**Grajales, 2000**). El nivel de investigación es correlacional porque permite predicciones estructuradas y determina tendencias (**Valle, 2009**).

## **2.4 Descripción de la zona de estudio**

El área de estudio está compuesta por el Cantón Ambato en la hoya del río Patate, atravesada por el río Ambato, a una altitud de 2580 m s. n. m. y con un clima templado andino promedio de 15,7 °C (**C. Castillo, Saá, & Gamboa, 2020**). Llamada "Ciudad de las Flores y las Frutas", o también "Cuna de los Tres Juanes". Tiene una población de 489.37 habitantes, y ocupa la quinta posición entre las conurbaciones del Ecuador. Ocupa el 65,1 % del total de la Provincia de Tungurahua. Limita al norte con la provincia de Cotopaxi, al sur con la provincia de Chimborazo, al este con las provincias de Pastaza y Napo y al oeste con las provincias de Cotopaxi y Bolívar (**Guevara, Guevara, & Saá, 2019**).

## 2.5. Población

Debido a que no existen trabajos similares ni un inventario de trabajos relacionados de secado de manzano (*Pyrus malus*), la población se fijó por juicio de expertos (**De Arquer, 2011**) determinando un valor recomendado de 30 curvas de secado. Además existen trabajos similares en Ingeniería bioquímica en la estimación de DBO5 (**Pillapa Vargas, 2022**) y COV,S en calidad de aire en ambientes interiores (**Gavilánez Barrionuevo, 2021**).

## 2.6. Recolección de la información

La información se recolectó de la recopilación de datos de repositorios científicos indexados, relacionados a secado de manzano (*Pyrus malus*). La información se dispuso en una matriz donde en las filas se colocaron las variables codificadas con letras mayúsculas incluyendo la variable de salida (humedad crítica) y en las columnas las treinta muestras recolectadas como se observa en la tala 1.

**Tabla 1.** *Matriz de ingreso a MATLAB®*

PARÁMETRO	VARIABLE	CÓDIGO	1	2	3	*30
Dato experimental calculado	Humedad crítica	AA				
	Tiempo crítico	A				
Dato fisicoquímico experimental	Humedad absoluta 1	B				
	Humedad absoluta 2	C				
	Humedad absoluta 3	D				
	Humedad absoluta 4	E				
	Humedad absoluta 4	F				
	Humedad absoluta 6	G				
	Humedad absoluta 7	H				
	Humedad absoluta 8	I				
	Humedad absoluta 9	J				

	Humedad absoluta 10	K
	Humedad absoluta 11	L
	Humedad absoluta 12	M
	Humedad absoluta 13	N
	Humedad absoluta 14	Ñ
	Tiempo 1	O
	Tiempo 2	P
	Tiempo 3	Q
	Tiempo 4	R
	Tiempo 5	S
	Tiempo 6	T
Dato experimental	Tiempo 7	U
curva de secado	Tiempo 8	V
	Tiempo 9	W
	Tiempo 10	X
	Tiempo 11	Y
	Tiempo 12	Z
	Tiempo 13	Z1
	Tiempo 14	Z2

**Nota:** Codificación de variables utilizadas para la red neuronal artificial. \* El número de columnas representa las 30 curvas de secado procesadas. **Fuente:** Elaboración propia.

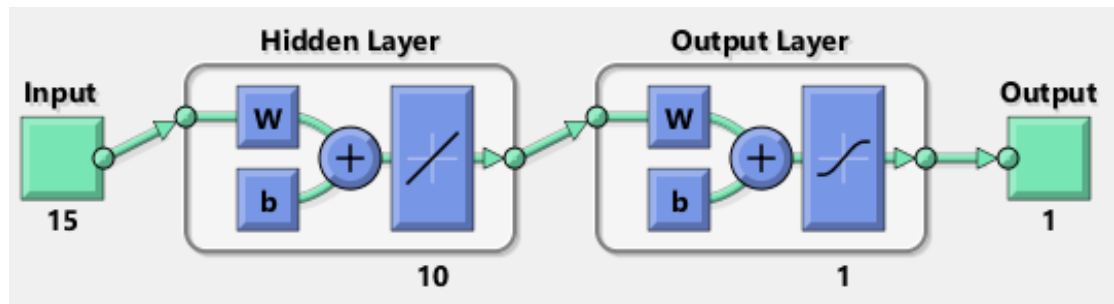
## 2.7. Determinación de las variables de entrada y variable de salida

Para la matriz de ingreso de datos en MATLAB® se requiere separar los datos de entrada A, B, C, D, C, F, G, H, I, J, K, L, M, N, Ñ, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, ZZ. y el dato de salida: AA. Para 30 datos conocidos de curvas de secado de manzano (*Pyrus malus*).

## 2.8. Diseño de la Red Neuronal Artificial RNA

Para estimar el valor de salida  $ZZ$  (humedad crítica) se esbozó un modelo de red neuronal artificial (RNA) con un algoritmo de retro propagación (RP). Los valores de entrada se tomaron de la curva de Humedad total en función del tiempo, así como los datos de humedad crítica y tiempo crítico de las curvas de la cinética de secado consultados. La Red Neuronal Artificial con Retro Propagación (RNA-RP) diseñada en MATLAB® se observa en la figura 12. Se aprecia cuatro capas, en la cual la primera capa de entrada tiene 15 neuronas receptoras estáticas, en la segunda capa que es oculta (López & Fernández, 2008) dispone de 10 neuronas ocultas, la tercera capa es de suma importancia y dispone una neurona dinámica, la capa final dispone de una neurona de salida estática (P. Castillo, Castellano, Merelo, & Prieto, 2001).

Figura 12. Red Neuronal Artificial diseñada



**Nota:** Gráfico de la RNA-RP para estimar la humedad crítica en proceso de secado de manzano *Pyrus malus*, en corte por rodajas. **Fuente:** Elaboración propia.

En este estudio, se generó una matriz de entrada de entrenamiento como se observa en la tabla 2.



**Tabla 2.** Datos de programación de la Red Neuronal Artificial

ITEM	Consideración
Arreglo	30x30 doble
Variable responsable	30 filas
Columnas	30 muestras
Perfil de salida	SampleOut
Número de entrenamientos	1000

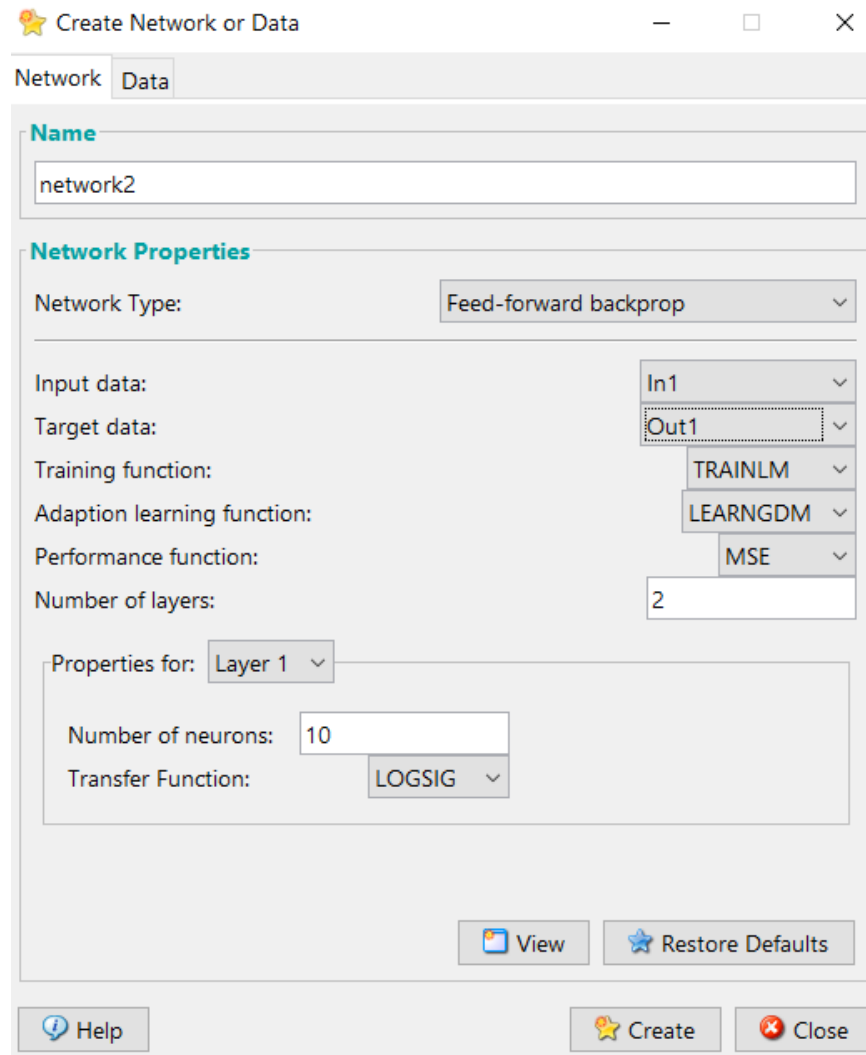
**Nota:** Consideraciones para la programación de la Red Neuronal Artificial. Se requiere llegar a un valor de error mínimo cercano a  $1e-07$  en cada intervalo de entrenamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.

Luego para empezar el entrenamiento se crea una Matriz de Prueba doble (ver anexo 1.) donde las sumas de los datos de las muestras 1 y 2 decrece del valor real de la predicción de salida de la humedad crítica. Los datos de entrada y salida se importan al MATLAB® de la matriz de resultados (ver anexo 2). Para lograr un mejor aprendizaje y resultados se desarrolló la RNA considerando el modelo de Retro Propagación (RNARP) (Toda Caraballo, García Mateo, & Capdevila, 2010), debido a, su bajo porcentaje de error absoluto.

Además, se utilizó el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA o simplemente LM), también conocido como el método de mínimos cuadrados amortiguados (DLS), para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales que se forma al ejecutar el cálculo del error como se muestra en la figura 13 (Moré, 1978).

**Figura 13.** Red Neuronal Artificial diseñada



**Nota:** Ventana gráfica que proporciona MATLAB® en el diseño de la Red Neuronal Artificial con Retro-propagación desarrollada para estimar la humedad crítica en proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*), en corte por rodajas, donde se muestra la primera capa. **Fuente:** Elaboración propia.

La programación que genera un código de programación que se observa en la figura 14.

**Figura 14.** Programación de la Red Neuronal Artificial en MATLAB®

```
>> plot(Linea, SampleOut, '--gs', ...
        'LineWidth', 2, ...
        'MarkerSize', 10, ...
        'MarkerEdgeColor', 'b', ...
        'MarkerFaceColor', [0.5, 0.5, 0.5])
>>
>> hold on
x>> plot(Linea, RNDB05_outputs, '--gs', ...
        'LineWidth', 2, ...
        'MarkerSize', 10, ...
        'MarkerEdgeColor', 'b', ...
        'MarkerFaceColor', [0.5, 0.5, 0.5])
```

**Nota:** Programación de la RNA-RP para estimar la humedad crítica en proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*) que genera el MATLAB®. **Fuente:** Elaboración Propia.

## 2.9. Prueba de Tukey

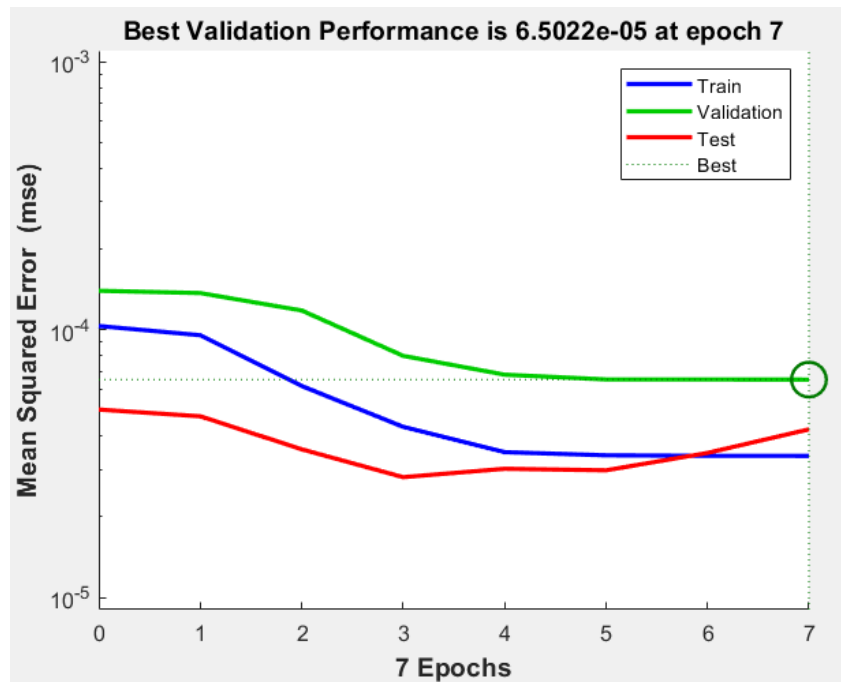
Para calcular la eficacia del modelo como método de estimación del error de la Humedad Crítica se aplica la prueba de Tukey utilizando la herramienta informática InfoStat, para comparar los valores estimados de la red neuronal con los valores reales estadísticamente.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Análisis y discusión de resultados

En la figura 15 se observa los resultados del valor del entrenamiento de la Red Neuronal Artificial para estimar la humedad crítica en proceso de secado de manzano *Pyrus malus*

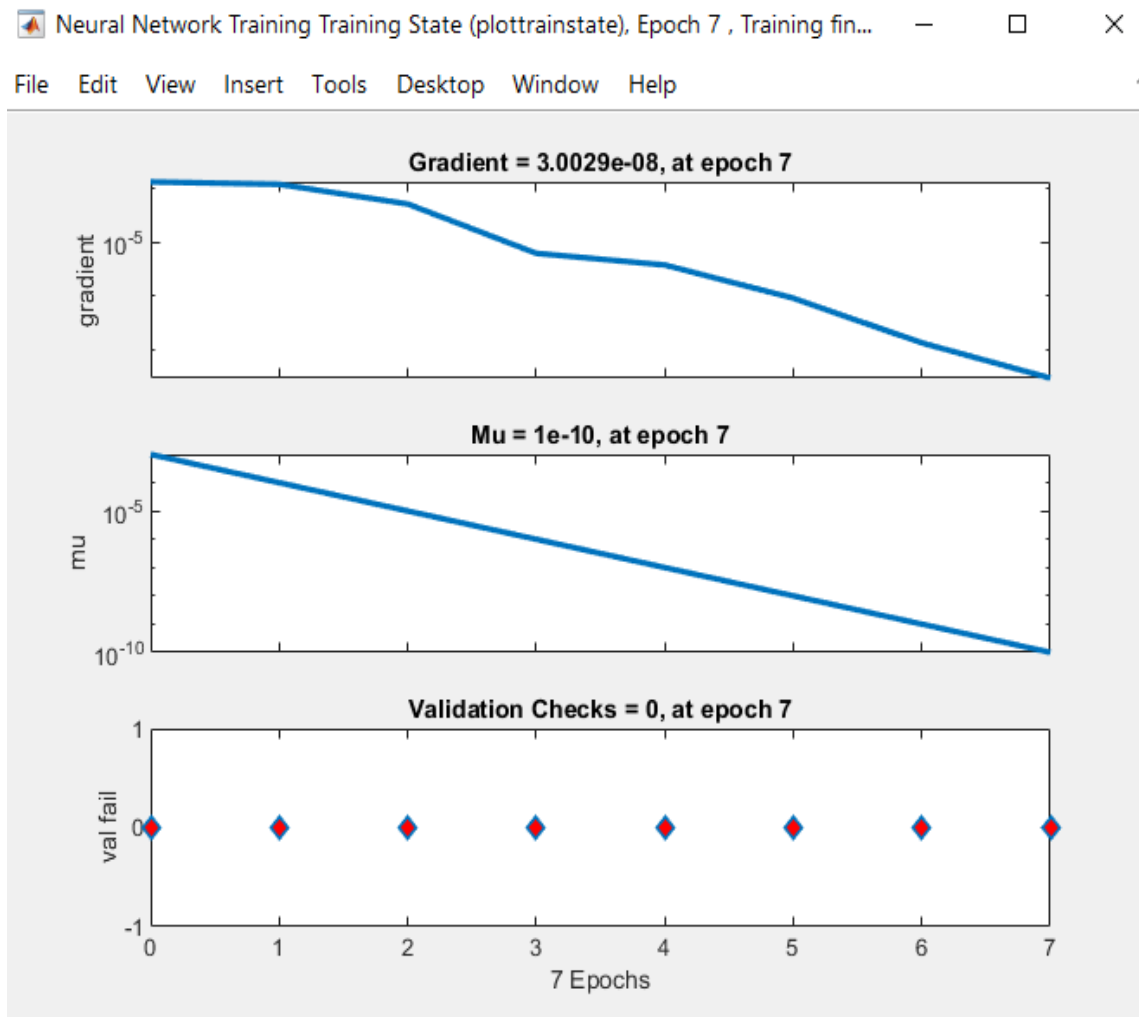
**Figura 15.** Resultado entrenamiento de la Red Neuronal Artificial



**Nota:** Curva de entrenamiento y las épocas totales que la programación de la RNA-RP ejecuta para estimar la humedad crítica en proceso de secado de manzano *Pyrus malus* que genera el MATLAB®. El valor del ajuste de los mínimos cuadrados para este caso es de 0,99. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 16 se observa el entrenamiento de la Red Neuronal Artificial en proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*) que genera el MATLAB® hasta ajustar el valor más cercano de la humedad crítica en proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*)

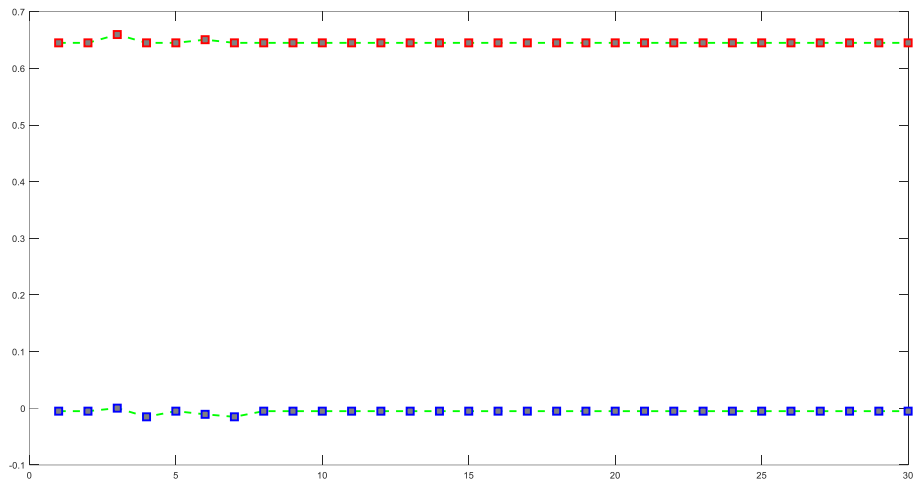
**Figura 16.** Resultado entrenamiento y ajuste de la Red Neuronal Artificial con retro propagación



**Nota:** Curva de entrenamiento y el comportamiento casi lineal para los datos de análisis que la programación de la RNA-RP ejecuta para estimar la humedad crítica en proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*) que genera el MATLAB®. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figuras 17 se muestra los resultados de la estimación del cálculo del error en la estimación de la humedad crítica con datos de curva de secado de 30 trabajos similares.

**Figura 17.** Resultado de la estimación del error con la Red neuronal Artificial con retro propagación



**Nota:** Resultado de las curvas de estimación del error donde de color azul se observa el error mientras que el color rojo muestra el valor calculado de la humedad crítica estimada por la Red Neuronal Artificial con Retro Propagación en el proceso de secado de manzano (*Pyrus malus*) que genera el MATLAB®. **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 17 se observan valores de error cercanos a cero en casi todas las estimaciones de la humedad crítica. Se aprecia que la RNA-RP estima de manera casi certera valores de Humedad crítica.

### 3.1.1 Pronóstico de la red neuronal

En la Tabla 3 se muestra los valores reales comparados con los estimados por la RNA-RP.

**Tabla 3.** Resultado de la estimación de la humedad crítica comparada con el valor real

#	VALOR REAL (Kg agua/Kg sólido seco)	VALOR ESTIMADO (Kg agua/Kg sólido seco)	ERROR %
1	0.64	0.645000002151564	0,78
2	0.64	0.645000001103314	0,78
3	0.66	0.659669195767602	0,05
4	0.63	0.645003618797174	2.38
5	0.64	0.645000003557881	0,78
6	0.64	0.650583968184112	1.65
7	0.63	0.645000002475958	2.38
8	0.62	0.645000004693526	0.80
9	0.64	0.645000002151564	0.78
10	0.64	0.645000001629268	0.78
11	0.61	0.645000002041733	0.81
12	0.61	0.645000003739132	0.81
13	0.64	0.645000003069962	0.78
14	0.62	0.645000001638002	0.80
15	0.64	0.645000129273665	0.78
16	0.61	0.64500000205652	0.81
17	0.64	0.645000002703171	0.78
18	0.62	0.645000002018751	0.80
19	0.64	0.645000002089783	0.78
20	0.61	0.645000003185103	0.81

21	0.64	0.645000002679921	0.78
22	0.64	0.645000003225514	0.78
23	0.64	0.645000002151564	0.78
24	0.64	0.645000001809987	0.78
25	0.64	0.645000001603801	0.78
26	0.62	0.645000002735219	0.80
27	0.64	0.645000002960361	0.78
28	0.64	0.645000002646793	0.78
29	0.62	0.645000001839842	0.80
30	0.61	0.645000004403621	0.81

**Nota:** Codificación de variables utilizadas para la red neuronal artificial. \* El número de columnas representa las 30 curvas de secado procesadas. **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 3 presenta resultados de estimación de humedad crítica con valores de error menos del 2.38 en las 30 curvas de secado analizadas lo que infiere que la RNA-RP estima muy bien este tipo de datos.

### 3.1.2 Análisis estadístico

Se aplicó la prueba de Tukey, análisis de varianza para comparar los valores obtenidos en la simulación con valores experimentales consultados de fuentes bibliográficas que se muestran en la figura 18.



**Figura 18.** Resultado del análisis de varianza y prueba Tukey

**Análisis de la varianza**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
HUMEDAD CRÍTICA	60	0,36	0,35	1,49

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,9E-03	1	2,9E-03	32,52	<0,0001
MÉTODO	2,9E-03	1	2,9E-03	32,52	<0,0001
Error	0,01	58	9,1E-05		
Total	0,01	59			

**Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,00492**

Error: 0,0001 gl: 58

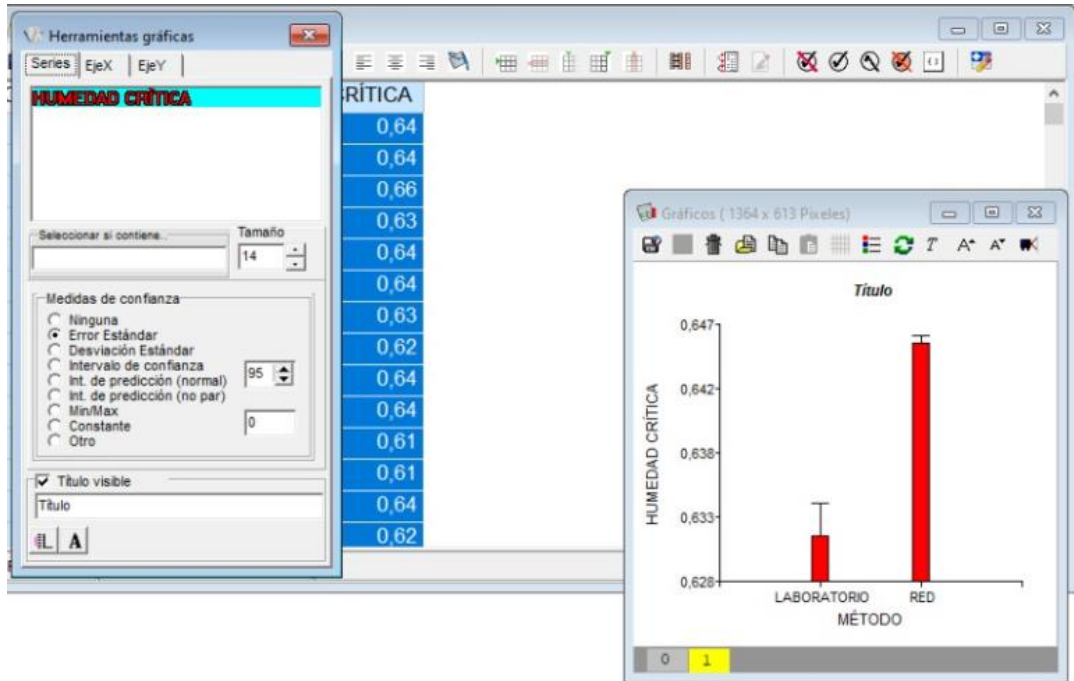
MÉTODO	Medias	n	E.E.	
LABORATORIO	0,63	30	1,7E-03	A
RED	0,65	30	1,7E-03	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Nota:** Resultado del análisis de varianza, y prueba Tukey utilizando el programa InfoStat. Los valores del error son casi imperceptibles. **Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 19 se indica la relación entre la respuesta esperada y la red neuronal.

**Figura 19.** Resultado prueba Tukey entre valores de humedad crítica de curvas de secado y las comparadas con la red neuronal



**Nota:** Resultado de la prueba Tukey comparando valores bibliográficos con los valores calculados con la Red Neuronal Artificial utilizando el programa InfoStat. **Fuente:** Elaboración propia.

La Figura 20 se muestra que el valor de la probabilidad aplicando la prueba t de student.

**Figura 20.** Prueba t para una media

Valor de la media bajo la hipótesis nula: 0

Variable	n	Media	DE	LI(95)	LS(95)	T	p(Bilateral)
ERROR	30	-0,01	2,9E-03	-0,01	-4,6E-03	-10,67	<0,0001

**Nota:** Prueba t de student para una media utilizando el programa InfoStat. El valor de P es menor que 0,001 que es bajo la diferencia entre el valor real de la humedad crítica bibliográfico y el de las curvas de secado. **Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

### 4.1 Conclusiones

Este trabajo de investigación muestra que el desarrollo, entrenamiento y aplicación de una Red Neuronal Artificial con el algoritmo de Retro Propagación (RNA-RP) para estimar la humedad crítica es factible dando errores de menos 2,5% del valor real y siendo una alternativa a los métodos experimentales disminuyendo el 99,8% de tiempo con esta alternativa ya que la simulación se demora 1 minuto del valor de 570 minutos que requiere el método convencional.

Con una Red Neuronal Artificial que utiliza el algoritmo de Retro Propagación RNA-RP diseñada en MATLAB® formada de cuatro capas, donde se ubicaron 15 neuronas receptoras en la primera capa, 10 neuronas dinámicas ocultas en la segunda capa, 1 neurona dinámica de suma en la tercera capa y 1 neurona de salida estática en la capa final se obtuvieron el 90% de los resultados con errores de cálculo menos al 1% y el 10% con errores menos del 2,38% con un entrenamiento de la red que finalizó en siete etapas.

Se compara entre los valores estimados por la Red Neuronal y los valores reales. Esto se muestra, cuando los datos se recopilan mediante la prueba de Tukey con un 95% de confianza. El valor de confiabilidad es del 99,99% de las respuestas obtenidas de la red neuronal artificial y el valor real en el laboratorio. Las afirmaciones de que las medias

son iguales, no estadísticamente diferentes; son ideales para afirmar que la estimación de la humedad crítica con redes neuronales es eficiente.

Los valores del error no disminuyen con el aumento del número de neuronas dinámicas que formen la Red Neuronal Artificial para la estimación de la humedad crítica ya que 30 datos de salida y 30 datos de alimentación de la matriz de ingreso en MATLAB® son considerados pocos para su capacidad de ejecución.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Se debe probar la estimación del tiempo total de secado trabajando una Red Neuronal Artificial con datos directos de la curva de la cinética de secado directamente de la Manzana (*Pyrus malus*) y comparar con los datos de la matriz de humedad total.
- Para mejorar los resultados obtenidos en esta investigación se podría probar aplicar la Red Neuronal Artificial con uno de los algoritmos más eficientes como lo es el Genético.
- Se recomienda realizar la estimación de la humedad crítica en el secado de manzanas (*Pyrus malus*) trabajando con datos para una Red Neuronal Artificial a diferentes temperatura de secado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Paredes, M. O. (2015). *Diseño de un secador prototipo (escala industrial) para la deshidratación de manzanas (Pyrus malus L.) y peras (Pyrus communis)*. Quito, 2015.,
- Abril, F. G. M., Martín, A. F. M., & Díaz, J. M. O. J. A. d. C. (2007). Crecimiento poblacional y políticas públicas. 27(44), 149-162.
- Acevedo, E., Serna, A., & Serna, E. J. D. e. i. e. i. (2017). Principios y características de las redes neuronales artificiales. 173.
- Al-Omari, A. I., & Bouza, C. N. J. I. O. (2014). Review of ranked set sampling: modifications and applications.35(3), 215-235.
- Anaya, M. M. M., & Pechene, J. C. Q. (2017). *Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia*. Paper presented at the Memorias de Congresos UTP.
- Aristizábal, M. C. J. L. d. E. (2006). Evaluación asimétrica de una red neuronal artificial: aplicación al caso de la inflación en Colombia. (65), 75-116.
- Aruani, M. C., & Sánchez, E. E. J. R. d. I. F. d. C. A. (2002). Manzano. 34(1).
- Ayala Arias, B., Mejía Carranza, J., Martínez Estrada, I., Rubí Arriaga, M., & Vázquez García, L. M. J. R. m. d. c. a. (2017). Caracterización morfológica de híbridos de chile manzano. 8(4), 825-836.
- BARBOSA-CANOVAS, G. V., & Ibarz, A. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*: Mundi-Prensa Libros.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of foods*: Springer Science & Business Media.
- Benítez, R., Escudero, G., Kanaan, S., & Rodó, D. M. (2014). *Inteligencia artificial avanzada*: Editorial UOC.
- Bisang, R., & Campi, M. J. R. I. d. C., Tecnología y Sociedad-CTS. (2010). Hambre, alta tecnología y desigualdad social: Un desafío a inicios del siglo XXI. 5(14), 1-21.
- Bravo, E. J. e. I. e. c. (2009). Causas de la crisis alimentaria mundial. 38(38/39), 11.

- Britos, M. I. P. J. P. C. (2005). Entrenamiento de redes neuronales basado en algoritmos evolutivos.
- Bueno, L., & Pons, J. L. J. X. J. d. A. (2007). Un sistema de interfaz cerebro ordenador basado en redes neuronales auto-organizadas. 2007.
- Calixto Aldama, S. (2018). Estudio comparativo de herramientas para Redes Neuronales Artificiales (RNA): Weka, Matlab y Neurosolutions.
- Carvajal Carlos, I. J. I. d. I. y. T. (2020). Control Variante en el Tiempo y Teoría Tau-Jerk para Generación de Trayectorias de Manipulador Redundante con Observador Visual Neuronal Recurrente Bicapa.
- Casierra-Posada, F., Cortés, L. F., Ramírez, J., & Franco, H. C. J. A. C. (2003). Estado nutricional de arboles de manzano 'anna' durante la. 21(1 Y 2), 75-82.
- Castillo, C., Saá, M. J. M., & Gamboa, J. J. R. C. U. (2020). Panorama socioeconómico de los emprendedores de la economía informal de la ciudad de Ambato-Ecuador. 13(33), 47-58.
- Castillo Martinez, W. E., Manayay Sanchez, D., Dominguez Castañeda, J. M., Palacios Ambrocio, A. L., Quezada Berru, S. M., & Gonzales Capcha, J. K. (2015). Evaluación del proceso de secado por aire caliente de manzana (Pyrus Malus) variedad San Antonio.
- Castillo, P., Castellano, J., Mereño, J., & Prieto, A. J. I. A. R. I. d. I. A. (2001). Diseño de redes neuronales artificiales mediante algoritmos evolutivos. 5(14), 2-32.
- Codina, L. J. E. p. d. I. i. (2005). Scopus: el mayor navegador científico de la web. 14(1), 44-49.
- De Arquer, M. I. J. C. n. d. c. d. t., España. (2011). NTP 401: Fiabilidad humana: métodos de cuantificación, juicio de expertos.
- de la Sociedad Española, G. C., de Nutrición Comunitaria, S., Bartrina, J. A., Val, V. A., Aldalur, E. M., de Victoria Muñoz, E. M., . . . Martín, A. R. J. N. h. (2016). Guías alimentarias para la población española (SENC, diciembre 2016); la nueva pirámide de la alimentación saludable. 33(8), 1-48.
- del Brío, B. M., & Cinca, C. S. J. S. r. y. o. d. c. (1995). Fundamentos de redes neuronales artificiales: hardware y software. 103-125.

- El Ouahabi El Ouahabi, I. (2018). Diseño de un secadero continuo de banda por convección para fritas cerámicas.
- Ferreira, S. R., & Costa, A. R. J. I. t. (2009). Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. *20(2)*, 89-104.
- García-Reverter, J. (1996). *Secaderos de alimentos por aire caliente*. Universitat Politècnica de València,
- Gava, A. J. (2009). *Tecnología de alimentos*: NBL Editora.
- Gavilánez Barrionuevo, C. S. (2021). *Estimación de la calidad del aire en ambientes interiores en laboratorios químicos de la Universidad Técnica de Ambato utilizando redes neuronales artificiales*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos ...,
- Goodin, A. D. J. R. C. d. N. (2013). La evolución del aprendizaje: más allá de las redes neuronales. *8(1)*, 20-25.
- Grajales, T. J. O. I. R. e. (2000). Tipos de investigación. *14*.
- Guevara, A. R. G., Guevara, M. D. G., & Saá, J. P. M. J. D. d. I. C. (2019). Análisis del turismo accesible en la industria hotelera en la ciudad de Ambato. *5(2)*, 28-43.
- Hernández-Muela, S., Mulas, F., & Mattos, L. J. R. N. (2004). Plasticidad neuronal funcional. *38(1)*, 58-68.
- Isasi Vinuela, P., & Galván León, I. J. U. E. P., Editorial Pearson Educación SA Madrid España. (2004). *Redes de neuronas artificiales*.
- Larranaga, P., Inza, I., & Moujahid, A. J. R. N., U. del P. Vasco. (1997). Tema 8. redes neuronales. *12*, 17.
- Linnaeus, C. (1799). *Species plantarum* (Vol. 3): Impensis GC Nauk.
- Llano, L., Hoyos, A., Arias, F., & Velásquez, J. J. A. e. S. e. I. (2007). Comparación del Desempeño de Funciones de Activación en Redes Feedforward para aproximar Funciones de Datos con y sin Ruido. *4(2)*.
- López, R. F., & Fernández, J. M. F. (2008). *Las redes neuronales artificiales*: Netbiblo.
- Luján, R. J. C. a. d. I. (2004). Bases moleculares de la señalización neuronal. *5(2)*, 1-19.
- Martinez, W. E. C., Sanchez, D. M., Castañeda, J. M. D., Ambrocio, A. L. P., Berru, S. M. Q., & Capcha, J. K. G. J. I. C., *Tecnología e Innovación*. (2014).

- EVALUACION DEL PROCESO DE SECADO POR AIRE CALIENTE DE MANZANA (*Pyrus malus*) VARIEDAD SAN ANTONIO. *1*(2), 17-17.
- Matich, D. J. J. U. T. N., México. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones*. *41*, 12-16.
- Moré, J. J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In *Numerical analysis* (pp. 105-116): Springer.
- Moreno Rodríguez, A. (2009). *Desarrollo de una interfaz gráfica de redes neuronales usando Matlab*.
- Olabe, X. B. J. P. d. l. E. d. I. (1998). *Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones*.
- Ortega, A. O. J. E. d. h. w. r. n. p. A. O. O. p. E. D. I. T. D. C. C. l. b. b. f. c. d. E. (2018). *Enfoques de investigación*. *14*.
- Pacbeco, R. A. (1981). *Manual Los Cultivos De Manzano Y Peral En El Ecuador: INIAP Archivo Historico*.
- Padilla-Frías, K. A., Granados-Conde, C., Leon-Mendez, G., Pineda, Y. A., & Torrenegra-Alarcon, M. J. I., *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. (2020). Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado. *16*(1), 98-110.
- Pillapa Vargas, Y. E. (2022). *Estimación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en aguas residuales de las empresas de jeans de la ciudad de Pelileo utilizando redes neuronales artificiales*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos ...,
- Rengifo Bedoya, M. E., & Porras Galindo, J. L. *Interfaz cerebro computador basada en potenciales de estado establece evocados visualmente para el control de movimiento de un dispositivo virtual*.
- Ríos, K. C. (2011). *Tecnología de alimentos*: Ediciones de la U.
- Rodríguez Holguín, G. A., & Duque Taborda, C. A. (2012). Propuesta de mejora de un sistema de buenas prácticas de manufactura para una empresa de alimentos.
- Rosset, P. M., & Ávila, D. R. J. E. P. (2008). Causas de la crisis global de los precios de los alimentos, y la respuesta campesina. (36), 18-22.
- Salas, R. J. U. d. V. D. d. C. (2004). *Redes neuronales artificiales*. *1*, 1-7.



- Silva Gil, M. B. (2005). Caracterización morfológica de variedades contenidas en el Banco de Germoplasma de manzano de la Estación Experimental de Aula Dei.
- Soria, N., & León, J. (1992). El cultivo del manzano en la zona alta del Ecuador.
- Toda Caraballo, I., García Mateo, C., & Capdevila, C. (2010). Diseño de redes neuronales con aprendizaje combinado de retropropagación y búsqueda aleatoria progresiva aplicado a la determinación de austenita retenida en aceros TRIP.
- Valencia, S. J. R. C. d. C. A. (2011). Cinética de la deshidratación y control de la oxidación en manzana Granny smith, mediante la aplicación de diferentes métodos de secado. *1*(6).
- Valle, E. G. Y. J. R. d. h. e. s. n. u. m.-d.-l.-i.-p.-d.-g.-. (2009). Metodología de la investigación.
- Vega, A., Andrés, A., & Fito, P. J. I. t. (2005). Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). *16*(6), 3-11.
- Vega, A., Chacana, M., & Lemus, R. J. R. C. p. l. I. d. A. I. (2006). La Industria de los Alimentos Deshidratados y la Importancia del Control de Procesos. *9*(42), 50-67.
- Zuluaga, J. D., Cortés-Rodríguez, M., & Rodríguez-Sandoval, E. J. R. d. l. F. d. I. U. C. d. V. (2010). Evaluación de las características físicas de mango deshidratado aplicando secado por aire caliente y deshidratación osmótica. *25*(4), 127-135.

## ANEXOS

### ANEXO 1

**Figura 21.** Datos del entrenamiento

The screenshot shows the MATLAB training options dialog box. It is divided into three main sections: Algorithms, Progress, and Plots.

**Algorithms**

- Data Division: Random (dividerand)
- Training: Levenberg-Marquardt (trainlm)
- Performance: Mean Squared Error (mse)
- Calculations: MEX

**Progress**

Epoch:	0	<b>0 iterations</b>	1000
Time:		<b>0:00:00</b>	
Performance:	3.50e-05	<b>3.50e-05</b>	0.00
Gradient:	3.20e-09	<b>3.20e-09</b>	1.00e-07
Mu:	0.00100	<b>0.00100</b>	1.00e+10
Validation Checks:	0	<b>0</b>	6

**Plots**

- Performance (plotperform)
- Training State (plottrainstate)
- Regression (plotregression)

Plot Interval:  1 epochs

**Training finished: Reached minimum gradient**

Buttons: Stop Training, Cancel

**Nota:** Pantalla de MATLAB que selecciona los valores randómicos de los primeros entrenamientos de la Red Neuronal Artificial. **Fuente:** Elaboración propia.



